

Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der
datengetriebenen Produktentwicklung

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 353

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Erlangen
FAU University Press
2020

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.

Bitte zitieren als

Küstner, Christof. 2020. *Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 353. Erlangen: FAU University Press.

DOI: 10.25593/978-3-96147-349-6.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-348-9 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-349-6 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-349-6

**Assistenzsystem zur Unterstützung der
datengetriebenen Produktentwicklung**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christof Küstner

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 26.06.2020

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben,

Univ. Bremen

Vorwort

Imagination is more important than knowledge. For knowledge is limited, whereas imagination embraces the entire world, stimulating progress, giving birth to evolution. It is, strictly speaking, a real factor in scientific research.

ALBERT EINSTEIN

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die auf vielfältigste Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack für die Betreuung meines Promotionsvorhabens aussprechen. Sandro, ich habe unsere Zusammenarbeit sehr geschätzt. Dein direktes und ehrliches Feedback hat mir sehr geholfen, mich in den fünf Jahren am Lehrstuhl weiterzuentwickeln. Vor allem Deine Aufforderung, immer eine „Geschichte“ zu erzählen und Begeisterung für sein Thema in den Vorträgen zu zeigen ist etwas, das nun auch in der Industrie sehr große Relevanz hat. Ich empfand dich menschlich wie auch fachlich als einen ausgezeichneten Chef, der eine exzellente Arbeitsatmosphäre geschaffen hat – vielen Dank dafür.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben, Geschäftsführer des BIBA und Leiter des BIBA-Forschungsbereichs Informations- und kommunikationstechnische Anwendungen in der Produktion der Universität Bremen, möchte ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr. Michael Kohlhasse für die Bereitschaft, die Funktion des fachfremden Prüfers zu übernehmen. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte möchte ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bei der Promotionsprüfung meinen Dank aussprechen.

Dank gilt auch der DFG, dem BMBF und der Zeidler Forschungstiftung für die Förderung von Forschungsprojekten, in deren Rahmen viele Grundlagen für diese Arbeit entstanden; hierzu zählen: „Assistenzsystem zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen“ (EUREKA-ALARM), „Simultane Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems“ (SFB/TR 73, TP B1) und „Prognose und Reduzierung der Schallemission von Windenergieanlagen“ (PRE-Wind). Ich bedanke mich bei allen Beteiligten für das

sehr gute Zusammenwirken. Besonders möchte ich Alexander Ribbentrop-Arcade, Felix Wernicke, Christian Schönke, Dr.-Ing.Christian Radisch, Dr. Rolf Bayerbach und Dr. Bernd Hellmich der Fa. Senvion sowie Sonja Goris der Fa. ZF für die professionelle Zusammenarbeit danken.

Den ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des KTmfk danke ich für die gemeinsame Zeit, die hilfreichen Anregungen während der Zeit am Lehrstuhl und die schönen Momente dazwischen, z. B. auf den Klausurtagungen, den Konferenzen und die „unvergesslichen“ Stunden außerhalb des Lehrstuhls. Besonders möchte ich mich für die kollegiale Zusammenarbeit, die entstandene Freundschaft, den wissenschaftlichen Austausch und die Zeit für das Korrekturlesen bei meinem Vorgänger Jedi-Meister Dr.-Ing. Thilo Breitsprecher und meinen beiden Nachfolgern Padawan Christopher Sauer und Padawan Fabian Dworschak bedanken. An die Kollegen aus meiner ehem. Arbeitsgruppe am KTmfk gehen ein persönliches Dankeschön an Tobias Sprügel, Philipp Kestel und Thomas Luft für den fachlichen Austausch und die konstruktiven Kritiken. Für die langen und fachübergreifenden „Kaffeegespräche“ möchte ich mich bei Andreas Meinel, Matthias Müller und David Hochrein bedanken, die mich regelmäßig auf andere Gedanken gebracht haben. Ein besonderen Dank gilt Thomas Niering für die fachlich-technische Unterstützung bei der Umsetzung des Assistenzsystems.

Eine wertvolle Unterstützung waren auch die Studierenden, die ich bei ihren Abschlussarbeiten betreuen durfte. Eure Teilergebnisse trugen zum Erfolg dieser Arbeit bei. Hiermit möchte ich euch meinen herzlichen Dank aussprechen, insbesondere Benedikt Carton, Sebastian Häsner, Christoph Raab, Frank Schmidtner, Philipp Wachsmuth, Bernd Wißerner, Korbinian Liebl, Manuel Roppelt und Michael Jäger.

Weiterer Dank gilt meinen Eltern für ihre Unterstützung und Förderung meines schulischen Vorankommens, sodass ich eine akademische Laufbahn einschlagen konnte. Meinen Schwagern Kenny Faske und Ingo Hecker möchte ich für das Korrekturlesen der Arbeit danken.

Schließlich möchte ich mich an dieser Stelle besonders bei meiner Frau Nicole bedanken. Nicole, Du hast mir bei der Entstehung der Arbeit und während der gesamten Zeit mehr als nur viel Verständnis entgegengebracht, mich in jeder Hinsicht stets motiviert und in stressigen Zeiten den notwendigen Rückhalt gegeben. Hierdurch hast Du wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen ♥.

Nürnberg, Juli 2020

Christof Küstner

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Problembeschreibung: Die Grenzen der Eigenschaftsabsicherung in der Produktentwicklung	2
1.2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit.....	4
2 Stand der Technik und wissenschaftliche Grundlagen	7
2.1 Definitionen und Einordnung zentraler Begriffe	7
2.2 Digitalisierung der Produktentwicklung.....	9
2.2.1 Einfluss der Informations- und Kommunikationstechnologien auf die Konstruktion	12
2.2.2 Erhebung von produktbeschreibenden Daten im Produktlebenszyklus	14
2.2.3 Verwaltung von produktbeschreibenden Daten	20
2.2.4 Formale Repräsentation von produktbeschreibenden Daten.....	23
2.2.5 Zwischenfazit und Trends im Produktdatenmanagement.....	25
2.3 Datengetriebene Produktentwicklung.....	26
2.3.1 Hypothesengetriebene und datengetriebene Analyse ...	27
2.3.2 Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten.....	28
2.3.3 Data-Mining-Methoden zur Mustererkennung.....	34
2.3.4 Überwachte Lernverfahren.....	36
2.3.5 Unüberwachte Lernverfahren	43
2.3.6 Zwischenfazit und Diskussion zur datengetriebenen Produktentwicklung.....	49
2.4 Wissen und Assistenzsysteme in der Produktentwicklung.....	52
2.4.1 Taxonomie des Wissens	53
2.4.2 Wissenstransfer in der Produktentwicklung.....	54

2.4.3	Prinzipielle Architektur wissensbasierter Assistenzsysteme	57
2.4.4	Umsetzung und Einführung von wissensbasierten Assistenzsystemen.....	59
2.4.5	Zwischenfazit	64
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	67
3.1	Fazit zu den wissenschaftlichen Grundlagen	67
3.2	Zielsetzung	68
3.2.1	Forschungsbedarf und -ziel	69
3.2.2	Forschungsfragen	70
3.3	Weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit	71
4	Entwicklung von lärmreduzierten Produkten als Anwendungskontext	73
4.1	Methodische Vorgehensmodelle für die Entwicklung lärmreduzierter Produkte	73
4.2	Windenergieanlagen als Serienprodukt	75
4.2.1	Prinzipieller konstruktiver Aufbau	76
4.2.2	Akustische Produkteigenschaften.....	77
4.2.3	Absicherung der akustischen Produkteigenschaften.....	78
4.3	Anforderungen an einen Lösungsansatz	80
5	Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung	83
5.1	Strategie zur Unterstützung der Produktentwicklung	84
5.2	Produktbeschreibende Daten als Ressource für maschinelle Lernmethoden.....	85
5.2.1	Herkunft der produktbeschreibenden Daten.....	87
5.2.2	Datenmodell für maschinelle Lernmethoden	88
5.2.3	Qualität der produktbeschreibenden Daten.....	91
5.2.4	Strukturierung und Integration der produktbeschreibenden Daten	94
5.3	Wissen zur Unterstützung bei der datengetriebenen Produktentwicklung.....	100
5.3.1	Umgang mit produktbeschreibenden Daten in der Eigenschaftsabsicherung.....	102
5.3.2	Repräsentation von Wissen zur Eigenschaftsabsicherung	103

5.3.3	Akquisition von Prozess- und Methodenwissen zur systematischen Analyse von Daten	107
5.3.4	Bereitstellung von Wissen zur datengetriebenen Produktentwicklung	110
5.4	Gesamtkonzept des wissensbasierten Assistenzsystems	111
5.4.1	Informationstechnische Verknüpfung der einzelnen Konzepte	112
5.4.2	Die vier Hauptkomponenten zur Operationalisierung der Konzepte	113
6	Umsetzung des Konzeptes als Assistenzsystem für die Produktentwicklung	119
6.1	Architektur des Assistenzsystems	120
6.2	Produktdatenmodell zur Verortung von produktbeschreibenden Daten	122
6.3	Die projektbezogenen Wissensbasen und deren Austausch	126
6.4	Umsetzung der Hauptkomponenten des Assistenzsystems	
	ALARM	131
6.4.1	Produktentwicklungsnavigator	132
6.4.2	Importassistent	136
6.4.3	Synthesewerkzeug	137
7	Anwendungsbeispiel: Datengetriebene Konfigurationsanalyse	141
7.1	Vorstellung des Anwendungsbeispiels	141
7.2	Konfigurationsanalyse: Datenanalysealgorithmus zur Identifikation von Herstellerabhängigkeiten und Wechselwirkungen der Komponenten	144
7.2.1	Identifikation der Eingangsdaten	145
7.2.2	Entwurf der Konfigurationsanalyse	147
7.3	Wissen zum Vorgehen bei der Konfigurationsanalyse	154
7.4	Einsatz der Konfigurationsanalyse als Analysewerkzeug	156
7.5	Kontextualisierung der Analyseergebnisse	159
7.6	Diskussion zur Konfigurationsanalyse	163
8	Zusammenfassung und Ausblick	165
9	Summary and Outlook	171
A	Anhang	175
A.1	Erhebung zu den Wissensakquisitionsarten bei der Entwicklung und Pflege von wissensbasierten Assistenzsystemen	175

A.2 Anonymisierter Datensatz zum Anwendungsbeispiel	176
Literaturverzeichnis	183

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A	–	Amplitude
D	m	Rotordurchmesser einer Windenergieanlage
H	m	Nabenhöhe einer Windenergieanlage
H_0	–	Nullhypothese
H_1	–	Alternativhypothese
H_P	–	Matrix der Schalltransferpfade
L_A	dB(A)	A-bewerteter Schalldruckpegel
N	–	Anzahl der Feature-Target-Paare (Zeilen) im Datensatz
R_0	m	Abstand des Schallemissionsmesspunktes von einer Windenergieanlage
$W(E)$	–	Relative Häufigkeit eines Ereignisses E
X	–	Prämisse, linke Seite einer Assoziationsregel
Y	–	Konklusion, rechte Seite einer Assoziationsregel
a	–	Eintrag [0, 0] der Vier-Felder-Tafel
b	–	Eintrag [0, 1] der Vier-Felder-Tafel
c	–	Eintrag [1, 0] der Vier-Felder-Tafel
d	–	Eintrag [1, 1] der Vier-Felder-Tafel
f	Hz	Frequenz
k	–	Anzahl der durchgeführten Signifikanztests
m	–	Anregungspunkt
n	–	Messpunkt zur Schallabstrahlung
p_α	–	Wahrscheinlichkeit für den Fehler 1. Art (α -Fehler) eines Ereignisses
$p_{F\alpha}$	–	Wahrscheinlichkeit nach FISHER
\vec{x}	–	Unabhängige Variablen (Features)
y	–	Abhängige Variable (Target)

Symbol	Einheit	Beschreibung
\hat{y}	–	Berechneter Wert durch ein Metamodell
α	–	Wahrscheinlichkeit für den Fehler 1. Art (α -Fehler)
α_{sig}	–	Signifikanzniveau (maximal zulässige Wahrscheinlichkeit für den Fehler 1. Art)
β	–	Wahrscheinlichkeit für den Fehler 2. Art (β -Fehler)
ϵ	–	Genereller Fehler in den Daten
$\hat{\epsilon}$	–	Score: Maß für die Güte des Metamodells
φ	rad	Phase
$\Omega_{\vec{x}}$	–	Menge aller Features in einem Trainingsdatensatz

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ALARM	Assistenzsystem zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BPMN	Business Process Modeling and Notation
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided Engineering
CASE	Computer-aided Software Engineering
CDO	Chief Digital Officer
CMS	Condition Monitoring System
CoD	Coefficient of Determination, dt. Bestimmtheitsmaß
CoP	Coefficient of Prognosis, dt. Prognosekoeffizient
CPM	Characteristics-Properties Modelling
CRISP-DM	CRoss-Industry Standard Process for Data Mining
DMC	Data Matrix Code
DoE	Design of Experiments
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz

Abkürzung	Beschreibung
eEPK	Erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette
ER	Entity-Relationship-Diagramm
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FK	Foreign key, dt. Fremdschlüssel
FN	False-Negatives
FP	False-Positives
GUI	Graphical User Interface
ICT	Information and Communications Technology
IoT	Internet of Things
IT	Informationstechnologie
JT	Jupiter Tesselation
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KlaIn	Klassen-Instanzen (Klassen-Instanzen-Produktmodell)
KMDL	Knowledge Modeling and Description Language
MAPE	Mean absolute percentage error, dt. relativer Fehler
MES	Manufacturing Execution System
ML	Maschinelles Lernen
MOKA	Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications
NVH	Noise, Vibration und Harshness, dt. Geräusch, Vibration und Rauigkeit
OEM	Original Equipment Manufacturer
PDF	Portable Document Format
PDM	Produktdatenmanagement
PE	Produktentwicklung
PK	Primary key, dt. Primärschlüssel
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
RFID	Radio-frequency identification, dt. Identifikation mittels Sender-Empfänger-Systemen
RMSE	Root-mean-squared error, dt. Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme

Abkürzung	Beschreibung
RSM	Response Surface Methodology
SADT	Structured Analysis and Design Technology
SAP	Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung (ERP-System)
SCM	Supply Chain Management
SECI	Socialization, Externalization, Combination, Internalization
SDK	Software Development Kit
SDM	Simulationsdatenmanagement
SHA	Secure Hash Algorithm
SQL	Structured Query Language
STEP	Standard of the Exchange of Product model data
TDM	Teamdatenmanagement
TN	True-Negatives
TP	True-Positives
UML	Unified Modeling Language
VMDM	Versuchs- und Messdatenmanagement
XML	Extensible Markup Language
XLSX	Dateiformat von Microsoft® Excel

1 Einleitung

Die Digitalisierung stellt neben der Globalisierung heutzutage eine große Herausforderung für Unternehmen dar. Durch die Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung wurde der Begriff „Industrie 4.0“ als Synonym der digitalen Transformation geprägt, um die Zukunft Deutschlands als Produktionsstandort zu sichern [1; 2]. Hierbei wird im Speziellen die Automobil- und Maschinenbaubranche angesprochen, welche sich den neuen Herausforderungen des digitalen Wandels stellen müssen [3]. Eine Studie der BOSTON CONSULTING GROUP aus dem Jahr 2017 zeigt, dass Unternehmen des klassischen Maschinenbaus im internationalen Vergleich zum aktuellen Zeitpunkt gleichermaßen die digitale Transformation vernachlässigen, weshalb ein großer Bedarf zum Handeln besteht [4]. Die Chancen der digitalen Transformation gehen mit zunehmender Notwendigkeit der Mechatronisierung und Automatisierung einher. Die Ingenieure sind daher mit neuen Anforderungen an die technischen Produkte und stetig steigender Produktkomplexität konfrontiert. [5]

Im Hinblick auf das „Predictive Engineering“ nach WARTZACK [6] ist die Strategie und das Ziel der Produktentwicklung die möglichst frühe und virtuelle Absicherung der Produkteigenschaften und des Produktverhaltens [7; 6]. Aufgrund der steigenden Komplexität der Produkte und Diversität der eingesetzten Technologien gestaltet sich der virtuelle Absicherungsprozess für Produktentwickler zunehmend schwieriger. Aus diesem Grund kann ein unerwünschtes Produktverhalten häufig erst nach der Produktentstehung, d. h. als physischer Prototyp oder im Betrieb des Produktes, identifiziert werden [8].

Zum Abgleich der Produkteigenschaften mit den Anforderungen erheben die Ingenieure im Lebenszyklus eines Produktes eine große Menge an produktbeschreibenden Daten. Hierzu zählen zum Beispiel numerische und experimentelle Versuchsdaten. Die Notwendigkeit, die produktbeschreibenden Daten effektiv und effizient zu organisieren, führte zur Entwicklung von Produktdaten- und Produktlebenszyklusmanagement-Systemen (PDM-/PLM-Systeme), welche in der Industrie zum Stand der Technik gehören. Durch PDM-Systeme wird primär die Entwicklung der Produkte unterstützt, indem die produktbeschreibenden Daten sicher verwaltet, revidiert und archiviert werden [7].

Im letzten Dekaden haben Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens ihren Weg in die Produktentwicklung gefunden [9]. Die maschinellen Lernmethoden können durch die systematische Analyse der produktbeschreibenden Daten Zusammenhänge sichtbar machen, die mit klassischen Analyseverfahren nicht erfasst werden können. Die Zusammenhänge und Tendenzen in den Daten bieten den Produktentwicklern tiefere Einblicke in ihr und ein besseres Verständnis von ihrem Produkt. Die Repräsentation und Ablageorganisation von produktbeschreibenden Daten ist allerdings für maschinelle Lernmethoden direkt nicht geeignet, weshalb sie vor der Analyse richtig verknüpft und transformiert werden müssen (siehe Abschnitt 2.2.3). Die Aufbereitung der Daten nimmt i. d. R. ein Data Engineer oder Data-Scientist vor, wobei dieser das notwendige Domänenwissen zur Interpretation der Daten in Rücksprache mit den Produktentwicklern erhält. Dieser Prozess ist sehr zeit- und somit kostenintensiv.

1.1 Problembeschreibung: Die Grenzen der Eigenschaftsabsicherung in der Produktentwicklung

Die stetig ansteigende Produktkomplexität erfordert einen größeren Aufwand in der Absicherung der Produkteigenschaften und des Produktverhaltens. Im Sinne des „Predictive Engineering“ nach WARTZACK [6] soll die Eigenschaftsabsicherung möglichst virtuell und in der frühen Phase „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus erfolgen. Hierfür stehen den Ingenieuren computerunterstützte Methoden und Werkzeuge zur Verfügung [10].

Trotz der vielseitigen Methoden und Werkzeuge können häufig die Einflüsse auf abweichende Produkteigenschaften nicht benannt werden, wodurch die virtuelle Eigenschaftsabsicherung in der Produktentwicklung verhindert oder zumindest erschwert wird. Eine Grenze wird durch die signifikante

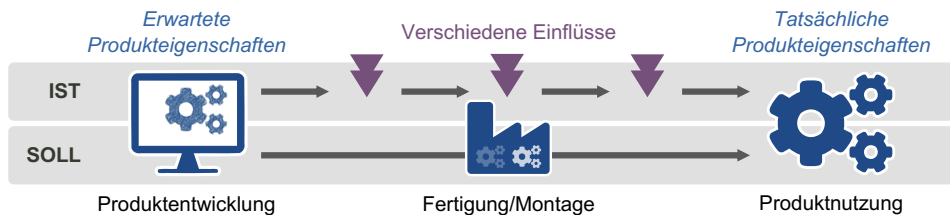


Bild 1: Ist- und Soll-Zustand bei der Absicherung von Produkteigenschaften aus der Sicht der Produktentwicklung.

Diskrepanz zwischen den erwarteten und den tatsächlich ermittelten Eigenschaften am einzelnen Produkt oder am Serienprodukt ersichtlich (siehe Bild 1). Zwei Beispiele hierfür sind das akustische Verhalten von Windenergieanlagen [11] oder die magnetischen Eigenschaften von Rotoren für Elektromotoren [12].

Beim Einsatz von CAE-Werkzeugen zur Absicherung von Produkteigenschaften liegt die häufigste Ursache für die Diskrepanz zwischen numerischem Versuchsergebnis und tatsächlichem Verhalten des Produktes in den variierenden oder unbekanntem Rand- und Rahmenbedingungen. Hierdurch sind Simulationsmodelle unvollständig, was zu fehlerhaften Simulationsergebnissen führt. Darüber hinaus können Zeit- und Kostengründe, mangelnde Fähigkeit der Berechnungsingenieure oder schlicht fehlender Funktionsumfang der Simulationssoftware dazu führen, dass das Simulationsmodell die Realität nicht hinreichend genau abbildet. [13] Eine weitere Schwäche der virtuellen Eigenschaftsabsicherung liegt darin, dass die verwendeten Produktmerkmale (z. B. Geometrie, Werkstoffparameter) in Simulationsmodellen sich an der Nenngrößen der Produkte orientieren (z. B. Nenngeometrie, nominelle Werkstoffparameter) und die Fertigungsabweichungen kaum berücksichtigt werden [14]. Bei numerischen Versuchen können demnach zwar deterministische Aussagen über die Produkteigenschaften virtuell getroffen werden, allerdings wird bei der Betrachtung von komplexeren Produkteigenschaften häufig die Realität nicht abgebildet. Experimentelle Versuche erfordern immer reale Prototypen, die zu hohen Kosten gefertigt und montiert werden müssen. Durch den Einfluss der Fertigungsabweichungen und Messunsicherheiten können die Eigenschaften eines Produktes nur stichprobenartig oder bei mehreren Prototypen statistisch bestimmt werden [15; 16]. Darüber hinaus kann die Gültigkeit der Ergebnisse eines experimentellen Versuchs an einem Prototyp nicht direkt auf die Serienprodukte übertragen werden [17].

Neben der Produktentwicklung und -entstehung hat auch die Lebensphase der Produktnutzung einen Einfluss auf die Produkteigenschaften. Im Folgenden sind drei Beispiele aufgeführt, die nur mit großem Aufwand bei der virtuellen Eigenschaftsabsicherung berücksichtigt werden können:

- Verschleiß der Produkte über die Lebensdauer. [P9; 18]
- Unterschiedliche Produktnutzung durch verschiedene Menschen. [19; S8]
- Variierende Rahmenbedingungen im Betrieb der Produkte, bspw. durch Wetter oder Verschmutzung der Umgebung. [20]

Die Diskrepanz zwischen den erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften des Produktes führt demzufolge zu einer Unsicherheit bei der Absicherung der Eigenschaften während der Produktentwicklung. Der Unsicherheitsfaktor wird durch die zunehmende Digitalisierung und die damit inbegriffene Steigerung der Komplexität der Produkte nochmal erhöht. Die vorliegende Arbeit leistet deshalb einen Beitrag im Spannungsfeld der Eigenschaftsabsicherung komplexer Produkte durch die intensive Wiederverwendung von produktbeschreibenden Daten.

1.2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit

Aufgrund der voranschreitenden Digitalisierung werden im Produktlebenszyklus sehr viele produktbeschreibende Daten erhoben, welche die tatsächlichen Eigenschaften von Serienprodukten offenbaren. Diese Datenbasis als Beurteilungsgrundlage bleibt bei der Eigenschaftsabsicherung häufig aufgrund der Datenmenge, der Diversität und der fehlenden Struktur der produktbeschreibenden Daten unberücksichtigt. Die Begegnung dieser Herausforderungen ist durch die Produktentwickler ohne informationstechnische Unterstützung nicht zu bewerkstelligen.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit ist daher die Konzeption und Umsetzung eines Assistenzsystems zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung. Der Begriff *datengetrieben* bedeutet die gezielte und systematische Analyse von Daten mittels maschineller Lernmethoden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Nutzung von produktbeschreibenden Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen zu intensivieren, um die Lücke zwischen erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften von Serienprodukten zu schließen.

Hierzu sollen zu Beginn die methodischen Grundlagen für ein wissensbasiertes Assistenzsystem erarbeitet werden, welches die Produktentwickler bei der systematischen Analyse von Daten im Kontext der Produktentwicklung unterstützt. Das methodische Konzept umfasst zum einen die Strukturierung von produktbeschreibenden Daten als Vorbereitung für die Datenanalyse, sowie die Integration von Expertenwissen über den Prozess der Eigenschaftsabsicherung und der systematischen Datenanalyse. Das methodische Konzept soll anschließend informationstechnisch umgesetzt werden, um anhand eines Anwendungsbeispiels validiert zu werden. Die Ergebnisse und Erkenntnisse sind kritisch zu diskutieren. Abschließend soll die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben werden. Ein Überblick zum inhaltlichen Aufbau dieser Arbeit ist in Bild 2 dargestellt.

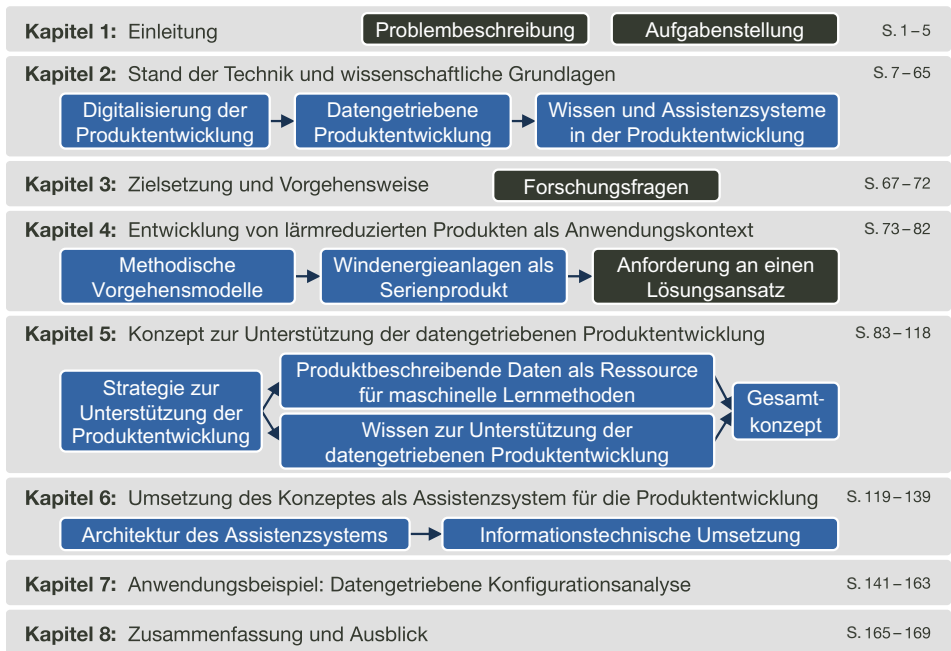


Bild 2: Ein Überblick zum inhaltlichen Aufbau dieser Arbeit.

2 Stand der Technik und wissenschaftliche Grundlagen

Innerhalb dieses Kapitels werden zunächst verschiedene Begriffe vorgestellt und eingeordnet, deren Definition für diese Arbeit von Beginn an wichtig sind. Anschließend wird auf die zunehmende Digitalisierung und die daraus resultierende Computerunterstützung in der Produktentwicklung eingegangen. Die datengetriebene Produktentwicklung im anschließenden Abschnitt zeigt, wie produktbeschreibende Daten systematisch analysiert und dadurch Wissen erhoben werden kann. Das Kapitel schließt mit den wissenschaftlichen Grundlagen zu wissensbasierten Assistenzsystemen für die Produktentwicklung.

2.1 Definitionen und Einordnung zentraler Begriffe

In Kapitel 2 werden zunächst verschiedene Begriffe im Kontext der Produktentwicklung vorgestellt und eingeordnet. Das Thema dieser Arbeit adressiert verschiedene Fachdisziplinen, in welchen einige Begriffe unterschiedlich verwendet werden. In diesem Abschnitt sind deshalb ausgewählte Definitionen vorweggenommen. Ziel dieses Abschnitts ist nicht die fachliche Definition der Begriffe, sondern die Einordnung und die Klarstellung des Verwendungskontextes der Begriffe in dieser Arbeit.

In der Produktentwicklung stehen **Produkt und Produktentwickler** im direkten Wechselspiel. Der Produktentwickler ist für die Entwicklung von Produkten verantwortlich. Unter Entwicklung versteht der Autor das ingenieure Erarbeiten von Lösungen für Entwicklungsaufgaben. Das Produkt repräsentiert das Ergebnis des Produktentwicklungs- und Produktherstellungsprozesses. Heutzutage werden Produkte aufgrund ihrer Komplexität im interdisziplinären Team entwickelt, weshalb stets ein Entwicklungsteam gemeint ist, sofern von der Produktentwicklung als Organisationseinheit gesprochen wird.

Der **Experte** wird als Rolle in einem Unternehmen oder in einem Team verstanden. Er fungiert als Wissensträger, da er das Wissen einer bestimmten Domäne bündelt. Die Domänen in dieser Arbeit umfassen insbesondere die „Produktentwicklung“ und das „maschinelle Lernen“. Interdisziplinäre Entwicklungsteams bestehen häufig aus verschiedenen Experten verschiedener Domänen. In den Abschnitten in welchen das Expertenwissen thematisiert wird, wird zur Differenzierung zwischen den beiden Rollen die Experten in

der Domäne der Produktentwicklung „PE-Experten“ und die Experten in der Domäne des maschinellen Lernens „ML-Experten“ genannt.

Die **digitale Transformation** beschreibt einen Prozess zur Veränderung des Geschäftsmodells. Hierbei werden die „digitalen“ Technologien aus dem Bereich der Informatik und Datenverarbeitung stärker ins Unternehmen integriert. Häufig wird in diesem Kontext von der Digitalisierung der Unternehmen gesprochen, wobei zwischen „Digitalisierung“ und „digitale Transformation“ ein Unterschied besteht. Der Unterschied wird in Abschnitt 2.2 genauer erörtert. Mit der digitalen Transformation werden verschiedene Schlagworte und Technologien verbunden, z. B. Internet der Dinge (IoT¹), Industrie 4.0, Digitaler Zwilling, Big Data, Smart Data, Maschinelles Lernen, Enterprise Social Networking, Enterprise Cloud.

Daten und Dateien sind ein essentieller Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung. Die Kommunikation zwischen den Produktentwicklern sowie die Dokumentation von Ergebnissen und Erkenntnissen erfolgt heutzutage weitestgehend digital. Dateien (z. B. Office-Dokumente, CAD-Daten) werden in dieser Arbeit als digitale Objekte betrachtet, welche als Träger der entwicklungsrelevanten, produktbezogenen oder produktbeschreibenden Daten fungieren. Die Daten in den Dateien stellen die Basis der datengetriebenen Produktentwicklung dar.

Die **datengetriebene Produktentwicklung** erfordert die Integration der Ansätze und Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens in die Produktentwicklung. Hierdurch ermöglicht sie eine intensivere Nutzung von Daten, welche während des Lebenszyklus von Produkten erhoben werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Wiederverwendung von produktbeschreibenden Daten vorangegangener Produktgenerationen, die einen neuen, datenbasierten Blickwinkel auf das Produkt eröffnen (siehe Abschnitt 2.3.1).

Wissen wird als vernetzte Informationen definiert, wobei die Vernetzung i. d. R. durch den Menschen erfolgt. Informationen sind Daten mit bekannter Semantik, d. h. mit bekanntem Kontext. Diese Definition folgt der Taxonomie des Wissens in Anlehnung an die Wissenstreppe nach NORTH [21]. Generell befähigt Wissen die Mitarbeiter in einem Unternehmen zum operativem Handeln. Es bedarf deshalb besonderen Schutz und muss für den Erhalt im Unternehmen zwischen den Mitarbeitern kontinuierlich ausgetauscht werden.

¹ engl. Internet of Things

Assistenzsysteme für die Produktentwicklung stellen informationstechnische Werkzeuge zur Unterstützung der Produktentwickler dar. Sie umfassen einerseits wissensbasierte Systeme, wie bspw. Expertensysteme, andererseits informationstechnische Werkzeuge, welche die Produktentwickler von wiederkehrenden Routinetätigkeiten entlasten. Sie tragen zur Standardisierung und Automatisierung von Produktentwicklungsprozessen bei. Durch wissensbasierte Assistenzsysteme entsteht eine Basis zur Konservierung von Wissen sowie zum Transfer von Wissen zwischen den Experten und den Produktentwicklern.

2.2 Digitalisierung der Produktentwicklung

In den letzten Jahren haben Unternehmen in fast allen Branchen die Initiative ergriffen, um neue digitale Technologien zu erforschen und ihre Vorteile im industriellen Kontext zu nutzen [24]. Dieser Veränderungsprozess wird „digitale Transformation“ genannt (siehe Bild 3). Sie führt i. d. R. zum Wandel des Kerngeschäfts eines Unternehmens, d. h. es werden Produkte, Prozesse, Organisationsstrukturen und Managementkonzepte verändert oder neu entwickelt. [24] Die Veränderung erfordert von den Unternehmen eine höhere Kompetenz für Informationstechnologien (IT), welche mit neuen Aufgabenfeldern für die Geschäftsführung einhergeht. Dies zeigt sich national und international im zunehmenden Trend der Unternehmen, einen Vorstand zur Koordinierung der Digitalisierung (CDO²) zu etablieren. Die Aufgabe der CDO sind die strategische Planung und Umsetzung der Digitalisierung und der digitalen Transformation. [25] In Anlehnung an DAPP et al. [26] kann die digitale Veränderung der Unternehmen als abgeschlossen betrachtet werden, wenn alle Bereiche des Unternehmens digitalisiert sind

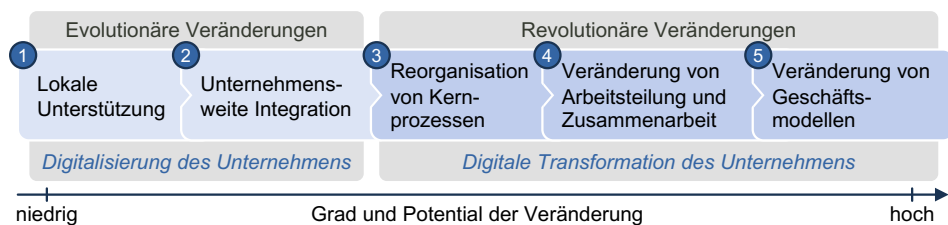


Bild 3: Die fünf Wirkungsstufen der Veränderung durch digitale Technologien im Unternehmen nach [22; 23].

² Der CDO ist eine C-Level-Führungsposition und steht für Chief Digital Officer.

und hierdurch ein maximaler Grad der Vernetzung verschiedener Organe innerhalb und außerhalb des Unternehmens erreicht wurde.

Die ersten beiden Stufen in Bild 3 stellen evolutionäre Veränderungen dar und werden der „Digitalisierung“ zugeordnet. Die letzten drei Stufen führen zu revolutionären Veränderungen, welche als „digitale Transformation“ bezeichnet werden. [27; 23] Zur Verdeutlichung des Unterschieds werden im Folgenden die einzelnen Stufen am Beispiel der Produktentwicklung und Maschinenbaubranche erläutert: Zur ersten Stufe gehört die Einführung von Software zur direkten Unterstützung der Produktentwickler, z. B. CAD-Systeme in der Konstruktionsabteilung. Die zweite Stufe beinhaltet die Vernetzung der Produktentwicklung auf Unternehmensebene, z. B. durch PDM-/PLM-Systeme zur Verwaltung von produktbeschreibenden Daten (siehe Abschnitt 2.2.3). Die ersten beiden Stufen umfassen die Verbesserung bestehender Prozesse durch die Etablierung und den intensiveren Einsatz von IT im Unternehmen. Das Geschäftsmodell selbst wird nicht verändert.

Die dritte Stufe umfasst die Veränderung von Kernprozessen durch die Computerunterstützung, um die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu verbessern. Hier ist bspw. die stetig zunehmende Automatisierung der Produktentstehung in Deutschland durch den Einsatz von IT zu nennen [28]. In der vierten Stufe geht es um die engere Kopplung der Lieferanten oder Kunden eines Unternehmens. Als Beispiel können hier Lieferkettenmanagement-Systeme (SCM-Systeme) zur Unterstützung der Verwaltung von Lieferketten angeführt werden. Die letzte Stufe beinhaltet die Entwicklung völlig neuer Produkte oder Dienstleistungen, die das Geschäftsmodell des Unternehmens ändern. Ein mögliches Szenario stellt die intensivere Nutzung der Sensordaten bei der Produktnutzung dar. Sensoren werden heutzutage verstärkt zur Zustandsüberwachung der Produkte eingesetzt, wodurch die Menge der Sensordaten zunehmend steigt. Hierdurch können neue Dienstleistungen zur Produktbereitstellung oder intelligenten Wartung von Produkten angeboten werden, die sukzessive das ursprüngliche Geschäftsmodell ablösen. [22; 23] Als Beispiel sind die Dienstleistung zur Wartung eines Produktes nach dem Verkauf (vgl. After-Sale-Services in [P9]) oder die Bereitstellung eines Produktnutzens zu nennen, welches mit dem Mieten eines Produktes vergleichbar ist (z. B. die Bereitstellung von Betriebsstunden einer Flugzeugturbine [29]).

Zur Verdeutlichung der Chancen und Risiken der digitalen Transformation dient das Beispiel der Musikbranche, da dort die digitale Transformation bereits weit vorangeschritten ist: Die traditionelle Musikindustrie hat

zwar aktiv an der Digitalisierung teilgenommen, allerdings die digitale Transformation verweigert. Die CD als digitales Speichermedium löste die Schallplatte und die Musikkassette als analoges Speichermedium Mitte der 1990er Jahren ab und führte somit zur Digitalisierung der Musikindustrie. Das Kerngeschäft lag bis dahin im Verkauf der Speichermedien. Durch die Entwicklung des MP3-Formats und des Breitbandinternets eröffneten sich neue Möglichkeiten zum Musikvertrieb. Die traditionelle Musikindustrie ignorierte die neuen Technologien trotz der großen Nachfrage auf dem Markt, da ein Umsatzrückgang durch unkontrolliertes Kopieren der digitalen Musik befürchtet wurde. Andere Unternehmen, wie bspw. Amazon oder Spotify, ergriffen die Chance und etablierten Musikstreamingdienste. Die Kunden bezahlen heutzutage nicht für den Erwerb und Besitz der Musik, sondern für die Bereitstellung dieser Dienstleistung. Die traditionelle Musikindustrie hat bei dieser Veränderung seine Marktdominanz verloren. [30; 31] Anhand dieses Beispiels wird ersichtlich, wie die digitale Transformation das Geschäftsmodell vom Vertrieb eines Produktes hin zum Bereitstellen einer Dienstleistung verändern kann. Ebenso werden die Folgen deutlich, wenn die Unternehmen die digitale Transformation versäumen.

Die zeitgenössischen Unternehmen der Maschinenbaubranche nehmen den internationalen Druck wahr und haben bereits Schritte zur Digitalisierung eingeleitet. Als positives Beispiel dient hier die Automobilindustrie, die in den vergangenen Jahren Monatsabonnements eingeführt hat, z. B. „Mercedes me Flexperience“, „Access by BMW“, „Porsche Passport“, „Book by Cadillac“ oder „Care by Volvo“. Hierdurch bezahlen die Kunden für die Mobilität und können flexibel zwischen ausgewählten Fahrzeugmodellen wechseln. [32] Allerdings stehen laut BLOCHING et al. [28] die meisten Unternehmen erst am Anfang der digitalen Transformation. In diesem Abschnitt wird erörtert, wie die Digitalisierung und die digitale Transformation die virtuelle Produktentwicklung beeinflusst haben. Hierfür wird im nächsten Abschnitt auf die geschichtliche Entwicklung der virtuellen Produktentwicklung eingegangen. Die Erhebung, Verwaltung und Wiederverwendung von digitalen Daten stellt einen von „vier Hebeln zur Digitalisierung“ dar [28]. Deshalb wird anschließend auf die Erhebung von produktbeschreibenden Daten in den Produktlebensphasen eingegangen. Der Fokus der letzten beiden Abschnitte liegt auf der Verwaltung und Repräsentation von produktbeschreibenden Daten.

2.2.1 Einfluss der Informations- und Kommunikationstechnologien auf die Konstruktion

Die Konstruktion wurde schon immer von vielen Innovationen und Trends geprägt. In Bild 4 sind die Evolutionsphasen der Konstruktion zur virtuellen Produktentwicklung nach SPUR & KRAUSE [33] aufgetragen. Darunter sind die sieben Innovationswellen der letzten Jahrzehnte nach HARGROVES & SMITH [34] zeitlich den Evolutionsphasen angegliedert.

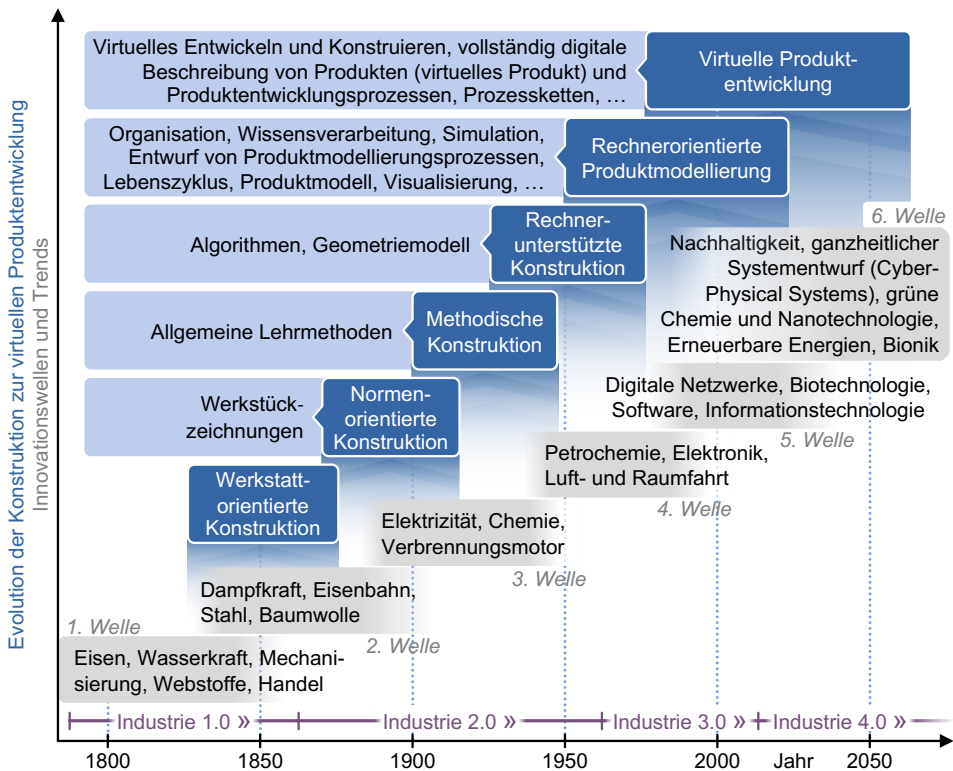


Bild 4: Evolutionsphasen der Konstruktion hin zur virtuellen Produktentwicklung durch den Einfluss von Innovationen und Trends nach [34; 33].

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts dominieren vor allem der Einfluss der Schwerindustrie und die kontinuierliche Mechanisierung der Produktentstehung (erste industrielle Revolution). Die Konstruktion fokussierte sich auf die Standardisierung der Maschinenelemente und die methodische Beschreibung des Konstruktionsprozesses. Resultierend aus den Arbeiten der Mathematiker CHARLES BABBAGE (1791-1871), JOHN VON NEUMANN (1903-1957) und

ALAN TURING (1912–1954) sowie des Bauingenieurs KONRAD ZUSE (1910–1995) kamen die ersten frei programmierbaren Computer in den 1940er Jahren auf [35].

Mit dieser Erfindung und der voranschreitenden Entwicklung der Elektronik findet im Sektor der Produktentstehung die dritte industrielle Revolution statt. Zu dieser Zeit, in den 1960er Jahren, fanden erste Bemühungen statt, die damals neue Informationstechnologie (IT) zur Unterstützung der Konstrukteure am Reißbrett bei der Anfertigung von technischen Zeichnungen einzusetzen. In diesem Kontext ist insbesondere *Sketchpad* zu nennen, welches das erste IT-Werkzeug zur virtuellen Beschreibung der Bauteilgeometrie darstellte [36; 37]. SUTHERLAND [36] wird deshalb als Vater des computerunterstützten Konstruierens (CAD) bezeichnet. 20 Jahre später, in den 1980er Jahren, hat sich die CAD-Technologie als Werkzeug für die Konstruktion im industriellen Kontext flächendeckend etabliert [10].

Die virtuelle Beschreibung der Produkte eröffnete neue Möglichkeiten zur computergestützten Analyse der virtuellen Entwürfe. Der Nutzen durch wissensbasierte Assistenzsysteme (siehe Abschnitt 2.4) oder die Betrachtung des Produktes in seinem Lebenszyklus (siehe Abschnitt 2.2.2) sind zwei Beispiele, welche die Bemühungen zur ganzheitlichen, virtuellen Beschreibung der Produkte weiter förderten. Die gestiegene Komplexität der Produktmodellierung wertete das Berufsbild des Konstrukteurs hin zum Produktentwickler auf. Die voranschreitende Digitalisierung in der Produktentwicklung sowie die kontinuierliche Weiterentwicklung der IT-Technologien führte dazu, dass sich seit Anfang der 1980er Jahren der Computer als Hauptarbeitsmedium des Produktentwicklers durchgesetzt hat. Der fortwährende Computereinsatz in der Produktentwicklung hatte zur Folge, dass sehr viele produktbeschreibende Daten erhoben wurden [37]. Im Kontext der Produktentwicklung sind das vor allem Geometriedaten (CAD-Daten), Toleranzangaben, Stücklisten, die Dokumentation zu den Anforderungen und zur Auslegung, Simulations- und Messdaten.

Für die interdisziplinäre Zusammenarbeit, den kontrollierten Austausch sowie die Archivierung der produktbeschreibenden Daten kamen Mitte der 1990er Jahre PDM-/PLM-Systeme stärker zum Einsatz (siehe Abschnitt 2.2.3) [10]. Etwa zeitgleich wurde das Internet und darauf aufbauende Dienste, wie z. B. das World Wide Web oder die E-Mail, stetig populärer [38]. Hierdurch wurde die Art der Zusammenarbeit von und die Kommunikation zwischen Produktentwicklern nachhaltig geprägt. Diese und andere Schlüsseltechnologien und Innovationen aus den Bereichen der Informations- und

Kommunikationstechnologien (ICT) und dem Maschinenbau führten zur kontinuierlichen Virtualisierung der Produktentwicklung.

Die Ingenieurwissenschaften sind heute im Bereich der virtuellen Produktentwicklung zu einer Informationswissenschaft geworden. Die Forschung im Kontext der computerunterstützten Produktentwicklung fokussiert generell auf die Etablierung und Nutzbarmachung der Potentiale der ICT-Technologien. Hierdurch wird der Grad der Digitalisierung kontinuierlich erhöht. Eine Nebenerscheinung ist die intensivere Erhebung von Daten in allen Lebensphasen eines Produktes. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Erhebung von produktbeschreibenden Daten in der Produktentwicklung näher eingegangen.

2.2.2 Erhebung von produktbeschreibenden Daten im Produktlebenszyklus

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Veränderung der Konstruktion hin zur virtuellen Produktentwicklung dargestellt. Die Virtualisierung hat einen intensiveren Einsatz von IT-Werkzeugen zur Folge. Im Kontext der Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit sind die Erhebung von produktbeschreibenden Daten durch IT-Werkzeuge im Lebenszyklus eines Produktes von zentraler Bedeutung. Deshalb wird in diesem Abschnitt zuerst auf den Lebenszyklus und den Entwicklungsprozess von Produkten eingegangen sowie anschließend die Erhebung von produktbeschreibenden Daten durch den Einsatz von IT-Werkzeugen erörtert.

Es gibt verschiedene methodische Beschreibungen zur Entwicklung und zum Lebenszyklus von Produkten. Die weltweit bekannteste befindet sich in der Norm DIN EN ISO 9001:2015-11 [39]. Die ISO-Norm wurde von der Qualitätssicherung der produzierenden Industrie hervorgebracht und weltweit etabliert. Sie benennt allerdings keine konkreten Einzelschritte oder Phasen als Orientierung für die Produktentwickler. Vielmehr definiert sie prozessorientierte Anforderungen und Steuermaßnahmen zum Entwerfen, zur Realisierung und zur Pflege eines Entwicklungsprozesses von Produkten und Dienstleistungen im Unternehmen. [39] Die Ingenieurwissenschaften haben detaillierte Beschreibungen des Produktentwicklungsprozesses hervorgebracht, wobei im Speziellen die im deutschsprachigen Raum entwickelte Richtlinie VDI 2221:1993-05 [5] international bekannt und allgemein anerkannt ist [40]. Die VDI-Richtlinie beschreibt den Produktlebenszyklus und insbesondere ein methodisches Vorgehensmodell für die Entwicklung und Konstruktion von technischen Produkten ausreichend detailliert, weshalb

diese als Basis für den weiteren Verlauf dieser Arbeit gewählt wurde. Neben der Richtlinie VDI 2221:1993-05 [5] gibt es eine Vielzahl anderer Beschreibungen von Produktentwicklungsprozessen, allerdings ist die Intention dieses Abschnitts weniger einen Überblick zu verschiedenen Entwicklungsprozessen zu geben, sondern vielmehr die Erhebung von produktbeschreibenden Daten im Kontext des Produktlebenszyklus zu diskutieren. Aus diesem Grund wird zum Themenfeld „Methodische Entwicklung von Produkten“ auf die Grundlagenliteratur verwiesen, z. B. KESSELRING [41], SPUR & KRAUSE [33], LINDEMANN [42] oder FELDHUSEN & GROTE [7].

2.2.2.1 Lebensphasen von Produkten

Nach der Richtlinie VDI 2221:1993-05 [5] durchlaufen Produkte sechs Lebensphasen. Der Lebenszyklus startet bei der Produktplanung und beginnt nach der letzten Phase, dem Recycling der Produkte von Neuem (siehe Bild 5). Es wird vom Produktlebenszyklus gesprochen, da in der letzten Lebensphase Bestandteile der Produkte in die dritte und fünfte Lebensphase zurückfließen (siehe ausgehende Pfeile der letzten Lebensphase in Bild 5). Der letzten

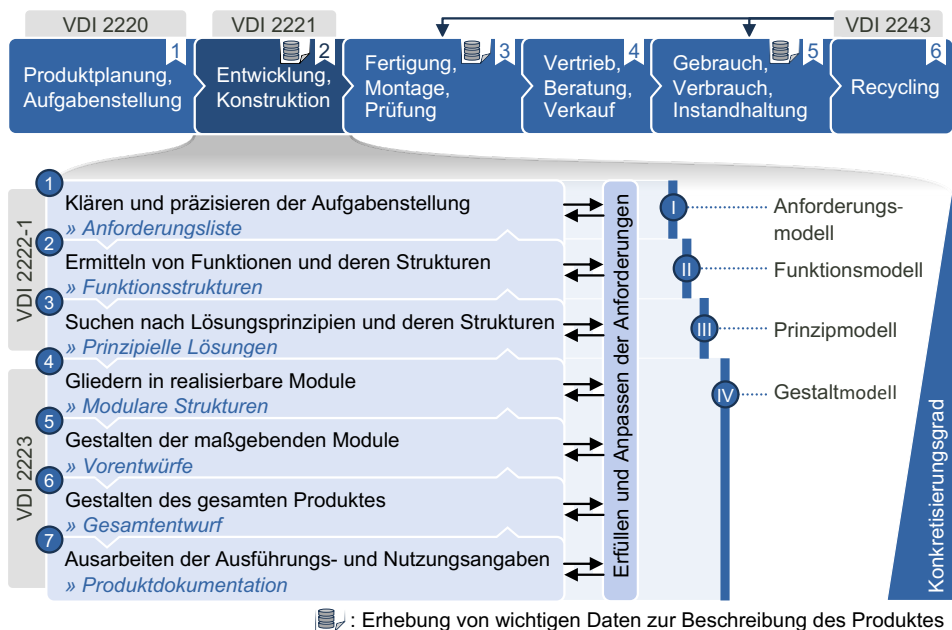


Bild 5: Die sechs Lebensphasen eines Produktes (oben), die methodische Vorgehensbeschreibung des Produktentwicklungsprozesses in sieben Arbeitsabschnitte mit ihren Arbeitsergebnissen (links) nach [5] und der „Modellraum des Konstruierens“ nach [43].

Lebensphase, der Recyclingphase, ist eine eigene VDI-Richtlinie gewidmet, da der größte Einfluss auf die Recyclingfähigkeit der Produkte in den frühen Lebensphasen genommen werden kann. Das Augenmerk der Richtlinie VDI 2243:2002-07 [44] liegt auf der Sensibilisierung der Produktentwickler für das Thema „Recycling“. Übergeordnetes Ziel der recyclingorientierten Produktentwicklung ist die Wiederverwendung möglichst vieler Bauteile oder Baugruppen und die Weiterverwertung möglichst vieler Werkstoffe nach der letzten Lebensphase. [44] Neben der letzten Lebensphase kommt auch der ersten Lebensphase eine größere Bedeutung zu. Die Produktplanung und die Definition der Aufgabenstellung ist aus Sicht der strategischen Ausrichtung eines Unternehmens wichtig, weshalb für diese Lebensphase ebenso eine separate VDI-Richtlinie zur Verfügung steht [45].

In der zweiten Lebensphase findet die Konstruktion und Entwicklung der Produkte statt. Die Richtlinie VDI 2221:1993-05 [5] thematisiert hierbei die generelle Methodik zur Produktentwicklung in sieben Arbeitsabschnitten, wobei die ersten drei Abschnitte durch die Richtlinie VDI 2222-1:1997-06 [46] und die letzten vier Abschnitte durch die Richtlinie VDI 2223:2004-01 [47] ergänzt werden. Der Prozess beginnt mit einer Entwicklungsaufgabe und endet mit der Übergabe der Produktdokumentation an die Fertigung. Der Entwicklungsprozess ist als iterativer Vorgang zu verstehen, worin zwischen den Arbeitsabschnitten hin- und hergewechselt werden kann. Jeder der sieben Arbeitsabschnitte bringt bestimmte Arbeitsergebnisse hervor, welche den Entwicklungsstand und Konkretisierungsgrad des Produktes dokumentieren (siehe Bild 5). [5; 42]

2.2.2.2 Produktmodelle zur Beschreibung der Arbeitsergebnisse

Die Digitalisierung der Unternehmen und die damit einhergehenden Virtualisierung der Produktentwicklung erfordert die Dokumentation der Arbeitsergebnisse in computerverarbeitbaren Repräsentationsformen [37]. Deshalb wird im Kontext der virtuellen Produktentwicklung der Entwicklungsstand gemäß des Konkretisierungsgrades als produktbeschreibendes Modell in computerverarbeitbarer Form repräsentiert (siehe Abschnitt 2.2.4). Diese Modelle werden Produktmodelle genannt. [42; 5] Die Richtlinie VDI 2249:2003-09 [48] definiert das Produktmodell als „ein Modell, das alle relevanten Informationen über ein Produkt in hinreichender Vollständigkeit enthält“. Die Arbeiten von ROTH [49] und RUDE [43] zeigen, dass sich die Arbeitsergebnisse der sieben Arbeitsabschnitte in vier Produktmodelle abbilden lassen (siehe Bild 5). Jedes der vier Produktmodelle stellt

einen anderen Konkretisierungsgrad des Produktes dar. Durch die Tätigkeit des Produktentwicklers werden produktbeschreibende Daten erhoben und durch das Produktmodell erfasst. Der Konkretisierungsgrad der Produktmodelle wird im Verlauf des Entwicklungsprozesses somit kontinuierlich erhöht. [48]

2.2.2.3 Autorensysteme im systematischen Problemlösungszyklus

Jeder Arbeitsabschnitt im Produktentwicklungsprozess entspricht einem iterativen Problemlösungszyklus, worin verschiedene Lösungsalternativen erzeugt, analysiert und beurteilt werden, bis eine Lösungsalternative mit den Anforderungen konform ist [5]. Im systematischen Problemlösungszyklus wird zu Beginn die Aufgabenstellung analysiert und eine Problemstellung formuliert. Im Kontext des „Characteristics-Properties Modelling³“-Ansatzes (CPM-Ansatz) nach WEBER [50] legen die Produktentwickler das virtuelle Modell des Produktes durch die Vorgabe von Merkmalen fest (Systemsynthese). Im Anschluss werden die Eigenschaften des Produktes ermittelt (Systemanalyse), um diese mit den Anforderungen abzugleichen (Beurteilung und Entscheidung). In der virtuellen Produktentwicklung gibt es eine Vielzahl von IT-Werkzeugen, um die Produktentwickler im Problemlösungszyklus zu unterstützen. Diese IT-Werkzeuge werden Autorensysteme⁴ genannt [52; 8].

In Anlehnung an LOSSACK [37] sind in Bild 6 horizontal die Einzelschritte des systematischen Problemlösungszyklus und vertikal die vier Produktmodelle nach RUDE [43] als Matrix aufgetragen. Diese vier Produktmodelle formalisieren alle Arbeitsergebnisse der sieben Arbeitsschritte nach VDI 2221:1993-05 [5] der zweiten Lebensphase „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus (siehe Bild 5). In der Matrix sind die Einträge mit einer hohen Verfügbarkeit von Autorensystemen hervorgehoben. Die größte Unterstützung durch IT-Werkzeuge können die Produktentwickler in der Systemsynthese und -analyse erwarten. Die hohe Verfügbarkeit von Autorensystemen in Bild 6 ist ein direkter Indikator für die Verfügbarkeit von produktbeschreibenden Daten, welche im Kontext der datengetriebenen Produktentwicklung von Relevanz sind. Im Folgenden werden Beispiele zu wichtigen Schnittflächen in der Matrix genannt.

³ dt. Merkmale-Eigenschaften Modellierung.

⁴ Autorensysteme werden in der Literatur auch Erzeugersysteme und im Kontext dieser Arbeit IT-Werkzeuge zur Unterstützung der Produktentwicklung genannt. [51]

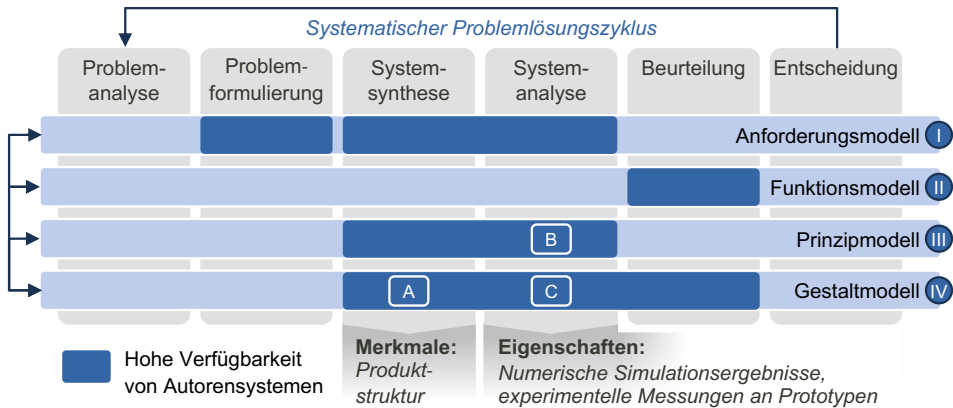


Bild 6: IT-Werkzeuge zur Unterstützung der Produktentwickler und Erhebung von produktbeschreibenden Daten im systematischen Problemlösungszyklus nach [37; 5; 52]. Eine hohe Verfügbarkeit von Autorensystemen impliziert eine hohe Verfügbarkeit von produktbeschreibenden Daten.

Der Einsatz von Autorensystemen in der Systemsynthese bringt in der zweiten Lebensphase „Entwicklung, Konstruktion“ nach der Fertigstellung des Gestaltmodells vor allem Daten zur Beschreibung der Produktmerkmale hervor. In der Schnittfläche **A** „System-synthese-Gestaltmodell“ werden CAD-Systeme eingesetzt, um die Produktstruktur (CAD-Geometrie) zu definiert. In der Systemanalyse zur Eigenschaftsabsicherung werden in der virtuellen Produktentwicklung Systemsimulationen (Schnittfläche **B** „Systemanalyse-Prinzipmodell“) und Finite-Elemente-Simulationen (Schnittfläche **C** „Systemanalyse-Gestaltmodell“) durchgeführt. Die IT-Werkzeuge für die virtuelle Systemanalyse werden generell als CAE-Systeme⁵ bezeichnet. Zur Absicherung der Produkteigenschaften greifen Produktentwickler auf experimentelle Versuche mit Prototypen zurück [17]. Darüber hinaus ist dieser Schritt notwendig, um die berechneten Eigenschaften bzw. das vorhergesagte Produktverhalten der numerischen Versuchsergebnisse zu validieren. Der Einsatz von digitalen Messsystemen resultiert ebenso in der Erhebung von sehr vielen produktbeschreibenden Daten.

In der dritten Lebensphase „Fertigung, Montage, Prüfung“ werden durch die intensive Erprobung von Prototypen, die Vorbereitungen zur Serienproduktion oder zur Qualitätssicherung im Fertigungsprozess ebenfalls produktbeschreibende Daten erhoben [5; 53]. Die Erhebung erfolgt zum

⁵ CAE steht für Computer-aided Engineering, dt. Simulation und computerunterstützte Berechnung.

einen, um die Produkteigenschaften kontinuierlich abzusichern, sodass die Anforderungen an das Produkt und die Qualität kontinuierlich evaluiert werden können. Zum anderen müssen produzierende Unternehmen eine Rückverfolgbarkeit sicherstellen, um bei Rückrufen hinsichtlich der Produkthaftung PRODHAF TG:1989-12 [54] die Historie zur Fertigung eines Produktes lückenlos nachweisen können. Unternehmen etablieren deshalb Produktionsleitsysteme⁶, die u. a. alle relevanten Daten im Fertigungsprozess zu einem Produkt erfassen. Zur Rückführung von Daten über die Qualitätssicherung in die Produktentwicklung entwickeln KRAUSE et al. [55] ein integriertes Qualitätsinformationsmodell.

Eine weitere Lebensphase, in der wichtige produktbeschreibende Daten erfasst werden, ist die fünfte Lebensphase „Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung“. Hier werden insbesondere Daten bei der Maschinenüberwachung oder zur zustandsabhängigen Wartung erhoben [56; 57; P9]. Bei diesen sensorischen Aufzeichnungen während dem Betrieb stellt das Produkt selbst die Datenquelle dar. Hierzu entwickeln HRIBERNIK et al. [58] den „Produktavatar“, mit welchem alle produktbeschreibenden Daten über eindeutige Identifikatoren einer eindeutigen Produktinstanz zugeordnet werden können (z. B. durch Barcodes, DMC oder RFID-Marker am Produkt). Anschließend ermöglicht der Produktavatar die kontextbezogene Bereitstellung der produktbeschreibenden Daten für verschiedene Interessensgruppen. Hierauf aufbauend entwickelten WUEST et al. [59] einen Ansatz, bei welchem die Produktavatare über soziale Netzwerke mit den Produktnutzern interagieren [59; 60]. Es gibt darüber hinaus Bestrebungen, die Rückmeldung und die Kommunikation der Produktnutzer über das Produkt in sozialen Netzwerken oder Foren als Datenquelle für die fünfte Lebensphase „Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung“ zu berücksichtigen [61; 62].

2.2.2.4 Zwischenfazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass alle Lebensphasen kontinuierlich von IT-Werkzeugen durchdrungen werden, wodurch die Menge der erhobenen produktbeschreibenden Daten in allen Lebensphasen eines Produktes stetig erhöht wird. In der zweiten „Entwicklung, Konstruktion“, der dritten „Fertigung, Montage, Prüfung“ und der fünften Lebensphase „Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung“ fallen die meisten und wichtigsten Daten zur Beschreibung des Produktverhaltens an. Dies zeigen auch nationale und

⁶ engl. Manufacturing Execution System (MES)

internationale Forschungsarbeiten zum digitalen Zwilling⁷, worin die produktbeschreibenden Daten einen noch höheren Stellenwert einnehmen [63; 64]. Aus Sicht der Produktentwicklung und im Kontext der Aufgabenstellung dieser Arbeit werden alle Daten, welche die Merkmale oder Eigenschaften und somit auch das Verhalten eines Produktes im Verlauf aller Lebensphasen dokumentieren, als produktbeschreibende Daten⁸ bezeichnet. In der virtuellen Produktentwicklung werden die Produkteigenschaften mittels der Produktanalyse in numerischen Versuchen (Simulationen) bestimmt, die tatsächlichen Produkteigenschaften durch experimentelle Versuche (Messungen). Neben der Erhebung der produktbeschreibenden Daten ist auch die Verwaltung nach der Erhebung von großer Bedeutung, sodass die produktbeschreibenden Daten für den Austausch und zur Wiederverwendung strukturiert vorliegen. Auf den Aspekt der Verwaltung wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

2.2.3 Verwaltung von produktbeschreibenden Daten

Wie im vorherigen Abschnitt vorgestellt, werden vor allem in der Produktentwicklung, im Fertigungsprozess und der Produktnutzung im Lebenszyklus kontinuierlich produktbeschreibende Daten erhoben. Die Verwaltung von produktbeschreibenden Daten ist neben rechtlichen Aspekten [65; 54] auch aus Sicht der Qualitätssicherung⁹ [66; 39] von Bedeutung. Unternehmen sind daher verpflichtet, produktbeschreibende Daten langfristig aufzubewahren. Neben der Verwaltung nimmt der Austausch und die Bereitstellung von produktbeschreibenden Daten, u. a. aufgrund der zunehmenden Digitalisierung der Unternehmen und die damit einhergehende Instanzierung datengetriebener Geschäftsmodelle, eine wichtigere Rolle ein [51]. In diesem Abschnitt wird hierzu der Stand der Technik und Forschung im Kontext der Aufgabenstellung dieser Arbeit vorgestellt. Der Fokus dieses Abschnitts liegt insbesondere auf der IT-Unterstützung im Produktdaten- und Produktlebenszyklusmanagement, da die strukturierte Ablage von Daten die Grundlage für die datengetriebene Produktentwicklung in Abschnitt 2.3 darstellt.

⁷ Der digitale Zwilling (engl. Digital Twin) beschreibt ein Konzept, worin ein physikalisches oder virtuelles Objekt ganzheitlich und digital repräsentiert wird.

⁸ Produktbeschreibende Daten werden in der Literatur ebenso „Produktdaten“, „produktbezogene Daten“ oder „entwicklungsrelevante Daten“ genannt.

⁹ Im Qualitätsmanagement werden produktbeschreibende Daten als dokumentierte Information bezeichnet. [39]

Das Produktdatenmanagement (PDM) befasst sich im Kern mit der Verwaltung von produktbeschreibenden Daten und der Koordination der Entwicklung (Rechte, Rollen, Versionierung, Revisionierung, Freigabeprozesse, Aufgabenkoordination etc.). PDM-Systeme als IT-Werkzeuge stellen heutzutage das wichtigste Verbindungselement zwischen der Datenerhebung durch die Produktentwickler und der Koordination der Produktentwicklung dar [67]. Das Produktlebenszyklusmanagement (PLM) weitet aus strategischer Sicht den Gedanken des PDM aus, um neben der Entwicklung die anderen Lebensphasen eines Produktes zu berücksichtigen. Neben der Erweiterung auf alle Produktlebensphasen werden durch das PLM auch die verschiedenen Disziplinen der Entwicklung eingeschlossen. Hierzu zählen bspw. die Entwicklung der Elektrik / Elektronik oder der Software. Die PLM-Systeme als IT-Werkzeug schließen darüber hinaus die Brücke zwischen Unternehmensstandorten (firmenintern) oder Zulieferern, Partnern und Kunden (firmenübergreifend). Die PLM-Systeme bilden somit das Rückgrat bei der interdisziplinären Kooperation der Entwicklung, bei der Vernetzung der Ingenieure über alle Lebensphasen und bei der Überbrückung von Unternehmensgrenzen. [52; 51]

Grundsätzlich wird bei der informationstechnischen Umsetzung des Produktdaten- und des Produktlebenszyklusmanagements zwischen dem integrierten und föderierten Ansatz¹⁰ unterschieden [8]. Beim integrierten Ansatz verschmelzen PDM- und PLM-System zu einer Einheit [69; 8], wodurch im Idealfall alle produktbeschreibenden Daten eines Unternehmens an einer zentralen Stelle liegen. Der Vorteil des integrierten Ansatzes liegt in der großen Datenkonsistenz, allerdings ist der Aufwand zur Integration von neuen Autorensystemen oder die Gefahr von nicht koppelbaren Autorensystemen sehr groß. Aufgrund der Komplexität, Diversität und schnellen Veränderung der Autorensysteme wird der Aufwand zur Integration stetig größer [70]. In der industriellen Praxis ist die IT-Landschaft seit der Einführung der ersten IT-Unterstützung für die Produktentwickler historisch gewachsen und muss nach KATZENBACH & STEIERT [70] trotzdem „Veränderungen ermöglichen und unterstützen“. Im Gegensatz zum integrierten Ansatz lässt der föderierte Ansatz eine Diversität von IT-Werkzeugen zu [71], weshalb spezielle Autorensysteme und lokal an die Disziplinen, Abteilungen oder Fachbereiche angepasste PDM-Systeme eingesetzt werden können. Hierdurch kann der Funktionsumfang der Autorensysteme und der PDM-Systeme besser ausgenutzt werden [8; 72]. Der föderierte Ansatz

¹⁰ Die Begriffe integriert und föderiert entspringen dem Themenfeld der Datenbanksysteme [68], welche die technologische Basis von PDM-Systemen bilden.

birgt die Gefahr der Dateninkonsistenz, weshalb eine übergeordnete Integrationsplattform erforderlich ist. Darüber hinaus sind viele Schnittstellen zwischen den verschiedenen IT-Werkzeugen erforderlich, wodurch laut KATZENBACH & STEIERT [70] große Veränderungen an der IT-Architektur erschwert werden. [8; 52]

In Bild 7 ist das vierstufige Architekturkonzept nach EIGNER & STELZER [8] dargestellt. Hierin wird beispielhaft die Kopplung und Integration von IT-Werkzeugen zur Erhebung und Verwaltung der produktbeschreibenden Daten dargestellt. Auf der Stufe ① erheben die Produktentwickler durch die Nutzung von Autorensystemen produktbeschreibende Daten. Die Stufe ② ist für das Produktdatenmanagement zuständig. Sie ist in Bild 7 generisch als Teamdatenmanagement (TDM) bezeichnet, da in Unternehmen durch die teils speziellen Autorensysteme in den unterschiedlichen Disziplinen, Abteilung oder Fachbereichen häufig spezialisierte PDM-Systeme eingesetzt werden. Zwischen der Stufe ① und ② findet eine sehr starke Integration der produktbeschreibenden Daten statt, um das Produkt virtuell möglichst komplett abzubilden. Hierdurch entstehen integrierte Produktmodelle der

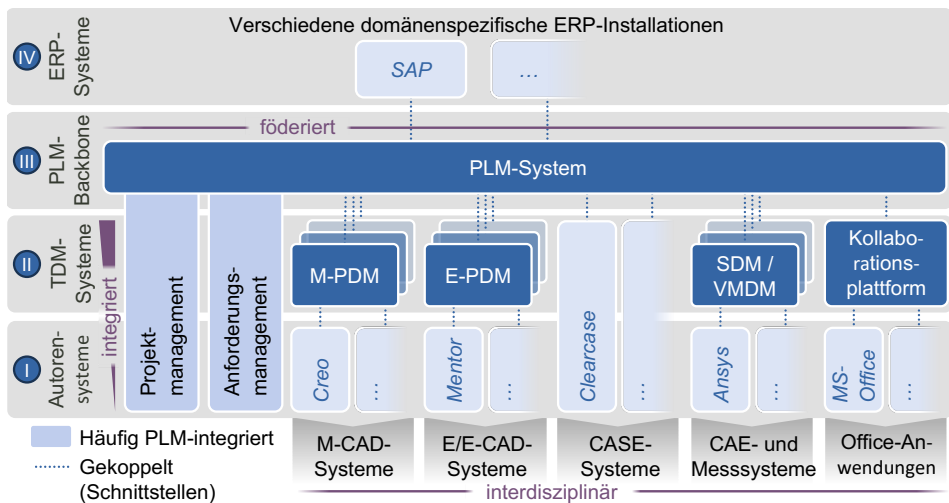


Bild 7: Vierstufiges Architekturkonzept der IT-Unterstützung im Kontext des Produktlebenszyklusmanagements nach [8].

Abkürzungen:

CAE: Computer-aided Engineering, CASE: Computer-aided Software Engineering, E/E: Elektrik / Elektronik, ERP: Enterprise-Resource-Planning, M: Mechanik, SDM: Simulationsdatenmanagement, TDM: Teamdatenmanagement, VMDM: Versuchs- und Messdatenmanagement

einzelnen Disziplinen. Die PDM-Systeme werden zur interdisziplinären Zusammenarbeit über die Stufe (III) an ein PLM-System angekoppelt. Da dort alle Disziplinen zusammengeführt werden, wird die Stufe (III) auch Rückgrat des Produktlebenszyklusmanagements bezeichnet. Die Ankopplung der PDM-Systeme erfolgt i. d. R. auf dem Detaillierungsgrad von Stamm- und Strukturdaten sowie durch standardisierte Datenformate, im Fall des Gestaltmodells bspw. durch STEP oder JT. Die letzte Stufe (IV) zielt auf die Ankopplung von ERP-Systemen, die vor allem zur Ressourcenplanung von bspw. Personal, Kapital und Betriebsmittel notwendig sind [51]. [8; 52; 51]

Das vierstufige Architekturkonzept ist ein Beispiel für die durchgängige IT-Unterstützung im Produktdatenmanagement. Hierbei wurde auf eine Mischung aus integriertem und föderiertem Ansatz gesetzt. Durch die Diversität der Autorensysteme und die Parallelisierung der verschiedenen Disziplinen in der Produktentwicklung zeigt der föderierte Ansatz auf der Ebene des Produktlebenszyklusmanagements die größere Flexibilität [8; 71; 73]. Die Integration der produktbeschreibenden Daten erfolgt auf der Ebene des Produktdatenmanagements. Die PDM-Systeme sind häufig auf die Autorensysteme abgestimmt, da sie vorrangig die Unterstützung der unterschiedlichen Disziplinen, Abteilungen oder Fachbereiche fokussieren [8].

2.2.4 Formale Repräsentation von produktbeschreibenden Daten

Die Kernaufgabe der PDM-Systeme ist die Verwaltung von produktbeschreibenden Daten und der Koordination der Entwicklung (siehe Abschnitt 2.2.3). Im Kontext der formalen Repräsentation zur Computerverarbeitung sind unter produktbeschreibenden Daten in erster Linie die digitale Beschreibung der Arbeitsergebnisse (Produktmodelle) in Form einzelner Dokumente zu verstehen. Mit dem Ziel, ein umfassendes *integriertes Produktmodell* zum systemübergreifenden Austausch von produktbeschreibenden Daten zu entwickeln und zu standardisieren, wurde in den 1990er Jahren die internationale Norm ISO 10303 „Product Data Representation and Exchange“ (STEP) definiert [74; 75]. Die produktbeschreibenden Daten werden hierzu in „ein genormtes Datenformat [als] sequentielle Datei“ abgespeichert, sodass die produktbeschreibenden Daten zwischen verschiedenen Autorensystemen als digitales Dokument ausgetauscht werden können [75]. Auf die Norm ISO 10303 (STEP) als Produktmodell zur Integration von produktbeschreibenden Daten wird in dieser Arbeit in Abschnitt 5.2.4.1 (S. 95) genauer eingegangen.

Ein Dokument ist nach der Norm DIN EN 82045-1:2002-11 [76] eine „festgelegte und strukturierte Menge von Informationen, die als Einheit verwaltet und zwischen Anwendern und Systemen ausgetauscht werden kann“. Die Dokumente werden im Kontext der Informationstechnologie als Dateien formal repräsentiert, d. h. „elektronisch gespeichert“ [77; 51]. Aus dem Blickwinkel der Produktentwicklung werden die Dokumente in digitaler Form mithilfe der Autorensysteme erzeugt und in Form von Dateien auf dem Computer der Produktentwickler abgelegt oder in das PDM-System eingecheckt (z. B. CAD- und CAE-Modelle in nativen Formaten oder STEP, Stücklisten im Tabellenformat, Fertigungszeichnungen im PDF-Format). Die PDM-Systeme betrachten die Dokumente als „Behälter“. Sie werden zwar häufig aus Gründen der informationstechnischen Handhabung nach ihrer Dateiart klassifiziert, allerdings werden die Inhalte der Dokumente vom PDM-System nur sehr selten ausgelesen und interpretiert [8; 78]. Ausnahmen sind bspw. die Ermittlung der Produktstruktur oder das Erstellen einer Vorschau des CAD-Modells.

Zusätzlich zu den Dokumenten werden zwischen den Autorensystemen und dem PDM-System Stamm- und Strukturdaten ausgetauscht. Die Strukturierung der Dokumente erfolgt i. d. R. anhand der Produktstruktur (CAD-Daten), die ein Produkt hierarchisch in Komponenten wie Baugruppen und Bauteile gliedert [7; 79]. Die Strukturdaten entnimmt das PDM-System den CAD-Modellen [51] und überführt diese in eine Ordnerstruktur ähnliche Form [79]. Jede Baugruppe oder Bauteil entspricht einem Ordner bzw. Unterordner, worin die zugehörigen Dokumente zu den Geometriedaten abgelegt werden können. Die Stammdaten, auch Metadaten genannt, sind Daten zur genaueren Beschreibung des Dokuments [76; 79]. Metadaten sind bspw. Bezeichnung, Artikelnummer zur Identifikation, Werkstoff, Bearbeitungsstatus, Freigabestatus, Version, Sicherheit oder Zugriffsberechtigungen [51; 80]. Die Metadaten benötigt das PDM-System vorwiegend zur Verwaltung der Dokumente, zur Koordination der Entwicklung und zur Kommunikation mit anderen IT-Systemen. Aus dem Blickwinkel der Produktentwickler unterstützt das PDM-System durch die Bereitstellung der Metadaten z. B. beim Vorfüllen des Zeichnungsrahmens für eine Fertigungszeichnung oder bei der Übermittlung der erforderlichen Werkstoffe an das ERP-System zur Fertigungsplanung.

2.2.5 Zwischenfazit und Trends im Produktdatenmanagement

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, verwalten die PDM-Systeme die produktbeschreibenden Daten in Form von Dokumenten. Die Strukturierung der Dokumente erfolgt mithilfe der Stamm- und Strukturdaten, wobei der Inhalt der Dokumente unberücksichtigt bleibt (siehe Abschnitt 2.2.4). In Abschnitt 2.2.3 wurde dargestellt, dass die einzelnen Disziplinen der Produktentwicklung auf eine starke Datenintegration achten. Die Integration im Produktlebenszyklusmanagement erfolgt für wichtige Dokumente auf Basis der Metadaten. Bei der Verwaltung der Dokumente wird vor allem auf die Unterstützung und Koordination der Entwicklung geachtet. Die Ablage der Dokumente erfolgt anhand der Produktstruktur im PDM-System, und ist auf das schnelle Wiederfinden und den standardisierten Austausch mit den Autorensystemen zur Bearbeitung der Dokumente optimiert. Abgesehen von der Produktstruktur, können zwischen den Dokumenten auf der Inhaltsebene (Daten) keine Verknüpfungen erstellt werden, wodurch die Daten in den Dokumenten häufig nur einer Disziplin zur Verfügung stehen [81].

Die Forschungsaktivitäten im Bereich des Produktdaten- und Produktlebenszyklusmanagements zeigen deshalb einen Trend zu einer stärkeren Verknüpfung der Dokumente. Hierbei kommen Semantic-Web-Technologien in Form von Ontologien zum Einsatz, die Objekte einer Domäne und ihre Beziehungen zueinander maschinenlesbar beschreiben [82; 83]. Das Forschungsfeld der Semantic-Web-Technologien geht auf die Arbeit von BERNERS-LEE & FISCHETTI [38] zum World Wide Web zurück. Da die Semantic-Web-Technologien und die Ontologien keinen Fokus dieser Arbeit darstellen, wird für einen tieferen Einblick in dieses Themenfeld auf die jeweilige Grundlagenliteratur verwiesen, z. B. [84] und [85]. WEBER [86] arbeitet im Kontext des Produktdatenmanagements an einem komplett semantischen PDM-System, welche alle entwicklungsrelevanten und produktbeschreibenden Daten semantisch vernetzt. Der Ansatz verspricht eine echte Durchgängigkeit und Verfolgbarkeit der Dokumente im Produktlebenszyklus, da zusammengehörige Dokumente einer Domäne über die Disziplinen und Unternehmensgrenzen hinweg einheitlich und maschinenlesbar vernetzt werden können [87; 86].

Weitere Forschungsaktivitäten erfolgen auf dem Themenfeld „Linked Data“, welcher ebenfalls den Semantic-Web-Technologien entspringt [88]. Linked Data forciert im Kontext der Produktentwicklung vor allem die Strukturierung von Daten unterschiedlichen Typs und Quellen [89]. In [90] werden

die Semantic-Web-Technologien zur Verknüpfung von CAD-Daten (Nenngeometrie) und Messdaten bei der Herstellung von Werkstücken genutzt, um automatisiert eine Qualitätskontrolle bei der Herstellung durchführen zu können. Li et al. [91] stellen einen Ansatz zur semantischen Erweiterung des CAD-Modells vor, um Datenaustausch mit anderen IT-Werkzeugen zu vereinfachen. In [92] werden alle Objekte (Personen, Dokumente etc.) aus verschiedenen Quellen (digitale Ordnerstruktur, PDM-System etc.) eines Unternehmens zum Teil automatisch vernetzt, um ausgehend von den Anforderungen bis zur Eigenschaftsabsicherung eines Produktes die interdisziplinäre Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten.

Im Kontext der Digitalisierung steht die direkte Nutzung der Ressource „Daten“ im Vordergrund [26; 23]. Hierfür ist eine starke Verknüpfung der Dokumente und der darin enthaltenen Daten erforderlich. Dieser Trend im Produktdatenmanagement kommt dem Ziel der datengetriebenen Produktentwicklung entgegen, worin die intensivere Nutzung der produktbeschreibenden Daten fokussiert wird. Die datengetriebene Produktentwicklung wird im nächsten Abschnitt thematisiert.

2.3 Datengetriebene Produktentwicklung

Im vorangegangenen Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, wie die Daten durch den Einsatz von IT-Werkzeugen zur Unterstützung der Produktentwicklung erhoben, verwaltet und repräsentiert werden. Die zunehmende Digitalisierung und der damit verbundene Einsatz von IT-Werkzeugen führt zur Erhebung von sehr vielen Daten in allen Lebensphasen eines Produktes (siehe Abschnitt 2.2.2). Wie die großen Internetkonzerne versprechen sich auch die Unternehmen der Maschinenbaubranche durch die intensivere Nutzung der eigenen Daten einen Wettbewerbsvorteil und eine Effizienzsteigerung [93]. Aufgrund der Menge der Daten, die im Lebenszyklus eines Produktes erhoben werden, ist die manuelle Analyse und Auswertung durch die Ingenieure nicht möglich, weshalb ein großer Teil der Daten ungenutzt bleibt [94; 95]. In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Ansätze, Vorgehensmodelle und Methoden vorgestellt, wodurch die Daten besser genutzt und dadurch wiederverwendet werden können. Die Integration in und Nutzung von diesen Ansätzen und Methoden in der Produktentwicklung wird datengetriebene Produktentwicklung genannt.

2.3.1 Hypothesengetriebene und datengetriebene Analyse

Die Produktentwicklung beinhaltet einen iterativen, systematischen Prozess, bei welchem Lösungen zu einer Aufgabenstellung erarbeitet und durch Produktentwickler bewertet werden (siehe Bild 6 zum systematischen Problemlösungszyklus auf S. 18). Bei der Produktanalyse werden häufig bspw. numerische Versuchsdaten am virtuellen Prototyp und experimentelle Versuchsdaten am realen Prototyp empirisch erhoben. Die Daten über das Produktverhalten werden mit den Anforderungen an das Produkt verglichen und die Lösung dadurch bewertet (siehe Abschnitt 2.2.2.3). Diese iterative und empirische Vorgehensweise aus Versuch und Irrtum existiert jeher in der Entwicklung und Konstruktion von Produkten [96; 97]. Die empirische Vorgehensweise ist im Kontext der Datenanalyse der hypothesengetriebenen Analyse zugeordnet, die auch als Top-Down-Vorgehensweise bezeichnet wird (siehe Bild 8). Hierbei wird eine Hypothese aufgestellt, Versuche geplant¹¹ und die Daten hinsichtlich der Hypothese ausgewertet [100]. Die Produktentwickler zielen hierdurch auf die Validierung oder Falsifizierung der Lösung durch die gezielte Erhebung und Auswertung der Daten. Die Produktentwickler beantworten sich dadurch bspw. die Frage: „Verhält sich das Produkt so, wie es konzipiert wurde?“. Im Gegensatz dazu steht das Bottom-Up-Verfahren, wobei von erhobenen Daten (Beobachtungen) ausgegangen wird, um Ursache-Wirkungsmechanismen zu identifizieren und zu erklären. Dieses Verfahren wird datengetriebene Analyse genannt. Die Daten müssen hierzu nicht zwangsweise durch die statistische Versuchsplanung erhoben werden [100], wodurch die systematische Analyse von sehr großen Datenmengen möglich wird. Die Produktentwickler beantworten sich dadurch bspw. die Frage: „Welches Verhalten haben die Produkte gemeinsam?“. [101; 102]

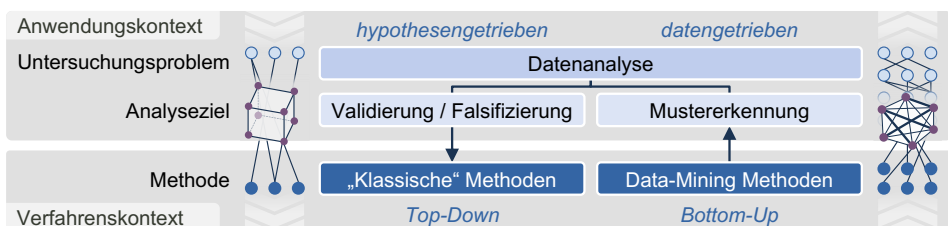


Bild 8: Problemorientierte Einordnung der Datenanalyse nach [101].

¹¹ Zum Beispiel mittels der statistischen Versuchsplanung (DoE) [98; 99].

In dieser Arbeit wird die *datengetriebene Produktentwicklung* als der Einsatz der datengetriebenen Analyse zur Unterstützung der Entwicklung und Konstruktion definiert. Die datengetriebene Produktentwicklung ermöglicht das Verhalten von Produkten statistisch zu beschreiben. Sie basiert auf den Methoden des Data-Minings, die Muster und Beziehungen in Daten identifizieren können. In den folgenden Abschnitten wird hierzu der Stand der Technik vorgestellt.

2.3.2 Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten

Die Analyse von Daten zur Mustererkennung erfordert ein systematisches Vorgehen, um die richtigen Daten zu analysieren, echte Muster zu identifizieren und schließlich die richtigen Schlussfolgerungen daraus zu ziehen [103; 102]. In der Literatur werden die Vorgehensmodelle häufig Prozesse zur Wissensentdeckung in Datenbanken (KDD¹²) genannt. Mit dem Begriff „Wissen“ wird in den folgenden Abschnitten noch sehr offen umgegangen. Die genaue Definition von „Wissen“ erfolgt im Abschnitt 2.4.1.

KDD-Prozesse umfassen das Themenfeld der Datenbanken, der Statistik und des maschinellen Lernens [104]. In den frühen 1990er Jahren wurde die Wissensentdeckung in Datenbanken von verschiedenen Forschungsfeldern vorangetrieben. Aus diesem Grund haben sich unterschiedliche Begriffe etabliert: KDD im Kontext der Forschungsfelder künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen, Data-Mining im Kontext der Datenbanksysteme. [105] Hierdurch werden die beiden Begriffe, KDD und Data-Mining, in der Literatur häufig noch synonym verwendet. Heutzutage wird von Data-Mining auch im Kontext von KDD gesprochen, allerdings wird darunter der Teilschritt zur Mustererkennung verstanden [93; 106].

2.3.2.1 Generisches Vorgehensmodell zur systematischen Analyse von Daten

In Bild 9 sind die drei wesentlichen Schritte zur systematischen Analyse von Daten zusammengefasst. Diese bestehen aus dem Pre-Processing ①, dem Processing ② und dem Post-Processing ③. Ziel des ersten Schritts ist die Vorbereitung der Daten, sodass die nachfolgende Datenanalyse im zweiten Schritt durchgeführt werden kann. Die zu analysierenden Daten liegen häufig in verschiedenen Dateiformaten und an unterschiedlichen Speicherorten vor. Diese reichen von Datenbanken (bspw. PDM-Systeme)

¹² KDD steht für Knowledge Discovery in Databases.

bis hin zu Dateien in verschiedenen Ordnern. Das Pre-Processing ist für die Aggregation der einzelnen Datenbasen, die Datenaufbereitung und die erste Vereinfachung des Datensatzes verantwortlich. Dies muss häufig manuell erfolgen und ist deshalb der arbeits- und zeitintensivste Schritt. Das Ergebnis des Schritts ① sind strukturierte Daten, die als flache Tabelle repräsentiert werden. Im zweiten Schritt werden die strukturierten Daten mittels der Data-Mining-Methoden verarbeitet (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Art der Daten und das Analyseziel bestimmen die Data-Mining-Methode. Neben der Mustererkennung gehört zum zweiten Schritt die Berechnung von Validierungskennzahlen. Im Schritt ③ geht es vor allem um die Validierung des Musters. Hierzu sind ergänzende Interpretations- und Bewertungsmaßnahmen erforderlich. Die Identifikation der vorher unbekanntenen Zusammenhänge (Muster) in den Daten und nachgestellte Interpretation der Muster wird im Kontext von KDD als Erhebung von Wissen verstanden. [100]

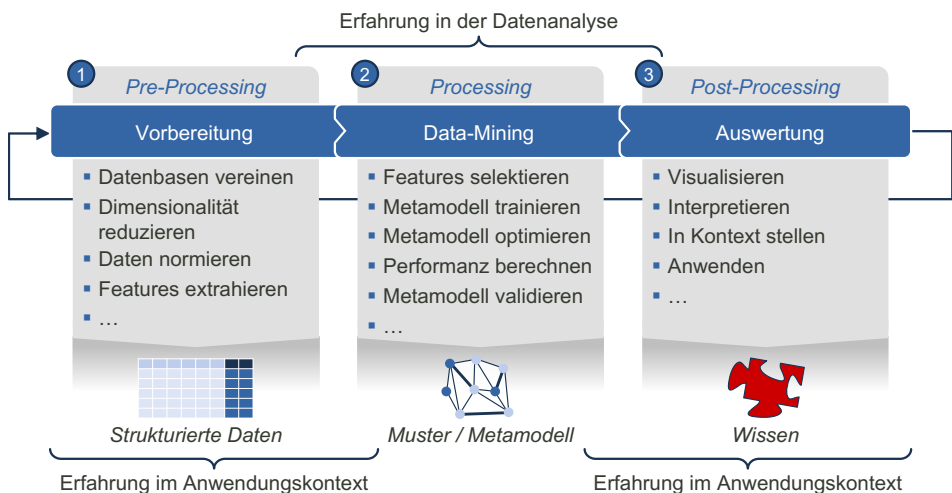


Bild 9: Die drei Hauptschritte zur systematischen Analyse von Daten nach [103; 100].

Neben dem generischen Vorgehensmodell zur systematischen Analyse von Daten in Bild 9 haben sich seit Anfang der 2000er Jahren zwei Prozesse zur Wissensentdeckung etabliert. Der KDD-Prozess nach FAYYAD et al. (Bild 10) entstand im Umfeld der Forschungsgemeinschaft SIGKDD und der CRISP-DM nach CHAPMAN et al. (Bild 11) in einem branchenübergreifenden Industriekonsortium. Beide Prozesse werden in den nächsten beiden Abschnitten kurz vorgestellt.

2.3.2.2 KDD-Prozess nach FAYYAD et al.

Der KDD-Prozess nach FAYYAD et al. besteht aus neun interaktiven und iterativen Schritten (siehe Bild 10): Im ersten Schritt soll ein Verständnis für den Anwendungskontext aufgebaut werden, um die Erwartungen an das Analyseergebnis genau beschreiben zu können. Hierdurch wird das genaue Analyseziel des KDD-Prozesses formuliert, um wirklich neue und nützliche Ursache-Wirkungsmechanismen zu identifizieren. Im zweiten Schritt wird ein initialer Analysedatensatz erstellt. Hierfür werden aus den zur Verfügung stehenden Datenquellen alle relevanten Daten in einen initialen Analysedatensatz überführt. Bei der Auswahl der Daten sind möglichst alle Datenquellen zu berücksichtigen, die einen Einfluss auf das Analyseziel haben könnten. Falls relevante Daten fehlen, werden sie in diesem Schritt erhoben. Der dritte Schritt widmet sich der Datenaufbereitung. Hierzu zählt das Vereinen der Daten aus verschiedenen Quellen, doppelte Daten zu löschen, Lücken in den Datensätzen intelligent zu ergänzen oder Inkonsistenzen zu bereinigen. Die Lücken sind bspw. unvollständige Messdatensätze oder numerische Versuchsdurchläufe, die nicht konvergiert sind. An dieser Stelle hat der Datensatz meist noch zu viele Features, um qualitativ sinnvolle Muster identifizieren zu können. Features sind die unabhängigen Eingangsgrößen eines Datensatzes, welche häufig die Spalten in einer Tabelle repräsentieren, wobei die Anzahl der Features als Dimension eines Datensatz bezeichnet wird. Der Begriff „Feature“ wird in Abschnitt 2.3.3 genauer vorgestellt. Aufgrund der häufig noch großen Anzahl an Features wird im vierten Schritt die Dimension der Daten reduziert. Hierfür werden häufig bereits erste Voranalysen der Daten durchgeführt. Ziel dieses Schritts ist es, so viele Features wie nötig auszuwählen, und so wenige Features wie möglich für die eigentliche Datenanalyse im Datensatz zu behalten. Ein Verfahren zur Dimensionsreduktion stellt die Verjüngung dar, worin zum Beispiel Drehmoment- und Drehzahlmesswerte in die mechanische Leistung überführt werden, sofern weder Drehmoment noch Drehzahl in engerer

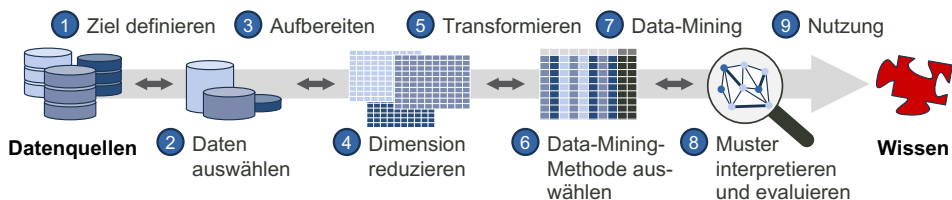


Bild 10: Der KDD-Prozess nach FAYYAD et al. [93].

Verbindung mit dem Analyseziel stehen. Für weitere Verfahren zur Reduzierung der Dimension wird auf WITTEN et al. [108] verwiesen. Der fünfte und sechste Schritt stehen in enger Verbindung, da die Transformation im fünften Schritt die Daten für die ausgewählte Data-Mining-Methode im sechsten Schritt vorbereitet. Die Auswahl der Methode im sechsten Schritt ist wiederum stark an das Analyseziel gekoppelt (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Auswahl der Data-Mining-Methode im sechsten Schritt definiert somit, wie die Daten im fünften Schritt transformiert werden müssen. Die Transformationen der Daten im fünften Schritt beinhaltet bspw. die Normierung der Daten oder die Skalierung der Werte einzelner Features. Unter Skalierung wird die Konvertierung zwischen stetigen (z. B. $\{1, 2, \dots, 10\} \in \mathbb{R}$) und diskreten Wertebereichen (z. B. rot, grün, blau, ...) verstanden [109]. Im siebten Schritt erfolgt die eigentliche Mustererkennung durch die Analyse der Daten mittels der ausgewählten Data-Mining-Methode. Im achten Schritt wird das Muster interpretiert und evaluiert. Zur Validierung stehen verschiedene Methoden und Kennzahlen zur Verfügung (siehe Abschnitt 2.3.4.2). Häufig ist Teil dieses Schritts auch die visuelle Gegenüberstellung der transformierten Daten aus Schritt fünf und dem identifizierten Muster. Falls das identifizierte Muster das Analyseziel nicht erfüllt, muss iterativ Schritt eins bis acht wiederholt werden. Der letzte Schritt besteht aus der Kontextualisierung des Musters, sodass es als Wissen genutzt werden kann. [93; 104]

2.3.2.3 CRISP-DM nach CHAPMAN et al.

Der Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) nach CHAPMAN et al. wurde in einem internationalen und branchenübergreifenden Industriekonsortium erarbeitet und im Jahr 2000 veröffentlicht. Der CRISP-DM ist industrie-, werkzeug- und anwendungsunabhängig konzipiert, wofür verschiedene Data-Mining-Projekte und deren Abwicklung analysiert wurden. Der CRISP-DM umfasst ein Referenzmodell und einen Leitfaden. Das Referenzmodell definiert ein generisches Data-Mining-Projekt in sechs Phasen und deren einzelne Aufgaben mit ihren erwarteten Ergebnissen. Für die erfolgreiche Durchführung eines Data-Mining-Projektes stellt der Leitfaden wertvolle Tipps und Hinweise für jede Phase und jede Aufgabe in einer Phase zur Verfügung. Im industriellen Umfeld hat sich der CRISP-DM und darauf aufbauende Vorgehensmodelle als Standard etabliert. [107; 110]

In Bild 11 sind die sechs Phasen des CRISP-DM-Referenzmodells mit den wichtigsten und häufigsten Beziehungen untereinander dargestellt. Die

Abfolge der Phasen ist als Empfehlung zu sehen, jedoch nicht als fest vorgeschrieben. Abhängig vom Ziel sowie dem Hintergrund der Datenanalyse und vor allem von der Datenlage sind weitere Verknüpfungen der Phasen vorgesehen. Die genaue Abfolge der Phasen ergibt sich im Projektverlauf, d. h. sie ist von den Zwischenergebnissen der einzelnen Phasen und jeder Aufgabe in den Phasen abhängig. Der äußere Ring in Bild 11 symbolisiert den zyklischen Charakter von Data-Mining-Projekten, wobei die Folgeprojekte von den Ergebnissen, Erkenntnissen und Erfahrungen aktueller Projekte profitieren. [107]

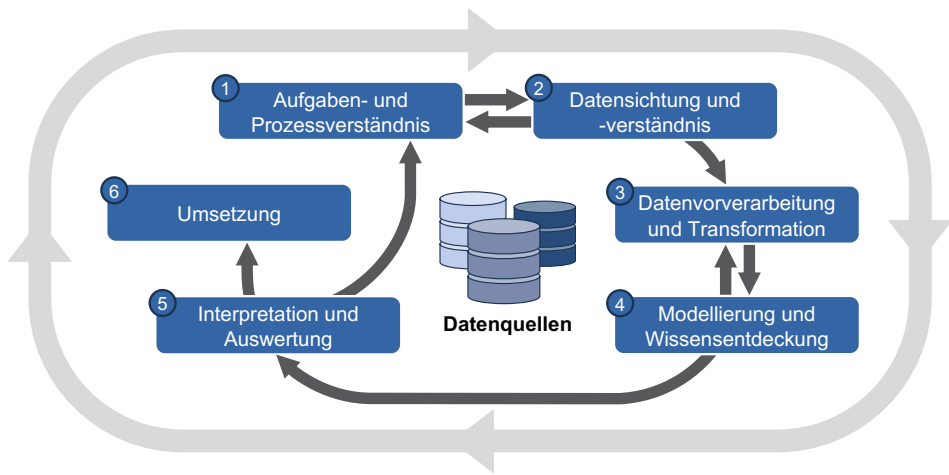


Bild 11: Die sechs Lebensphasen des CRISP-DM-Referenzmodells nach CHAPMAN et al. [107].

Die einzelnen Phasen des CRISP-DM nach CHAPMAN et al. ähneln den Schritten im KDD-Prozesses nach FAYYAD et al. im vorherigen Abschnitt, weshalb auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet wird. Die einzelnen Aufgaben und die erwarteten Ergebnisse der einzelnen Phasen sind für die Problemstellung der vorliegenden Arbeit von geringerer Relevanz, weshalb hierfür auf CHAPMAN et al. [107] verwiesen wird.

2.3.2.4 Zwischenfazit

Die vorgestellten Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten sind sich strukturell sehr ähnlich. Dennoch unterscheiden sie sich durch den Entstehungskontext und vor allem durch den Grad der Detaillierung. Hervorzuheben ist, dass der CRISP-DM nach CHAPMAN et al. [107] sehr

ausführlich beschrieben ist und zugleich das Vorgehensmodell mit der größeren Flexibilität darstellt.

Die Vorgehensmodelle KDD und CRISP-DM zeigen die erforderlichen Schritte, um zuverlässig Muster in den Daten zu identifizieren. Der systematische Ablauf soll der Gefahr vorbeugen, falsche Muster zu identifizieren und somit vermeintlich neues Wissen zu entdecken und zu nutzen. Die häufigsten Fehler bei der Wissensentdeckung in Daten werden bei der Datenauswahl und der Kontextualisierung der Muster gemacht. Ersterer passiert, wenn falsche oder nicht relevante Daten ausgewählt werden und die Data-Mining-Methoden dadurch falsche oder nicht relevante Muster identifizieren (Prinzip: „Garbage In, Garbage Out“) [102]. Letzterer passiert, wenn offensichtliche Muster entdeckt oder bereits bekannte bestätigt werden [102]. Darüber hinaus können Muster identifiziert werden, die keinen kausalen Zusammenhang beschreiben (Prinzip: „Fischen im Trüben“¹³) [94]. Der Nutzwert dieser Muster ist entsprechend gering. Die Fehler können vermieden werden, wenn bei der Datenvorbereitung und Musterauswertung auf Domänenwissen aus dem Entstehungskontext der Daten zurückgegriffen wird [94; 95]. In Bild 9 auf S. 29 sind hierfür zwei Domänen angedeutet: Die Domäne der Datenanalyse (Processing) und des Anwendungskontextes (Pre- und Postprocessing), die sich aufgrund des erforderlichen Wissensaustausches zwischen den Domänen jeweils leicht überschneiden. Die Domäne der Datenanalyse wird i. d. R. von der Rolle des Data-Scientists eingenommen. Die Domäne des Anwendungskontextes wird von den Urhebern der Daten vertreten, d. h. im besten Fall von den Ingenieuren aus dem jeweiligen Anwendungskontext. Dieser interdisziplinäre Aspekt, sowie der notwendige Austausch von Domänenwissen, wird in der Literatur zur Wissensentdeckung in Daten noch zu wenig Rechnung getragen.

Die Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten gehen von integrierten und strukturierten Datenquellen aus, die eine formale Repräsentation aufweisen (bspw. Textdateien, Tabellenformate oder relationale Datenbanken) [100; 107; 111]. In der Produktentwicklung steht die Verwaltung von produktbeschreibenden Daten vor allem zur Unterstützung und Koordination der Entwicklung im Vordergrund. Hierbei werden die produktbeschreibenden Daten in Dokumenten in unterschiedlichsten Dateiformaten verwaltet (siehe Abschnitt 2.2.5). Aufgrund der Diversität der Dokumente und der Inkonsistenz der Dateiformate können die Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten nicht direkt auf die

¹³ engl. data dredging

produktbeschreibenden Daten aus der Produktentwicklung angewendet werden [112]. Die Diskrepanz zwischen den Anforderungen der Vorgehensmodelle an die Datenquellen und der Repräsentation von produktbeschreibenden Daten erfordert im Moment einen weiteren manuellen Schritt im Pre-Processing und somit einen hohen personellen Aufwand.

Die vorgestellten Vorgehensmodelle KDD und CRISP-DM zeigen die notwendigen Schritte, um Wissen aus Daten zu erheben. Im Kontext der datengetriebenen Produktentwicklung stellt das Wissen die statistische Beschreibung des Produktverhaltens dar. Das Wissen wird durch die Kontextualisierung der identifizierten Muster in den Daten gewonnen [103]. Zur Mustererkennung kommen analysezielabhängig verschiedene Data-Mining-Methoden in Frage, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden.





2.3.3 Data-Mining-Methoden zur Mustererkennung

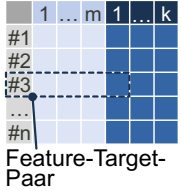
Im vorangegangenen Abschnitt wurden Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten vorgestellt. Die Auswahl der richtigen Data-Mining-Methode hängt von den Daten aus dem Pre-Processing ab, die unter Berücksichtigung des Analyseziels erhoben werden. Die Entscheidung für eine Data-Mining-Methode definiert direkt, welche Muster identifiziert werden können. In diesem Abschnitt wird auf die unterschiedlichen Data-Mining-Methoden zur Mustererkennung näher eingegangen.

Data-Mining als Methode entspringt den Forschungsfeldern der Statistik, Mustererkennung, künstliche Intelligenz und im Speziellen dem maschinellen Lernen [113; 100]. Bevor sich der am Bergbau orientierte Begriff „Data-Mining“ durchgesetzt hat, wurde von generalisierungsbasierten Induktionstechniken gesprochen [114]. Die Data-Mining-Methoden fallen im maschinellen Lernen unter die Kategorie „Lernen aus Beispielen“, welche nach MICHALSKI [115] auf die Theorie des induktiven Lernens zurück geht. Die zu lernenden Beispiele im Data-Mining werden durch die Lern- oder Trainingsdaten repräsentiert, die als strukturierter Datensatz vorliegen müssen (siehe Abschnitt 2.3.2.1). Der strukturierte Trainingsdatensatz besteht immer aus Features (unabhängige Eingangsgrößen), die bei Bedarf durch Targets (abhängige Zielgrößen) ergänzt werden [116]. Die Features können als Merkmale und die Targets als Eigenschaften des Datensatzes interpretiert werden. Die Begrifflichkeiten zum strukturierten Trainingsdatensatz sind im Kontext verschiedener Domänen in Tabelle 2 zusammengefasst. Im maschinellen Lernen wird der strukturierte Datensatz als Feedback an den Lernalgorithmus verstanden. Je nachdem wie und welche Beobachtungen

die Lernalgorithmen verarbeiten können, werden die Lernalgorithmen in drei Gruppen eingeteilt [113]: überwachtes Lernen, unbeaufsichtigtes Lernen, und Lernen durch Verstärkung.

Tabelle 2: Nomenklatur zum strukturierten Trainingsdatensatz im Kontext verschiedener Domänen.

Domäne	Unabhängige Größe  	→ Abhängige Größe  	Autor(en)
Maschinelles Lernen	Feature	→ Target	[114]
	Attribut	→ Label	[100]
	Unabhängige Variable x	→ Abhängige Variable y	[116; 117]
Ingenieurwesen	Merkmal	→ Eigenschaft	[50]
	Systemparameter	→ Verhalten oder Antwort	[117]
	Eingangsgröße	→ Ergebnis- oder Zielgröße	[99]
	Umwelt	→ Beobachtung	[117]



Das Lernen durch Verstärken orientiert sich an der klassischen Konditionierung nach PAWLOW [118]. Hierbei folgen die Lernalgorithmen iterativ dem Prinzip des Versuch-und-Irrtums bzw. -Belohnung. In Anlehnung an die Konditionierung des PAWLOW'schen Hundes wird der Lernalgorithmus durch Belohnung (Verstärkung) bei richtigem Handeln und Bestrafung bei falschem trainiert. Ziel des Trainings ist die Maximierung der Belohnung, die der Lernalgorithmus durch die Änderung seines Verhaltens oder seiner Strategie erreichen kann [113]. Die Lernalgorithmen erhalten beim Lernen durch Verstärken keinen Datensatz aus ihrer Umwelt, sondern ein positives oder negatives Feedback zur vorgenommenen Änderung ihres Verhaltens. Das Feedback bzw. die Daten werden unmittelbar beim Training aus der Umwelt bezogen, wodurch der Lernalgorithmus iterativ herausfindet, welche Aktion zu einer Belohnung führt. [119; 113]

Ein sehr berühmter Algorithmus dieser Lernverfahren ist AlphaGo des Unternehmens Google DeepMind für das chinesische Brettspiel Go. Mit AlphaGo gelang es in den Jahren 2016–2017 einem Computer zum ersten Mal, die Weltmeister im Go-Spiel zu besiegen [120]. Die Leistung von AlphaGo ist deshalb von großer Bedeutung, da das Go-Spiel eine so hohe Spielbaum-Komplexität¹⁴ aufweist, die von heutigen Computern nicht

¹⁴ Die Spielbaum-Komplexität drückt die Anzahl von möglichen Zügen bis zum Sieg aus.

abgebildet werden kann [P10]. Lernen durch Verstärkung ist zur Mustererkennung in Daten nur bedingt nützlich, da in diesem Lernverfahren nicht direkt aus einem strukturierten Datensatz gelernt wird [119]. Aus diesem Grund wird das Lernen durch Verstärkung in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

In Bild 12 sind die Einteilung der maschinellen Lernverfahren und die zugehörigen Data-Mining-Methoden dargestellt. Zur Identifikation von Mustern in Daten sind vor allem die überwachten und unüberwachten Lernverfahren von Relevanz [110], weshalb auf die Data-Mining-Methoden der beiden Lernverfahren in den nächsten Abschnitten noch etwas näher eingegangen wird. Für einen Überblick zum Lernen durch Verstärkung wird an dieser Stelle auf SCHMIDHUBER [121] verwiesen.

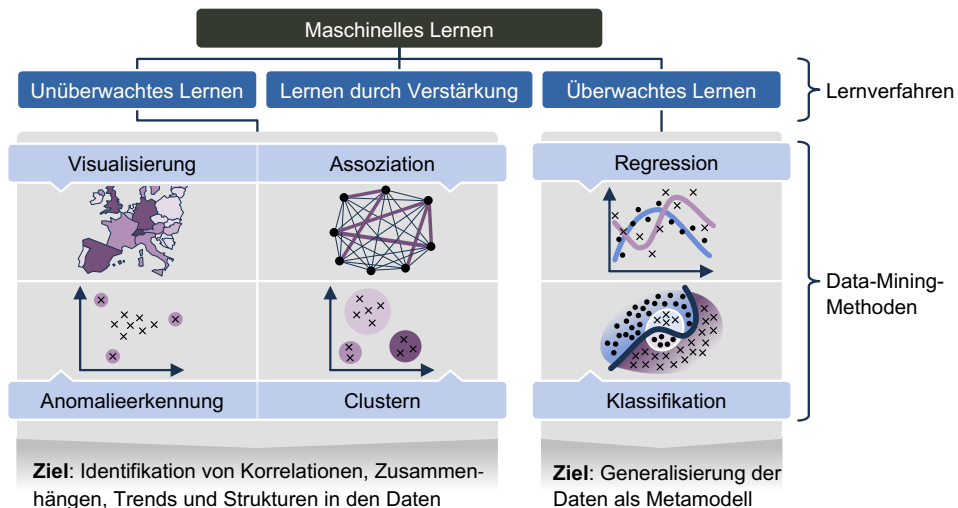


Bild 12: Einteilung der maschinellen Lernverfahren und Data-Mining-Methoden nach [113; 100; 102; P9].

2.3.4 Überwachte Lernverfahren

Bei den überwachten Lernverfahren erfasst ein Lernalgorithmus einen statistischen Zusammenhang zwischen den unabhängigen Features und abhängigen Targets eines Datensatzes. Die Beobachtungen aus der Umwelt werden hierzu als Feature-Target-Paare in einen Datensatz abgebildet. Der Lernvorgang anhand der Feature-Target-Paare wird als Training oder Induktion bezeichnet. Hierbei wird der Datensatz generalisiert, sodass auch Feature-Target-Paare berechnet oder klassifiziert werden können, die nicht

Teil des Trainingsdatensatzes waren (Deduktion). Ziel ist hierbei die Daten verallgemeinert zu lernen und ein „Auswendiglernen“ der Trainingsdaten zu verhindern. In Anlehnung an KLEIJNEN [117] wird der gelernte Zusammenhang im Folgenden als „Metamodell“ bezeichnet. Durch die überwachten Lernverfahren entsteht ein direkter Nutzen, da nach dem Training die Metamodelle mehrmals eingesetzt werden können. [100; 113]

2.3.4.1 Regression

Mittels der Regression können Metamodelle für abhängige Targets y mit numerischen, infiniten Wertebereich trainiert werden [100; 122]. Durch die Metamodelle können durch Vorgabe der unabhängigen Features x die abhängigen Targets y berechnet werden. In der ingenieursnahen Literatur wird die Regression im mehrdimensionalen Fall häufig auch Response Surface Methodology (RSM) genannt [99].

Ein zweidimensionales Beispiel für die Regression stellt die Ausgleichskurve dar, wobei das eine Feature x auf der Abszisse liegt und das eine Target y auf der Ordinate (siehe Bild 13). Die einzelnen Feature-Target-Paare stellen die Datenpunkte dar, durch die die Ausgleichskurve läuft. Die Ausgleichskurve ist in diesem Beispiel das Metamodell und die Feature-Target-Paare die Trainingsdaten.

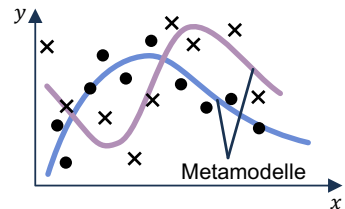


Bild 13: Prinzipielle Darstellung einer Regression am Beispiel von Ausgleichskurven.

In Gleichung 1 ist nach BOX & WILSON [123] und SIMPSON et al. [96] der funktionale Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable y (Target) und mehreren unabhängigen Variablen \vec{x} (Features) ausgedrückt. Der wirkliche Zusammenhang zwischen y und \vec{x} in Form der Antwortfunktion $f(\vec{x})$ ist normalerweise nicht bekannt. Durch die Variable ε wird der generelle Fehler in den Daten repräsentiert, z. B. ein Messfehler. Da der eigentliche Zusammenhang in den Daten unbekannt ist, kann mittels der Methoden des Data-Minings eine approximierte Antwortfunktion $g(\vec{x})$ berechnet werden, die durch Gleichung 2 repräsentiert wird. Bei der Regression entspricht die approximierte Antwortfunktion dem Metamodell. Der Fehler der Approximation und somit des Metamodells wird durch die Variable $\hat{\varepsilon}$ ausgedrückt. Das Fehlermaß $\hat{\varepsilon}$ wird im maschinellen Lernen auch als Score oder Performanz eines Metamodells bezeichnet [108]. Der Score beschreibt die Güte des Metamodells, wodurch einerseits die Vertrauenswürdigkeit des Metamodells ausgedrückt wird und andererseits kann sie zum Vergleich

verschiedener Metamodelle genutzt werden [P2]. Auf die Ermittlung des Scores bei der Regression wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen.

$$y = f(\underbrace{x_1, x_2, \dots, x_m}_{\vec{x}}) + \varepsilon \quad (1)$$

$$\hat{y} = g(\vec{x}) \pm \hat{\varepsilon} \quad (2)$$

- y - Abhängige Variable (Target)
- \vec{x} - Unabhängige Variablen (Features)
- ε - Genereller Fehler in den Daten
- \hat{y} - Berechneter Wert durch ein Metamodell
- $\hat{\varepsilon}$ - Score: Maß für die Güte des Metamodells

Durch die Regression wird der funktionale Zusammenhang der Daten erschlossen. Hierdurch kann ein tieferes Verständnis zum Einfluss der abhängigen Features auf das abhängige Target erlangt werden [96]. Für einen tieferen Einblick in die Grundlagen zur Regression wird auf FAHRMEIR et al. [122] verwiesen.

2.3.4.2 Validierung der überwachten Lernverfahren

Die Validierung der überwachten Lernverfahren erfolgt durch die Berechnung eines Scores nach dem Training des Metamodells. Zur Berechnung des Scores gibt es zwei verschiedene Bezugsmaße: das Resubstitutionsmaß und das Generalisierungsmaß [100]. Das Resubstitutionsmaß offenbart, wie gut ein Metamodell den Trainingsdatensatz abbilden kann. Zur Berechnung des Scores auf Basis des Resubstitutionsmaßes werden die Features des Trainingsdatensatzes in das Metamodell eingesetzt. Das Resubstitutionsmaß wird vor allem für die erste Einschätzung des Lernalgorithmus hinsichtlich der Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung genutzt. [100; 108]

Das Generalisierungsmaß stellt einen Indikator für die Fähigkeit des Lernalgorithmus zur Verallgemeinerung der Daten dar. Es beschreibt, wie gut ein Metamodell ein Feature-Target-Paar berechnen kann, das nicht Teil des Trainingsatzes war. In diesem Zug wird häufig auch von der Prognosefähigkeit des Metamodells gesprochen. Zur Berechnung des Scores auf Basis des Generalisierungsmaßes werden entweder neue Beobachtungen benötigt, oder es müssen statistische Validierungsmethoden angewendet werden. Bei den statistischen Validierungsmethoden müssen keine neuen Daten erhoben werden, sondern es werden dem Metamodell vor dem Training gezielt Feature-Target-Paare methodenabhängig vorenthalten. Durch das

Vorenthalten wird die Situation der neuen Dateneingabe simuliert, wodurch nachfolgend der Score abgeschätzt werden kann. [100; 124]

Die bekanntesten Vertreter der statistischen Validierungsmethoden sind der Holdout-Split und die 10-Fold Cross-Validation. Beim Holdout-Split wird ein fester Anteil aller Feature-Target-Paare des Trainingsdatensatzes dem Lernalgorithmus vorenthalten. Die Auswahl erfolgt i. d. R. zufällig und der Anteil der vorenthaltenen Daten liegt bei 30 %. Bei der 10-Fold Cross-Validation wird der Trainingsdatensatz in zehn gleiche Teile aufgeteilt¹⁵, wobei neun Teile für das Training des Metamodells und ein Teil zur Berechnung des Scores verwendet wird. Dieser Vorgang wird zehn Mal wiederholt, wobei immer ein anderer Teil zur Berechnung des Scores benutzt wird. Aus den zehn Scores wird abschließen der Mittelwert gebildet. Hierdurch wird jeder der zehn Teile einmal zur Berechnung des Scores verwendet. Für eine detaillierte Beschreibung der statistischen Validierungsmethoden wird auf WITTEN et al. [108] und TAN et al. [100] verwiesen. [100; 108]

Ein optimales Metamodell weist einen guten Score beim Resubstitutions- und beim Generalisierungsmaß auf. Falls der Score des Resubstitutionsmaßes gut und das Generalisierungsmaß schlecht ist, dann wird von Overfitting (dt. Überanpassung) gesprochen. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der Lernalgorithmus den Trainingsdatensatz „auswendig gelernt“ hat. Falls der Score des Resubstitutionsmaßes sehr gering ist, wird von Underfitting (dt. Unteranpassung) gesprochen. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der Lernalgorithmus zur Berechnung des Metamodells die Zusammenhänge im Trainingsdatensatz nicht ausreichend gut erfasst hat. In beiden Fällen ist die Vertrauenswürdigkeit der berechneten Werte des Metamodells als gering anzusehen. Um ein vertrauenswürdiges Metamodell zu erhalten, sollten beide Maße berücksichtigt werden. [100]

2.3.4.3 Score-Kennzahlen für die Regression

Die Quantifizierung des Scores bei der Regression erfolgt durch Kennzahlen mit unterschiedlicher Ausprägung. Die Kennzahlen haben gemeinsam, dass sie die bekannten Werte im Datensatz y_i (Feature-Target-Paare) den berechneten Werten durch das Metamodell \hat{y}_i gegenüberstellen. Für die Regression werden in der Literatur verschiedene Kennzahlen vorgeschlagen (siehe hierzu [108]). Drei wichtige Score-Kennzahlen sind in Tabelle 3 dargestellt.

¹⁵ Es können auch andere Teilungen vorgenommen werden, zehn hat sich nach WITTEN et al. [108] allerdings in den vergangenen Jahren bewährt.

Tabelle 3: Wichtige Score-Kennzahlen bei der Regression.

Bezeichnung	Gleichung	Ausprägung	Einheit	Autor(en)
Coefficient of Determination (CoD) oder R^2	$\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$	0 ... 1 größer ist besser	-	[125]
Mean absolute percentage error (MAPE) oder MA%E	$\frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ \hat{y}_i - y_i }{ y_i }$	0 % ... 100 % kleiner ist besser	-	[126]
Root-mean-squared error (RMSE)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}}$	0 ... ∞ kleiner ist besser	von y	[108]

y : Bekannter Wert im Datensatz,
 \hat{y} : Berechneter Wert durch das Metamodell,
 N : Anzahl der Feature-Target-Paare im Datensatz

Das Bestimmtheitsmaß (CoD oder R^2) ist eine Score-Kennzahl vor allem für lineare Regression. Je näher der Wert an 1 liegt, desto besser approximiert das Metamodell die Daten. Dieser Score ist in den Forschungsfeldern des maschinellen Lernens und der Statistik als Vergleichsmaß weit verbreitet. Allerdings wird auf den falschen Einsatz des Scores von verschiedenen Autoren hingewiesen [127; 125; 128]. Hauptkritikpunkt ist der Einsatz bei nichtlinearen Lernverfahren. Die Erweiterung des CoD von MOST & WILL [129] zum Coefficient of Prognosis (CoP) soll diese Schwächen beheben. Der CoP ist allerdings kaum verbreitet.

Der MAPE ist ein relatives Maß. Hierdurch können Berechnungen von Metamodellen mit verschiedenen Einheiten und Wertebereichen verglichen werden (z. B. $\hat{y} = 564 \text{ N/mm}^2 \pm 3,2 \%$). Laut KLEIJNEN [117] wird der Score als gut betrachtet, wenn er kleiner als 10 % beträgt. Der RMSE ist ein absolutes Maß in der Einheit des generalisierten Targets y (z. B. $\hat{y} = 785 \text{ N/mm}^2 \pm 45 \text{ N/mm}^2$). Für Produktentwickler ist der RMSE am einfachsten zu interpretieren, da es sich um ein gängiges Ingenieursmaß handelt.

2.3.4.4 Klassifikation

Der Unterschied zwischen der Regression und der Klassifikation liegt im Wertebereich des abhängigen Targets y . Im Vergleich zur Regression haben die abhängigen Targets y bei der Klassifikation einen diskreten, finiten Wertebereich (z. B. *wahr/falsch, rot/grün/blau* oder \bullet/\times), siehe Bild 14 rechts.

Mittels der Metamodelle können die Features \vec{x} einer Klasse zugeordnet werden. [100; 114]

Ein Beispiel aus der Produktentwicklung stellt die Klassifikation von Maschinenstörungen dar. Hierbei kann nach einer Sicherheitsabschaltung durch die Maschinensteuerung die Wartungsmaßnahme bestimmt werden. Zum Training des Metamodells werden in diesem Beispiel die Sensoraufzeichnungen vor einer Störung genutzt (Features), bei welchen zum Teil ein Schaden oder ein Fehlalarm verzeichnet wurde (Target: Wartungsmaßnahmen notwendig *ja/nein*). Das Metamodell kann nach dem Training auf Basis der Sensordatenaufzeichnungen bei einer Sicherheitsabschaltung entscheiden, ob Wartungsmaßnahmen notwendig sind, oder ob der Betrieb direkt fortgesetzt werden kann (Fehlalarm). Da jede Störung bzw. Wartungsmaßnahme an unterschiedlichen Sensoren der Maschine zu erkennen ist, muss für eine ausreichende Metamodell-Güte für jede Wartungsmaßnahme ein eigenes Metamodell trainiert werden. [P9]

Der funktionale Zusammenhang zwischen einer unabhängigen Variable y (Target) und mehreren unabhängigen Variablen \vec{x} (Features) entspricht bei der Klassifikation den Gleichungen 1 und 2 für die Regression. Ebenso sind für die Klassifikation das Resubstitutions- und Generalisierungsmaß, das Over- und Underfitting sowie die Validierungsmethoden aus den vorherigen Abschnitten gleichermaßen von Relevanz. Aufgrund der unterschiedlichen Skalierung des Wertebereichs des abhängigen Targets y , unterscheiden sich neben den Lernalgorithmen die Strategien zur Berechnung der Score-Kennzahlen. Auf diese wird im folgenden Abschnitt kurz eingegangen.

2.3.4.5 Score-Kennzahlen für die Klassifikation

Die wichtigen Score-Kennzahlen bei der Klassifizierung basieren auf der Konfusionsmatrix. Eine Konfusionsmatrix und die Visualisierung einer binären Klassifikationsaufgabe (\bullet/\times) ist in Bild 14 dargestellt. Generell wird in der

		Berechnete Klasse \hat{y}	
		Klasse \bullet	Klasse \times
Bekannte Klasse y	Klasse \bullet	True-Positives (TP)	False-Negatives (FN)
	Klasse \times	False-Positives (FP)	True-Negatives (TN)

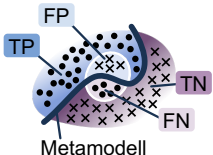


Bild 14: Konfusionsmatrix (links) und Visualisierung (rechts) für eine binäre Klassifikationsaufgabe (\bullet/\times) nach [P9; 100].

Konfusionsmatrix die Güte des Metamodells quantifiziert. Hierzu werden die mittels des Metamodells berechneten Klassenzuweisungen \hat{y} den bekannten Klassenzuweisung y aus dem Trainingsdatensatz gegenübergestellt. Die Anzahl von richtig und falsch zugeordneten Feature-Target-Paaren werden in der jeweiligen Zelle in der Konfusionsmatrix aufsummiert. Hierbei zählen die True-Positives (TP) und True-Negatives (TN) die jeweils durch das Metamodell richtig berechneten Zuordnungen (Klasse • und × in Bild 14). Die False-Positives (FP) und False-Negatives (FN) zählen jeweils die falsch berechneten Klassenzuordnungen. Für das Beispiel in Bild 14 bedeutet FP, dass das Metamodell auf Basis des Features \vec{x} die Klasse • auswählt, obwohl es laut dem Trainingsdatensatz der Klasse × angehört. [100; P9]

Vier wichtige Score-Kennzahlen bei der Klassifikation sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Genauigkeit Acc ist ein Verhältnis aus allen richtig berechneten Klassenzuordnungen (Summe der Diagonale in der Konfusionsmatrix) zu allen durchgeführten Klassenzuordnungen (Summe aller Einträge in der Konfusionsmatrix). Die Genauigkeit stellt ein geeignetes Vergleichsmaß dar, sofern alle Klassen von gleichem Interesse sind. [100] Häufiger kommt es allerdings vor, dass eine oder wenige Klassen wichtiger sind als die andere. Die größere Relevanz einer Klasse ist anhand des Beispiels zur Ermittlung von Wartungsmaßnahmen bei Maschinenstörungen ersichtlich. Hierin darf die Güte des Metamodells nur an der richtigen Zuordnung der wichtigen

Tabelle 4: Wichtige Score-Kennzahlen bei der Klassifikation nach [100].

Bezeichnung	Gleichung	Visualisierung (bzgl. Bild 14)	Ausprägung
Genauigkeit (engl. accuracy)	$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}$		} 0 ... 1 größer ist besser
Präzision (engl. precision)	$P = \frac{TP}{TP + FP}$		
Trefferquote (engl. recall)	$R = \frac{TP}{TP + FN}$		
F1-Wert	$F1 = 2 \cdot \frac{P \cdot R}{P + R}$ $= \frac{TP + TP}{TP + TP + FP + FN}$	-	

TP: True-Positives, TN: True-Negatives, FN: False-Negatives, FP: False-Positives

Klasse (TP) gemessen werden, d. h., dass eine Wartungsmaßnahme auch sicher als solche identifiziert wird. Ein offensichtlicher Schaden an der Maschine, der durch das Metamodell als Fehllalarm klassifiziert wird (FP), hätte bei der Wiederinbetriebnahme unvorhersehbare Folgen. [P9] Hierfür werden die drei Score-Kennzahlen Präzision P , Trefferquote R und der F_1 -Wert eingeführt. Der F_1 -Wert stellt den harmonischen Mittelwert aus Präzision P und Trefferquote R dar. Im \bullet/\times -Beispiel in Bild 14 beschreibt der Wert P , wie präzise das Metamodell die positive Klasse \bullet berechnen kann, wobei der Fehler des Metamodells bei der Zuordnung zur positiven Klassen \bullet hervorgehoben wird. Das Verhältnis drückt aus, wie viele der als positiv berechneten Fälle auch tatsächlich zur positiven Klasse \bullet gehören. Die Trefferquote R beschreibt, wie viele der insgesamt vorhanden positiven Klassen \bullet im Trainingsdatensatz durch das Metamodell richtig zugeordnet werden. [100]

2.3.5 Unüberwachte Lernverfahren

Bei den unüberwachten Lernverfahren steht die Identifikation von Korrelationen, Zusammenhänge, Tendenzen und Strukturen in den Daten im Vordergrund. Die identifizierten Muster sind hierbei nicht zwingend an ein Target gebunden [102], d. h. sie werden durch die Lernalgorithmen nur aufgedeckt. Im Gegensatz zu den Metamodellen beim überwachten Lernen, können die Muster beim unüberwachten Lernen nicht direkt genutzt werden. Der Nutzen entsteht erst im Post-Processing durch eine gründliche Validierung und Kontextualisierung. [100; 113]

Zu den wichtigsten Vertretern der unüberwachten Lernverfahren gehören die Visualisierung, die Assoziation, die Anomalieerkennung und das Clustern. Auf diese vier Lernverfahren wird in den folgenden Abschnitten kurz eingegangen und anhand eines Beispiels aus der Produktentwicklung belegt.

2.3.5.1 Visualisierung

Die Datenvisualisierung ermöglicht die Identifikation von Mustern und Beziehungen in den Daten, die bei der Betrachtung der Daten selbst unerkant bleiben. [114; 130] Die Identifikation der Muster in der grafischen Repräsentation der Daten erfolgt durch die menschliche Wahrnehmung, die zum visuellen Dekodieren der Daten genutzt wird (siehe Bild 15) [131].

In der Produktentwicklung ist die Visualisierung von Daten zur Kommunikation von Ergebnissen und Erkenntnissen die gängige Praxis, weshalb für einen tieferen Einblick zur Datenvisualisierung auf weiterführende Literatur verwiesen wird, z. B. CHEN et al. [130].

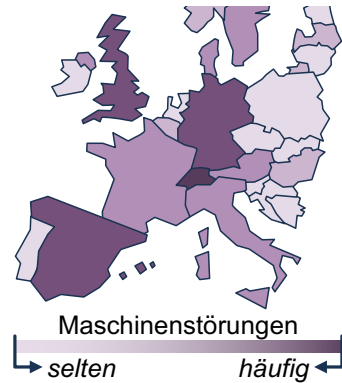


Bild 15: Prinzipielles Ergebnis einer Visualisierung am Beispiel einer Choroplethenkarte.

2.3.5.2 Anomalieerkennung

Die Anomalieerkennung wird eingesetzt, wenn der Fokus der Mustererkennung nicht auf der Gesamtheit der Daten liegt, sondern auf wenige Anomalien oder Ausreißer. Hierbei werden Feature-Target-Paare identifiziert, die sich von der Gesamtheit der restlichen Daten signifikant unterscheiden (siehe Bild 16). [100; 114]

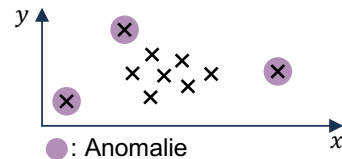


Bild 16: Prinzipielles Ergebnis einer Anomalieerkennung.

Drei generelle Anwendungsbeispiele für die Anomalieerkennung nach TAN et al. [100] und HAN et al. [114] sind:

- Kreditkartenbetrug: Erkennung von abweichendem Kaufverhalten zum Besitzer, hinsichtlich Ort, Art der Einkäufe und Häufigkeit der Benutzung.
- Spionage in Computersystemen: Neben klassischen Hackangriffen gibt es schleichende Infiltrationen, die durch die Erkennung von abweichendem Netzwerkverkehr und Leistungsaufnahmen der Systeme erkannt werden können.
- Gesundheitssystem: Erkennen von Impflücken durch Unregelmäßigkeiten in den Krankheitsraten.

In einem Beispiel aus der Produktentwicklung wird die Anomalieerkennung zur Identifikation fehlerhafter Flugzeugturbinen genutzt. Durch das unüberwachte Lernverfahren kann in verschiedenen Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitssensordaten erkannt werden, wenn eine Flugzeugturbinen vom Durchschnittsverhalten aller anderen signifikant abweicht. Hierbei erkennt der Lernalgorithmus selbständig die Sensoren, anhand derer er eine Flugzeugturbinen als signifikant abweichend betrachtet. Hierdurch können Flugzeugturbinen länger betrieben und trotzdem vor dem Ausfall gewartet werden. [132]

Neben der direkten Nutzung der Anomalieerkennung als Data-Mining-Methode, wird das Lernverfahren ebenso in der Datenvorbereitung genutzt, um Ausreißer in den Daten zu identifizieren und anschließend zu beseitigen [100]. Dies ist bei Data-Mining-Methoden notwendig, die die Ausreißer nicht selbstständig als Rauschen oder Ausnahmen behandeln können [114].

2.3.5.3 Assoziation

Die Assoziation oder Assoziationsanalyse wurde ursprünglich von AGRAWAL et al. [133] zur Warenkorbanalyse in Supermärkten entwickelt. Bis dato war die Suche nach Auffälligkeiten im Kaufverhalten von Kunden manuell und sehr aufwändig. Ziel der Suche war es, umsatzsteigernde Maßnahmen für das Sortiment anhand der gemeinsam gekauften Artikel eines Kunden abzuleiten. [133; 100]

In Bild 17 ist hierzu eine prinzipielle Darstellung einer Assoziation abgebildet. Zur Veranschaulichung der Assoziationsanalyse wird häufig das Windel-Bier-Phänomen aufgegriffen. Obwohl das Windel-Bier-Beispiel kaum wissenschaftlich belegt ist, zeigt es die Leistungsfähigkeit dieser Data-Mining-Methode sehr gut. [134; 135] Die Analyse der gemeinsam gekauften Artikel verschiedener Kunden eines großen amerikanischen Kaufhauses zeigte, dass falls am Freitag Windeln gekauft wurden, auch häufig Bier im Einkaufswagen war. Dies resultiert in folgender Assoziationsregel: $\{\text{Windeln, Freitag}\} \Rightarrow \{\text{Bier}\}$. Als Erklärung wird in der Literatur der Familienvater genannt, der vor dem Wochenende zum Einkaufen geschickt wird und neben den Windeln für sich selbst Bier einkauft. Klassische Marketingstrategien sehen zwischen Windeln und Bier keinen plausiblen

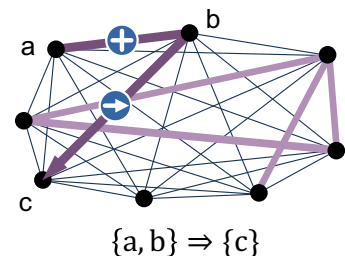


Bild 17: Prinzipielle Darstellung von Assoziationen.

Zusammenhang, die allerdings unerwartet in den Daten des Beispiels vorhanden waren. Das amerikanische Kaufhaus hat aufgrund dieser Assoziationsregel freitags zusätzlich Bier neben den Windeln platziert, wodurch der Umsatz stieg. [136; 137]

Generell identifiziert die Assoziationsanalyse starke Zusammenhänge oder Regelmäßigkeiten in einem Trainingsdatensatz. Das Ergebnis einer Assoziationsanalyse stellt verschiedene Assoziationsregeln dar, welche die starken Zusammenhänge oder Regelmäßigkeiten zwischen den Features \vec{x} des Datensatzes beschreiben. Eine Assoziationsregel besteht aus einer Prämisse (linke Seite) und einer Konklusion (rechte Seite) der Form [138; 95]:

$$X \Rightarrow Y \tag{3}$$




mit $X, Y \subset \Omega_{\vec{x}}$ und $X \cap Y \stackrel{!}{=} \emptyset$

Die Gleichung 3 beschreibt zwei Mengen X und Y , deren Elemente aus der Feature-Menge $\Omega_{\vec{x}}$ stammen (Spalten im Trainingsdatensatz), wobei die Elemente in der Prämisse X nicht zeitgleich in der Konklusion Y enthalten sein dürfen [138]. Der Pfeil „ \Rightarrow “ in der Assoziationsregel impliziert ein Ko-Ereignis, wodurch im Datensatz eine Korrelation zwischen X und Y angezeigt wird, d. h. falls bei einer Warenkorbanalyse X im Warenkorb vorhanden ist, kommt Y ebenso häufiger vor [100].

Zur Beurteilung einer Assoziationsregel stehen verschiedene Score-Kennzahlen zur Verfügung. Die wichtigsten sind der Support, die Confidence und der Lift. Die Kennzahlen basieren auf den relativen Häufigkeiten W der Mengen X und Y , die auf die Gesamtanzahl N von Zeilen im Trainingsdatensatz bezogen werden [109]. In der Warenkorbanalyse ist N die Anzahl aller erfassten Einkäufe. Die Definition und Visualisierung der Score-Kennzahlen ist in Tabelle 5 auf der nächsten Seite aufgetragen.

Die Support-Kennzahl oder Abdeckung beschreibt prozentual, in wie vielen Zeilen des Trainingsdatensatzes die Mengen X und Y gemeinsam vorkommen (relative Häufigkeit W). Der Support quantifiziert somit den Anteil des Trainingsdatensatzes, der durch eine Assoziationsregel abgedeckt wird. Im Windel-Bier-Beispiel entspricht das dem Anteil aller erfassten Einkäufe, in welchen am Freitag Windeln und Bier zusammen eingekauft wurde, z. B. in $0,3 = 30\%$ aller erfassten Einkäufe. Die Confidence-Kennzahl stellt die bedingte Wahrscheinlichkeit zwischen der Konklusion Y und der Prämisse X dar. Sie quantifiziert das prozentuale Verhältnis zwischen dem Support und der relativen Häufigkeit der Prämisse X . Die Confidence-Kennzahl

Tabelle 5: Wichtige Score-Kennzahlen bei der Assoziationsanalyse nach [133; 140; 141].

Bezeichnung	Gleichung	Ausprägung	Visualisierung	Nr.
Support (dt. Abdeckung)	$W(X \cup Y)$	0 ... 1 größer ist besser		(4)
Confidence (dt. Konfidenz)	$\frac{W(X \cup Y)}{W(X)}$	0 ... 1 größer ist besser		(5)
Lift (dt. Hebelwirkung)	$\frac{W(X \cup Y)}{W(X) \cdot W(Y)}$	0 ... ∞ $\neq 1$ ist besser		(6)

$W(E)$ ist als die relative Häufigkeit eines Ereignisses E definiert, die auf die Gesamtanzahl N von Zeilen im Trainingsdatensatz bezogen wird [109].

beschreibt ugs. die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Konklusion Y, wenn die Prämisse X in einer Zeile des Trainingsdatensatzes vorhanden ist. Im Windel-Bier-Beispiel bedeutet ein beispielhafter Confidence-Kennwert von 0,75, dass bei 75 % aller Windel-Einkäufe am Freitag auch Bier gekauft wurde. Die Lift-Kennzahl stellt den Confidence-Kennwert der Assoziationsregel dem Support der Konklusion Y gegenüber. Ein Lift ungleich Eins deutet auf einen wahrscheinlich signifikanten Zusammenhang zwischen der Prämisse X und der Konklusion Y hin. Ein Lift kleiner Eins weist auf einen Zusammenhang zur negierten Konklusion Y hin, d. h. $X \Rightarrow \bar{Y}$. Die Lift-Kennzahl wird auch „Hebelwirkung“ oder „Interessenfaktor“ genannt, da sie den Häufigkeitsfaktor für das Eintreten der Assoziationsregel in Bezug zur Grundgesamtheit ausdrückt. Im Windel-Bier-Beispiel bedeutet ein beispielhafter Lift von 3,2, dass ein Windelkäufer am Freitag 3,2-mal häufiger auch Bier kauft, d. h. die Wahrscheinlichkeit ist 220 % höher als bei einem Durchschnittskunden (positive Korrelation). [110; 100; 139]

In einem Beispiel im Kontext der Produktentwicklung wird die Assoziationsanalyse zur orts aufgelösten Identifikation von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen geometrischen Fertigungsabweichungen einer Charge von Turbinenschaufeln eingesetzt. SHAHBAZ et al. [142] teilt die geometrischen Dimensionen (Länge, Breite, Höhe) einer Turbinenschaufel des Unternehmens Rolls-Roys in diskrete Abschnitte ein. Somit wird der Ort auf der sehr unregelmäßigen Oberfläche der Turbinenschaufel schachbrettartig beschrieben. Jedem Feld auf dem Schachbrett ist ein Nennmaß und eine Toleranz zugeordnet. Da die Assoziationsanalyse nur diskrete Daten analysieren kann, wird das Toleranzfeld in elf Kategorien unterteilt, von der unteren bis

zur oberen Toleranzgrenze. Durch Messdaten aus der Qualitätssicherung der Charge, die das Ist-Maß der Turbinenschaufeln quantifizieren, kann jeder Ort auf der gefertigten Turbinenschaufel einer der elf Abweichungskategorien zugeordnet werden. Regeln, die die anschließende Assoziationsanalyse hervorbringt sind zum Beispiel: Falls der zweite Abschnitt in Richtung der Höhe der Turbinenschaufel das Nennmaß erreicht, dann gibt es häufig zwei Abschnitte in Richtung der Breite und Tiefe der Turbinenschaufel, die das obere Grenzmaß erreichen. Diese Assoziationsregel kann an dieser Stelle genutzt werden, um die orts aufgelösten Toleranzangaben im geometrischen Entwurf der Turbinenschaufel zu verbessern. Ebenso manifestiert diese Assoziationsregel eine Randbedingung des Fertigungsverfahrens. [142]

2.3.5.4 Clustern

Bei der Clusteranalyse werden die Features \vec{x} des Trainingsdatensatzes in eine vorgegebene Anzahl n_C von Gruppen aufgeteilt [114]. Die Gruppierung in n_C Gruppen erfolgt aufgrund der Ähnlichkeit oder Gleichheit der Features [114]. Die größte Herausforderung bei einer Clusteranalyse ist die Abschätzung der Gruppenanzahl n_C , sofern sie nicht implizit durch den Anwendungskontext bekannt ist [143]. Durch das Clustern können somit vorher nicht bekannte Ähnlichkeiten oder Gleichheiten in den Daten in Form von Gruppenzuordnungen offenbart werden (siehe Bild 18). Das Clustern wird als das unüberwachte Pendant der Klassifikation angesehen. Falls ein Trainingsdatensatz einer Klassifikationsaufgabe kein Target aufweist, erfolgt häufig vor der Klassifikation eine Clusteranalyse. [144]

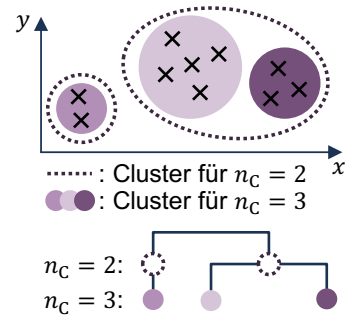


Bild 18: Prinzipielles Ergebnis einer Clusteranalyse als Plot (oben) und Dendrogramm (unten).

WALLIS et al. [145] zeigen den Einsatz der Clusteranalyse mit anschließender Klassifikation im Bereich der Produktentwicklung und Fertigungsprozessplanung. Ziel dieser Forschungsaktivitäten ist die halbautomatische Identifikation von notwendigen Fertigungsprozessen auf Basis der produktbeschreibenden Daten einer Baugruppe. Das Ziel basiert auf der Annahme, dass ähnliche Produkte auch durch ähnliche Fertigungsprozesse hergestellt werden. Die Trainingsdaten werden aus einem PDM-System bezogen, das die produktbeschreibenden Daten und die zugehörigen Fertigungsprozesse

verwaltet. Die erste Clusteranalyse erfolgt mit den produktbeschreibenden Daten, wie zum Beispiel die Einträge in der Stückliste oder verschiedene Produktmerkmale und -eigenschaften wie Abmessungen oder Masse. Die zweite Clusteranalyse erfolgt mit den Prozessdaten, die hauptsächlich durch die Montagetätigkeiten beschrieben werden. Abschließend wird die ursprüngliche Verknüpfung zwischen Produkt- und Prozessdaten im PDM-System genutzt, um ein Metamodell zu trainieren, das die Produkt-Cluster den Prozess-Clustern zuordnen kann. Hierdurch können neue Produkte den bestehenden Produkt-Clustern (Produktkategorien) zugeteilt und halbautomatisch die passenden Prozess-Cluster zugeordnet werden. [145]

2.3.6 Zwischenfazit und Diskussion zur datengetriebenen Produktentwicklung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde der Hintergrund und die wissenschaftlichen Grundlagen zur datengetriebenen Produktentwicklung vorgestellt. Die hypothesengetriebene Datenanalyse repräsentiert das klassische, empirische Vorgehen der Ingenieure, wobei Daten gezielt zur Bestätigung oder Widerlegung einer Hypothese in numerischen und experimentellen Versuchen erhoben und ausgewertet werden. Die hypothesengetriebene Analyse von Daten ist aus diesem Grund nach wie vor ein wichtiges Validierungswerkzeug der Produktentwicklung. Durch die voranschreitende Digitalisierung der Produktentwicklung werden heutzutage allerdings weit mehr Daten in allen Phasen des Produktlebenszyklus über ein Produkt erhoben (siehe Abschnitt 2.2.2). Als Folge stehen den Produktentwicklern sehr viele Daten zu einem Produkt zur Verfügung.

Die Methoden der datengetriebenen Analyse können dazu genutzt werden, um Muster in den bestehenden Daten zu identifizieren, die als Erkenntnis zu Produktoptimierungen genutzt werden können. DAPP et al. [26] spricht aufgrund des großen Potentials in Daten vom „digitalen Gold“, dem „Rohstoff des 21. Jahrhunderts“ und dem „neuen Öl“. Die vorgestellten Vorgehensmodelle und Data-Mining-Methoden zur Mustererkennung bieten die Möglichkeit, produktbeschreibende Daten direkt wiederverwenden zu können. Die Abschnitte 2.3.3, 2.3.4 und 2.3.5 sind sehr ausführlich gehalten, um einerseits das Leistungsspektrum der maschinellen Lernmethoden darzustellen und andererseits für die große Anzahl der Rand- und Rahmenbedingung der datengetriebenen Analyse zu sensibilisieren. Die vorgestellten Grundlagen sowie die angegliederten Anwendungsbeispiele zeigen, dass zur

erfolgreichen Identifikation von Wissen in Daten Expertenwissen verschiedener Domänen notwendig ist.

In den letzten Jahren wurde national und international im thematischen Umfeld der datengetriebenen Produktentwicklung geforscht. Die meisten Forschungsaktivitäten hierzu entsprangen dem Forschungsfeld des Produktlebenszyklusmanagements, wobei hauptsächlich die gezielte Rückführung von Daten und Informationen aus der Produktnutzungsphase für die Entwicklung neuer Produktgenerationen¹⁶ im Vordergrund stand. ABRAMOVICI et al. [148] beschreiben einen PLM-basierten Ansatz, wie Daten von Sensoren, Umgebungsbedingungen, Störungen, Wartungsmaßnahmen einer Maschine von unterschiedlichen Kunden an den Hersteller zurückgeführt werden können. Ein Wissensingenieur¹⁷ setzt Data-Mining-Methoden ein, um die erhobenen Daten als Diagnosemodelle zu generalisieren. Die Diagnosemodelle werden anschließend zur Fehlermöglichkeits- und Fehlereinflussanalysen (FMEA) genutzt, um Verbesserungsmaßnahmen für die neue Produktgeneration abzuleiten. [148] Generell fokussieren die Forschungsarbeiten von ABRAMOVICI auf der Rückführung, Strukturierung und Nutzung von Daten bestehender Sensoren einer Maschine für den Entwicklungsprozess neuer Produktgenerationen, siehe [149; 19; 150].

Im DFG Sonderforschungsbereich SFB 653 mit dem Titel „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus – Nutzung vererbbarer, bauteilinhärenter Informationen in der Produktionstechnik“ wurde im Hinblick auf Industrie 4.0 und IoT die Entwicklung, Fertigung und Wartung von intelligenten Bauteilen erforscht. Der Fokus hierin lag insbesondere auf dem fertigungstechnischen Aspekt zur Integration von verschiedenen Sensoren in die Bauteile. [151] Speziell im Teilprojekt N4 mit dem Titel „Gestalt evolution durch algorithmisierte Informationsrückführung aus dem Produktlebenszyklus“ werden datengetriebene Ansätze eingesetzt, um neue Produktgenerationen an veränderte Nutzungsbedingungen anzupassen. In Bild 19 ist der Prozess der technischen Vererbung nach LACHMAYER et al. [152] dargestellt, die zur Vererbung von Nutzungsinformationen an neue Produktgenerationen die algorithmisierte Informationsrückführung einsetzen. Die proaktive Veränderung der Produkte anhand der wirklich resultierenden Beanspruchungen nennt GOTTWALD [153] die Designevolution. Im Vergleich zu den Forschungsaktivitäten von ABRAMOVICI werden Bauteile gezielt mit Sensoren

¹⁶ Der Begriff „Produktgenerationsentwicklung“ wurde von ALBERS et al. [146] und BURSAC [147] eingeführt.

¹⁷ Die Rolle des Wissensingenieurs wird in Abschnitt 2.4.4.1 diskutiert.

hergestellt, um die Nutzungsbedingungen des Produktes zu erfassen (gentelligente Bauteile). [154; 153]

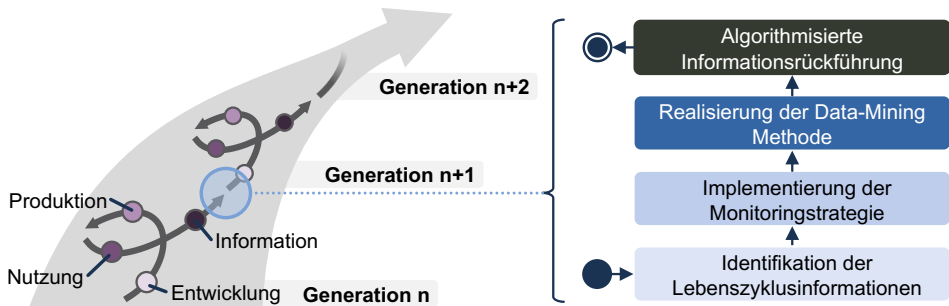


Bild 19: Der datengetriebene Ansatz von LACHMAYER und GOTTWALD zur technischen Vererbung durch gentelligente Bauteile nach [152; 153].

Einige internationale Aktivitäten im Forschungsfeld der datengetriebenen Produktentwicklung sind im Review-Paper von HARDING et al. [155] zusammengefasst: HARDING selbst forscht intensiv am Einsatz der datengetriebenen Ansätze im Umfeld der Produktion, um Wissen aus der Fertigung zu akquirieren und in der Produktentwicklung nutzbar zu machen (z. B. [142; 156]). GIESS et al. [157] stellen einen datengetriebenen Ansatz zur Identifikation von Relationen zwischen verschiedenen Wuchtungs- und Betriebschwingungsmessungen während der Montage von Gasturbinen vor, um den Entwurf und den Entstehungsprozess der nächsten Produktgeneration zu verbessern. ISHINO & JIN [158] zeigen, wie datengetriebenes Erfahrungswissen in CAD-Modellen durch die Beobachtung der Konstrukteure beim Entwerfen akquiriert werden kann. Neben der Akquisition des Erfahrungswissens wird auch das Verhalten der Konstrukteure beim Konstruieren mit CAD-Systemen hierdurch untersucht. [158]

ROMANOWSKI & NAGI [159] stellen ein Konstruktionsassistenzsystem konzeptionell vor, das die Wiederverwendung von Daten aus dem Produktlebenszyklus ermöglicht. In Bild 20 sind die Komponenten des Assistenzsystems dargestellt. Ein Fokus des Assistenzsystems lag in der Integration von heterogenen und verteilten Daten, die zum Teil in Papierform vorlagen. Die Nutzung des Assistenzsystems erfolgt in der gewohnten Umgebung des Konstrukteurs, der Bauteile im CAD-System aus einem Baukasten auswählt, wozu ihm durch den Data-Mining-Manager einerseits relevante Dokumente und Daten und andererseits Konstruktionsregeln bereitgestellt werden. [159] Der Fokus der Wiederverwendung der Daten aus dem Produktlebenszyklus

lag vor allem auf den Stücklisten vorangegangener Produktgenerationen. Hierzu wurde ein datengetriebener Ansatz zur Generalisierung von Stücklisten [160] und eine Methode zur Berechnung eines Vergleichsmaßes zweier Stücklisten entwickelt [161].

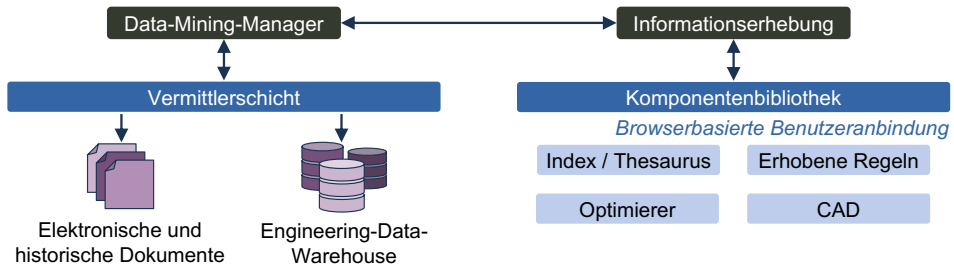


Bild 20: Das Data-Mining-basierte Konstruktionsassistenzsystem nach [162].

In diesem Abschnitt wurden die Grundlagen zur datengetriebenen Produktentwicklung und der Nutzen beim Einsatz der datengetriebenen Ansätze sehr ausführlich vorgestellt, um für die Komplexität, die verschiedenen Rahmen- und Randbedingungen der maschinellen Lernmethoden zu sensibilisieren. Anhand der vorgestellten Anwendungsbeispiele wird ersichtlich, dass es verschiedene Anwendungsszenarien gibt, um erfolgreich produktbeschreibenden Daten aus den Lebensphasen für neue Produktgenerationen zu nutzen. Hierbei konzentrieren sich die meisten Forschungsaktivitäten, national wie international, auf den Kontext des Fertigungsprozesses und des Produktlebenszyklusmanagements. Alle Szenarien haben gemein, dass im Speziellen bei der Vorbereitung der produktbeschreibenden Daten und der nachfolgenden Kontextualisierung der Muster Expertenwissen aus verschiedenen Domänen erforderlich war. Zur Akquise und Bereitstellung von Expertenwissen werden im Umfeld der Produktentwicklung sehr häufig Assistenzsysteme eingesetzt, welche dem Forschungsfeld der wissensbasierten Produktentwicklung zugeordnet werden. Im nächsten Abschnitt werden die Grundlagen zu Wissen und Assistenzsysteme thematisiert.

2.4 Wissen und Assistenzsysteme in der Produktentwicklung

Wissen spielt in der heutigen Gesellschaft eine bedeutende Rolle. Neben „Arbeit, Einkommen und Ansehen“ ist Wissen zu einem Statussymbol unserer Informations- und Wissensgesellschaft geworden [111]. Im klassischen

industriellen Umfeld wurde Wissen neben der Arbeitskraft, dem Kapital und den Boden als natürliche Ressource bereits viel früher als weiterer Produktions- und Wettbewerbsfaktor identifiziert. Ab den 1950er Jahren wird das Wissen der Mitarbeiter eines Unternehmens als der dominierende Erfolgsfaktor angesehen. [163] Die aktuelle Grundlagenliteratur im Umfeld der Produktentwicklung [10] und dem Wissensmanagement [21] vertreten die gleiche Aussage. Neuere Wissenschaftszweige, wie die der Informationstechnologie, sehen heutzutage Informationen [164] oder Daten [165; 166] als vierten Produktionsfaktor.

Diese Darstellung der Literatur zeigt, dass den Begriffen Daten, Informationen und Wissen im Umfeld der Industrie und Forschung von jeder Fachdomäne ein anderer Stellenwert beigemessen wird. Neben Daten nehmen Wissen und dessen operativer Einsatz in Assistenzsystemen in der vorliegenden Arbeit eine zentrale Rolle ein. Deshalb wird der Kontext von Wissen und Assistenzsystemen in der Produktentwicklung in den folgenden Abschnitten näher vorgestellt.

2.4.1 Taxonomie des Wissens

Die Begriffe Daten, Informationen und Wissen werden umgangssprachlich sehr weitläufig und häufig synonym verwendet. Auch in der vorliegenden Arbeit wurden bisher die drei Begriffe nicht scharf voneinander getrennt, welche im Folgenden genauer definiert werden. Im Wissensmanagement [21] und der wissensbasierten Produktentwicklung [167; 168] hat sich hierzu die Taxonomie des Wissens in Anlehnung an die Wissenstreppe nach NORTH etabliert (siehe Bild 21).

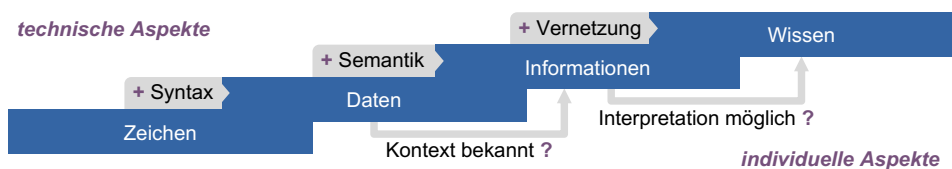


Bild 21: Die ersten vier Stufen der Wissenstreppe nach NORTH [21] und die Evolution nach AHMED et al. [169].

Nach NORTH [21] bilden Zeichen die unterste Stufe der Wissenstreppe (z. B. „N“, „/“, „8“). Durch die Syntax können objektive Fakten als Daten aus den Zeichen gebildet werden (z. B. „Nm“, „168“). Durch die Semantik wird den Daten ein Bedeutungskontext zugeordnet, wodurch sie zu Informationen

werden (z. B. „Das Drehmoment ist 168 Nm.“). Aus Informationen wird durch die gezielte Vernetzung Wissen (z. B. „Das Drehmoment von 168 Nm beschädigt das Bauteil.“). Wissen ist von großem Wert, da hierdurch Vergleiche durchgeführt werden können (z. B. „Wenn das Drehmoment größer als 150 Nm ist, dann wird das Bauteil beschädigt.“). [21; 168]

Die Wissenstreppe nach NORTH definiert die Begriffe Zeichen, Daten, Informationen und Wissen generell und grenzt sie voneinander ab. In der Produktentwicklung ist das Wissen häufig auf die Individuen konzentriert, wo es zur Lösung von Problemstellungen eingesetzt wird. Das Wissen bildet im Ingenieursalltag somit die Grundlage für fast alle Tätigkeiten. [170] Die Evolution bis zum operativen Wissen ist laut AHMED et al. [169] zudem sehr personenbezogen, da neben den technischen Aspekten auch die individuellen Fähigkeiten und Erfahrungen der Produktentwickler eine Rolle spielen, um den jeweiligen Schritt auf die nächste Stufe vollziehen zu können. Die Evolution von den Daten zu den Informationen hängt demnach davon ab, ob dem Produktentwickler der Kontext der Daten bewusst ist und ihn einschätzen kann. Wenn der Produktentwickler den Kontext der Daten kennt, haben die Daten für den Produktentwickler eine Bedeutung und sind somit Informationen. Der Übergang von den Informationen zum Wissen hängt von der Kompetenz des Produktentwicklers zur Interpretation der Informationen ab. Je qualifizierter ein Produktentwickler ist, desto nützlicher wird sich das erworbene Wissen erweisen. Mit der kontinuierlichen und richtigen Vernetzung von Informationen steigt die Erfahrung der Produktentwickler. [169]

Im Umfeld der Produktentwicklung ist das Wissen häufig personenbezogen [171], weshalb die Frage nach dem Wissenstransfer Rechnung getragen werden muss. Im nächsten Abschnitt wird deshalb auf den Wissenstransfer in der Produktentwicklung genauer eingegangen.

2.4.2 Wissenstransfer in der Produktentwicklung

WARTZACK [6] unterteilt das Wissen in der Produktentwicklung generell in theoretisches Fachwissen und heuristisches Erfahrungswissen (z. B. Maßnahmen zur Lärmreduzierung). Das Fachwissen wird zusätzlich in Fakten- (z. B. gesetzliche Vorgaben) und Methodenwissen (z. B. Akustiksimulation) unterteilt. [6] Das theoretische Fachwissen ist häufig expliziter Natur und kann demnach einfacher kommuniziert werden. Im Gegensatz dazu steht das implizite Erfahrungswissen, dessen Formalisierung sich als schwieriger erweist. [172]

Für die tägliche Arbeit in der Produktentwicklung ist im Speziellen das personengebundene Erfahrungswissen sehr wichtig [33; 37]. Für Unternehmen ist daher essentiell, dass personengebundenes Wissen kontinuierlich weitergegeben und geteilt wird. In den 1990er Jahren erforschten NONAKA und TAKEUCHI hierzu, wie Wissen im Unternehmen entsteht und geteilt wird. Hierbei entwickelten sie die Wissensspirale, welche heute auch SECI-Modell¹⁸ genannt wird. Hierbei wird durch Sozialisation (implizit → implizit), Externalisierung (implizit → explizit), Kombination (explizit → explizit) und Internalisierung (explizit → implizit) personenbezogenes (Individuum) und allgemein im Unternehmen verfügbares Wissen (Organisation) iterativ erzeugt, weitergegeben und geteilt. [173; 174]

Nach TURKI & ALBERS [177] gibt es bei der Weitergabe von Erfahrungswissen allerdings verschiedene Barrieren: Neben „Mangel an Vertrauen“, „Wissen ist Macht“ und „mangelndes Sozialkapital“ werden der „Zeitmangel“, die „starrten Organisationsstrukturen“, „räumliche Distanz“ und „mangelnde Kommunikationskompetenz“ als häufigste Barrieren bei der Weitergabe von Erfahrungswissen genannt [177]. Neben der Reduzierung von Barrieren bei der Weitergabe von Wissen gibt es verschiedene Intentionen für die Etablierung des Wissensmanagements im Unternehmen (siehe hierzu insbesondere VDI 5610-1:2009-03 [167]). Die ProWis-Studie „Prozessorientiertes und -integriertes Wissensmanagement in KMU“ des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik im Jahr 2011 [176] zeigt die größten Herausforderungen im Umgang mit Wissen im Unternehmen. Ein Auszug aus der Studie ist in Bild 22 dargestellt, die direkt die Intentionen

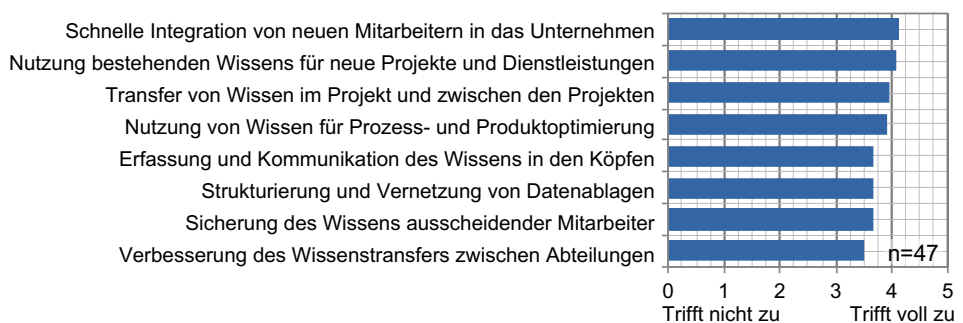


Bild 22: Ein Auszug aus den am häufigsten genannten Herausforderungen in der ProWis-Studie beim Umgang mit Wissen im Unternehmen nach [175; 176].

¹⁸ SECI steht für Socialization, Externalization, Combination, Internalization

der Unternehmen zur Einführung des Wissensmanagements widerspiegeln. Zusammenfassend zeigt die Studie, dass der Wissenstransfer von erfahrenen zu unerfahrenen Ingenieuren, der Wissenstransfer zwischen den Projekten und Abteilungen sowie die bessere Nutzung von bestehenden Wissensquellen die größten Herausforderungen in Unternehmen darstellen.

Ist das Wissensmanagement nicht etabliert und reicht die Erfahrung zur Lösung von Problemstellungen nicht aus, müssen die Produktentwickler auf andere Wissensquellen ausweichen. Hierzu kommen im Unternehmen i. d. R. IT-gestützte Systeme unterschiedlicher Art zum Einsatz, die Wissens- und Informationsobjekte als Wissensquelle verwalten. Die Begriffe „Wissens- und Informationsobjekt“ wurden von GRONAU & FRÖMING [178] eingeführt und von LUFT & WARTZACK [179] im Kontext der Produktentwicklung genauer definiert. Die Objekte bestehen aus drei wesentlichen Elementen: Inhalt (z. B. Berechnung der Schallabstrahlung einer Maschine), Repräsentationsart (z. B. Microsoft® Excel-Dokument) und Ablage- oder Speicherort (z. B. auf dem Netzwerklaufwerk der Abteilung) [179]. In der vorliegenden Arbeit zählen demzufolge die produktbeschreibenden Daten (Begriffskontext: Produktdatenmanagement, siehe Abschnitt 2.2.4) zu den Informationsobjekten (Begriffskontext: Wissensmanagement). Die Studie von ALBERS et al. und BURSAĆ in Bild 23 zeigt, welche IT-gestützten Systeme zur Verwaltung der Wissens- und Informationsobjekte häufig in der industriellen Praxis eingesetzt werden.

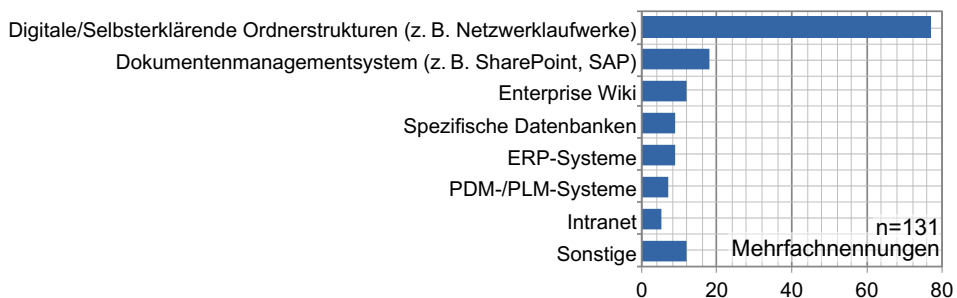


Bild 23: Management von Wissens- und Informationsobjekten im Unternehmen nach [180; 147].

In Bild 23 ist zu erkennen, dass Unternehmen am häufigsten digitale Ordnerstrukturen zur Verwaltung der Wissens- und Informationsobjekte einsetzen. Dies impliziert, dass trotz der Einführung von PDM-, PLM- und ERP-Systemen in den Unternehmen die Wissens- und Informationsobjekte

als Dokumente verwaltet werden [147]. Das bedeutet, dass auch ein Großteil der produktbeschreibenden Daten in Form von Dokumenten ohne IT-Unterstützung verwaltet werden (siehe hierzu das Fazit zum Produktdatenmanagement in Abschnitt 2.2.5).

Zusammenfassend wurde in diesem Abschnitt der Bedarf der Produktentwickler an Erfahrungswissen gezeigt und die häufigen Barrieren bei der Weitergabe erläutert. Es zeigt sich, dass die IT-gestützten Werkzeuge zur Unterstützung des Wissensmanagements dazu genutzt werden, um Wissens- und Informationsobjekte in digitalen Ordnerstrukturen abzulegen. Diese Tatsache deckt sich mit der Vorgehensweise bei der Verwaltung von produktbeschreibenden Daten (siehe Abschnitt 2.2.5). Wie im Zwischenfazit in Abschnitt 2.3.2.4 dargestellt, müssen die Daten für die datengetriebene Produktentwicklung in strukturierter Form vorliegen. Aufgrund der bisher dokumentenzentrierten Verwaltung der Wissens- und Informationsobjekte im Unternehmen werden diese in der datengetriebenen Produktentwicklung kaum genutzt.

Darüber hinaus zeigt das generische Vorgehensmodell zur systematischen Analyse von Daten (siehe Bild 9 in Abschnitt 2.3.2.1), dass Erfahrungswissen im Anwendungskontext notwendig ist. Zur Akquisition, zur Formalisierung und zur Bereitstellung von Domänenwissen eignen sich wissensbasierte Assistenzsysteme [181]. Durch die Etablierung von wissensbasierten Assistenzsystemen können z. B. die in diesem Abschnitt vorgestellten Barrieren und Herausforderungen beim Wissenstransfer überwunden werden [182]. In den folgenden Abschnitten wird deshalb näher auf den operativen Nutzen und die Umsetzung von Assistenzsystemen in der Produktentwicklung eingegangen.

2.4.3 Prinzipielle Architektur wissensbasierter Assistenzsysteme

Wissensbasierte Assistenzsysteme werden in den vergangenen Jahren in der Literatur unter den Begriffen „Expertensysteme“, „wissensbasierte Systeme“ oder „Assistenzsysteme“ diskutiert¹⁹ [183; 33; 95], wobei sich diese Varianten häufig nur in ihrem Anwendungskontext oder Wissensquelle unterscheiden. Im Vergleich zu konventionellen IT-Werkzeugen haben wissensbasierte Assistenzsysteme, neben den normalen Algorithmen, auch spezielle

¹⁹ In der engl. Literatur als assistance systems, engineering workbenches oder expert systems bezeichnet.

Algorithmen zur Problemlösung und Anwendung von explizitem Wissen. Die wichtigsten Komponenten wissensbasierter Assistenzsysteme sind in Bild 24 dargestellt.

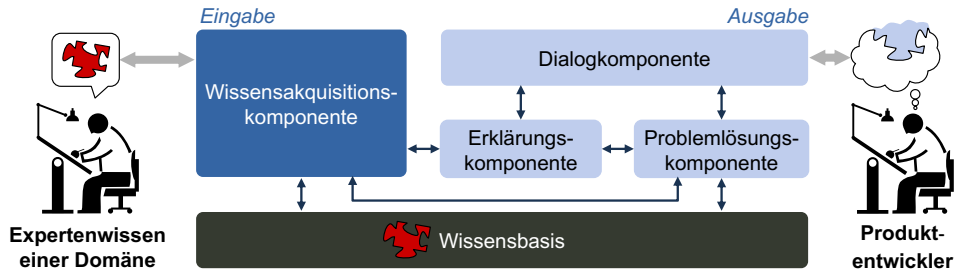


Bild 24: Die prinzipielle Architektur wissensbasierter Assistenzsysteme nach [183; 33].

Nach RAULEFS [183] und SPUR & KRAUSE [33] besteht die prinzipielle Architektur von wissensbasierten Assistenzsystemen aus fünf Komponenten. Neuere Grundlagenliteratur zeigt, dass sich die prinzipielle Architektur seit den 1980er Jahren nicht verändert hat [95]. Die übergeordnete Aufgabe eines wissensbasierten Assistenzsystems besteht darin, den Transfer von Wissen einer Wissensquelle zum Produktentwickler zu ermöglichen (siehe Bild 24). Die Wissensakquisitions-komponente kommuniziert hierzu mit dem Experten (I), einem Wissensingenieur (II) oder führt die Akquisition selbst (III) durch, um Domänenwissen zu akquirieren und in der Wissensbasis zu formalisieren [184]. KURBEL [185] bezeichnet die drei Ausprägungen als direkte (I), indirekte (II) und automatische (III) Wissensakquisition. Die Wissensbasis repräsentiert das akquirierte Domänenwissen. Sie bildet das Fundament eines wissensbasierten Assistenzsystems. Häufig haben wissensbasierte Assistenzsysteme mehrere Wissensbasen, die auf eine Wissensdomäne oder auf eine Art der Wissensrepräsentation spezialisiert sind. Die Dialogkomponente stellt häufig eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) dar, die mit dem Benutzer des Assistenzsystems interagiert. Der Produktentwickler kann hierin seine Problemstellung beschreiben und erhält Lösungen und die zugehörigen Erklärungen. Die Lösung zu einer Problembeschreibung ermittelt die Problemlösungskomponente, die hierzu auf das Wissen in der Wissensbasis zurückgreift. Durch die Erklärungskomponente wird dem Benutzer die Problemlösung plausibilisiert. [183; 33]

Bevor ein wissensbasiertes Assistenzsystem im Unternehmen eingesetzt werden kann, muss das Wissen initial akquiriert und im laufenden Betrieb aktualisiert werden. Im folgenden Abschnitt wird deshalb auf die

Umsetzung und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme sowie die operative Ausführung der Wissensakquisition und -repräsentation näher eingegangen.

2.4.4 Umsetzung und Einführung von wissensbasierten Assistenzsystemen

Die Grundlagenliteratur beschäftigt sich häufig mit dem konzeptionellen Aufbau und den methodischen Grundlagen von wissensbasierten Assistenzsystemen, hierzu wird auf [37; 95; 185] verwiesen. Im Speziellen wird in dieser Arbeit im Folgenden auf wichtige Aspekte bei der Umsetzung und Einführung von wissensbasierten Assistenzsystemen im Unternehmen eingegangen.

In der Literatur werden verschiedene Vorgehensmodelle definiert, um wissensbasierte Assistenzsysteme zu entwickeln und umzusetzen. Die VDI 2222-1:1997-06 [46] schlägt ein Vorgehen in vier Schritten vor, wobei der Fokus auf der Erhebung und Formalisierung des Wissens liegt. Die informationstechnische Umsetzung des wissensbasierten Assistenzsystems, das i. d. R. die meiste Zeit in Anspruch nimmt, ist in einem Schritt zusammengefasst. Die Inbetriebnahme, Ausrollung und Wartung werden hierbei nicht berücksichtigt. Mit der Richtlinie VDI 5610-2:2017-05 [168] wurden die Forschungsarbeiten der letzten Jahre im Umfeld des Wissensmanagements in der Produktentwicklung in eine allgemeine Vorgehensweise zur Entwicklung und Einführung von wissensbasierten Assistenzsystemen überführt. Die Richtlinie definiert hierzu vier Phasen, die durch ein übergeordnetes Konzept für *Sicherheit und Wissensschutz* begleitet werden [168]:

1. *Planung:*
 - Organisation des Projektes
 - Identifikation des relevanten Wissens
2. *Entwicklung:*
 - Wissenserhebung
 - Wissenanalyse und -strukturierung
 - Wissensimplementierung
3. *Test:*
 - Validierung und Freigabe

4. *Betrieb:*

- Einführung und personelle Aspekte
- Verwaltung, Pflege und Aktualisierung des Wissens

Die vier Phasen zur Entwicklung und Einführung von wissensbasierten Assistenzsystemen zeigen, dass die Wissensquelle bereits in der Planungsphase identifiziert und festgelegt wird [168]. Hierdurch wird in einem frühen Stadium folgende Frage beantwortet: „Was soll das wissensbasierte Assistenzsystem leisten?“ Die Leistungsfähigkeit eines wissensbasierten Assistenzsystems wird implizit durch die Restriktionen bei der informationstechnischen Umsetzung der Wissensbasis beschränkt. Wissen muss zum einen akquiriert, formalisiert und anschließend informationstechnisch repräsentiert werden, d.h. der Transfer und die Transformation in eine maschinenlesbare Repräsentationsform (siehe hierzu Abschnitt 2.4.2). Nur wenn das Wissen aus der Wissensquelle akquiriert und informationstechnisch repräsentiert werden kann, wird der Einsatz eines wissensbasierten Assistenzsystems einen Mehrwert bringen und Akzeptanz schaffen. In den folgenden Abschnitten wird aus diesem Grund auf wichtige Aspekte zur Entwicklung wissensbasierter Systeme näher eingegangen.

2.4.4.1 Der Wissensakquisitionsprozess

Bei der Umsetzung und anschließenden Pflege von wissensbasierten Assistenzsystemen im Betrieb ist vor allem die Wissensakquisitionskomponente von großer Bedeutung [95]. Aus diesem Grund wird die Wissensakquisition von vielen Autoren seit den 1970er Jahren als der „Flaschenhals“ eines wissensbasierten Assistenzsystems dargestellt [186; 184; 185]. Die Literatur zu bestehenden Assistenzsystemen zeigt, dass sich die Art der Wissensakquisition häufig im Verlauf der Entwicklung der wissensbasierten Assistenzsysteme verändert (siehe Bild 25 auf der nächsten Seite). Teile der Ergebnisse dieses Abschnitts wurden bereits in [P6] veröffentlicht.

In Bild 25 ist zu erkennen, dass die Wissensakquisition bei der Entwicklung von mehr als die Hälfte der betrachteten wissensbasierten Assistenzsysteme indirekt durchgeführt wurde. Dies lässt sich damit begründen, dass bei der direkten Wissensakquisition eine leistungsfähige Wissensakquisitionskomponente zur Verfügung stehen muss, die den Experten im Akquisitionsprozess intuitiv unterstützt. Während der Entwicklung und Erprobung von wissensbasierten Assistenzsystemen steht die Wissensakquisitionskomponente häufig noch nicht zur Verfügung. Die Entwickler der wissensbasierten

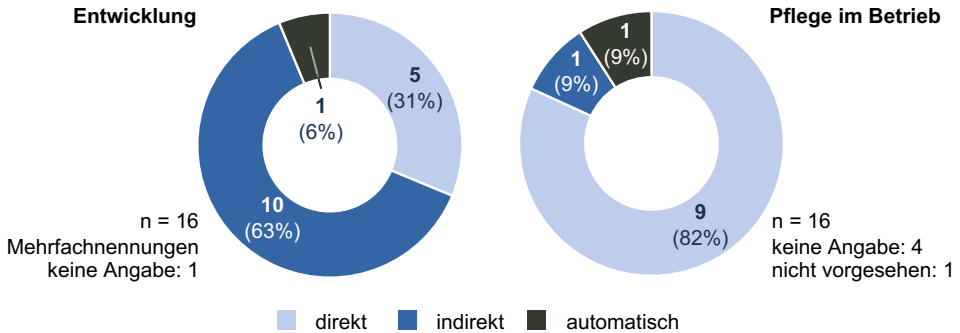


Bild 25: Häufigkeit der Wissensakquisitionsarten bei der Entwicklung (links) und der Pflege (rechts) eines wissensbasierten Assistenzsystems gemäß der Tabelle 13 (S. 175) nach [P6].

Assistenzsysteme nehmen deshalb häufig selbst die Rolle des Wissensingenieurs ein und führen demnach während der Entwicklung die initiale Akquisition des Wissens selbst durch. Dieser Schritt scheint aus Sicht der Entwicklung und Umsetzung der Wissensbasis von Wichtigkeit, da die Form und Art des Wissens auch die Architektur der Wissensbasis beeinflusst. Ein Entwickler muss sich demnach während der Entwicklung eines Assistenzsystems intensiv mit dem Domänenwissen auseinandersetzen. In Bild 25 ist zu erkennen, dass sich die Art der Wissensakquisition zur kontinuierlichen Pflege der Wissensbasis im Betrieb eines Assistenzsystems veränderte. Hierfür bauten die Entwickler des Assistenzsystems die Leistungsfähigkeit der Wissensakquisitionskomponenten soweit aus, dass Experten ihr Wissen selbst formalisieren können, wodurch die Wissensakquisition direkt erfolgte. Gründe hierfür liegen einerseits im wirtschaftlichen Betrieb des Assistenzsystems [187] oder andererseits beim Schutz des Wissens, wenn das wissensbasierte Assistenzsystem nicht vom Unternehmen selbst entwickelt wird. [P6]






Generell deutet Bild 25 darauf hin, dass die indirekte Wissensakquisition besser für die initiale Entwicklung eines wissensbasierten Assistenzsystems geeignet ist. Im Verlauf der Entwicklung bis zur Einführung des wissensbasierten Assistenzsystems sollte demzufolge eine leistungsfähige Wissensakquisitionskomponente konzipiert werden.

2.4.4.2 Repräsentation von Prozesswissen

Die Repräsentation von Prozessen erfolgt mittels der Methoden der Prozessmodellierung, die dem Forschungsfeld des Prozessmanagements

zugeordnet wird. Hierbei wird generell zwischen skriptbasierten (Skriptsprachen) und grafischen Methoden (Diagrammsprachen) unterschieden, wobei die Diagrammsprachen nochmal in datenfluss-, kontrollfluss- und objektorientiert unterteilt werden [188]. In einer Umfrage wurde die Nutzungshäufigkeit der verschiedenen Modellierungssprachen erfasst. Die am häufigsten eingesetzten Modellierungssprachen im Bereich des Prozessmanagements sind laut einer Studie im Jahr 2009, neben anderen genannten, Swimlanes (ca. 44 %), SADT (ca. 43 %), eEPK (ca. 37 %), BPMN (ca. 23 %) und UML (ca. 14 %) [189] ($n = 206$). Zur Modellierung wissensintensiver Prozesse haben sich im Umfeld der Produktentwicklung darüber hinaus spezifischere Modellierungssprachen etabliert, hierzu zählen bspw. MOKA [190] oder KMDL [178]. Zur generellen Modellierung von Abläufen und Vorgehen eignen sich insbesondere UML-Aktivitätsdiagramme. Dies zeigt auch eine Gegenüberstellung von GOTTWALD [153], wobei ein Augenmerk auf die Modellierung von Schleifen und Verzweigungen gelegt wurde. Ein Auszug zur Notation für UML-Aktivitätsdiagramme ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Auszug aus der Notation zu UML-Aktivitätsdiagrammen nach [191; 188].

Benennung	Symbol	Beschreibung
Start		Beginn eines Prozesses, wobei nur ein Startpunkt erlaubt ist.
Aktivität		Eine Aktivität, Aktion oder Tätigkeit, z. B. „Bestimme das E-Modul“.
Verzweigung		Durch die Verzweigung wird der Kontrollfluss unter der Angabe einer Bedingung aufgeteilt. Hierdurch können alternative Zweige im Prozess modelliert werden, z. B. „Ist das E-Modul gleich $210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$?“ (Alternativen „ja“ oder „nein“)
Kontrollfluss		Der Pfeil gibt die Richtung des Kontrollflusses an und zeigt somit auf das nachfolgende Objekt im Prozess.
Ende		Ende eines Prozesses, wobei mehrere Endpunkte erlaubt sind. Die verschiedenen Endpunkte ergeben sich durch Verzweigungen im Verlauf des Prozesses.

In der Studie von OVERHAGE et al. [192] wurden die beiden Modellierungsmethoden eEPK und UML gegenübergestellt. Beide Modellierungsmethoden zeigen etwa eine gleiche Anzahl an Stärken und Schwächen, wobei bei

einem erhöhten Bedarf an Prozessflexibilität das UML-Aktivitätsdiagramm der eEPK-Methode vorzuziehen ist [192]. Generell unterscheiden sich alle Modellierungsmethoden in der Anzahl der zur Verfügung stehenden Symbole. In [188] sind die verschiedenen Modellierungssprachen hierzu im Detail gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass die im Prozessmanagement häufig genutzten Swimlanes sich kaum von UML-Aktivitätsdiagrammen unterscheiden. Im Vergleich haben Swimlanes zusätzlich abgetrennte „Schwimmbahnen“, wodurch die Aktivitäten einer Organisationseinheit zugeordnet werden können.

2.4.4.3 Strategien zur Einführung von Assistenzsystemen in Unternehmen

Die Einführung von Neuerungen (z. B. neue Version von Software, Hardware oder Prozessen) im Unternehmen wird generell als „Rollout“ bezeichnet. Der Begriff Rollout entspringt dem Flugzeugbau und beschreibt den Moment, wenn das Flugzeug zum ersten Mal auf die Startbahn gerollt wird. Der Rollout von wissensbasierten Assistenzsystemen ist häufig ein kritischer Moment im Entwicklungsprozess, wird in den Vorgehensmodellen zur Entwicklung von wissensbasierten Systemen allerdings kaum betrachtet. Im Folgenden werden die wissenschaftlichen Grundlagen zum Rollout aus dem Bereich des Prozessmanagements vorgestellt, die auf die Einführung von Neuerungen im Unternehmen (z. B. wissensbasierte Assistenzsysteme) übertragen werden können.

Nach HANSMANN et al. [193] und LEIMEISTER [194] spielen bei der Durchführung von Veränderungen zwei Aspekte eine zentrale Rolle: der Zeitpunkt der Einführung und die organisatorischen Hürden. Beim Zeitpunkt einer Einführung wird zwischen schlagartigem (Big-bang), iterativem (Step-by-step), pilotiertem und parallelem Rollout unterschieden. Unter einem pilotierten Rollout wird die gezielte Einführung an einem Standort in einem Funktionsbereich eines Unternehmens verstanden (z. B. die Einführung eines neuen CAD-Systems am Hauptstandort). Beim iterativen Rollout (Step-by-step) wird eine Neuerung an einem Standort oder einem Funktionsbereich eingeführt. Durch die Konzentration einer Einführung auf einen Funktionsbereich oder Standort kann mit Fehlern und Problemen gezielter umgegangen werden. Sofern eine Einführung im gesamten Unternehmen gleichzeitig erfolgt, wird vom schlagartigen Rollout (Big-bang) gesprochen (z. B. die Einführung eines neuen CAD-Systems im gesamten Unternehmen). Bei den ersten drei Rollout-Strategien besteht immer die Möglichkeit, den Rollout parallel zum vorherigen durchzuführen (paralleler Rollout), um

die Verfügbarkeit eines Systems sicherzustellen. [193; 194] Die Einordnung von schlagartigem, iterativem und pilotiertem Rollout sind in Bild 26 in Bezug auf den Standort und den Funktionsbereich dargestellt. Die Vor- und Nachteile der Rollout-Strategien werden in [193] diskutiert.

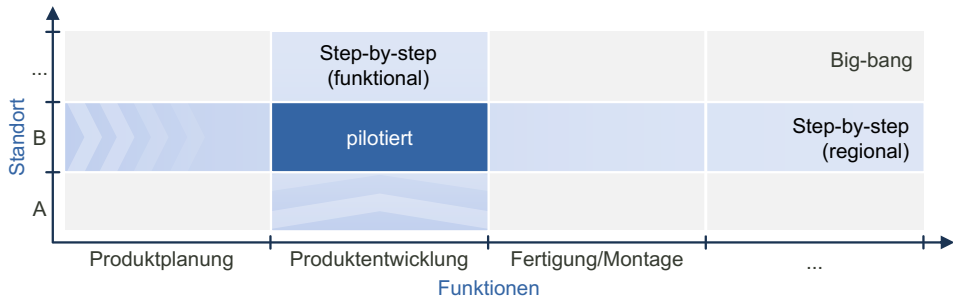


Bild 26: Drei Rollout-Strategien im Hinblick auf den Zeitpunkt der Einführung nach [193].

Die organisatorischen Hürden bei der Einführung von Neuerungen sind i. d. R. Wissens- und die Willensbarrieren [194]. Die verschiedenen Ursachen und Gegenmaßnahmen hierfür sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Organisatorische Hürden, Ursachen und Gegenmaßnahmen bei der Einführung von Neuerungen im Unternehmen nach [194].

Hürde	Ursache	Gegenmaßnahme
Unkenntnis	Informationsdefizit →	Transparenz schaffen
Ohnmacht	Organisationsdefizit →	Anpassung von Ressourcen
Überforderung	Qualifikationsdefizit →	Qualifizierungsmaßnahmen
Schlechterstellung	Motivationsdefizit →	Schaffung von Anreizen

Die Gegenmaßnahmen in Tabelle 7 zielen auf die Erhöhung der Akzeptanz und des Vertrauens der Anwender, um einen großen Anteil der Anwender von der Veränderung zu überzeugen [194].

2.4.5 Zwischenfazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die wissenschaftlichen Grundlagen zu Wissen und Assistenzsystemen in der Produktentwicklung vorgestellt. Die größte Herausforderung für Unternehmen liegt vor allem im Transfer von Wissen und der gezielten Nutzung bestehender Wissens-

quellen. Wissensbasierte Assistenzsysteme können hierbei einen entscheidenden Beitrag leisten. Sie wirken durch ihre Struktur als Wissenssicherung und tragen bei ihrem Einsatz zum Wissenstransfer bei. Bei der Implementierung von wissensbasierten Assistenzsystemen ist ein Fokus auf die Wissensakquisitionskomponente zu legen, da die Wissensakquisition den „Flaschenhals“ darstellt. Durch eine geeignete Rollout-Strategie können wissensbasierte Systeme abschließend gezielt im Unternehmen etabliert werden.

Im Jahr 1994 formuliert MITCHELL [195] drei Paradigmen zur Computerunterstützung in der Produktentwicklung, wobei das zweite Paradigma die Produktentwicklung als wissensintensiven Prozess und den Einsatz von wissensbasierten Assistenzsystemen anspricht. Hierbei warnt MITCHELL, dass eine Wissensbasis nie vollständig oder richtig sein kann, da wissensbasierte Assistenzsysteme in begrenzter Zeit entwickelt werden und nur einen abgeschlossenen Teil der Wirklichkeit abbilden. Deshalb schlussfolgert MITCHELL, dass zukünftig Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (datengetriebene Ansätze) zur Unterstützung der Produktentwickler in die Produktentwicklung integriert werden müssen. [195] Diese Schlussfolgerung impliziert, dass der Einsatz von datengetriebenen Ansätzen die Fähigkeit von klassischen wissensbasierten Assistenzsystemen um eine weitere Wissensquelle erweitern kann, d. h. um eine neue Perspektive auf die bereits vorhandene Daten im Unternehmen. Dies kann anhand der Wissenstreppe nach NORTH veranschaulicht werden: Die datengetriebenen Ansätze schaffen es, die Semantik in einem Datensatz zu identifizieren. Die Vernetzung der so erhobenen Informationen erfolgt i. d. R. anschließend durch die Interpretation der Muster und Tendenzen.

STADLER & HIRZ [196] zeigen, dass durch den Einsatz von wissensbasierten Assistenzsystemen zusätzlich die Komplexität von Produktentwicklungsaufgaben reduziert werden kann. Dies stellt insbesondere im Hinblick auf die voranschreitende Digitalisierung eine Möglichkeit dar, besser mit der steigenden Produktkomplexität umzugehen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im vorangegangenen Kapitel wurden die wissenschaftlichen Grundlagen im Kontext dieser Arbeit vorgestellt. Hierbei wurde der thematische Rahmen dargelegt und der Stand der Forschung und Technik in jedem Abschnitt abschließend zusammengefasst. In diesem Kapitel werden zunächst die wissenschaftlichen Grundlagen diskutiert (Abschnitt 3.1), um den Forschungsbedarf, die wissenschaftliche Zielsetzung und die Forschungsfragen abzuleiten (Abschnitt 3.2). Abschließend wird die weitere Vorgehensweise dargestellt (Abschnitt 3.3).

3.1 Fazit zu den wissenschaftlichen Grundlagen

Die wissenschaftlichen Grundlagen im Kapitel 2 umfassen das thematische Umfeld dieser Arbeit. Hierzu wurde der Stand der Technik dargestellt und aktuelle Forschungsarbeiten analysiert. In Abschnitt 2.2 wurde die Digitalisierung der Produktentwicklung thematisiert, da hierdurch die technologischen Voraussetzung geschaffen wurde, um die datengetriebenen Ansätze in der Produktentwicklung einsetzen zu können. Durch die voranschreitende Digitalisierung der Produktentwicklung werden in allen Phasen des Produktlebenszyklus mehr produktbeschreibende Daten und in höherer Qualität erhoben. Dies begründet sich dadurch, dass in den bisher kaum durch IT-Werkzeuge unterstützten Lebensphasen kontinuierlich IT-Werkzeuge etabliert werden. PDM-Systeme unterstützen hierbei die Produktentwicklung bei der Verwaltung und dem Austausch der produktbeschreibenden Daten mit dem primären Ziel, die Koordinierung der interdisziplinäre Produktentwicklung zu unterstützen. Die produktbeschreibenden Daten werden hierzu als Dateien in Form von Dokumenten repräsentiert (z. B. CAD-Dateien, numerische und experimentelle Versuchsdaten, Office-Dokumente zur Dokumentation). Die Verknüpfung der Dokumente erfolgt in PDM-Systemen über die Produktstruktur, wobei die Inhaltsebenen (Daten) in den Dokumenten nicht berücksichtigt werden. BURSAĆ [147] spricht aus diesem Grund von einer „dokumentenzentrierten Produktentwicklung“. Zur intensiveren Nutzung der Ressource „Daten“ im Umfeld der Produktentwicklung, müssen bestehende Dokumente stärker auf der Inhaltsebene verknüpft werden.

Die datengetriebene Produktentwicklung in Abschnitt 2.3 basiert, im Gegensatz zur hypothesengetriebenen Produktentwicklung, auf der systema-

tischen Analyse von Daten. Zur systematischen Analyse von Daten werden Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens eingesetzt. Hierzu wurden wichtige Vorgehensmodelle vorgestellt. Nach den anschließenden wissenschaftlichen Grundlagen zum maschinellen Lernen und den angegliederten Anwendungsbeispielen aus der Produktentwicklung, wurden mögliche Einsatzszenarien des datengetriebenen Ansatzes im Umfeld von Forschung und Industrie vorgestellt. Hierbei wurde konzeptionell auf die Wiederverwendung von Daten eingegangen. Nationale und internationale Forschungsaktivitäten von ABRAMOVICI et al. [148], LACHMAYER et al. [152], HARDING et al. [155] und ROMANOWSKI [162] bestätigen den erfolgreichen Einsatz der maschinellen Lernmethoden im Umfeld der Produktentwicklung. Allerdings steht bei den Autoren häufig die Auswahl der geeigneten maschinellen Lernmethoden im Vordergrund und die Frage nach der Vorbereitung der Daten und die Kontextualisierung des Wissens bleibt unbeantwortet. Ebenso werden häufig nur einzelne Bauteile betrachtet, d. h. die Betrachtung der Eigenschaften und das Verhalten ganzer Baugruppen aus verschiedenen Bauteilen bleibt unberücksichtigt. Darüber hinaus fokussieren die Autoren auf die Rückführung von produktbeschreibenden Daten aus einzelnen Lebensphasen (siehe Abschnitt 2.3.6).

Zur Etablierung der datengetriebenen Produktentwicklung ist Expertenwissen aus verschiedenen Domänen notwendig. Die große Anzahl der Rand- und Rahmenbedingungen der maschinellen Lernmethoden erfordert Expertenwissen aus der Domäne des maschinellen Lernens. Bei der Datenvorbereitung (Pre-Processing) und der Kontextualisierung der Muster (Post-Processing) ist Expertenwissen aus der Domäne der Produktentwicklung notwendig. Zur Konservierung und dem Transfer von Expertenwissen aus verschiedenen Domänen in der Produktentwicklung eignen sich wissensbasierte Assistenzsysteme, die in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurden.

3.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit wird durch den Forschungsbedarf motiviert, der sich aus der übergeordneten Problemstellung (Abschnitt 1.1) und dem Stand der Forschung und Technik (Kapitel 2) begründet. Hierdurch kann die wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit definiert und anschließend die Forschungsfragen abgeleitet werden.

3.2.1 Forschungsbedarf und -ziel

Der Forschungsbedarf dieser Arbeit motiviert sich durch die Tatsache, dass es bei komplexen Produkten eine Diskrepanz zwischen den erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften oder Verhalten gibt (siehe Abschnitt 1.1). Es kommt demnach vor, dass trotz mehrjähriger Entwicklungsarbeit ein Produkt oder Produkte einer Serie die Anforderungen nicht erfüllen. Das bisherige Vorgehen der Produktentwickler liegt darin, die bekannten Methoden und Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung weiter zu verbessern, um der Herausforderung zu begegnen. Im Hinblick auf die dargestellten, nicht beeinflussbaren Einflüsse auf die Produkteigenschaften in Abschnitt 1.1, kann nicht davon ausgegangen werden, dass aufgrund der kontinuierlichen Steigerung der Produktkomplexität eine evolutionäre Verbesserung der Methoden und Vorgehensmodelle der virtuellen Produktentwicklung zu einer Lösung führen wird. Der Stand der Technik und die wissenschaftlichen Grundlagen in Kapitel 2 zeigen, dass aufgrund der zunehmenden Digitalisierung der Produktentwicklung sehr viele produktbeschreibende Daten erhoben und gespeichert werden, welchen bisher noch kaum Aufmerksamkeit gewidmet wird. Mittels der datengetriebenen Ansätze, im Gegensatz zum hypothesengetriebenen Vorgehen, können die Produkteigenschaften und das Verhalten statistisch beschrieben werden (siehe Abschnitt 2.3.1). Hierdurch können Erklärungen für die Diskrepanz zwischen erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften oder Verhalten statistisch ermittelt werden und dadurch Lösungsansätze abgeleitet werden.

Allerdings zeigen sich verschiedene Herausforderungen im interdisziplinären Umfeld der datengetriebenen Produktentwicklung, welchen gegenwärtig nicht oder unbefriedigend begegnet wird, sodass die Produktentwickler die datengetriebenen Ansätze nicht direkt nutzen können:

- Produktentwicklern fehlt i. d. R. das Fachwissen, die Muster zu interpretieren und zu kontextualisieren, die durch datengetriebene Analysen mittels maschinellen Lernmethoden erhoben werden.
- Aufgrund der dokumentenzentrierten Verwaltung von produktbeschreibenden Daten gibt es kein einheitliches Konzept zur Strukturierung der produktbeschreibenden Daten [81], sodass sie für maschinelle Lernmethoden direkt eingesetzt werden können.
- Es gibt keine methodische Beschreibung zur Rückführung, Strukturierung und Verknüpfung von produktbeschreibende Daten vorangegangener Produktgenerationen zur intensiveren Wiederverwendung in der Produktentwicklung.

- Es gibt kein Vorgehensmodell zur Integration von datengetriebenen Ansätzen, mit dem Ziel, die Eigenschaftsabsicherung in der Produktentwicklung zu verbessern.

Aus den genannten Aspekten lässt sich zusammenfassend die wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit ableiten (siehe Bild 27):

Wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit

Das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit ist ein Konzept zur intensiveren Nutzung von produktbeschreibenden Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen, um insbesondere die Lücke zwischen erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften von Serienprodukten zu schließen.

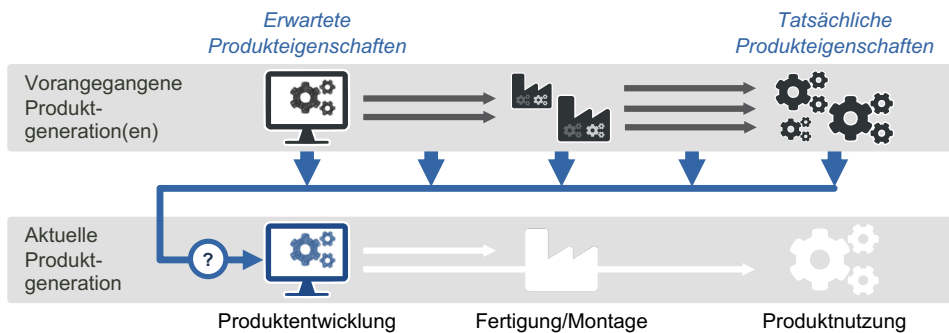


Bild 27: Die datengetriebene Produktentwicklung zur intensiveren Wiederverwendung von produktbeschreibenden Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen.

3.2.2 Forschungsfragen

Zur Operationalisierung der wissenschaftlichen Zielsetzung dieser Arbeit werden im Folgenden drei übergeordnete Forschungshypothesen aufgestellt und jeweils die zentralen Forschungsfragen abgeleitet:

1. Die produktbeschreibenden Daten vorangegangener Produktgenerationen können zur datengetriebenen Analyse mittels maschinellen Lernmethoden genutzt werden:
Wie müssen produktbeschreibende Daten strukturiert und verwaltet werden, sodass sie in maschinelle Lernmethoden genutzt werden können?

2. Produktentwickler können datengetriebene Analysen durchführen, um produktbeschreibende Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen intensiver zur Absicherung komplexer Produkteigenschaften zu nutzen:

Wie kann Wissen zum maschinellen Lernen im Kontext der datengetriebenen Produktentwicklung formalisiert werden, sodass die Produktentwickler datengetriebene Analysen durchführen können?

3. Produktentwickler können datengetriebene Ansätze zur Eigenschaftsabsicherung in den frühen Phasen „Produktplanung, Aufgabenstellung“ oder „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus selbstständig einsetzen:

Wie muss ein wissensbasiertes Assistenzsystem konzipiert werden, um die Produktentwickler bei der datengetriebenen Produktentwicklung im Unternehmen zu unterstützen?

3.3 Weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit

Nachdem in diesem Kapitel die wissenschaftliche Zielsetzung der vorliegenden Arbeit dargelegt wurde, kann auf die weitere Vorgehensweise eingegangen werden (siehe Bild 28). Zur Ableitung von Anforderungen an ein Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung und dessen Umsetzung als wissensbasiertes Assistenzsystem wird im nächsten Kapitel ein Anwendungskontext skizziert (Kapitel 4). Der Anwendungskontext „Entwicklung von lärmreduzierten Produkten“ wird darüber hinaus die Relevanz und Notwendigkeit der datengetriebenen Produktentwicklung am

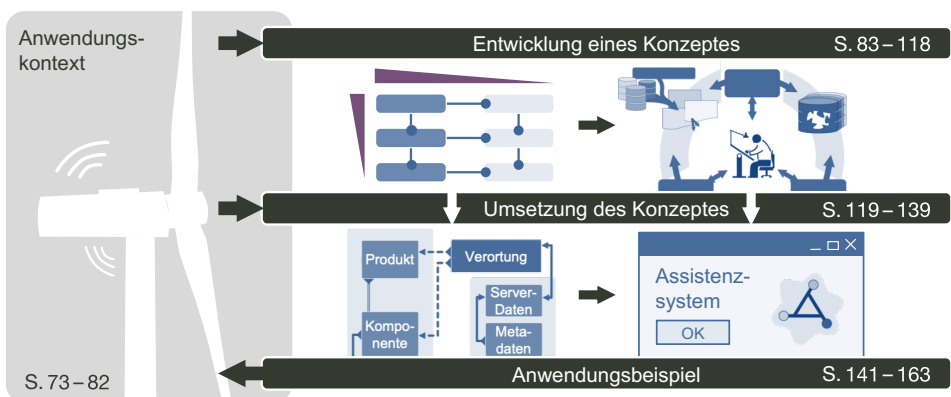


Bild 28: Weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit.

industrienahen Beispiel motivieren. Das Konzept wird anschließend vorgestellt (Kapitel 5), wodurch die abgeleiteten Forschungsfragen beantwortet werden. Hierzu wird zuerst den Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess eingegangen, bei welchem eine datengetriebene Unterstützung der Produktentwickler bei der Eigenschaftsabsicherung sinnvoll ist. Anschließend wird auf die produktbeschreibenden Daten als Ressource für maschinelle Lernmethoden und auf das notwendige Wissen für eine Unterstützung bei der datengetriebenen Produktentwicklung eingegangen. Abschließend wird in Kapitel 5 ein Gesamtkonzept zur intensiveren Nutzung von produktbeschreibenden Daten definiert. In Kapitel 6 wird zur Validierung das Konzept informationstechnisch als wissensbasiertes Assistenzsystem umgesetzt. Im letzten Kapitel 7 wird mittels eines Anwendungsbeispiels aus dem Anwendungskontext in Kapitel 4 gezeigt, wie produktbeschreibende Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen intensiver genutzt werden können, um die Lücke zwischen erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften von Serienprodukten zu schließen.

4 Entwicklung von lärmreduzierten Produkten als Anwendungskontext

Das folgende Kapitel hat das Ziel, den Anwendungskontext der vorliegenden Arbeit vorzustellen. Der Anwendungskontext soll die wissenschaftliche Notwendigkeit und praktische Relevanz der datengetriebenen Produktentwicklung am industrienahen Beispiel darstellen. Als Anwendungskontext wurden Windenergieanlagen ausgewählt, da sie als Serienprodukt einerseits eine ausreichende Komplexität aufweisen und andererseits im hohen Maße von der Problemstellung der Absicherung akustischer Produkteigenschaften betroffen sind (siehe [11]). Hierzu wird zu Beginn kurz auf methodische Vorgehensmodelle bei der Absicherung von akustischen Produkteigenschaften (Abschnitt 4.1) sowie auf Windenergieanlagen als Serienprodukt (Abschnitt 4.2) eingegangen. Abschließend werden die Anforderungen an ein verbessertes Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung abgeleitet (Abschnitt 4.3). Auszüge dieses Kapitels wurden vom Autor bereits in [P6; P1; P3; P7] vorgestellt.

4.1 Methodische Vorgehensmodelle für die Entwicklung lärmreduzierter Produkte

Die methodischen Vorgehensmodell zur Entwicklung von lärmreduzierten Produkten basiert auf den physikalischen Grundlagen zur technischen Akustik oder Maschinenakustik. Diese Grundlagen sind kein Gegenstand dieser Arbeit, weshalb hierzu auf die Literatur, wie bspw. [197; 198], verwiesen wird. Die Entwicklung von lärmreduzierten Produkten wird unter dem Begriff „geräuschgerechtes Konstruieren“ oder „akustische Produktentwicklung“ in der Literatur beschrieben [198]. Gerechtheiten in der Konstruktion haben ihren methodischen Ursprung im „Design for X“ [199]. Mit dem „X“ wird hierbei die Hauptforderung an das Produkt ausgedrückt, z. B. Design for Manufacturing für die fertigungsgerechte Konstruktion [200]. Für das geräuschgerechte Konstruieren wird somit auf die Bedeutung der Anforderung an die akustischen Eigenschaften eines Produktes Rechnung getragen. Nach der Richtlinie VDI 3720-1:2014-06 [201] und RIEG & STEINHILPER [198] können generell die wirksamsten Maßnahmen zur Geräuschreduzierung in den frühen Phasen „Produktplanung, Aufgabenstellung“ oder „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus in das Produkt integriert werden. In den späteren Phasen „Fertigung, Montage, Prüfung“ bis „Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung“ des Produktlebenszyklus muss auf zeit- und

kostenintensive Maßnahmen zurückgegriffen werden, die häufig eine kleinere Wirkung auf die Geräuschreduzierung haben.

RIEG & STEINHILPER [198] stellen ein methodisches Vorgehensmodell für die lärmreduzierte Produktentwicklung bestehend aus sechs Phasen vor. Das Vorgehensmodell ist losgelöst von den gängigen Produktentwicklungsprozessen. Ab der dritten Phase wird vorwiegend auf experimentelle Versuche an realen Prototypen zurückgegriffen. Numerische Versuche werden hauptsächlich zur Bestimmung der Resonanzfrequenzen des Produktes durchgeführt. Ein besonderes Augenmerk wird auf die „Wissens- und Erfahrungskonservierung“ in der letzten Phase gelegt, um bei der nächsten Revision der Produkte entsprechend frühzeitig Maßnahmen zur Verbesserung einbringen zu können.

Die Norm DIN EN ISO 11688-1:2009-11 [202] sowie die Richtlinie-Reihe VDI 3720-1:2014-06 [201] verorten verschiedene Maßnahmen zur Lärmminde- rung in den Produktentwicklungsprozess. Das systematische Vorgehens- modell ist hierzu in vier Phasen unterteilt [202], wobei die ersten drei dem Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten des Produktentwicklungs- prozesses nach [5] entsprechen. Nach der Ausarbeitung erfolgt abschließend die Quantifizierung der Schallemission durch experimentelle Versuche an Prototypen. In jeder der vier Phasen sind fünf Arbeitsschritte vorgesehen, um die Wirkungskette von der Entstehung der Geräusche bis zu ihrer Messposition zu erfassen, mit dem Ziel, Lärmminde- rungsmaßnahmen abzuleiten:

1. Charakterisierung und Priorisierung der Schallquellen, Schallübertra- gungswege und schallabstrahlende Flächen
2. Identifikation der Schallentstehungsmechnismen wichtiger Schall- quellen
3. Beschreibung und Analyse der Schallübertragungswege von den Schallquellen zu den schallabstrahlenden Flächen sowie von dort zu den Messpunkten
4. Identifikation der Beiträge der einzelnen abstrahlenden Flächen zum Schalldruckpegel am Messpunkt
5. Ableiten verschiedener Lärmminde- rungsmaßnahmen

Darüber hinaus entwickelte GUMMERSBACH [203] ein Informationssystem für Produktentwickler, welches strukturiert Wissen über Lärmminde- rungsmaßnahmen zur Verfügung stellt. Das Informationssystem basiert hierbei auf einem vorher entwickelten Katalog mit konstruktiven Lärmminde- rungs-

maßnahmen [204] und der DIN EN ISO 11688-1:2009-11 [202] als Vorgehensmodell zur systematischen Entwicklung von lärmreduzierten Produkten. Das gesamte Vorgehensmodell umfasst drei Schritte [203]: Zuerst wird das Schallflussmodell ermittelt, das anhand eines ersten Entwurfs im Produktentwicklungsprozess und den Anforderungen an das Produkt erstellt wird. Das Schallflussmodell erfasst semantisch die Beziehungen und Interaktion zwischen Baugruppen und Bauteilen und erleichtert dadurch die nachfolgende schalltechnische Analyse. Der zweite Schritt entspricht dem Vorgehensmodell nach DIN EN ISO 11688-1:2009-11 [202]. Hierbei werden durch die schalltechnische Analyse alle Schallquellen, Schallübertragungswege und Abstrahlflächen tabellarisch erfasst und bewertet. Im letzten Schritt werden mithilfe des Kataloges konstruktive Lärminderungsmaßnahmen abgeleitet.

Die methodischen Vorgehensmodelle für die lärmreduzierte Produktentwicklung haben gemein, dass die tatsächlichen akustischen Produkteigenschaften letztendlich erst durch eine Messung an einem Prototyp festgestellt werden. Hierdurch entsteht im Produktentwicklungsprozess eine Verzögerung oder die Lärminderungsmaßnahmen werden erst in nachfolgenden Produktgenerationen berücksichtigt. Die Vorgehensmodelle bieten vor allem eine methodische Grundlage zur Identifikation und Analyse von akustischen Problemen und beim Informationssystem von GUMMERSBACH [203] eine gezielte Bereitstellung von konstruktiven Gegenmaßnahmen.

4.2 Windenergieanlagen als Serienprodukt

Anfang der 2000er Jahre wurde in Deutschland der Atomausstieg beschlossen. Dies hatte zur Folge, dass erneuerbaren Energien gefördert und dadurch stärker ausgebaut wurden. Auch die Anzahl von Windenergieanlagen zur Energiegewinnung stieg stetig an, weshalb im Juli 2014 das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) reformiert wurde [205]. Standorte für Windenergieanlagen mit einer geringeren durchschnittlichen Windstärke wurden aufgrund der Anpassung des Referenzmodells zur Berechnung der Förderhöhe lukrativer. Dies betrifft insbesondere die Standorte im Inland, die wesentlich dichter als Küstengebiete besiedelt sind. Aufgrund der Nähe zu Wohngebieten müssen Windenergieanlagen, neben lokalen gesetzlichen Vorschriften (z. B. die 10H-Regelung in Bayern [206]), strenge Schallemissions- und -immissionsvorschriften einhalten, die durch die Norm IEC 61400-11 (2.1):2006-11 [207] und die Richtlinie FGW-1:2008-02 [208] geregelt sind. Produktentwickler begegnen deshalb bei der Entwicklung von

Windenergieanlagen der Herausforderung, neben den mechanischen, auch insbesondere die akustischen Produkteigenschaften der Windenergieanlage abzusichern.

4.2.1 Prinzipieller konstruktiver Aufbau

Der prinzipielle konstruktive Aufbau von Windenergieanlagen im Onshorebereich ist in Bild 29 dargestellt. Neben wenigen äußeren Produkteigenschaften, die häufig als Geschmacksmuster von den Windenergieanlagenherstellern gesichert sind, unterscheiden sich aktuelle Windenergieanlagen durch ihren konzeptionellen Aufbau. Hierbei wird übergeordnet zwischen Windenergieanlagen mit Getriebe (Bild 29 oben links) und getriebelosen Windenergieanlagen (Bild 29 unten links) unterschieden. Neben verschiedenen konstruktiven, mechanischen und regelungstechnischen Vor- und Nachteilen, siehe hierzu [209], ist es häufig eine unternehmenspolitische Entscheidung, welches Konzept auf dem Markt angeboten wird.

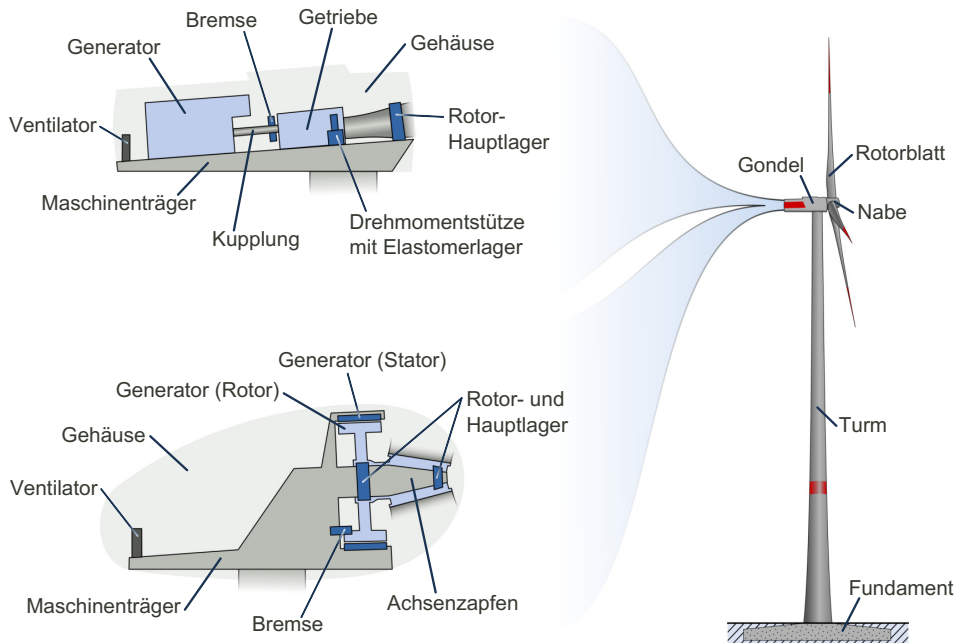


Bild 29: Prinzipieller konstruktiver Aufbau von Windenergieanlagen mit (oben) und ohne Getriebe (unten) nach [210; P1].

4.2.2 Akustische Produkteigenschaften

Nach WAGNER et al. [211] werden die akustischen Produkteigenschaften von Windenergieanlagen ursächlich in zwei Kategorien unterteilt: aerodynamisch und mechanisch bedingter Schall (siehe Bild 30). Der aerodynamisch bedingte Schall entsteht durch das Umströmen der Rotorblätter. Der mechanisch bedingte Schall wird hauptsächlich durch die mechanische [11] oder elektrische Anregung [212] in den Komponenten der Windenergieanlage erzeugt. Der Generator (elektrische Anregung) oder das Getriebe (mechanische Anregung) werden zu den Hauptquellen für Lärm von Windenergieanlagen gezählt. Die physikalischen Ursachen beider Schallkategorien sind bekannt und erforscht, so entsteht der mechanisch bedingte Schall bei Getrieben durch den Übertragungsfehler beim Kämmen der Zahnradpaare im Betrieb [211; 11]. Der Übertragungsfehler resultiert aus allen Abweichungen der Makro- und Mikro-Zahnradgeometrien von einem Ideal, z. B. durch Fertigungsrestriktionen und den elastischen Verformungen der Zähne und Zahnradflanken im Betrieb [11]. Hierdurch wird aufgrund der Rotation der Zahnräder eine oszillierende Kraft angeregt, die als Körperschall übertragen und als Luftschall abgestrahlt wird.

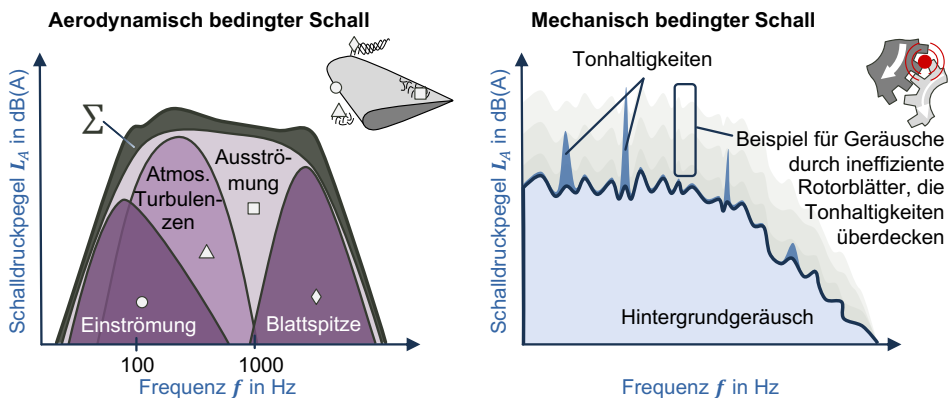


Bild 30: Aerodynamisch (links) und mechanisch bedingter Schall (rechts) von Windenergieanlagen nach [213; 211; P7].

Trotz der etwa gleichen Lautstärke beider Schallkategorien wirkt der mechanisch bedingte Schall auf Menschen störender [214]. Der Grund dafür liegt im Klangcharakter der Schallkategorien. Der aerodynamisch bedingte Schall erinnert an ein alternierendes Rauschen, was häufig mit Geräuschen natürlichen Ursprungs, wie das Rauschen des Waldes, verglichen werden kann (gleichmäßiges Schallspektrum in Bild 30 links). Der mechanisch

bedingte Schall hat sehr häufig tonalen Charakter, d. h. es werden einzelne Töne aus dem Hintergrundgeräusch wahrgenommen. Diese tonalen Komponenten im Schallspektrum werden Tonhaltigkeiten genannt (Spitzen im Schallspektrum in Bild 30 rechts). Tonhaltigkeiten gelten in der Psychoakustik als besonders störend [215], vergleichbar mit einem schrillen Pfeifen oder sonorem Summen. [211; 214] Aus diesem Grund werden die Tonhaltigkeiten in den Normen und Richtlinien zur Ermittlung von Geräuschemissionen und der Inbetriebnahme von Windenergieanlagen besonders abgeurteilt [215; 207]. In den letzten Jahren wurde die Effizienz der Rotorblätter hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften kontinuierlich gesteigert, wodurch die Hintergrundgeräusche im Schallspektrum sanken [216]. Hierdurch werden Tonhaltigkeiten stärker wahrgenommen. Werden wahrnehmbare Tonhaltigkeiten im Schallemissionsspektrum einer Windenergieanlage gemessen, so kann ein Strafzuschlag auf die Gesamtlautstärke der Windenergieanlage dazu führen, dass die Betriebsgenehmigung nicht erteilt oder entzogen wird.

4.2.3 Absicherung der akustischen Produkteigenschaften

Die methodischen Vorgehensmodelle zur lärmreduzierten Produktentwicklung sehen im Speziellen zur Validierung der akustischen Produkteigenschaften Messungen am Prototyp vor (siehe Abschnitt 4.1). Allerdings können Windenergieanlagen, bedingt durch ihre Größe und Höhe, nicht als Gesamtsystem auf einem Prüfstand getestet werden, um die akustischen Produkteigenschaften zu ermitteln. Normalerweise werden zur Eigenschaftsabsicherung deshalb in der zweiten Phase „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus numerische Versuche mittels CAE-Werkzeugen durchgeführt. Zur Validierung der Simulationen sind allerdings experimentelle Versuche notwendig [217; 210], die erst in den späteren Phasen „Fertigung, Montage, Prüfung“ bis „Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung“ des Produktlebenszyklus zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund sind numerische Versuche in der zweiten Phase „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus häufig noch ungenau und bieten keine Möglichkeit, das akustische Verhalten des Gesamtsystems abzubilden. Darüber hinaus sind Windenergieanlagen einer Generation Serienprodukte, weshalb aus strategischen Gründen wichtige Einzelkomponenten zum Teil von Zweitlieferanten²⁰ bezogen werden. Das tatsächliche akustische Produktverhalten

²⁰ Prinzip des Second Sources: Risikoreduzierung bei Wegfall eines Lieferanten und/oder preispolitische Maßnahme.

der vielen Einzelkomponenten im Zusammenspiel zeigt sich deshalb erst nach dem Errichten der Windenergieanlagen am Betriebsstandort.

Der Entwicklungsprozess einer neuen Generation von Windenergieanlagen hat drei Phasen (siehe Bild 31). In der Konzeptphase werden aufgrund der Anforderungen wie bspw. Nennleistung, Nabenhöhen und Windklasse die generelle Produktstruktur abgeleitet. Hierbei werden bereits Spezifikationen der Einzelkomponenten für Zulieferer spezifiziert (wie z. B. das Getriebe oder der Generator). In der Detaillierungsphase wird die Windenergieanlage, häufig in enger Kooperation mit allen Zulieferern, konstruiert. Nach der Konzept- und Detaillierungsphase folgt aufgrund der vielen Unsicherheiten in der Eigenschaftsabsicherung eine ausführliche Validierungsphase. In dieser Phase werden die meisten produktbeschreibenden Daten erhoben. Hierzu zählen z. B. Messungen am Prototypen der Einzelkomponenten, Schallemissions- und Schwingungsmessungen (NVH) sowie validierte Mehrkörpersimulationsergebnisse.

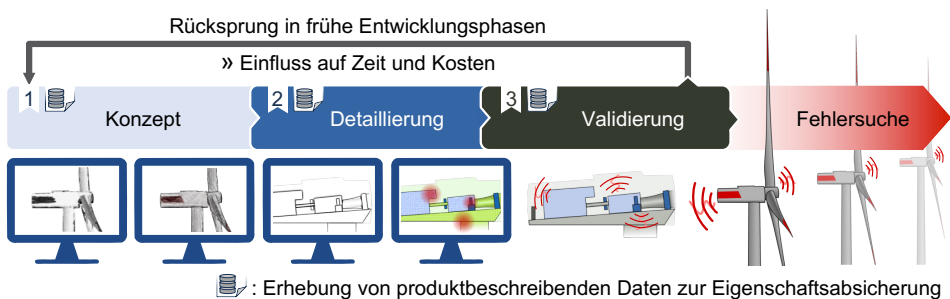


Bild 31: Die drei Phasen des Entwicklungsprozesses einer neuen Generation von Windenergieanlagen nach [P1; P3].

Falls nach der mehrjährigen Entwicklung der neuen Generationen auffällige akustische Produkteigenschaften bei der Inbetriebnahme festgestellt werden (z. B. Tonhaltigkeiten, siehe [207]), folgt eine unprofitable Zeit der Fehlersuche. Gegenmaßnahmen können zum Beispiel aktive [218] oder passive Schwingungstilger [219] darstellen, wobei die Montagepositionen aufwändig ermittelt werden müssen. Die Gegenmaßnahmen müssen aufgrund der unterschiedlichen Produktkonfigurationen der Serie durch verschiedene Zulieferer von Einzelkomponenten an jeden Standort angepasst bzw. jeweils neu entwickelt werden. Falls keine Gegenmaßnahme eine Wirkung zeigt, ist ein Rücksprung in frühere Phasen „Konzept“ oder „Detaillierung“ im Entwicklungsprozess der Windenergieanlagen notwendig [P3].

Die Produktentwickler der Windenergieanlagen sind demnach mit der Herausforderung konfrontiert, dass die akustischen Produkteigenschaften in der zweiten Lebensphase „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus nicht abgesichert werden können (siehe Abschnitt 1.1). Die akustischen Eigenschaften der Windenergieanlagen zeigen sich erst am Betriebsstandort (siehe Bild 31). Strukturierte Interviews mit Experten aus der Windenergiebranche zeigten das aktuelle Vorgehen der Produktentwickler [P7]: Die Entwickler von Windenergieanlagen erheben im Verlauf des Entwicklungsprozesses zur Absicherung der akustischen Produkteigenschaften sehr viele produktbeschreibende Daten. Da diese Daten nur schwach strukturiert, in verschiedenen Orten (z. B. digitale Ordnerstrukturen, PDM-Systeme) und in unterschiedlichsten Datenformaten verwaltet werden (z. B. Microsoft® Excel, kommerzielle Messdatenformate), bleiben sie in der ersten Lebensphase „Produktplanung, Aufgabenstellung“ bei der Entwicklung der nächsten Produktgeneration häufig unberücksichtigt. Durch die unstrukturierte, dokumentenbasierte Verwaltung der produktbeschreibenden Daten, können maschinelle Lernmethoden nicht direkt angewendet werden. Darüber hinaus fehlt den Produktentwicklern die Methodenkompetenz, die Daten systematisch zu analysieren.

Im folgenden Abschnitt werden die Anforderungen an einen Lösungsansatz abgeleitet.

4.3 Anforderungen an einen Lösungsansatz

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen zusammenfassend formuliert, die an einen Lösungsansatz gestellt werden. Hierbei werden das Forschungsziel, die abgeleiteten Forschungsfragen (Abschnitt 3.2) und der Anwendungskontext in den vorangegangenen Abschnitten berücksichtigt. Der Lösungsansatz muss eine methodische Beschreibung der Unterstützung für die datengetriebene Produktentwicklung beinhalten. Hierzu zählen alle Maßnahmen, die den Einsatz der maschinellen Lernmethoden im Umfeld der Produktentwicklung ermöglichen, sodass produktbeschreibende Daten vorangegangener Produktgenerationen zur Eigenschaftsabsicherung intensiver wiederverwendet werden können. Zur Bereitstellung des notwendigen Methodenwissens und zur Operationalisierung sowie Validierung der methodischen Beschreibung muss ein wissensbasiertes Assistenzsystem entwickelt werden. Die Anforderungen an den Lösungsansatz sind im Folgenden formuliert:

- Die produktbeschreibenden Daten unterschiedlicher Herkunft (z. B. PDM-Systeme, digitale Ordnerstrukturen) müssen integriert und strukturiert werden. Die unterschiedliche Herkunft der produktbeschreibenden Daten ist dadurch begründet, dass diese vorwiegend zur Unterstützung der Produktentwicklung erhoben, verwaltet und repräsentiert werden (siehe Abschnitt 2.2.5, S. 25).
- Jedes IT-Werkzeug hat sein eigenes Dateiformat, in welchem die Daten repräsentiert werden. Dies stört oder verhindert den direkten Austausch von Daten zwischen verschiedenen IT-Werkzeugen [220]. Da die Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten von strukturierten Datenbasen ausgehen, müssen die produktbeschreibenden Daten auch anhand ihres Inhalts strukturiert werden (siehe Abschnitt 2.3.3, S. 34).
- Auch in der datengetriebenen Produktentwicklung nimmt das Produkt selbst die zentrale Rolle ein, weshalb sich die Strukturierung und Verwaltung der produktbeschreibenden Daten anhand ihres Inhalts ebenfalls an der Produktstruktur orientieren muss.
- Aufgrund der Interdisziplinarität der datengetriebenen Produktentwicklung muss das Assistenzsystem Wissen aus zwei Domänen bereitstellen: Expertenwissen aus der Domäne des maschinellen Lernens (Processing) und Expertenwissen aus der Domäne der Produktentwicklung (Pre-Processing und Post-Processing) (siehe Abschnitt 2.3.2, S. 28).
- Es muss Wissen über den Entwicklungsprozess formalisiert werden können, welches das Vorgehen bei der systematischen Analyse von Daten beschreibt und unterstützt (siehe Abschnitt 2.4.4.2, ab S. 61). Hierzu muss sichergestellt werden, dass der Produktentwickler eine Unterstützung bei der Formalisierung, Bereitstellung und Anwendung von Methodenwissen zur systematischen Analyse von Daten erhält.
- Das wissensbasierte Assistenzsystem muss die Entwicklungsingenieure befähigen, datengetriebene Analysen durchzuführen. Es soll hierdurch den Wissenstransfer zwischen den Experten verschiedener Domänen und den Produktentwicklern unterstützen (siehe Abschnitt 2.4.2, S. 54).
- Die produktbeschreibenden Daten und das Prozesswissen dürfen aus Gründen der Anpassbarkeit auf ein Produkt oder in den Unternehmenskontext erst nach der Inbetriebnahme des wissensbasierten

Assistenzsystem integriert werden. Dies erfüllt auch die generelle Anforderung an den Schutz von Wissen.

- Zur Reduktion der organisatorischen Hürden bei der Einführung des wissensbasierten Assistenzsystems (siehe Abschnitt 2.4.4.3, ab S. 63) muss es sich in den bestehenden Produktentwicklungsprozess einfach integrieren lassen. Hierzu muss eine graphische Benutzerschnittstelle den Anwendern die Möglichkeit zur Verfügung stellen, mit dem wissensbasierten Assistenzsystem zu interagieren und zu kommunizieren.

5 Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung

Ziel des folgenden Kapitels ist die Entwicklung und methodische Beschreibung eines Konzeptes zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung. Es stellt, neben der informationstechnischen Umsetzung des Konzeptes in Kapitel 6, den Kern dieser Arbeit dar.

Bei der Entwicklung des Konzeptes zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung müssen die Grundlagen und Anforderungen verschiedener Disziplinen berücksichtigt werden. Hierzu zählt die Produktentwicklung als Anwendungskontext, die maschinellen Lernmethoden zur Durchführung der datengetriebenen Analysen und die technologischen Randbedingungen zur Umsetzung des Konzeptes als wissensbasiertes Assistenzsystem. Bei der Entwicklung des Konzeptes muss insbesondere der Nutzen für die Produktentwickler und die Einordnung in den Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden. Das Konzept wird ebenso von technologischen Randbedingungen (*Was kann informationstechnisch umgesetzt werden?*) sowie von den zur Verfügung stehenden Ressourcen (*Welche Eingangsgrößen sind notwendig?*) beeinflusst. Die Einflüsse und Randbedingungen für das Konzept sind hierzu zusammenfassend in Bild 32 dargestellt.

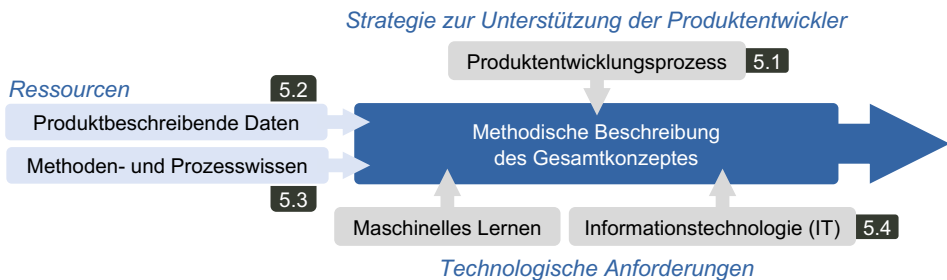


Bild 32: Überblick für das Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung.

In diesem Kapitel wird zu Beginn die Strategie zur Unterstützung der Produktentwicklung abgeleitet (Abschnitt 5.1). Anschließend werden die produktbeschreibenden Daten als Ressource für maschinelle Lernmethoden betrachtet (Abschnitt 5.2). In Abschnitt 5.3 wird auf das notwendige Prozess- und Methodenwissen zur Durchführung der systematischen Datenanalyse eingegangen. Durch die Vorüberlegungen kann anschließend

ein Gesamtkonzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung abgeleitet (Abschnitt 5.4.1) sowie die konzeptionell notwendigen Haupt- und Hilfskomponenten definiert werden. Die Haupt- und Hilfskomponenten sind als Vorbereitung für die Umsetzung als wissensbasiertes Assistenzsystem anzusehen (Abschnitt 5.4.2). Einzelne Ausschnitte des Konzeptes wurden vom Autor in [P6; P3; P7] veröffentlicht.

5.1 Strategie zur Unterstützung der Produktentwicklung

Zur Unterstützung der Produktentwickler bei der Eigenschaftsabsicherung muss ein sinnvoller Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess definiert werden, bei welchem der Einsatz von datengetriebenen Analysen sinnvoll ist. Im Sinne des systematischen Problemlösungszyklus steht nach der Systemsynthese die Systemanalyse an (siehe Bild 6 auf S.18). Bei der Systemanalyse werden die Produkteigenschaften ermittelt, um das Produkt im aktuellen Entwicklungsstand zu beurteilen und eine Entscheidung für das weitere Vorgehen zu treffen. Die Systemanalyse und die nachfolgenden Schritte „Beurteilung und Entscheidung“ dienen maßgeblich der Eigenschaftsabsicherung. Wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, gibt es bei bestimmten Produkteigenschaften eine Diskrepanz zwischen den erwarteten und tatsächlichen Produkteigenschaften. Experten in der Domäne der Produktentwicklung und des Produktes kennen die Produkteigenschaften, die durch bekannte Methoden und Maßnahmen in der Produktentwicklung nicht oder nur schwer abgesichert werden können [P3]. Bei der Entwicklung von Windenergieanlagen sind das die akustischen Produkteigenschaften (siehe Abschnitt 4.2.3). Durch das Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung sollen die etablierten Methoden und Prozesse nicht ersetzt, sondern das Repertoire der Produktentwickler um ein neues Werkzeug zur Nutzung der datengetriebenen Ansätze ergänzt werden.

In Bild 33 ist der Entwicklungsprozess der aktuellen und der vorangegangenen Produktgenerationen dargestellt. Im Entwicklungsprozess der aktuellen Produktgeneration soll das wissensbasierte Assistenzsystem den Produktentwickler genau dann unterstützen, wenn die schwer abzusichernden Produkteigenschaften betrachtet werden. Schwer abzusichernde Produkteigenschaften zeigen sich, wenn mehrere Systemsynthese und -analyseiterationen nicht ausreichen, um die Produkteigenschaften sicherzustellen oder die tatsächlichen Produkteigenschaften von den erwarteten Produkteigenschaften abweichen (siehe Abschnitt 1.1). Hierzu sind in Bild 33 beispielhaft vier

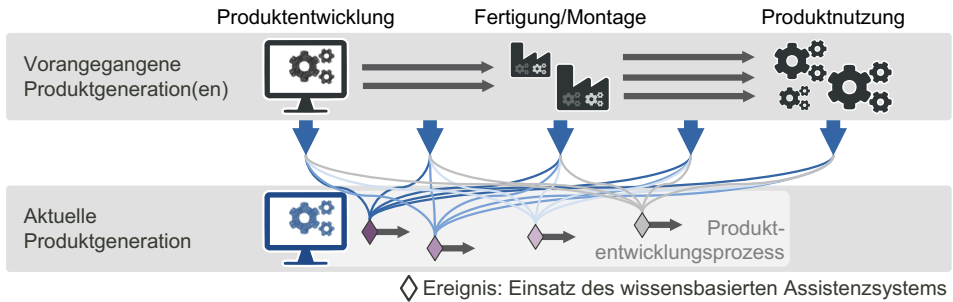


Bild 33: Strategie zur Unterstützung der Produktentwicklung durch den Einsatz eines wissensbasierten Assistenzsystems.

Ereignisse dargestellt, bei welchen durch die Analyse von produktbeschreibenden Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen neue Erkenntnisse für den Produktentwickler zu erwarten sind. Hierbei werden produktbeschreibende Daten verschiedener Lebensphasen aus den vorangegangenen Produktgenerationen in Betracht gezogen, insbesondere die Phase der Produktnutzung, da diese die tatsächlichen Produkteigenschaften einer Produktgeneration beschreibt. Auf die produktbeschreibenden Daten als Ressource für die datengetriebene Produktentwicklung wird in Abschnitt 5.2 genauer eingegangen. Die Zeitpunkte der Ereignisse im Entwicklungsprozess werden durch die Experten in der Domäne der Produktentwicklung bestimmt, die mit den Abschnitten und den Entscheidungen im Entwicklungsprozess vertraut sind. Hierdurch werden die Problemlösungszyklen im Entwicklungsprozess identifiziert und definiert, bei welchen die datengetriebene Analyse als Ergänzung der konventionellen Methoden eingesetzt werden können. Auf die Identifikation des Zeitpunkts sowie die Akquisition des Expertenwissens wird in Abschnitt 5.3 genauer eingegangen.

5.2 Produktbeschreibende Daten als Ressource für maschinelle Lernmethoden

Durch die voranschreitende Digitalisierung werden produktbeschreibende Daten erhoben, verwaltet und repräsentiert und stehen somit bei der Entwicklung der aktuellen Produktgeneration zur Verfügung. Da die produktbeschreibenden Daten primär zur Eigenschaftsabsicherung erhoben, verwaltet und dokumentenzentriert repräsentiert werden (siehe Abschnitt 2.2.5), können diese nicht direkt in der datengetriebenen Analyse genutzt werden. Wie in Abschnitt 2.3.3 dargestellt, haben die maschinellen Lernmethoden besondere Anforderungen an die Eingangsdaten. In diesem Abschnitt wird

aus diesem Grund die erste Forschungsfrage beantwortet: *Wie müssen produktbeschreibende Daten strukturiert und verwaltet werden, sodass sie in maschinelle Lernmethoden genutzt werden können?* Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein Konzept entwickelt, wodurch produktbeschreibende Daten gelesen, aufbereitet und strukturiert werden, sodass der Einsatz in maschinellen Lernmethoden möglich ist.

Wie in Abschnitt 5.1 dargestellt, wird im Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung eine *situative Unterstützung der Produktentwickler* angestrebt. Das Assistenzsystem muss demnach genau die produktbeschreibenden Daten akquirieren, die bei der datengetriebenen Analyse berücksichtigt werden sollen. Hierdurch wird erstens vermieden, dass die produktbeschreibenden Daten redundant im Assistenzsystem verwaltet werden und zweitens das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Assistenzsystems maximiert wird.

Im Folgenden werden Beispiele aus Sicht eines Produktentwicklers angegliedert, der in hypothetischen Szenarien produktbeschreibende Daten aus dem Anwendungskontext „tonhaltige Windenergieanlagen“ für maschinelle Lernmethoden vorbereitet. Hierdurch wird der Weg vom Stand der Technik, d. h. von der verteilten Verwaltung der produktbeschreibenden Daten in unterschiedlichen IT-Systemen, hin zur starken Strukturierung der Daten im Assistenzsystem aufgezeigt. Der Produktentwickler wird auf diesem Weg mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert, die in den folgenden

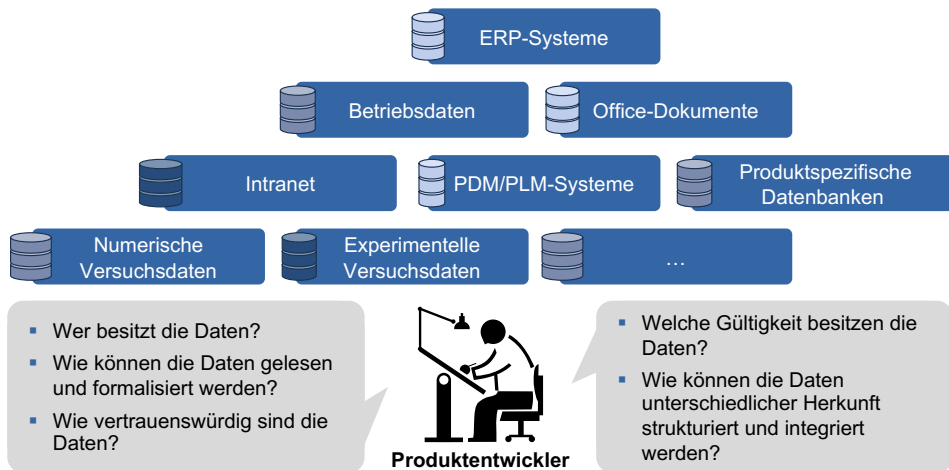


Bild 34: Herausforderung: Produktbeschreibende Daten als Ressource für maschinelle Lernmethoden.

Abschnitten diskutiert werden. Die zentralen Herausforderungen sind in Bild 34 zusammengefasst.

5.2.1 Herkunft der produktbeschreibenden Daten

Die Akquisition von Daten und Informationen im Aufgabenfeld der Produktentwickler wird als besonders unangenehm wahrgenommen. Das zeigt eine Studie „Kollaborative Produktentwicklung und digitale Werkzeuge“ aus dem Jahr 2013, welche die Arbeitsweise von Ingenieuren analysierte. [221] Die industrielle Praxis zeigt, dass unterschiedliche IT-Systeme zur Verwaltung der produktbeschreibenden Daten eingesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2.3). In Abschnitt 2.4.2 wurde erörtert, dass trotz der Etablierung von PDM-Systemen in der industriellen Praxis, wichtige Wissens- und Informationsobjekte in digitalen Ordnerstrukturen verwaltet werden. Das bedeutet, dass wichtige produktbeschreibenden Daten an Personen gebunden sind und deshalb häufig von Person zu Person ausgetauscht werden [222]. Falls experimentelle oder numerische Versuche zur Eigenschaftsabsicherung für das Produkt durchgeführt werden, verbleiben die Ergebnisse deshalb sehr häufig bei den verantwortlichen Produktentwicklern [223]. Dieses Vorgehen widerspricht dem Interesse der Unternehmen, den Wissenstransfer einfach zu gestalten. Eine Möglichkeit für die Unternehmen besteht darin, die Entwicklungsprozesse anzupassen, sodass produktbeschreibende Daten vermehrt mit anderen Produktentwicklern geteilt werden [224].

Beispiel: Der Produktentwickler möchte Schallemissionsmessungen einer tonhaltigen Windenergieanlage beziehen. Diese Messungen können zum einen in einem Messdatenmanagementsystem gespeichert oder im Besitz des Messingenieurs sein. Sofern eine Messung von einem externen Dienstleister durchgeführt wurde, sind die Daten zur Messung häufig auf einen Messbericht beschränkt. Um diese Daten zu beziehen, muss der Produktentwickler die Datenquelle kennen. Gängige Praxis ist in diesem Fall, die Daten selbst zu suchen oder Experten in der Domäne der Produktentwicklung nach der Quelle zu fragen, weshalb die Datenakquisition sehr viel Zeit in Anspruch nehmen kann.

Aufgrund der unklaren Situation zur Verwaltung der produktbeschreibenden Daten wird ein möglichst generischer Ansatz konzipiert: Das Assistenzsystem muss die Herkunft von produktbeschreibenden Daten für ein Ereignis im Produktentwicklungsprozess erfassen können. Hierzu müssen relevante Quellen im Unternehmen identifiziert und die produktbeschreibenden Daten in das Assistenzsystem importiert werden. Dies ist im

Hinblick auf die informationstechnische Umsetzung nur möglich, wenn ein Dateiformat für die Austauschdokumente definiert wird, das durch das Assistenzsystem gelesen werden kann. Aus diesem Grund wurden zum Austausch der Dokumente standardisierte oder ASCII-Dateiformate gewählt, um die Schnittstellenproblematik [220] zwischen verschiedenen IT-Werkzeugen zu umgehen. Gängige Autorensysteme und PDM-Systeme besitzen hierzu in der Regel Exportmöglichkeiten oder nutzen häufig bereits ASCII-Dateiformate (z. B. Messergebnisse der Zustandsüberwachung (CMS) einer Maschine im XML-Dateiformat, Produktstrukturdaten im XLSX-Dateiformat aus dem ERP-System SAP). Die Austauschdokumente werden zum einen aus den IT-Systemen zur Verwaltung der produktbeschreibenden Daten oder aus dem digitalen Ordnerstrukturen von (externen) Personen bezogen, die für die ursprüngliche Datenerhebungen zuständig sind. Auf die Nutzung einer API-Anbindung zum direkten Bezug der Austauschdokumente aus anderen IT-Systemen (z. B. PDM-Systeme) wurde explizit in dieser Arbeit verzichtet, da die Diversität der eingesetzten IT-Werkzeuge einen hohen Implementierungsaufwand verursachen, welcher zum einen der Aufgabenstellung dieser Arbeit nicht gerecht wird und zum anderen das Konzept auf wenige IT-Werkzeuge einschränkt. Darüber hinaus findet der Austausch von Dokumenten mit produktbeschreibenden Daten zum Teil über Unternehmensgrenzen hinweg statt (OEM ↔ Zulieferer oder OEM ↔ Subfirmen), wodurch dem Produktentwickler aufgrund des ASCII-Datenformats eine Möglichkeit zur Kontrolle der Dokumente erhalten bleibt.

5.2.2 Datenmodell für maschinelle Lernmethoden

Nachdem die Quelle der relevanten produktbeschreibenden Daten bestimmt wurde, können die ASCII-Austauschdokumente bezogen werden. In Abschnitt 2.3.2 wurde gezeigt, dass ein wesentlicher und aufwändiger Schritt in den Vorgehensmodellen zum maschinellen Lernen in der Datenvorbereitung liegt. Es muss demnach in der Datenvorbereitung sichergestellt werden, dass der Inhalt der produktbeschreibenden Daten interpretiert werden kann. Bei produktbeschreibenden Daten muss zudem ein besonderes Augenmerk auf die Vergleichbarkeit gelegt werden, da die Daten aus unterschiedlichen Quellen und häufig unter verschiedenen Randbedingungen erhoben wurden.

Beispiel: Möchte ein Produktentwickler die Betriebsschwingungen von einem Getriebe vergleichen, welche zum einen auf dem Prüfstand des

Zulieferers und zum anderen auf der Windenergieanlage gemessen wurden, müssen die Randbedingungen beider Messungen bekannt und erfasst sein. Zu den Randbedingungen gehören bspw. die Betriebspunkte, die durch eine eindeutige Drehzahl und ein Drehmoment definiert sind, oder die Position der Sensoren auf dem Getriebe. Die Randbedingungen der Messung müssen jeweils für den Prüfstand und der Windenergieanlage erfasst werden.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde das ML-Datenmodell zur formalen Repräsentation der produktbeschreibenden Daten bis zur Inhaltsebene entwickelt. Es orientiert sich an den Schritten zur Datenvorbereitung der Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten (siehe Abschnitt 2.3.2), d. h. den Schritten, die vor dem Einsatz der maschinellen Lernmethoden manuell durchgeführt werden müssen. Darüber hinaus wurde das Augenmerk auf die Vereinheitlichung verschiedener Dateiformate gelegt, sodass der Anforderung an die Strukturierung der produktbeschreibenden Daten auf der Inhaltsebene Rechnung getragen wird (siehe Abschnitt 4.3). Das ML-Datenmodell ist in Bild 35 abgebildet.

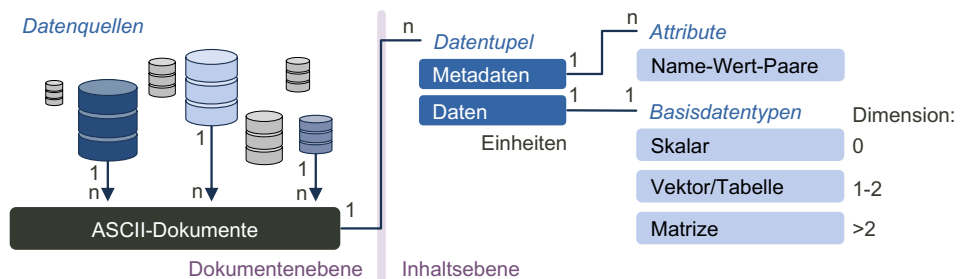


Bild 35: Das ML-Datenmodell zur formalen Repräsentation der produktbeschreibenden Daten bis zur Inhaltsebene.

Das ML-Datenmodell zur formalen Repräsentation der produktbeschreibenden Daten in Bild 35 beginnt bei den *Datenquellen*, von welchen die produktbeschreibende Daten bezogen werden. Hierbei wurde berücksichtigt, dass Daten zur Beschreibung einer Produkteigenschaft von den Autoren-systemen häufig auf mehrere Dokumente und in unterschiedliche Ordner aufgeteilt werden (z. B. falls die Beschleunigungswerte eines Sensors der verschiedenen Raumrichtungen in separaten Dateien vorliegen). Eine Datenquelle beschreibt dadurch die Ordner- und Dateistruktur, sowie den Aufbau der ASCII-Austauschdokumente für einen bestimmten zusammenhängenden Datensatz.

Um von der Dokumentenebene auf die Inhaltsebene zu gelangen, muss das Assistenzsystem die ASCII-Austauschdokumente in Datentupel überführen. Hierbei können in den ASCII-Austauschdokumenten der Datenquelle mehrere Datentupel vorliegen. Das *Datentupel* stellt einen Container dar, der die Metadaten und die Daten selbst repräsentiert. Analog zu der Handhabung in PDM-Systemen (siehe Abschnitt 2.2.4), bestehen *Metadaten* („Daten über Daten“) aus einer beliebigen Menge von Namen-Wert-Paaren (Attributen), die das Datentupel genauer beschreiben. Die Einführung der Metadaten ist durch die Notwendigkeit begründet, die Daten nach der Akquisition zu vergleichen und für maschinelle Lernmethoden verknüpfen zu können. Die Anzahl der Attribute eines Datentupel kann von Datentupel zu Datentupel variieren.

Beispiel: Durch die Trennung von Metadaten und Daten können neben der Messreihe auch die Informationen zur Messreihe gespeichert werden. Zum Beispiel werden einer Betriebsschwingungsmessung der jeweilige Betriebspunkt und die Sensorposition zugeordnet. Attribute sind hier zum Beispiel: Drehmoment = 0,89 kN; Drehzahl = 23 ^{mm}/s; Sensorposition = "C".

Analog zu den Metadaten in PDM-Systemen, welche die Dokumente selbst genauer beschreiben [79], dienen die Metadaten im ML-Datenmodell zur Beschreibung der Daten auf ihrer Inhaltsebene. Die Metadaten sind häufig Teil der ASCII-Austauschdokumente, bspw. im Kopf der Datei. Der Ort der Metadaten muss jeweils in der Definition einer Datenquelle erfasst sein. Sollten wichtige Metadaten aus einer Datenquelle nicht bezogen werden können, so müssen diese dem Assistenzsystem manuell vom Produktentwickler zur Verfügung gestellt werden. Dies stellt auch das Vorgehen in PDM-Systemen dar. Kontrollmechanismen, die den Import von Daten in das Assistenzsystem überwachen, müssen hierbei für die Vollständigkeit und Konsistenz der Metadaten sorgen.

Die *Daten* selbst werden den ASCII-Austauschdokumenten entnommen und entsprechend ihrer Dimension in die Datentupel abgelegt. Hierbei wird zwischen drei Basisdatentypen unterschieden: Skalar, Vektoren / Tabellen und Matrizen (siehe Tabelle 8). Skalare repräsentieren einzelne Werte. Die Vektoren oder Tabellen stellen ein- oder zweidimensionales Array dar. Die Matrizen repräsentieren mehrdimensionale Daten. Durch die Unterscheidung wird auf die informationstechnische Umsetzung Rücksicht genommen. Jeder Dimension der Daten ist fest eine Einheit zugeordnet, da

falsche oder nicht richtig umgerechnete Einheiten ein hohes Fehlerpotential bei der Eigenschaftsabsicherung von Produkten darstellen.

Tabelle 8: Basisdatentypen der Daten nach [P6].

Basisdatentyp	Dimension	Beispiel im Anwendungskontext	
Skalar	0	Tonhaltigkeitsbewertung	'Ja'
Vektor / Tabelle	1, 2	Schallemissionsspektrum bestehend aus Frequenz f , Amplitude A und Phase φ	$[f; A; \varphi]$
Matrize	> 2	Schalltransferpfade H_p zwischen Anregungs- m und Messpunkt n für den Frequenzgang f	$H_p[m, n, f]$

Das ML-Datenmodell ermöglicht produktbeschreibende Daten unterschiedlicher Herkunft auf ihrer Inhaltsebene zu formalisieren. Hierdurch wird die Voraussetzung geschaffen, produktbeschreibende Daten auf ihrer Inhaltsebene zu strukturieren und in einem Produktmodell zu integrieren. Die Integration und Strukturierung auf der Inhaltsebene ist ein wichtiger Schritt vor der Durchführung von datengetriebenen Analysen mittels der maschinellen Lernmethoden.

5.2.3 Qualität der produktbeschreibenden Daten

Angenommen verschiedene produktbeschreibende Daten unterschiedlicher Herkunft wurden in das ML-Datenmodell überführt und diese werden nachfolgend in maschinellen Lernmethoden eingesetzt. Hierbei muss dem Produktentwickler die Frage beantwortet werden, wie vertrauenswürdig ein Analyseergebnis ist. Die Antwort auf diese Frage ist unmittelbar mit den produktbeschreibenden Daten verknüpft, die zur Analyse herangezogen wurden. Das Analyseergebnis kann maximal die Qualität und Güte der produktbeschreibenden Daten im ML-Datenmodell erlangen, die als Eingangsdaten in den maschinellen Lernmethoden genutzt werden. Die Qualität in der Eigenschaftsabsicherung wird dadurch ausgedrückt, wie genau die produktbeschreibenden Daten die tatsächlichen Produkteigenschaften ausdrücken.

Beispiel: Akquiriert der Produktentwickler Schallemissionsmessungen an einer Windenergieanlage (Messung: tatsächlichen Produkteigenschaften)

haben diese Daten i. d. R. eine höhere Aussagegüte als eine akustische CAE-Simulation (Berechnung: erwartete Produkteigenschaften).

Zur Definition der Qualität von Daten und Informationen gibt es eine Vielzahl von Faktoren. ROHWEDER et al. [225] hat für die Informationsqualität 15 Dimensionen definiert, die in vier Kategorien aufgeteilt sind (siehe Bild 36). Die vier Kategorien beschreiben die vier Untersuchungsgegenstände System, Inhalt, Darstellung und Nutzung der Daten und Informationen. Für produktbeschreibende Daten im ML-Datenmodell sind vor allem die Dimension der Glaubwürdigkeit (*Wie vertrauenswürdig und zuverlässig sind die Daten?*) und der einheitlichen Darstellung (*Werden die Daten personenunabhängig im gleichen Format und Layout erhoben?*) von Relevanz. Der Dimension der einheitlichen Darstellung wurde bereits durch das ML-Datenmodell selbst Rechnung getragen (siehe Abschnitt 5.2.2). Die anderen hervorgehobenen Dimensionen (Aktualität, Relevanz, Zugänglichkeit, Bearbeitbarkeit, Übersichtlichkeit) in Bild 36 werden durch die informationstechnische Umsetzung als wissensbasiertes Assistenzsystem berücksichtigt (siehe Abschnitt 5.4.2 und Kapitel 6).

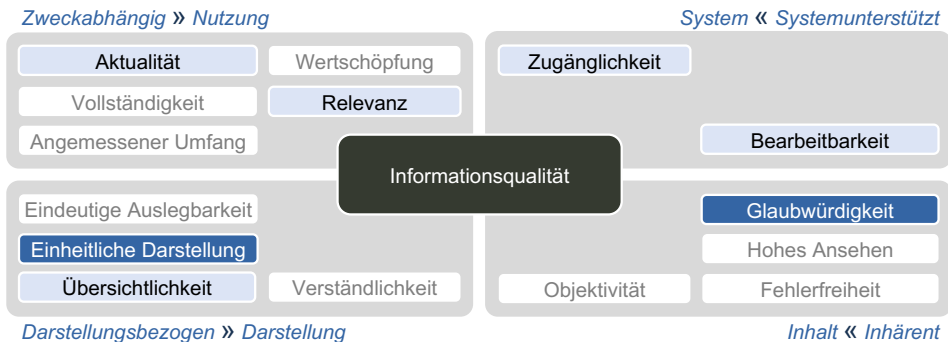


Bild 36: Die 15 Dimensionen der Informationsqualität nach [225].

Die Dimension der Glaubwürdigkeit bestimmt die Vertrauenswürdigkeit und Zuverlässigkeit von Daten und Informationen. Aus diesem Grund ist die Glaubwürdigkeit im Hinblick auf die Wiederverwendung von produktbeschreibenden Daten die wichtigste Dimension der Informationsqualität. Im Hinblick auf die produktbeschreibenden Daten und deren Einsatz in maschinellen Lernmethoden wird deshalb im Folgenden die Glaubwürdigkeit als Qualitätskriterium für produktbeschreibende Daten definiert.

Die Glaubwürdigkeit der produktbeschreibenden Daten wird insbesondere durch deren Herkunft und der Methode der Datenerhebung bestimmt. Zur Bestimmung von Indikatoren für die Glaubwürdigkeit wurden die Tätigkeiten bei der Eigenschaftsabsicherung im Produktentwicklungsprozess untersucht. Die Erhebung von Daten findet immer während der Systemanalyse des systematischen Problemlösungszyklus statt (siehe Abschnitt 2.2.2.3). Je früher die Eigenschaften im Produktentwicklungsprozess ermittelt werden, desto niedriger ist die Glaubwürdigkeit hinsichtlich der tatsächlichen Produkteigenschaften. Dies liegt nicht zwangsweise an der Phase des Produktentwicklungsprozesses, sondern an den Erhebungsmethoden, die bei der Systemanalyse eingesetzt werden. Da durch den Zeitpunkt der Datenerhebung nicht auf die Methode geschlossen werden kann, wird die Methode der Datenerhebung als Indikator zur Klassifizierung der Glaubwürdigkeit genutzt. Hierzu wurden im Kontext der Eigenschaftsabsicherung fünf Qualitätsklassen identifiziert. Die Qualitätsklassen der produktbeschreibenden Daten als Indikator für die Glaubwürdigkeit sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Qualitätsklassen von produktbeschreibenden Daten.

Datenerhebung durch	Qualitätsklasse
① Annahmen	<i>sehr niedrig</i>
② Analytische Berechnung	<i>niedrig</i>
③ Numerische Versuche (CAE-Berechnung / Simulation)	<i>mittel</i>
④ Experimentelle Versuche (Messungen)	<i>hoch</i>
⑤ Tatsachen (Produktmerkmale)	<i>sehr hoch</i>

Die Qualitätsklassen in Tabelle 9 drücken das Gefälle zwischen Annahmen und Tatsachen aus. Annahmen ① haben die geringste Glaubwürdigkeit (Qualitätsklasse „*sehr niedrig*“), z. B. Vermutungen von Experten oder angenommene Eigenschaften des Produktes. In der Produktentwicklung werden zu Beginn häufig hypothesengetriebene Nachrechnungen, Auslegungsrechnungen und Optimierungsrechnungen durchgeführt [17]. Hierzu wird ein mathematisches und berechenbares Modell des Produktes abstrahiert, womit nur bestimmte, kritische Produkteigenschaften ermittelt werden. Aus diesem Grund wird bei analytischen Berechnungen ② eine Qualitätsklasse von „*niedrig*“ angenommen. Bei numerischen Versuchen wird ebenfalls ein Modell des Produktes gebildet, allerdings können

durch die Computerunterstützung wesentlich mehr Randbedingungen berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, weichen die CAE-Berechnungsergebnisse, im Speziellen von komplexeren Produkteigenschaften, von den tatsächlichen Produkteigenschaften ab. Deshalb wird bei den numerischen Versuchen (3) eine Qualitätsklasse von „mittel“ zugeordnet. Die sicherste Methode zur Erhebung der tatsächlichen Produkteigenschaften sind experimentelle Versuche. Die produktbeschreibenden Daten werden während der Produktentwicklung hypothesengetrieben durch die Herstellung eines Prototyps oder nach der Fertigung und Montage am tatsächlichen Produkt durch Messungen erhoben. Aus diesem Grund wird experimentellen Versuchen (4) eine „hohe“ Glaubwürdigkeit zugeordnet. Die höchste Glaubwürdigkeit mit „sehr hoch“ haben Tatsachen (5). Zu den Tatsachen zählen alle Produktmerkmale, wie bspw. die Produktstruktur. Die Struktur von Produkten vorangegangener Generationen werden zum Zeitpunkt des Einsatzes des wissensbasierten Assistenzsystems, d. h. in der aktuellen Produktgeneration (siehe Ereignisse in Abschnitt 5.1), als unveränderbar und deshalb als Tatsache angenommen.

Die Qualitätsklasse erschließt sich implizit aus der Datenquelle. Sie wird im ML-Datenmodell als Pflichtattribut in den Metadaten erfasst. Hierdurch wird die Glaubwürdigkeit für jede Datentupel quantifiziert, sodass ein Analyseergebnis durch den Produktentwickler entsprechend interpretiert und eingeordnet werden kann.

5.2.4 Strukturierung und Integration der produktbeschreibenden Daten

Nach der Erhebung der produktbeschreibenden Daten und der Formalisierung im ML-Datenmodell muss der Strukturierung und Integration Rechnung getragen werden. Nach BACHSCHUSTER [226] werden hierzu Produktmodelle etabliert, um den „problemlosen Austausch von Produktdaten“ zu gewährleisten. Die Struktur eines Produktes wird von den Produktentwicklern durch die Modellierung im CAD-System festgelegt, wobei das gesamte Produkt in Baugruppen und Bauteile aufgeteilt wird [10; 227]. Diese Strukturierung anhand der Geometrie eines Produktes stellt die gewohnte Vorgehensweise der Produktentwickler dar. Anwender des Assistenzsystems sind ebenso Produktentwickler, weshalb in dieser Arbeit die geometrische Produktstruktur als Basis des Produktmodells im Sinne der „product structure [...] as information backbone“ [6; 228] forciert wird.

Angenommen verschiedene produktbeschreibende Daten unterschiedlicher Herkunft wurden in das ML-Datenmodell überführt und müssen nachfolgend vom Produktentwickler in die Produktstruktur integriert werden. Hierbei muss den Produktentwicklern die Frage beantwortet werden, ob das beschriebene Produktverhalten in den Datentupeln auf andere Produkte, Baugruppen oder Bauteile der Serie übertragbar bzw. gültig ist. Die Übertragbarkeit hängt in diesem Fall nicht nur von der hierarchischen Produktstruktur ab, sondern auch auf welche Weise die Daten erhoben wurden. Eine Messung an einem Prototyp definiert die Produkteigenschaften an einem Prototyp und ist deshalb auch nur für diesen Prototyp sicher gültig [17]. Die CAE-Simulationen werden i. d. R. mit den nominellen Merkmalen eines Produktes durchgeführt, weshalb die CAE-Simulationen die tatsächlichen Produkteigenschaften häufig nicht sicher offenbaren (siehe Abschnitt 1.1). Da in der CAE-Simulation die nominellen Produktmerkmale genutzt werden und diese für alle Produkte, Baugruppen und Bauteile der Serie gültig sind, müssen auch die ermittelten Produkteigenschaften für die gesamte Serie gültig sein. Der Gültigkeitsbereich einer CAE-Simulation ist deshalb größer als der einer Messung. Zusammenfassend bedeutet das: Je stärker das tatsächliche Produkt durch die Modellbildung vereinfacht wurde, desto größer ist der Gültigkeitsbereich der erhobenen Daten.

Beispiel: Schallemissionsmessungen an einer Windenergieanlage an einem Standort (Messung: tatsächlichen Produkteigenschaften) offenbart die Lautstärke und Tonhaltigkeiten der Windenergieanlage an diesem Standort. Die Qualitätsklasse ist „hoch“, allerdings kann aufgrund dieser konkreten Messung nicht auf andere Standorte geschlossen werden. Eine CAE-Simulation der Betriebsschwingungen am Getriebe beim Zulieferer haben eine „mittlere“ Qualitätsklasse und sind für alle Windenergieanlagen der Serie gültig, die dieses Getriebe verbaut haben.

Die Strukturierung und Integration von produktbeschreibenden Daten auf ihrer Inhaltsebene erfordert ein Produktmodell, welches neben der Produktstruktur auch den Gültigkeitsbereich berücksichtigt. Hinsichtlich dieser Kriterien werden im Folgenden etablierte Produktmodelle als Anregung und Definition einer Eigenwicklung vorgestellt und diskutiert.

5.2.4.1 Das Produktmodell nach ISO 10303 (STEP)

Die bekannteste und weit verbreitete Definition eines Produktmodells stellt der „Standard of the Exchange of Product model data (STEP)“ dar, welcher in der internationalen Norm ISO 10303 „Product Data Representation and

Exchange“ beschrieben wird [75]. Nach [229] ist STEP als ein integriertes Produktmodell zum Austausch von Produktdaten zwischen Autorensystemen über alle Lebensphasen eines Produktes definiert (siehe Abschnitt 2.2.4). Die Beschreibung des STEP-Produktmodells erfolgt durch die Definition verschiedener Anwendungsprotokolle als Implementierungsvorgabe, die in verschiedene Serien gegliedert sind [75]. Hierbei setzt die Norm auf die Datenmodellierungssprache EXPRESS (textuell) und EXPRESS-G, welche eine graphische Notation von EXPRESS darstellt [74]. Ein Beispiel einer Produktstruktur ist in Bild 37 mittels EXPRESS-G der ISO 10303 dargestellt.

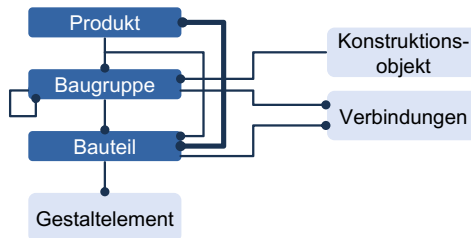


Bild 37: Ein Auszug eines Produktmodells in EXPRESS-G am Beispiel von [6].

Der Modellierung des Produktmodells ist bei STEP relativ große Freiheit gelassen, wobei die Produktstruktur mindestens aus Bauteilen und Baugruppen bestehen muss [229]. Innerhalb des STEP-Konsortiums gibt es verschiedene Forschungsaktivitäten zur Erweiterung des bisherigen Standards: Ein Ziel ist die Repräsentation und Integration des Produktverhaltens über alle Lebensphasen eines Produktes [229]. STEP als solches ist ein sehr umfassender Standard und erfüllt die gestellten Anforderungen an die Produktstruktur. Allerdings kann bei der Modellierung der Produktstruktur keine Rücksicht auf den Gültigkeitsbereich von produktbeschreibenden Daten genommen werden, weshalb STEP zum aktuellen Zeitpunkt die Anforderungen zur Strukturierung und Integration von produktbeschreibenden Daten nicht erfüllt.

5.2.4.2 PLM-Integrationskonzept zur Verwaltung von Produktnutzungsinformationen

ABRAMOVICI et al. [149] und NEUBACH [19] entwickelten ein Integrationskonzept zur Verwaltung von Produktnutzungsinformationen in PLM-Systemen. Sie beschrieben hierbei die Grenzen bestehender PLM-Systeme bei der Verwaltung von produktbeschreibenden Daten aus der Produktnutzungsphase

und den Herausforderungen bei der Integration in die PLM-Systeme. Die Autoren zeigen, dass aktuelle PLM-Systeme vor allem zur Unterstützung der Produktentwicklung eingesetzt werden. Hierbei werden alle Produkte als ideales Modell repräsentiert, weshalb individuelle Messergebnisse der Produktnutzungsdaten (genannt Zustandsüberwachungsdaten oder Feedbackdaten) nicht möglich sind. Die Autoren entwickelten deshalb ein Integrationskonzept, das die Verwaltung von Produktinformationen auf Produktmodell- und Produktinstanzebene ermöglicht (siehe Bild 38).

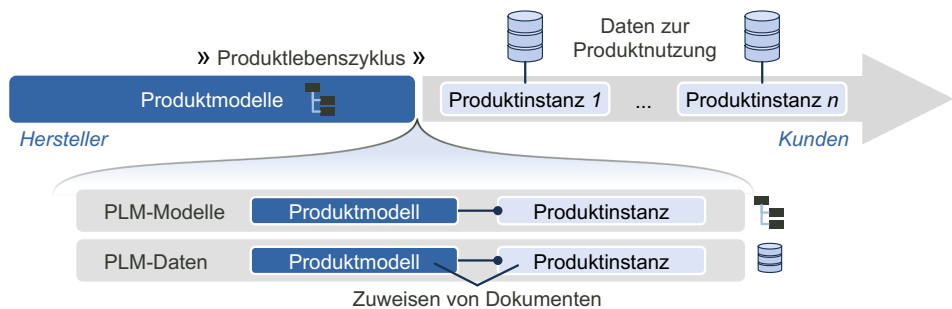


Bild 38: Konventionelles und integriertes Konzept zur Abbildung von Produktnutzungsdaten in PLM-Systemen nach [149; 19].

In Bild 38 ist oben das konventionelle PLM-Konzept dargestellt, in welchem hauptsächlich Produktmodelle durch den Hersteller eines Produktes verwaltet werden. Die erfassten Daten während der Herstellung des Produktes in der dritten Lebensphase „Fertigung, Montage, Prüfung“ und die Produktnutzungsdaten des Kunden oder der Nutzer des Produktes in der fünften Lebensphase „Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung“ können zwar in den Produktmodellen verortet werden, sind aber dadurch den einzelnen Produktinstanzen nicht mehr zuzuordnen. Das Integrationskonzept (Bild 38, unten) begegnet dieser Herausforderung durch die Erweiterung des PLM-Metadatenmodells der PLM-Systeme. Neben speziellen Modifikationen zur Handhabung von Produktnutzungsdaten, stellt der Kern dieses Konzeptes die Erweiterung der Produktmodelle um Produktinstanzen dar. Hierdurch können Dokumente von den Produktinstanzen (z. B. Messdaten von der Zustandsüberwachung eines Produktes) genau diesem Produkt (Produktinstanz) zugeordnet werden. [149; 19]

Die Einführung von Produktinstanzen sieht der Autor dieser Arbeit als einen richtigen Weg zur Integration von produktbeschreibenden Daten. Das erweiterte PLM-Integrationskonzept zur Verwaltung von Produktnutzungsdaten

geht allerdings bei der Integration nicht weit genug: Erstens werden die produktbeschreibenden Daten auf Dokumentenebene verwaltet, weshalb es für die Verwaltung des ML-Datenmodells nicht geeignet ist. Das ist sicher dem Umstand geschuldet, dass PLM-Systeme die Verwaltung von produktbeschreibender Daten auf Dokumentenebene vorsehen. Zweitens unterscheidet das PLM-Integrationskonzept nicht zwischen Produkt, Baugruppen und Bauteile, was zur Beschreibung des Gültigkeitsbereichs allerdings von Relevanz ist.

5.2.4.3 Das Klain-Produktmodell zur Strukturierung und Integration produktbeschreibender Daten

Ein Produktmodell zur Strukturierung und Integration von produktbeschreibenden Daten bedarf einerseits der etablierten Produktstruktur, welche das Produkt in Baugruppen und Bauteile unterteilt (in Anlehnung an die ISO 10303). Andererseits muss die Möglichkeit bestehen, die im ML-Datenmodell formalisierten produktbeschreibenden Daten den Produktinstanzen zuzuordnen, um den Gültigkeitsbereich ausdrücken zu können.

WOLL [230] entwickelte ein „Modellierungsprinzip der Spezifikation“ zur Verallgemeinerung von Objekten in einer Produktstruktur, das zum einen die Produktstruktur und zum anderen die Produktinstanzen berücksichtigt. Der Autor differenziert hierbei zwischen „generischen“, „spezifischen“ und „individuellen Objekten“ [230]. Die generische Produktstruktur beschreibt den prinzipiellen Aufbau eines Produktes in der vierten Phase „Gliedern in realisierbare Module“ des Produktentwicklungsprozesses (z. B. Windenergieanlagen besitzen, u. a., ein Getriebe und einen Rotor). Die spezifische Produktstruktur beschreibt den prinzipiellen Aufbau eines Produktes, welches am Ende des Produktentwicklungsprozesses zur Verfügung steht und von einem Unternehmen als Produkt angeboten werden kann (z. B. den prinzipiellen Aufbau und die Spezifikation einer 3 MW Windenergieanlage). Da zur generischen Produktstruktur keine produktbeschreibenden Daten erhoben werden können, wird diese im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Die individuelle Produktstruktur entsteht, sobald das spezifische Produkt gefertigt und montiert wird (siehe Bild 39 auf der nächsten Seite)

In Bild 39 ist das entwickelte Klain-Produktmodell (Klassen-Instanzen-Produktmodell) zur Strukturierung und Integration von produktbeschreibenden Daten dargestellt. Das Klain-Produktmodell basiert hierbei auf dem Modellierungsprinzip nach WOLL [230], auf den Aspekten der ISO 10303 hinsichtlich der formalen Beschreibung der Produktstruktur und den Grund-

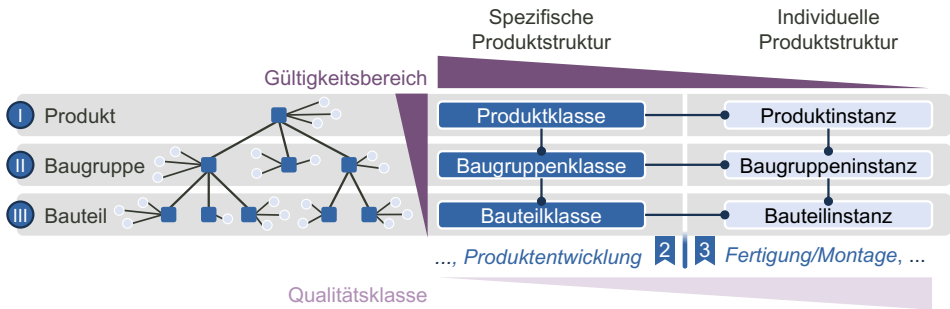


Bild 39: Das KLaIn-Produktmodell (Klassen-Instanzen-Produktmodell) zur Strukturierung und Integration von produktbeschreibenden Daten.

überlegungen zu Produktinstanzen im PLM-Integrationskonzept. Zur begrifflichen Unterscheidung zwischen den PLM-Produktmodellen und zur Schärfung der Begriffe wird in Anlehnung an die objektorientierte Softwareentwicklung in dieser Arbeit von *Klassen* (spezifische Produktstruktur) und *Instanzen* (individuelle Produktstruktur) gesprochen.

Die spezifische und individuelle Produktstruktur im KLaIn-Produktmodell, d. h. die Aufteilung in Produkte, Baugruppen und Bauteile, stellen Produktmerkmale dar und werden zum Zeitpunkt des Einsatzes des wissensbasierten Assistenzsystems als Tatsache mit einer „sehr hohen“ Qualitätsklasse betrachtet (siehe Abschnitt 5.2.3). Alle produktbeschreibenden Daten, die vor der Fertigung und Montage erhoben werden, müssen in die spezifische Produktstruktur verortet werden. Hierzu zählen die Auslegungsrechnungen und numerischen Versuche (CAE-Simulationen). Alle produktbeschreibenden Daten, die an einem tatsächlichen Produkt erhoben wurden, müssen in die individuelle Produktstruktur verortet werden. Hierzu zählen alle experimentellen Versuche (Messungen). Die hierarchische Strukturierung des Produktes in Baugruppen und Bauteile ermöglicht ein ML-Datenmodell entsprechend seines Ursprungs in das KLaIn-Produktmodell einzuordnen.

Beispiel: Schallemissionsmessungen an einer Windenergieanlage (Produkt) an einem Standort offenbaren die Lautstärke und Tonhaltigkeiten der Windenergieanlage. Die Windenergieanlage kann zwar nach ihrer Spezifikation baugleich zu Windenergieanlagen an anderen Standorten sein, sich aber dennoch aufgrund der Fertigungsabweichungen und verschiedenen Zweitlieferanten von Baugruppen und Bauteilen unterschiedlich verhalten. Die Schallemissionsmessung ist deshalb nur für diese Windenergieanlage an diesem spezifischen Standort gültig, weshalb die

Messdaten in der Produktinstanz dieser Windenergieanlage verortet werden. Eine CAE-Simulation der Betriebsschwingungen am Getriebe beim Zulieferer (Baugruppe) sind für alle Windenergieanlagen der Serie gültig, die dieses Getriebe verbaut haben. In einem numerischen Versuch wurde, wie üblich, die ideale Geometrie und Produktmerkmale des Getriebes genutzt. Aus diesem Grund werden die so erhobenen produktbeschreibenden Daten in der Baugruppenklasse verortet und dadurch an alle Baugruppeninstanzen an den verschiedenen Standorten vererbt.

Durch die hierarchische Struktur des Klaln-Produktmodells und die richtige Verortung der produktbeschreibenden Daten in diesem Modell wird direkt auf den Gültigkeitsbereich Rücksicht genommen. Die Gültigkeit der so verorteten produktbeschreibenden Daten werden mit ihrer Qualitätsklasse jeweils horizontal von Klasse → Instanz und vertikal von Produkt → Baugruppe → Bauteil vererbt. Auf diese Weise werden alle produktbeschreibenden Daten integriert und im richtigen Kontext bereitgestellt. Im Klaln-Produktmodell kann eine indirekte Korrelation zwischen der Qualitätsklasse (Abschnitt 5.2.3) und dem Gültigkeitsbereich festgestellt werden. Je höher die Qualitätsklasse der produktbeschreibenden Daten ist, desto kleiner ist ihr Gültigkeitsbereich.

5.3 Wissen zur Unterstützung bei der datengetriebenen Produktentwicklung

Ziel dieses Abschnitts ist die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage: *Wie kann Wissen zum maschinellen Lernen im Kontext der datengetriebenen Produktentwicklung formalisiert werden, sodass die Produktentwickler datengetriebene Analysen durchführen können?* Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein Konzept zur Akquisition und Formalisierung von Wissen zum Vorgehen bei der datengetriebenen Produktentwicklung entwickelt. Hierbei wurde insbesondere auf die Unterstützung des Wissenstransfers Wert gelegt, da interdisziplinäres Wissen bereitgestellt werden muss und die Produktentwicklung heutzutage über verschiedene Standorte weltweit in verschiedenen Teams hinweg kollaborativ stattfindet [224].

Wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, ist zur Etablierung der datengetriebenen Produktentwicklung Wissen aus zwei Domänen erforderlich: Expertenwissen aus der Domäne des maschinellen Lernens und der Produktentwicklung. Das Wissen aus der Domäne des maschinellen Lernens umfasst vor allem Methodenwissen zum maschinellen Lernen (siehe Abschnitt 2.3.3), d. h. die Entwicklung und Implementierung der datengetriebenen Analysen sowie

deren Anwendung auf Daten. Das Expertenwissen aus der Domäne der Produktentwicklung ist u. a. bei der Datenvorbereitung und Auswertung notwendig, d. h. bei der Auswahl der relevanten Daten für eine Analyseaufgabe und der Kontextualisierung und Validierung der gefundenen Muster. Darüber hinaus wird im Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung eine situative Unterstützung der Produktentwickler angestrebt (siehe Abschnitt 5.1). Die Maßnahmen zur Eigenschaftsabsicherung müssen deshalb in den gewohnten Produktentwicklungsprozess verankert werden, sodass die datengetriebenen Ansätze zum richtigen Zeitpunkt und für die richtigen Problemstellungen eingesetzt werden. Das wissensbasierte Assistenzsystem wird die infrastrukturellen und informationstechnischen Voraussetzungen schaffen, dass das hierzu erforderliche Wissen formalisiert und bereitgestellt werden kann. Hierdurch werden die Voraussetzungen geschaffen, um die Produktentwickler bei der datengetriebenen Produktentwicklung zu unterstützen.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten, werden im Folgenden Beispiele aus Sicht von PE-Experten und Produktentwicklern angegliedert, die ihren Ursprung im Anwendungskontext „tonhaltige Windenergieanlagen“ haben. Hierdurch wird die Entwicklung von der klassischen Produktentwicklung bis zum Einsatz von datengetriebenen Analysen für die Eigenschaftsabsicherung mithilfe des wissensbasierten Assistenzsystems aufgezeigt. Den Produktentwicklern und den PE-Experten begegnen auf diesem Weg verschiedene Herausforderungen, die in den folgenden Abschnitten diskutiert und im Konzept berücksichtigt werden. Die zentralen Herausforderungen sind in Bild 40 zusammengefasst.

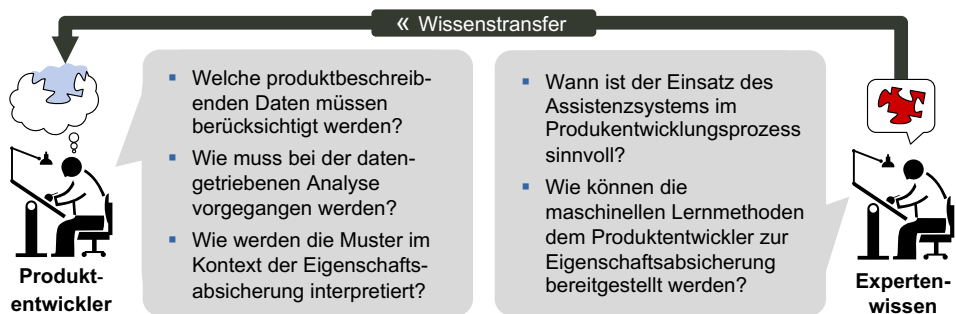


Bild 40: Herausforderung: Transfer von Wissen zum Vorgehen bei der datengetriebenen Produktentwicklung.

5.3.1 Umgang mit produktbeschreibenden Daten in der Eigenschaftsabsicherung

Der Einsatz des wissensbasierten Assistenzsystems zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung soll situativ erfolgen, um den herkömmlichen Produktentwicklungsprozess um ein Werkzeug für datengetriebenen Analysen zu ergänzen (siehe Abschnitt 5.1). Zur Integration des Assistenzsystems in den klassischen Produktentwicklungsprozess wurden im Jahr 2013 vom Autor PE-Experten und Produktentwickler eines Herstellers von Windenergieanlagen in Norddeutschland und Großgetrieben in Belgien begleitet. In den Unternehmen wurden strukturierte Interviews durchgeführt, um den Stand der Technik im Umgang mit produktbeschreibenden Daten zur Absicherung von Produkteigenschaften (siehe Abschnitt 1.1) zu erheben. Hierbei wurde insbesondere Augenmerk daraufgelegt, wie die produktbeschreibenden Daten zur Eigenschaftsabsicherung erhoben wurden, welche der Daten im aktuellen Produktentwicklungsprozess eingesetzt wurden und wie die beiden Rollen PE-Experte und Produktentwickler kooperierten. Die strukturierten Interviews wurden vom Autor bereits in [P3] veröffentlicht und sind im Folgenden zusammengefasst.

Zusammenfassung zu den strukturierten Interviews im Unternehmen: Das konventionelle Vorgehen der PE-Experten und Produktentwickler bestand darin, kollaborativ an Problemstellungen zu arbeiten. Es wurden produktbeschreibende Daten aus der vorangegangenen Produktgeneration herangezogen, um das Produktverhalten auf Basis aktueller Daten abzugleichen. Hierbei fand ein intensiver Austausch zwischen den verantwortlichen Produktentwicklern mit Experten verschiedener Domänen statt (z. B. Experte für Schallemissionsmessungen, Experte zur Simulation der Betriebsschwingungen). Die produktbeschreibenden Daten waren zum Teil im Besitz der Experten, d. h. nicht allgemein verfügbar. Für Vergleiche mit der aktuellen Produktgeneration wurden zum Teil hypothesengetrieben neue produktbeschreibende Daten erhoben und analysiert. Bei den produktbeschreibenden Daten handelte es sich hauptsächlich um numerische und experimentelle Versuchsergebnisse, die unterschiedliche Produkteigenschaften offenbarten. Die erhobenen Daten wurden sehr häufig mittels unternehmensinternen Algorithmen aufbereitet oder weiterverarbeitet, um anschließend in Visualisierungen einzufließen. Das Methodenwissen zur Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Daten sowie die Vorgabe zum generellen Vorgehen hierzu wurde durch die Experten der verschiedenen Domänen geprägt. Aufgrund der so erhobenen Daten konnten Entscheidungen hinsichtlich der Eigenschaftsabsicherung

und damit für den weiteren Produktentwicklungsprozess fundiert getroffen werden. Die Ingenieure betonten, dass die Vorgehensweisen für jede Produktgeneration ähnlich seien und bei Bedarf durch die Experten flexibel angepasst werden. [P3]

Die Erhebung zeigte, wie im industriellen Umfeld mit produktbeschreibenden Daten zur Eigenschaftsabsicherung umgegangen wird. Hierbei wurden auch verschiedene Aspekte zur Handhabung von produktbeschreibenden Daten bestätigt (siehe Abschnitt 2.2.3): Die produktbeschreibenden Daten waren kaum strukturiert und lagen in Form von Dokumenten unterschiedlicher Dateiformate vor. Verzögerungen bei der Entscheidungsfindung lagen vor allem daran, dass die PE-Experten und die Produktentwickler nach produktbeschreibenden Daten suchen mussten, d. h. es war nicht bekannt, wer bestimmte Daten erhoben hat, wo und in welchem IT-System diese abgelegt waren [P3]. Durch die Zusammenarbeit von PE-Experten und Produktentwickler war ein kontinuierlicher Wissenstransfer gegeben. Das Wissen zur Eigenschaftsabsicherung in der Produktentwicklung manifestiert sich demnach in den PE-Experten, die den Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess zur Erhebung und Analyse von produktbeschreibenden Daten vorgeben.

5.3.2 Repräsentation von Wissen zur Eigenschaftsabsicherung

Der Stand der Technik im vorangegangenen Abschnitt zeigt, dass zur Formalisierung von Wissen in der Eigenschaftsabsicherung das Expertenwissen eine wichtige Rolle spielt. Nach KARBACH & LINSTER [231] manifestiert sich Expertenwissen zur Lösung von Problemstellungen in sechs Aufgaben: Interpretation, Diagnose, Überwachung, Vorschau, Planung und Design. Die sechs Aufgaben beschreiben generisch die Tätigkeiten eines Experten, die auf dem theoretischen Fachwissen und dem heuristischen Erfahrungswissen des Experten basieren (siehe Abschnitt 2.4.2). Das heuristische Erfahrungswissen wird von THEL [171] als „Ablauf- und Vorgehenswissen“ bezeichnet, das auch im Rahmen dieser Arbeit von Relevanz ist. Im Wissensmanagement wird bei Wissen über Vorgehensweisen von Prozesswissen gesprochen [232]. Im Rahmen dieser Arbeit wird Ablauf- und Vorgehenswissen in der Produktentwicklung als UML-Aktivitätsdiagramme repräsentiert, da diese Form die geeignetste Methode zur Repräsentation von Prozesswissen darstellt (siehe Abschnitt 2.4.4.2 „Repräsentation von Prozesswissen“ auf S. 61).

5.3.2.1 Strukturierung von Prozesswissen

Im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses treten Ereignisse auf, die die Absicherung der Eigenschaften unter Nutzung von produktbeschreibenden Daten erfordern. Im Hinblick auf den systematischen Problemlösungszyklus sind aufgrund des Ereignisses verschiedene Synthese- oder Analyseschritte notwendig, die zur nachfolgenden Beurteilung und Entscheidung beitragen. Im Analyseschritt werden hierzu produktbeschreibende Daten erhoben. Die Erhebung der Daten erfolgt aufgrund von *Aktivitäten*, die vom Produktentwickler selbst durchgeführt oder in Auftrag gegeben werden. Die erhobenen Daten bilden darauffolgend die Grundlage für *Entscheidungen* hinsichtlich der Eigenschaften des Produktes. Die Abfolge der Aktivitäten und Entscheidungen stellen somit das Wissen zum Umgang mit den produktbeschreibenden Daten dar. Zur Strukturierung werden die verschiedenen Maßnahmen in Arbeitspakete unterteilt und in Projekte gruppiert. Darüber hinaus wird zur besseren Koordination jede Aktivität und Entscheidung einer Phase des Produktentwicklungsprozesses zugeordnet. Die Aufteilung in Projekte und die Zuordnung zu den Phasen des Produktentwicklungsprozesses bilden die Grundlage dafür, um darauf aufbauend eine situative Unterstützung für die datengetriebene Produktentwicklung zu realisieren. In Bild 41 auf der nächsten Seite ist zur Strukturierung des Prozesswissens ein Beispiel aus dem Anwendungskontext dargestellt.

Generell kann ein Projekt mehrere Arbeitspakete enthalten. In Bild 41 besitzt das Projekt zwei Arbeitspakete, wobei nur das erste erweitert dargestellt ist. In jedem Arbeitspaket sind UML-Aktivitätsdiagramme hinterlegt, die das Prozesswissen repräsentieren. Die UML-Aktivitätsdiagramme bestehen aus mehreren Aktivitäten und mehreren Verzweigungen (siehe Abschnitt 2.4.4.2), die im Kontext des systematischen Problemlösungszyklus als „Entscheidungen“ bezeichnet werden. Die Aktivitäten sind im Imperativ und die Entscheidungen als Fragen zu formulieren, wodurch der Prozess je nach Antwort in eine andere Richtung gelenkt wird. Die Aktivitäten und Entscheidungen sind den jeweiligen Phasen des Produktentwicklungsprozesses im Anwendungskontext zugeordnet. Ein Rücksprung auf bereits durchgeführte Aktivitäten oder getroffene Entscheidungen ist ebenso vorgesehen, wodurch Iterationen im Entwicklungsprozess abgebildet werden können. Hierdurch wird der Umgang mit produktbeschreibenden Daten zur Eigenschaftsabsicherung formal beschrieben und gleichzeitig der Zeitpunkt zur Durchführung der Maßnahmen im Produktentwicklungsprozess als Ereignis definiert.

Beispiel zum Bild 41: In der Rotorabteilung wird für die aktuelle Produktgeneration die Spezifikationen eines neuen Rotors freigegeben. Als Folge aus diesem Ereignis muss ein Produktentwickler in der Antriebsstrangabteilung die geforderten Eigenschaften für die aktuelle Produktgeneration absichern.

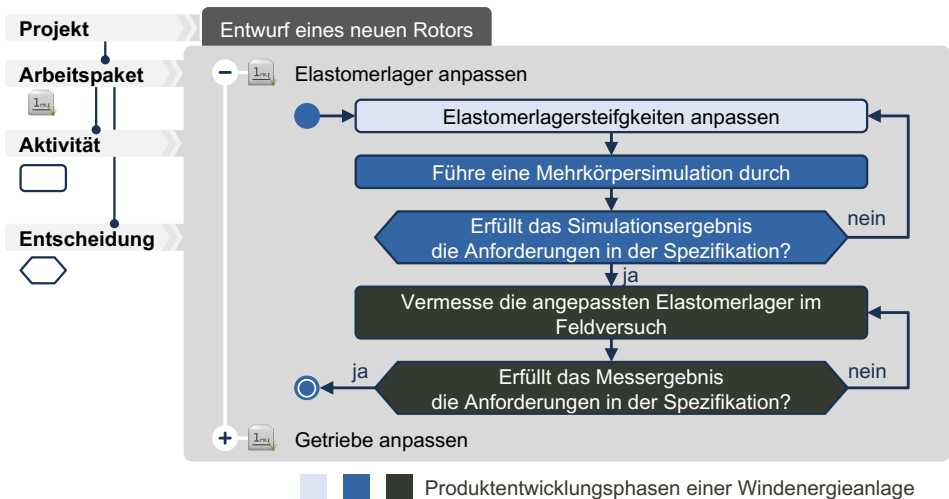


Bild 41: Strukturierung des Prozesswissens in Projekte, Arbeitspakete, Aktivitäten und Entscheidungen bei der Eigenschaftsabsicherung in der Produktentwicklung nach [P6].

5.3.2.2 Projektbezogene Wissensbasen zur Formalisierung von Prozesswissen für die datengetriebene Produktentwicklung

Zur Integration des wissensbasierten Assistenzsystems in bestehende Produktentwicklungsprozesse muss die Unterstützung des Produktentwicklers zur datengetriebenen Produktentwicklung möglichst analog der Unterstützung durch die PE-Experten im konventionellen Produktentwicklungsprozess gestaltet sein. Es bietet sich demnach an, dass das Wissen zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung ebenfalls in Form von Prozesswissen zu formalisieren, wodurch die Produktentwickler im Produktentwicklungsprozess navigiert werden können. Neben der Integration des wissensbasierten Assistenzsystems in bestehende Produktentwicklungsprozesse können hierdurch auch Aspekte der Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten abgebildet werden, da die Vorgehensmodelle formal ebenfalls Prozesse darstellen (siehe Abschnitt 2.3.2). Aufgrund der Anforderung einer situativen Unterstützung der Produktentwickler, muss zu jedem Ereignis im Produktentwicklungsprozess das

passende Prozesswissen bereitgestellt werden. Aus diesem Grund muss das Prozesswissen zur datengetriebenen Produktentwicklung projektbezogen formalisiert werden (siehe Bild 42).

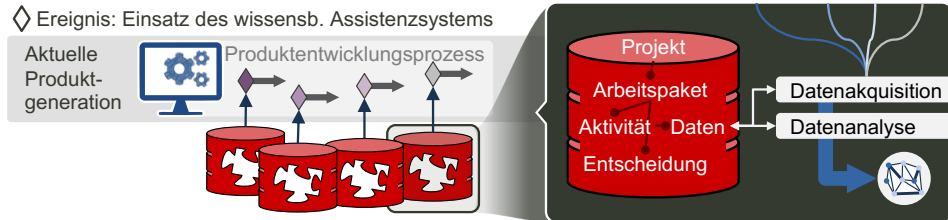


Bild 42: Prinzipieller Aufbau der projektbezogenen Wissensbasen zur Formalisierung des Prozesswissens für die datengetriebene Produktentwicklung nach [P3; P6].

Analog zur Repräsentation des Wissens zum Umgang mit den produktbeschreibenden Daten, stellen die projektbezogenen Wissensbasen jeweils Projekte zur Eigenschaftsabsicherung dar. Die Aktivitäten und Entscheidungen repräsentieren UML-Aktivitätsdiagramme, die in Arbeitspakete gruppiert werden. Im Gegensatz zu den Aktivitäten im konventionellen Produktentwicklungsprozess bilden die Aktivitäten die Maßnahmen und Tätigkeiten zur systematischen Analyse von Daten ab (siehe Abschnitt 2.3.2). Hierzu zählen Aktivitäten zur Datenvorbereitung, der Datenanalyse und der Kontextualisierung der Muster. Jede Aktivität zeichnet sich dadurch aus, dass durch ihre Durchführung Daten erhoben werden. Hiermit wird die Datenerhebung als Vorbereitung für die Datenanalyse sowie die Beschreibung der kontextualisierten Muster nach einer Datenanalyse intendiert [P7]. Aus diesem Grund wird die Aktivität um die Entität der Daten erweitert. Darüber hinaus muss jedes Arbeitspaket, jede Aktivität und Entscheidung durch eine ausführliche Wiki-ähnliche Beschreibung begleitet werden. Hierdurch können informal die einzelnen Schritte im Prozess bei der Erstellung der Wissensbasis ausführlich beschrieben werden. Im Hinblick auf die prinzipielle Architektur von wissensbasierten Assistenzsystemen (siehe Abschnitt 2.4.3) wird hierdurch der Erklärungskomponente Rechnung getragen.

Durch eine Navigation anhand der projektbezogenen Wissensbasen wird der Produktentwickler beim Verlassen seiner spezifischen Domäne der „Produktentwicklung“ in die weniger bekannte Domäne des „Maschinellen Lernens“ begleitet. Er erlangt dadurch, in Abhängigkeit der gerade vorliegenden Problemstellung, eine spezifische Beschreibung für das notwendige Vorgehen in der weniger bekannten Domäne. Beim Zurückkehren in die bekannte

Domäne der „Produktentwicklung“ können die erhobenen Ergebnisse und gemachten Erkenntnisse einen Beitrag bei der aktuellen Problemstellung leisten, z. B. bei der Durchführung von konstruktiven Änderungen.

5.3.3 Akquisition von Prozess- und Methodenwissen zur systematischen Analyse von Daten

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die formale Struktur der projektbezogenen Wissensbasen entwickelt, welche zur Formalisierung von Prozesswissen für die datengetriebene Produktentwicklung eine Voraussetzung ist. Ziel dieses Abschnitts ist, den Ablauf des Wissensakquisitionsprozesses für die datengetriebene Produktentwicklung zu spezifizieren. Neben dem Prozesswissen zur Absicherung von Produkteigenschaften, das vorerst durch die Anforderungen aus der Domäne der Produktentwicklung motiviert wurde, muss im Folgenden auch das Wissen der zweiten Domäne berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt wird deshalb insbesondere auf den Akquisitionsprozess zum Wissen aus der Domäne des maschinellen Lernens eingegangen.

Beispiel (konventionelles Vorgehen): Angenommen, ein Produktentwickler besitzt produktbeschreibende Daten aus der vorangegangenen Produktgeneration, die die tatsächlichen Produkteigenschaften beschreiben und bereits alle Anforderungen an maschinelle Lernmethoden erfüllen. Er möchte in den Daten nach Auffälligkeiten, Tendenzen oder Mustern suchen (z. B. „Was haben tonhaltige Windenergieanlagen gemeinsam?“). Da einem konventionellen Produktentwickler das Methodenwissen zur Durchführung von datengetriebenen Analysen in der Regel fehlt, muss er, analog zum Vorgehen bei konventionellen Systemanalysen, hierzu einen Experten konsultieren. Der Experte für maschinelle Lernmethoden (ML-Experte) wird zusammen mit dem Produktentwickler die produktbeschreibenden Daten evaluieren und die Aufgabenstellung für die Analyseaufgabe formulieren. Hierdurch erhält der ML-Experte zum einen das notwendige Wissen über und zum anderen ein Verständnis für die Daten. Daraufhin kann ein Analysealgorithmus ausgewählt, implementiert und die Analyse durchgeführt werden. Abschließend kann der ML-Experte zusammen mit dem Produktentwickler die identifizierten Muster kontextualisieren. Aufgrund der Analyseergebnisse kann der Produktentwickler Schlussfolgerungen zur Modifikation der Produktmerkmale der aktuellen Produktgeneration ziehen, um dadurch die Produkteigenschaften positiv

zu beeinflussen (z. B. „Windenergieanlagen mit weniger Tonhaltigkeiten“).

Auf Basis des konventionellen Vorgehens wurde ein Konzept zur Akquisition von Methodenwissen für die datengetriebene Produktentwicklung entwickelt (siehe Bild 43). Hierbei werden drei Rollen berücksichtigt: Der Experte in der Domäne der Produktentwicklung ① (PE-Experte), der Experte aus der Domäne des maschinellen Lernens ② (ML-Experte) und der Produktentwickler aus der Domäne des Anwendungsfalles ③, wobei alle Rollen auch von einer Person repräsentiert werden können.

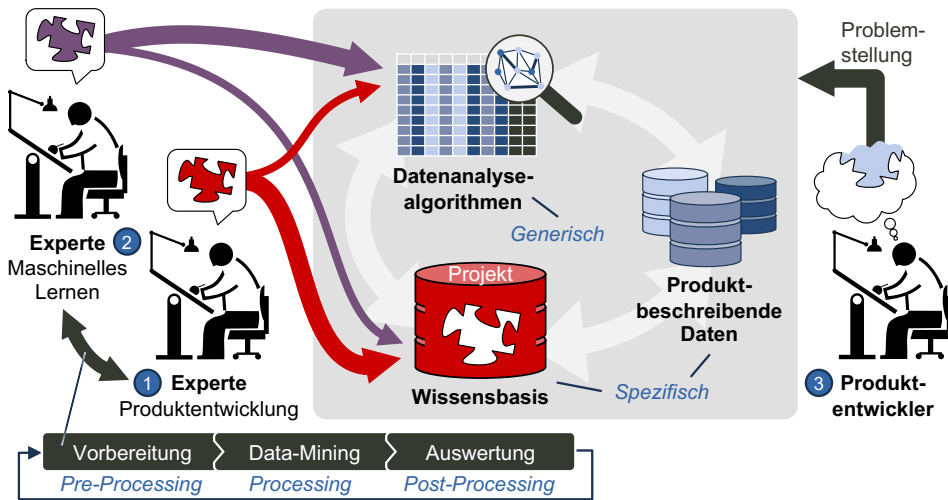


Bild 43: Konzept zur Akquisition von Methodenwissen für die datengetriebene Produktentwicklung.

Der Einsatz von maschinellen Lernmethoden wird durch die Vorgehensmodelle zur systematischen Analyse von Daten definiert (z. B. Vorbereitung, Data-Mining, Auswertung, siehe Bild 43 und Abschnitt 2.3.2). Im Grunde stellen die Vorgehensmodelle Prozesse dar, die durch UML-Aktivitätsdiagramme, d. h. durch Aktivitäten und Entscheidungen, abgebildet werden können. Hierdurch kann das Vorgehen bei der datengetriebenen Produktentwicklung ebenso mittels der projektbezogenen Wissensbasen abgebildet und formal beschrieben werden (siehe Abschnitt 5.3.2.2).

Im Fokus des Konzeptes in Bild 43 steht zu Beginn eine Problemstellung zur Eigenschaftsabsicherung aus dem Kontext der Produktentwicklung. Der PE-Experte prüft zuerst, ob die Problemstellung auch konventionell gelöst

werden kann. Sofern das nicht der Fall ist, beginnt der PE-Experte in enger Kooperation mit dem ML-Experten mit der Entwicklung der projektbezogenen Wissensbasis, um das datengetriebene Vorgehen im Produktentwicklungsprozess zu verorten. Analog zu den Vorgehensmodellen zur systematischen Analyse von Daten (z. B. CRISP-DM, siehe Abschnitt 2.3.2), muss eine Analyseaufgabe oder Ziel definiert werden. Dieses wird durch einen geeigneten Titel und der Definition des Ereignisses im Produktentwicklungsprozess für den Einsatz der projektbezogenen Wissensbasis ausgedrückt. Die ersten Aktivitäten stellen eine Beschreibung des Datenakquisitionsprozesses dar, wobei davon ausgegangen werden kann, dass die Strukturierung und Integration der Daten durch das wissensbasierte Assistenzsystem mithilfe des KlAI_n-Produktmodells in der späteren Anwendung durchgeführt wird (siehe Abschnitt 5.2). Im Hinblick auf die Zielsetzung der Analyseaufgabe und dem initialen Datensatz kann der ML-Experte einen Datenanalysealgorithmus auswählen und implementieren. Abschließend muss eine Beschreibung zur Kontextualisierung der Muster in die projektbezogene Wissensbasis aufgenommen werden, sodass die Ergebnisse des Datenanalysealgorithmus verstanden, interpretiert und kontextualisiert werden können. Die Akquisition zum Prozesswissen kann direkt oder indirekt erfolgen.

Analog zu numerischen Solvern²¹ in CAE-Systemen ist in diesem Konzept vorgesehen, dass der Datenanalysealgorithmus häufiger verwendet wird (siehe Bild 43). Häufiger in diesem Kontext bedeutet die Absicherung von gleichen Eigenschaften verschiedener Produkte. Bei der Entwicklung und Implementierung des Datenanalysealgorithmus muss deshalb ein Schwerpunkt auf die Wiederverwendung und die Allgemeingültigkeit gelegt werden. Eine Entwicklungsstrategie hierzu kann darin liegen, jeweils einen generischen Datenanalysealgorithmus für ähnliche Analyseaufgaben in der aktuellen Domäne sukzessive zur Verfügung zu stellen. Sofern kein bestehender Datenanalysealgorithmus für die aktuelle Problemstellung wiederverwendet werden kann, muss in diesem Schritt ein neuer Datenanalysealgorithmus entwickelt werden. Hierzu ist ein initialer Analysedatensatz erforderlich, der als Grundlage zur Entwicklung des Datenanalysealgorithmus notwendig ist. Die Akquisition des Methodenwissens muss direkt erfolgen.

Zusammenfassend ist der Produktentwickler hier auf die beiden Experten als Wissensquelle angewiesen. Durch den Akquisitionsprozess entstehen somit zwei Wissensobjekte, die zur datengetriebenen Produktentwicklung notwendig sind: die projektbezogene Wissensbasis und der Datenanalyse-

²¹ Als Solver werden die Berechnungskerne von CAE-Systemen bezeichnet.

algorithmus. Die projektbezogene Wissensbasis verortet die datengetriebene Analyse zur Eigenschaftsabsicherung in den Produktentwicklungsprozess. Zudem formalisiert sie das Pre-Processing und das Post-Processing im Kontext der Datenanalyse. Der Datenanalysealgorithmus definiert das Processing und stellt die informationstechnische Repräsentation des Algorithmus zur Mustererkennung dar.

5.3.4 Bereitstellung von Wissen zur datengetriebenen Produktentwicklung

Wie im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt, umfasst das Wissen zur datengetriebenen Produktentwicklung zum einen die projektbezogenen Wissensbasen (Prozesswissen) sowie die Datenanalysealgorithmen (Methodenwissen). Die Produktentwickler benötigen beide Wissensobjekte, um die datengetriebenen Analysen durchführen zu können. Hierzu wurde ein Konzept entwickelt, das insbesondere den Schutz des Wissens berücksichtigt, was im industriellen Umfeld von großer Bedeutung ist. Ein Überblick zum Konzept ist in Bild 44 dargestellt.

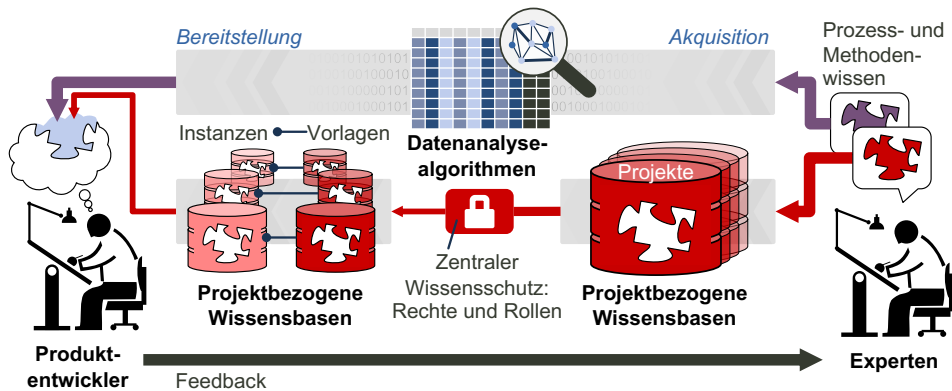


Bild 44: Schematischer Ablauf des Wissenstransfers unter Berücksichtigung des Wissensschutzes nach [P7].

Die Datenanalysealgorithmen erfordern aufgrund des algorithmischen Charakters des Wissens eine informationstechnische Umsetzung. Aus diesem Grund bietet es sich an, die Datenanalysealgorithmen direkt in das wissensbasierte Assistenzsystem zu integrieren oder als externe Stand-alone-Anwendungen zu konzipieren. Analog wird es bei den Solvern von CAE-Systemen gehandhabt [13]. Das Methodenwissen wird hierdurch mit jeder neuen Softwareversion an die Produktentwickler ausgerollt (Release-

basierte Bereitstellung). Darüber hinaus kann es bei Bedarf durch die Bereitstellung in Form von Binärcode geschützt werden.

Die projektbezogenen Wissensbasen ermöglichen dem Produktentwickler die datengetriebene Analyse zur Eigenschaftsabsicherung mit den richtigen Daten durchzuführen und die Muster zu interpretieren. Aus diesem Grund benötigen die projektbezogenen Wissensbasen einen besonderen Schutz. Der Schutz sollte über eine zentrale Rechte- und Rollenverwaltung im Unternehmen realisiert werden. Durch die Rechte- und Rollenverwaltung können verschiedenen Produktentwicklern unterschiedliche Wissensbasen zugänglich gemacht sowie den verschiedenen Experten jeweils Schreibrechte zu den Wissensbasen gewährt werden. Analog wird es bei der Bereitstellung von produktbeschreibenden Daten in PDM-Systemen gehandhabt [8]. Die projektbezogenen Wissensbasen stellen Vorlagen für die Produktentwickler zur Durchführung der Projekte dar und bleiben aus diesem Grund unverändert. Das Konzept sieht deshalb vor, dass die Projektvorlagen durch die Produktentwickler instanziiert, d. h. ausgeführt werden. Hierdurch kann ein Projekt mehrmals mit unterschiedlichen produktbeschreibenden Daten durchgeführt werden. Die erzielten Ergebnisse der datengetriebenen Analysen können direkt in den Projektinstanzen dokumentiert werden, um nachfolgende Berichte zu verfassen, die Ergebnisse zu diskutieren und sie mit anderen Projektinstanzen zu vergleichen. Durch die kontinuierliche Veränderung der Produkte, müssen die projektbezogenen Wissensbasen aktualisiert werden. Hierzu ist eine Feedbackschleife von den Produktentwicklern zu den Experten konzipiert, wodurch eine Aktualisierung oder Verbesserung angestoßen werden kann.

5.4 Gesamtkonzept des wissensbasierten Assistenzsystems

Ziel dieses Abschnitts ist die Beantwortung der dritten Forschungsfrage: *Wie muss ein wissensbasiertes Assistenzsystem konzipiert werden, um die Produktentwickler bei der datengetriebenen Produktentwicklung im Unternehmen zu unterstützen?* Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden zuerst die einzelnen Konzepte aus den vorangegangenen Abschnitten zu einem durchgängigen Gesamtkonzept kombiniert (Abschnitt 5.4.1). Anschließend wird das Gesamtkonzept in einzelne, funktionelle Komponenten überführt, wodurch die informationstechnische Umsetzung im nächsten Kapitel vorbereitet wird (Abschnitt 5.4.2).

5.4.1 Informationstechnische Verknüpfung der einzelnen Konzepte

Zu Beginn dieses Kapitels wurden zwei wichtige Aspekte im Umfeld der datengetriebenen Produktentwicklung betrachtet. In Abschnitt 5.2 wurde hierzu der Weg von den produktbeschreibenden Daten bis zu einem strukturierten und integrierten Produktmodell dargestellt (KlaIn-Produktmodell), um die Lücke zwischen der dokumentenzentrierten Verwaltung von produktbeschreibenden Daten und den Anforderungen an die Eingangsdaten für maschinelle Lernmethoden zu schließen. In Abschnitt 5.3 wurde der Akquisitionsprozess und die Formalisierung von Prozess- und Methodenwissen zur systematischen Analyse von Daten vorgestellt, um den Produktentwickler das Wissen zur Durchführung von datengetriebenen Analysen zur Verfügung zu stellen. Die beiden Konzepte bilden die technologische Grundlage des wissensbasierten Assistenzsystems, sind allerdings im Hinblick auf eine informationstechnische Umsetzung noch nicht stark genug integriert. Deshalb wird in diesem Abschnitt auf die informationstechnischen Aspekte zur Vereinigung beider Konzepte eingegangen.

In Bild 45 sind hierzu die beiden Konzepte als sequenzieller Ablauf zusammengefasst. Der Ablauf beginnt bei den produktbeschreibenden Daten in den Datenquellen (zumeist Dokumente) und endet beim Wissen zur Absicherung komplexer Produkteigenschaften. Die projektbezogenen Wissensbasen beeinflussen die Erhebung der produktbeschreibenden Daten und die Kontextualisierung der Muster, nachdem die Datenanalysealgorithmen ausgeführt wurden. Hierdurch wird das Konzept aus Abschnitt 5.3 zum Umgang

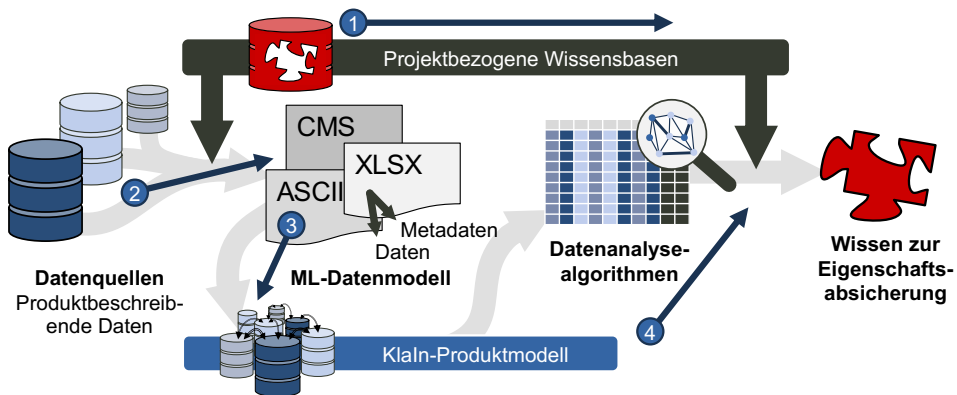


Bild 45: Vereinigung der Konzepte aus Abschnitt 5.2 und Abschnitt 5.3 zur Ableitung eines Gesamtkonzeptes für das wissensbasierte Assistenzsystem.

mit Wissen für die Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung repräsentiert. Die produktbeschreibenden Daten werden durch das ML-Datenmodell formal repräsentiert und über das Klaln-Produktmodell strukturiert und integriert. Konzeptionell wurden hierdurch alle Anforderungen an ein Assistenzsystem zur kontinuierlichen Unterstützung der Produktentwicklung erfüllt. Zur informationstechnischen Umsetzung des Konzeptes fehlen allerdings noch Komponenten zur Handhabung und Steuerung des gesamten Ablaufs. Zur Operationalisierung des Ablaufs und zur Gewährleistung einer kontinuierlichen Unterstützung der Produktentwickler sind vier Komponenten erforderlich, die in Bild 45 (① – ④) markiert sind.

Nachdem die projektbezogenen Wissensbasen (Projektvorlage) den Produktentwicklern zur Verfügung gestellt wurden (Punkt ① in Bild 45), muss die Projektvorlage instanziiert werden. Die Instanziierung kann als „Ausführen“ der Projektvorlage verstanden werden. Hierzu wurde ein *Produktentwicklungsnavigator* konzipiert, der den Fortschritt beim Durchführen eines Projektes überwacht und protokolliert. Um die produktbeschreibenden Daten in die Datenanalysealgorithmen einsetzen zu können, müssen diese formalisiert, strukturiert und im Klaln-Produktmodell integriert werden. Zur Durchführung dieser Schritte ist im Punkt ② ein *Importassistent* und in Punkt ③ ein *Synthesewerkzeug* vorgesehen. Der Importassistent liest die ASCII-Austauschdokumente der Datenquellen ein und formalisiert diese im ML-Datenmodell. Das Synthesewerkzeug verortet die ML-Datenmodelle im Klaln-Produktmodell. Zur Durchführung der Datenanalyse ist das *Analysewerkzeug* vorgesehen (Punkt ④ in Bild 45). Es bildet die Brücke zwischen den produktbeschreibenden Daten in den ML-Datenmodellen im Klaln-Produktmodell, dem Ausführen der Datenanalyse und der Darstellung der Analyseergebnisse (Muster).

Aufgrund der Erweiterung durch die vier Komponenten kann das wissensbasierte Assistenzsystem auch operationalisiert und deshalb auch informationstechnisch umgesetzt werden. Hierzu werden die bisherigen Konzepte in ein Gesamtkonzept überführt, das im nächsten Abschnitt im Detail vorgestellt wird.

5.4.2 Die vier Hauptkomponenten zur Operationalisierung der Konzepte

Das Gesamtkonzept des wissensbasierten Assistenzsystems besteht aus vier Haupt- und drei Hilfskomponenten. Die vier Hauptkomponenten dienen

zur Operationalisierung des grundlegenden Konzeptes, welches durch die drei Hilfskomponenten repräsentiert wird (siehe Bild 46).

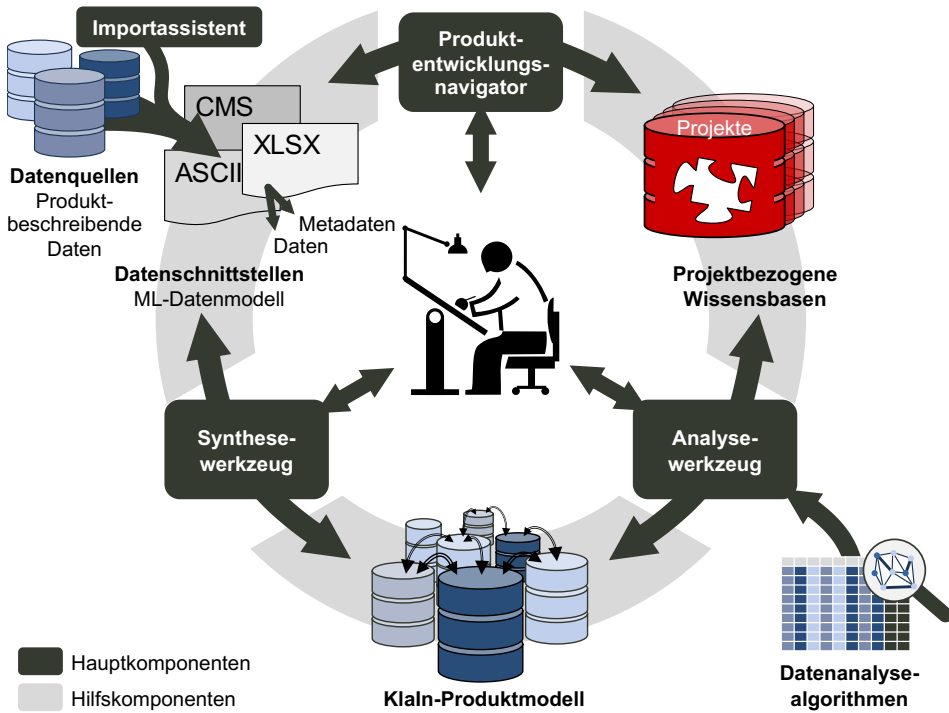


Bild 46: Gesamtkonzept des wissensbasierten Assistenzsystems zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung.

Die vier Hauptkomponenten in Bild 46 sind für die Anwender direkt sichtbar. Zu ihnen zählen der Produktentwicklungsnavigator, das Synthesewerkzeug, das Analysewerkzeug sowie der Importassistent. Die Hilfskomponenten bestehen aus den projektbezogenen Wissensbasen, den Datenschnittstellen (ML-Datenmodell) und dem Klein-Produktmodell.

Im Gesamtkonzept zum wissensbasierten Assistenzsystem sind die Komponenten der prinzipiellen Architektur von wissensbasierten Assistenzsystemen (siehe Abschnitt 2.4.3) nicht explizit dargestellt. Die Wissensakquisitions-, die Dialog-, die Erklärungs- und die Problemlösungskomponente werden durch den Produktentwicklungsnavigator repräsentiert. Die Wissensbasis stellen die verteilten, projektbezogenen Wissensbasen dar.

Im Folgenden wird das operative Zusammenwirken der einzelnen Komponenten im Kontext des Gesamtkonzeptes vorgestellt.

5.4.2.1 Produktentwicklungsnavigator

Der Produktentwicklungsnavigator stellt die zentrale Komponente des wissensbasierten Assistenzsystems dar. Den Experten bietet der Produktentwicklungsnavigator die Möglichkeit, die projektbezogenen Wissensbasen durch die Wissensakquisitionskomponente zu erzeugen. Hierdurch können die Experten das Wissen zum Vorgehen bei der datengetriebenen Produktentwicklung in Projekte, Arbeitspakete, Aktivitäten und Entscheidungen formalisieren. Die projektbezogenen Wissensbasen werden den Produktentwicklern als Vorlagen bereitgestellt. Hierzu muss bei der Umsetzung des Konzeptes, analog zu PDM-Systemen, ein zentrales IT-System mit Rechte- und Rollenverwaltung etabliert werden.

Nachdem die projektbezogenen Wissensbasen den Produktentwicklern zur Verfügung gestellt wurden, können diese vom Produktentwicklungsnavigator bei Bedarf mehrfach instanziiert werden. Der richtige Zeitpunkt für die Instanziierung wird durch das formulierte Ereignis definiert (siehe Ereignisse für den Einsatz des wissensbasierten Assistenzsystems in Abschnitt 5.1). Durch die Möglichkeit zur mehrfachen Instanziierung wird die notwendige Flexibilität für die Produktentwickler geschaffen, um eigene Ideen in den Prozess einzubringen und dadurch neue Lösungen und Erkenntnisse abzuleiten. In jeder Projektinstanz können bspw. verschiedene Daten analysiert und die Analyseergebnisse jeweils getrennt zur Gegenüberstellung dokumentiert werden. Hierdurch entsteht eine produktive und flexible Arbeitsumgebung für den Produktentwickler. Der Mechanismus zur wissensbasierten Navigation repräsentiert demnach die Problemlösungskomponente des wissensbasierten Assistenzsystems, da durch sie formalisiertes Wissen auf neue Problemstellungen angewendet wird.

Die Aktivitäten in den projektbezogenen Wissensbasen beschreiben im Kontext der datengetriebenen Produktentwicklung die Datenakquisition und -analyse. Aus diesem Grund werden über den Produktentwicklungsnavigator auch das Synthese- und Analysewerkzeug vom Produktentwickler ausgeführt.

5.4.2.2 Importassistent

Im Verlauf von jedem Projekt müssen produktbeschreibende Daten akquiriert werden. Das wissensbasierte Assistenzsystem ist so konzipiert, dass die Akquisition entweder vom Produktentwickler selbst, oder von anderen verantwortlichen Produktentwicklern durchgeführt werden kann. Der Austausch findet in diesem Fall über das Klain-Produktmodell statt. Die Datenakquisition erfolgt demnach einerseits durch das Zurückgreifen auf bereits strukturierte und integrierten Daten im Klain-Produktmodell, oder durch die direkte Akquisition von bisher noch nicht erhobenen produktbeschreibenden Daten. Letzteres ist die Aufgabe des Importassistenten.

Da die produktbeschreibenden Daten im Umfeld der Produktentwicklung häufig als Dokumente in unterschiedlichen IT-Systemen unstrukturiert verwaltet werden (siehe Abschnitt 2.4.2), entsteht ein hoher Aufwand bei der Akquisition der Daten, der von Ingenieuren als mühsame Routinetätigkeit wahrgenommen wird [221]. Zur Bereitstellung der produktbeschreibenden Daten auf Inhaltsebene wurde das ML-Datenmodell entwickelt (siehe Abschnitt 5.2.2). Die zentrale Aufgabe des Importassistenten bei der Akquisition von produktbeschreibenden Daten besteht in der Überführung der ASCII-Austauschdokumente in das ML-Datenmodell.

Der Bedarf einer Akquisition wird von einer Aktivität ausgelöst, z. B. „Beziehe die Betriebsschwingungsmessung des Getriebes“. Zur Akquisition der ASCII-Austauschdokumente muss dem Importassistenten die formale Struktur des ASCII-Austauschdokuments bekannt sein. Diese wird in dieser Arbeit auch als Datenschnittstelle oder als Datenquelle bezeichnet. Die formale Struktur des ASCII-Austauschdokuments ist anwendungs- und dadurch unternehmensabhängig. Diese Datenquellen müssen deshalb im Verwendungskontext implementiert werden. Der Importassistent ist aus diesem Grund so konzipiert, dass er um weitere Datenquellen sehr flexibel erweitert werden kann. Diese Tatsache garantiert die Übertragbarkeit auf andere ASCII-Austauschdokumente und somit auf andere Problemstellungen. Es können an dieser Stelle auch proprietäre Datenformate vorgesehen werden, allerdings stellten diese nicht den Fokus dieser Arbeit dar (siehe Abschnitt 5.2.1). Nach dem Einlesen der ASCII-Austauschformate teilt der Importassistent diese in Datentupel, d. h. Metadaten und Daten auf, und zeigt diese dem Produktentwickler an. Hierdurch wird dem Produktentwickler vor dem eigentlichen Importvorgang in die aktuelle Produktinstanz eine Kontrolle ermöglicht.

5.4.2.3 Synthesewerkzeug

Nachdem die ASCII-Austauschdokumente in ML-Datenmodelle formalisiert wurden, stehen sie im Assistenzsystem in der aktuellen Projektinstanz als Eingangsdaten für die Datenanalysealgorithmen direkt zur Verfügung. Um möglichst alle produktbeschreibenden Daten zu einem Produkt strukturiert zu erfassen, und den Austausch zwischen den Produktentwicklern zu ermöglichen, wurde das KlaIn-Produktmodell konzipiert (siehe Abschnitt 5.2.4.3). Das KlaIn-Produktmodell muss bei der Umsetzung des Konzeptes, analog zu PDM-Systemen, zentral im Unternehmen verfügbar sein. Hierdurch wird die Möglichkeit geschaffen, die produktbeschreibenden Daten mit anderen Produktentwicklern zu teilen, d. h. Doppelarbeit zu vermeiden, und dadurch den Aufwand bei der Datenakquisition zu reduzieren.

Die Aufgabe des Synthesewerkzeugs ist die Kommunikation zwischen dem Assistenzsystem und dem KlaIn-Produktmodell. Hierzu zählt die richtige Verortung der akquirierten ML-Datenmodelle in der Produktstruktur des KlaIn-Datenmodells, d. h. das Produktdatenmodell wird hierdurch synthetisiert. Zur Vermeidung von doppelten ML-Datenmodellen werden diese vor der Verortung mit einem digitalen Fingerabdruck²² versehen, welcher mit bestehenden ML-Datenmodellen im KlaIn-Produktmodell abgeglichen wird. Je nachdem wie das Gesamtkonzept umgesetzt wird, kann die Verortung, d. h. die Zuordnung zu Klassen und Instanzen der Produkte, Baugruppen und Bauteile, im KlaIn-Produktmodell vollautomatisch oder halbautomatisch durch den Produktentwickler erfolgen. Darüber hinaus müssen durch das Synthesewerkzeug auch die ML-Datenmodelle im KlaIn-Produktmodell durch den Produktentwickler gesucht und in die aktuelle Instanz des Projektes überführt werden können. Die Suche muss anhand der Produktstruktur und anhand der Metadaten des ML-Datenmodells erfolgen können. Da die Qualitätsklasse ebenfalls ein Attribut in den Metadaten darstellt, wird dieses direkt im KlaIn-Produktmodell erfasst. Hierdurch können bspw. alle Messungen zu einem Betriebspunkt an seiner Windenergieanlage untersucht werden, die bisher akquiriert und in das KlaIn-Produktmodell integriert wurden.

Durch die zentrale Erfassung und Strukturierung der größtenteils hypothesengetrieben erhobenen Produktdaten wird durch das Synthesewerkzeug die Grundlage für die datengetriebene Analyse geschaffen.

²² Der digitale Fingerabdruck wird häufig durch einen Hashwert repräsentiert.

5.4.2.4 Analysewerkzeug

Nachdem die produktbeschreibenden Daten mithilfe des Importassistenten akquiriert oder durch das Synthesewerkzeug aus dem Klain-Produktmodell bezogen wurden, können die datengetriebenen Analysen durchgeführt werden. Die Datenanalysealgorithmen müssen hierzu von den Experten für die maschinellen Lernmethoden (ML-Experten) zur Verfügung gestellt werden, um in das Assistenzsystem informationstechnisch integriert zu werden.

Die Aufgabe des Analysewerkzeugs ist die zielgerichtete Analyse von Daten. Hierzu sorgt das Analysewerkzeug für die Vorbereitung der Daten für den Datenanalysealgorithmus sowie die Aufbereitung der Analyseergebnisse (Muster) für den Produktentwickler. Bei der Datenvorbereitung werden die akquirierten ML-Datenmodelle in einen strukturierten Trainingsdatensatz überführt (siehe Abschnitt 2.3.3), welcher einer flachen Tabelle entspricht. Die flachen Tabellen stellen eine Anforderung der Datenanalysealgorithmen an die Eingangsdaten dar. Diese Vorbereitung ist abhängig von den Anforderungen des Datenanalysealgorithmus und muss bei der informationstechnischen Integration des Datenanalysealgorithmus durch den ML-Experten berücksichtigt werden. Die Bereitstellung der richtigen Daten kann der Produktentwickler durch die Datenakquisition beeinflussen. Nach der Datenanalyse muss das erhobene Muster durch den Produktentwickler unter Anleitung der Erklärungen in der projektbezogenen Wissensbasis kontextualisiert werden. Die Ergebnisse und Erkenntnisse können direkt in der aktuellen Projektinstanz dokumentiert werden.

6 Umsetzung des Konzeptes als Assistenzsystem für die Produktentwicklung

Zur Demonstration und Validierung des Konzeptes zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung aus dem vorangegangenen Kapitel ist eine informationstechnische Umsetzung erforderlich. Ziel dieses Kapitels ist es daher, das Konzept als Assistenzsystem für die Produktentwicklung prototypisch umzusetzen. Dieses Kapitel stellt zusammen mit dem Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung in Kapitel 5, den Kern dieser Arbeit dar.

Durch die Implementierung der Haupt- und Hilfskomponenten des Gesamtkonzeptes zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung (siehe Abschnitt 5.4.1) wird der Nachweis für die Umsetzbarkeit erbracht und die Voraussetzung für die Durchführung eines Anwendungsbeispiels zur Validierung des Konzeptes im nächsten Kapitel gelegt. Sofern zur Implementierung des Konzeptes produktbeschreibende Daten erforderlich werden, so wird der Rahmen des Anwendungskontextes aus Kapitel 4 herangezogen. Aufgrund der Spezifizierung des Konzeptes durch die produktbeschreibenden Daten aus dem Anwendungskontext „tonhaltige Windenergieanlagen“, wird das wissensbasierte Assistenzsystem im Folgenden *Assistenzsystem zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen (ALARM)* genannt. Die produktbeschreibenden Daten stammen aus dem industriellen Umfeld, weshalb aus Gründen der Geheimhaltung manche Ausschnitte in den Bildern verpixelt dargestellt werden müssen.

Die Implementierung des Assistenzsystems ALARM erfolgt mittels der freien Programmiersprache *Python*²³. Die benutzerfreundliche Oberfläche (GUI) wird mithilfe des freien *Qt-Toolkit*²⁴ umgesetzt. Als serverbasierte, relationale Datenbank wird die *Oracle Database*²⁵ sowie die dateibasierte, relationale Datenbank *SQLite*²⁶ gewählt.

²³ [Python](#) ist eine freie, plattformübergreifende, interpretierte, höhere Programmiersprache.

²⁴ [Qt](#) ist eine plattformübergreifende SDK in C/C++, die Bibliotheken für plattformübergreifende, grafische Benutzeroberflächen bereitstellen.

²⁵ [Oracle Database](#) ist eine proprietäre, serverbasierte, relationale Datenbank der Fa. Oracle.

²⁶ [SQLite](#) ist eine lokale, dateibasierte, relationale Datenbank.

6.1 Architektur des Assistenzsystems

Das Gesamtkonzept in Abschnitt 5.4.1 definiert alle konzeptionell notwendigen Haupt- und Hilfskomponenten für das wissensbasierte Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung. In diesem Gesamtkonzept wurden vier Haupt- und drei Hilfskomponenten identifiziert und definiert. Die prinzipielle Architektur des Assistenzsystems ALARM ist in Bild 47 dargestellt.

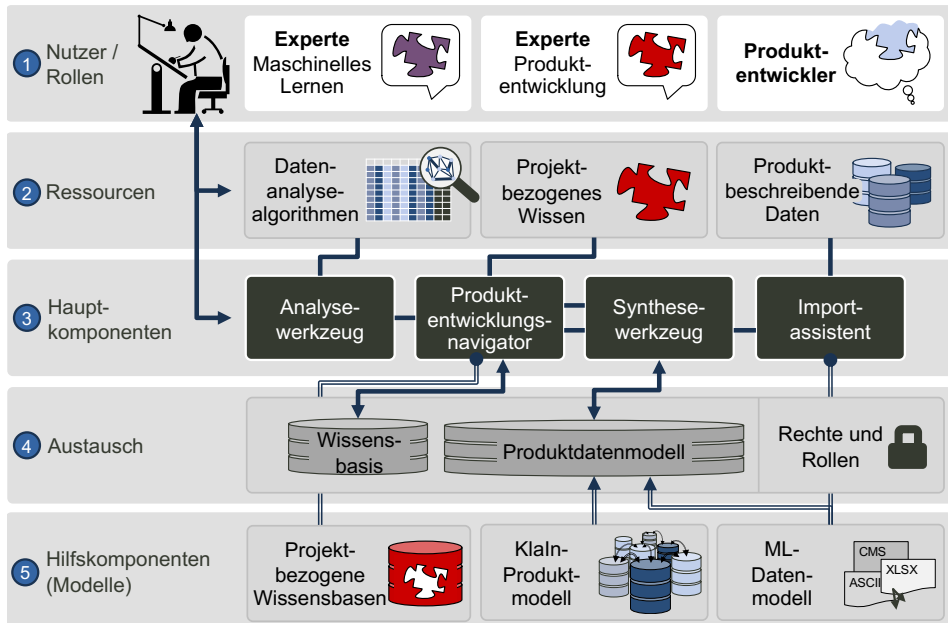


Bild 47: Prinzipielle Architektur des Assistenzsystems ALARM, die durch fünf logische Ebenen gegliedert ist.

Für die informationstechnische Umsetzung als Assistenzsystem wurden die Haupt- und Hilfskomponenten in fünf Ebenen gegliedert. Die Hilfskomponenten bedürfen für ihre informationstechnische Realisierung verschiedener IT-Systeme, die in die Architektur aufgenommen und entsprechend ihrer Ebene zugeordnet wurden. In der Ebene ① stehen die Nutzer und Rollen des Assistenzsystems. Die Nutzer interagieren mit der Ebene der Ressourcen ② und den Hauptkomponenten ③. Die Ebene ③ wird hauptsächlich durch grafische Benutzeroberflächen repräsentiert. Die Ebene ④ kontrolliert den Austausch von Daten und Wissen zwischen den Nutzern. Hierbei wurde eine zentrale Datenbank vorgesehen, die einerseits den koor-

dinierten Austausch der projektbezogenen Wissensbasen verantwortet und andererseits das Produktdatenmodell beherbergt. Das Produktdatenmodell stellt eine kombinierte Implementierung des KlAIIn-Produktmodells und des ML-Datenmodells zur Verortung der produktbeschreibenden Daten in der Produktstruktur dar. Die Ebene ⑤ beinhaltet die konzipierten Hilfskomponenten in Kapitel 5, die mehrfach in den anderen Ebenen eingesetzt, d. h. durch eine Implementierung instanziiert werden.

In Bild 48 ist die infrastrukturelle Architektur des Assistenzsystems ALARM dargestellt. Das Assistenzsystem ALARM ist so konzipiert, dass Experten in der Domäne der Produktentwicklung (PE-Experten) und die Produktentwickler die gleiche Instanz des Assistenzsystems ALARM benutzen. Hierdurch ist nur eine informationstechnische Umsetzung als Assistenzsystem erforderlich. Jeder Benutzer des Assistenzsystems ALARM erhält persönliche Zugangsdaten (Benutzername und Passwort), wodurch eine Differenzierung durch die Rechte- und Rollenverwaltung der zentralen Datenbank erfolgt. Jedem Benutzer können durch die Zuweisung von Gruppen die entsprechenden Rechte zugewiesen werden, z. B. Gruppe „Produktentwickler“: Leserechte in der Wissensbasis; Gruppe „Experte“: Lese- und Schreibrechte in der Wissensbasis. Hierdurch wird der Datensicherheit und dem Wissensschutz Rechnung getragen. Durch die zentrale Datenbank können die PE-Experten die projektbezogenen Wissensbasen auf dem zentralen Server bereitstellen und diese können von allen Produktentwicklern mit der entsprechenden Berechtigung bezogen werden. Wie in Abschnitt 5.3.4

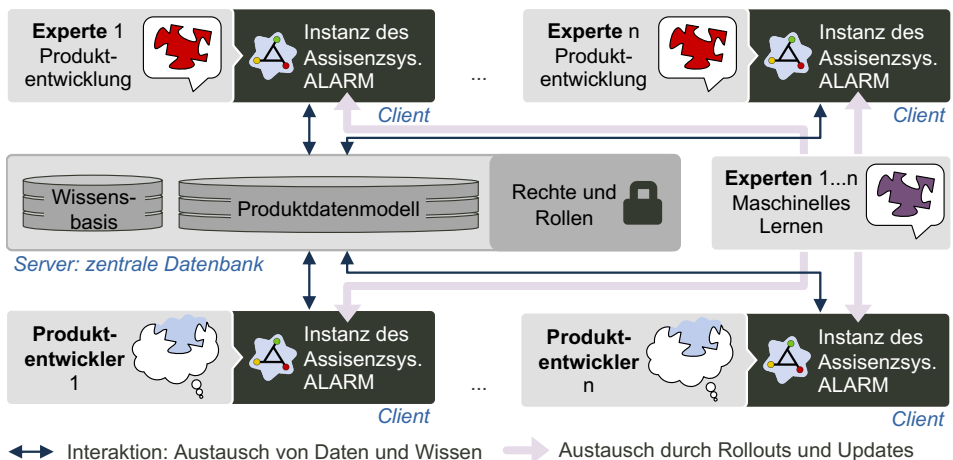


Bild 48: Client- und Serverarchitektur des Assistenzsystems.

erörtert, wird das Methodenwissen zum maschinellen Lernen direkt in das Assistenzsystem implementiert und mittels eines Rollouts (initiale Bereitstellung) oder durch Updates des Assistenzsystems ALARM bereitgestellt.

Die informationstechnische Umsetzung wichtiger Komponenten des Assistenzsystems ALARM wird in den nächsten Abschnitten kurz vorgestellt. Zuerst wird auf die Umsetzung des Produktdatenmodells zur Verortung der produktbeschreibenden Daten in der Produktstruktur eingegangen (Abschnitt 6.2). Das Produktdatenmodell als zentrale Schnittstelle muss vor der Inbetriebnahme der Clients implementiert und initiiert werden. Nachfolgend wird auf die projektbezogenen Wissensbasen und deren Austausch eingegangen (Abschnitt 6.3). Abschließend wird auf die Umsetzung der Hauptkomponenten des Assistenzsystems ALARM als Client eingegangen (Abschnitt 6.4), wobei das Analysewerkzeug im Speziellen erst im Anwendungsfall in Kapitel 7 betrachtet werden kann.

6.2 Produktdatenmodell zur Verortung von produktbeschreibenden Daten

In diesem Abschnitt wird auf den Aufbau und die Struktur der Datenbank für das Produktdatenmodell zur Verortung der produktbeschreibenden Daten eingegangen. Das Produktdatenmodell für das Assistenzsystem ALARM stellt eine kombinierte, prototypische Umsetzung und Instanziierung des Klain-Produktmodells und des ML-Datenmodells dar. Das Klain-Produktmodell sieht eine Aufteilung der Produktstruktur in drei Ebenen vor: Produkte → Baugruppen → Bauteile (siehe Abschnitt 5.2.4.3). Im Anwendungskontext der „tonhaltigen Windenergieanlagen“ wird aus Sicht des OEMs allerdings nur zwischen Produkten und ihren Komponenten unterschieden. Bei der Implementierung des Produktdatenmodells wird deshalb die Ebene der Baugruppe und der Bauteile als „Komponenten“ zusammengefasst, weshalb im Folgenden die Produktstruktur in zwei Ebenen aufgliedert wird: Produkte → Komponenten. Die Implementierung aller drei Ebenen wäre zwar dennoch möglich, wird allerdings im Rahmen der prototypischen Realisierung nicht umgesetzt.

Zur informationstechnischen Umsetzung des Produktdatenmodells wird ein Datenbankschema für ein relationales Datenmodell entwickelt, die als Entity-Relationship-Diagramme (ER-Diagramme) visuell modelliert werden können. In ER-Diagrammen werden die Entitäten mit ihren Attributen sowie die Beziehungen zwischen den Entitäten beschrieben. Die Entitäten stellen hierbei die Definition der normalisierten Daten in Tabellenform

dar, wobei die Attribute die Spaltennamen definieren. Ein Vorteil von relationalen Datenbanken besteht in ihrer Flexibilität, da sie ohne die Veränderung der bestehenden Datenbankstrukturen erweitert werden können. [233] Darüber hinaus können verschiedene Domänen durch weitere Entitäten verknüpft werden, wodurch im Produktdatenmodell die Verortung der ML-Datenmodelle in der Produktstruktur realisiert werden können. Zur Kommunikation (lesen, schreiben, verändern, löschen etc.) mit einer relationalen Datenbank wird die Datenbankabfragesprache SQL eingesetzt. Für Grundlagen zu relationalen Datenbanken und ER-Diagrammen wird an dieser Stelle auf die Grundlagenliteratur verwiesen (siehe [234; 233]).

Zur Umsetzung des Produktdatenmodells wurden insbesondere die Daten zur Produktstruktur von Windenergieanlagen untersucht (Qualitätsklasse „sehr hoch“). An dieser Stelle wird ein bestehendes Produktportfolio vorausgesetzt, da die datengetriebene Produktentwicklung auf produktbeschreibenden Daten vorangegangener Produktgenerationen basiert. Die produktbeschreibenden Daten stellt ein Export aus dem ERP-System SAP dar, das insbesondere in den späteren Lebensphasen (z. B. „Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung“) eingesetzt wird. Aus diesem Grund besteht der Datensatz nur aus Informationen zu den Komponenteninstanzen und deren Zugehörigkeit. Jede Komponenteninstanz ist durch einen genauen Standort definiert, der sich aus dem physikalischen Standort (technischer Platz, z. B. „DE-ERLANGEN-AB“) und der genauen Bezeichnung der Produktinstanz zusammensetzt. Die Bezeichnung der Produktinstanz setzt sich aus dem Produktklassennamen, einer Seriennummer und im Fall von Windenergieanlagen in einem Windpark aus einer Standortnummer im Windpark zusammen (z. B. „3.2MW 123456-01“). Hierdurch kann die Entität der Produktinstanzen und somit die Produktstruktur rekonstruiert werden. Um aus den Instanzen die jeweiligen Klassen abzuleiten, wird die Produkt- bzw. Komponentenklasse aus der Modellbezeichnung abgeleitet. Im Klain-Produktmodell ist die Trennung zwischen Klassen und Instanzen vorgesehen, sodass die produktbeschreibenden Daten entsprechend ihres Gültigkeitsbereiches zugeordnet werden können (siehe Abschnitt 5.2.4.3)

In Bild 49 ist das ER-Diagramm des Produktdatenmodells des Assistenzsystems ALARM dargestellt. Die linke Seite zeigt die Instanz des Klain-Produktmodells und die rechte Seite die Instanz des ML-Datenmodells. Bei der Implementierung der Produktstruktur (linke Seite) wurden drei Entitäten, *Produkt*, *Komponente* und *Komponente_Typ* vorgesehen. Die Entität *Produkt* speichert alle Daten zu einer Produktinstanz. Für Windenergieanlagen gehört hierzu die vollständige *+Bezeichnung* (z. B. „3.2MW

werden. Die Arten von Komponenten sind in der Entität *Komponenten_Typ* zusammengefasst. Zu den *+Bezeichnungen* zählen z. B. „Turm“, „Getriebe“, „Generator“. Analog zu den Produktinstanzen, werden in der Entität *Komponente* die Daten zu den Komponenteninstanzen gespeichert. Bei den Komponenten von Windenergieanlagen ist insbesondere der *+Hersteller*, die *+Seriennummer* und die Art der Komponente (über *+Typ_ID*) von Interesse. Analog zur Produktklasse definiert das Attribut *+Klasse* die zugehörige Komponentenkategorie einer Komponenteninstanz.

Zwischen den Entitäten *Produkt* und *Komponente* ist eine *m-n*-Beziehung, die gemäß STEINER [233] durch eine Transformationstabelle in zwei *1-n*-Beziehungen aufgelöst werden muss. Die *m-n*-Beziehung ist aufgrund des Austauschs von Komponenten durch Wartungsmaßnahmen erforderlich. Hierbei kann es vorkommen, dass Komponenten nach einer Revision erneut in eine andere Windenergieanlage montiert werden. Aus diesem Grund werden in der Transformationstabelle die Attribute *+Datum_von* und *+Datum_bis* erfasst. Die produktbeschreibenden Daten, die in der Produktstruktur der Komponenteninstanz vor einer Montage zugeordnet wurden, verlieren i. d. R. durch den Austausch ihre Gültigkeit, da sich durch die Revision der Komponente und durch den neuen Betriebsort zu viele Randbedingungen ändern.

Das ML-Datenmodell definiert die Formalisierung der Daten und deren Metadaten (siehe Abschnitt 5.2.2). Analog sind im Produktdatenmodell die Entitäten *ServerDaten*, *Metadaten* und *Metadaten_Typ* vorgesehen (siehe rechte Seite in Bild 49). Die Entität *Metadaten* und *Metadaten_Typ* bilden zusammen die Namen-Wert-Paare ab, wobei in *Metadaten_Typ* der *+Name* (z. B. „Drehmoment“) und die *+Einheit* (z. B. „N/mm²“), in *Metadaten* der *+Wert* (z. B. „45,1“) gespeichert werden. Jedem Attribut *+Datum* in der Entität *ServerDaten* können mehrere *Metadaten* zugeordnet werden. Durch diese Repräsentation können die produktbeschreibenden Daten nach der Ablage im Produktdatenmodell anhand ihrer Metadaten gesucht und identifiziert werden. Die Daten selbst werden als *+Datum* in der Entität *ServerDaten* binär gespeichert, wobei zusätzlich die *+Dimension* vermerkt wird. Neben der Erfassung der *+Dimension* des *+Datum*, wurde bei der Implementierung nicht weiter zwischen Skalar, Tabelle und Matrix differenziert, da die Suche in den Daten (im *+Datum*) nicht vorgesehen und damit die Indizierung nicht erforderlich ist. Hierdurch wird das binäre Datenobjekt aus dem Assistenzsystem ALARM, das den Skalar, den Vektor oder die Matrix formal repräsentiert, direkt in *+Datum* abgelegt.

Die Verknüpfung beider Seiten wird durch die Entität *Verortung* realisiert. Durch das Attribut *+ServerDaten_ID* wird das zu verortende Datum definiert. Zur Verortung des Datums in der Produktstruktur sind vier Attribute vorgesehen, die auf die Klasse oder Instanz eines Produktes respektive einer Komponente verweisen: *+Produkt_Instance_ID*, *+Produkt_Klasse*, *+Komponenten_Instance_ID* und *+Komponenten_Klasse*. Die Verortung wird durch die Wahl des Attributes gesteuert, d. h. nur eines der vier Attribute darf einen Wert enthalten. Die Beziehungen zwischen den Entitäten *Verortung*, *Produkt* und *Komponente* sind optional, d. h. die Fremdschlüssel können Nullwerte enthalten. Die Nullwerte bei Fremdschlüsseln widersprechen an dieser Stelle der Definition des konzeptionellen Fremdschlüssels [233]. Dadurch wird der Definition des physikalischen Fremdschlüssels gefolgt, wodurch Nullwerte beim Fremdschlüssel erlaubt sind und somit auf weitere Transformationstabellen verzichtet werden kann [233].

Das Produktdatenmodell des Assistenzsystems ALARM ermöglicht produktbeschreibende Daten auf ihrer Inhaltsebene zu strukturieren und zu integrieren. Produktbeschreibende Daten, die genau für ein Produkt gültig sind, können gleichermaßen verortet werden, wie produktbeschreibende Daten für Produktvarianten, die im Klain-Produktmodell durch andere Klassen ausgedrückt werden. Dies trifft ebenso für die produktbeschreibenden Daten der Komponenten zu. Durch das Produktdatenmodell wird die Strukturierung und Integration der produktbeschreibenden Daten auf ihrer Inhaltsebene gewährleistet und gleichzeitig kann hierdurch der Gültigkeitsbereich der Daten ausgedrückt werden. Da das Produktdatenmodell in einer zentralen Datenbank implementiert ist, wird der Austausch der produktbeschreibenden Daten zwischen den Produktentwicklern ermöglicht. Die Interaktion mit dem Produktdatenmodell erfolgt mit dem Synthesewerkzeug, welches in Abschnitt 6.4.3 vorgestellt wird.

6.3 Die projektbezogenen Wissensbasen und deren Austausch

In diesem Abschnitt wird auf das Datenmodell der projektbezogenen Wissensbasen und deren Austausch über die zentrale Wissensbasis eingegangen. Hierzu wird das Konzept aus Abschnitt 5.3.2 informationstechnisch umgesetzt. Das Datenmodell der projektbezogenen Wissensbasen repräsentiert das Prozesswissen in Anlehnung an die UML-Aktivitätsdiagramme (siehe Tabelle 6), welche zusätzlich durch Arbeitspakete gruppiert werden. Das Datenmodell wird von den Experten in der Domäne der Produktentwicklung

(PE-Experten) initiiert und anschließend in der zentralen Wissensbasis als projektbezogene Wissensbasen zur Verfügung gestellt. Die Produktentwickler können danach die projektbezogenen Wissensbasen als *Projektvorlagen* von der zentralen Wissensbasis beziehen und mittels des Produktentwicklungsnavigators im Assistenzsystem ALARM anwenden.

Das Datenmodell der projektbezogenen Wissensbasen in Bild 51 rechts auf der nächsten Seite setzt sich aus sechs Entitäten zusammen: *Arbeitspaket*, *Aktivität*, *Entscheidung*, *Verbindung*, *Phase* und *ClientDaten*. Eine Projektvorlage besitzt mehrere Arbeitspakete, weshalb der Ausgangspunkt des Datenmodells die Entität *Arbeitspaket* darstellt. Die anderen Entitäten *Aktivität*, *Entscheidung* und *Verbindung*, die das untergeordnete UML-Aktivitätsdiagramm abbilden, sind durch die Fremdschlüssel *+Arbeitspaket_ID* immer einem Arbeitspaket zugeordnet. Die Entität *Arbeitspaket* speichert die Angaben des PE-Experten zu einem Arbeitspaket ab, d. h. die Attribute *+Bezeichnung*, die Wiki-ähnliche *+Beschreibung* sowie einen Verweis auf die erste Verbindung im UML-Aktivitätsdiagramm durch das Attribut *+Start_Verbindung_ID*. Hierdurch erkennt das Assistenzsystem den „Startpunkt“ im UML-Aktivitätsdiagramm eines Arbeitspaketes. In Bild 50 ist hierzu ein hypothetisches Beispiel zur Veranschaulichung einer möglichen Prozessvorlage dargestellt.

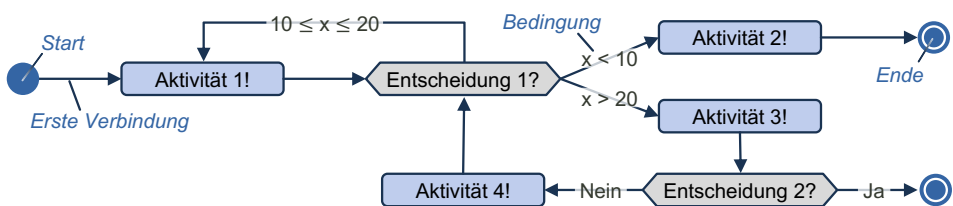


Bild 50: Hypothetisches Beispiel einer Prozessvorlage in einem Arbeitspaket in Anlehnung an die Notation zu den UML-Aktivitätsdiagrammen nach Tabelle 6 auf Seite 62.

Die Beschreibung des Vorgehens bei der datengetriebenen Produktentwicklung wird durch die Entitäten *Aktivität*, *Entscheidung* und *Verbindung* repräsentiert. Jede *Aktivität* hat eine *+Bezeichnung* und eine Wiki-ähnliche *+Beschreibung*. Nachdem die Aktivität durchgeführt wurde, wird der Zeitpunkt in *+Beendet* erfasst. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse und Erkenntnisse der Aktivität in einer Wiki-ähnlichen *+Diskussion* zusammenzufassen. Zur Verortung der Aktivitäten in den Produktentwicklungsprozess wird die Aktivität mit der Entität *Phase* durch das Attribut *+Phase_ID* verknüpft. In der Entität *Phase* werden alle Phasen des

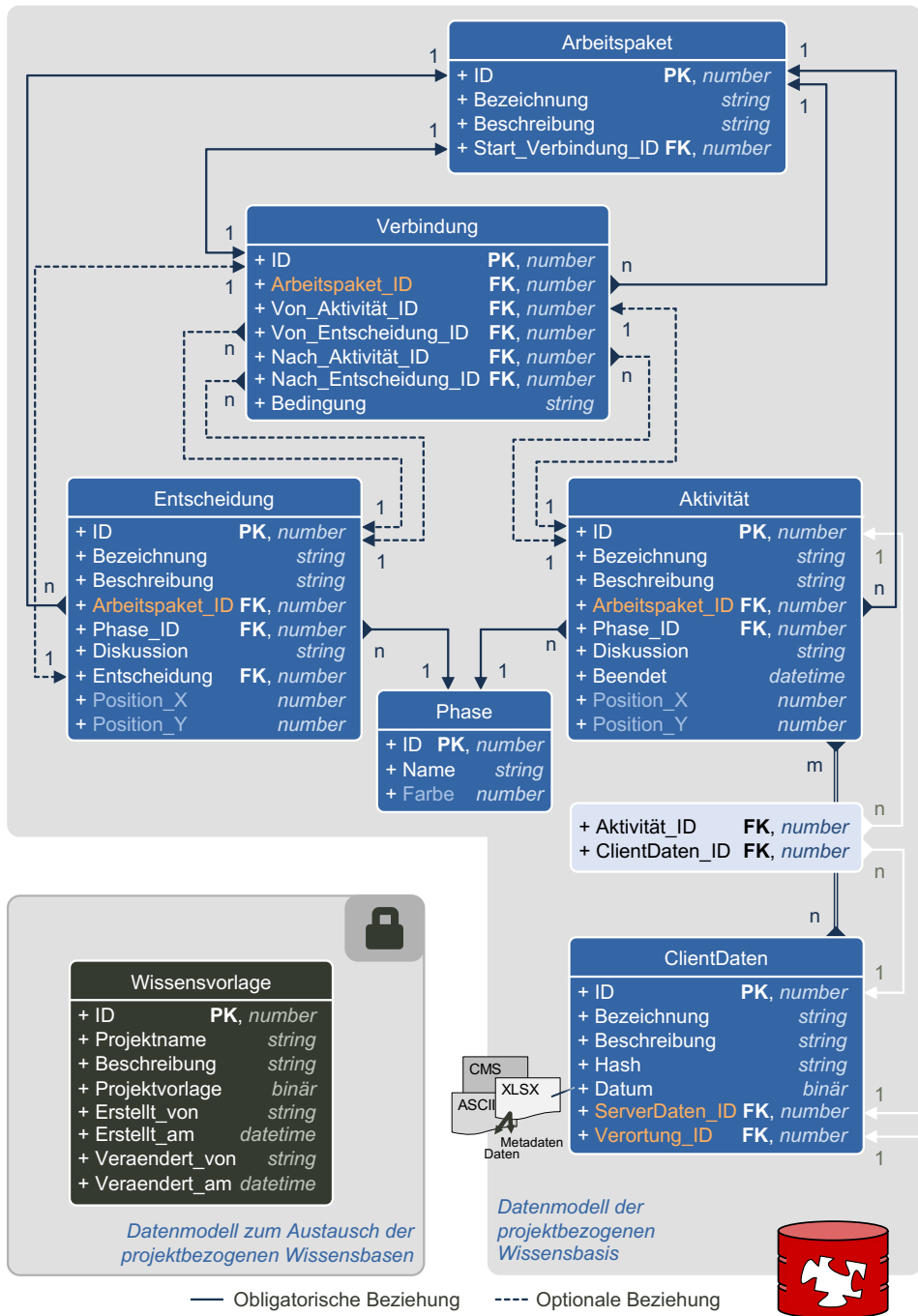


Bild 51: ER-Diagramm des Datenmodells der projektbezogenen Wissensbasen und des Datenmodells der zentralen Wissensbasis zum Austausch der Datenmodelle, basierend auf [P3]; Abkürzungen: PK: Primary key (dt. Primärschlüssel), FK: Foreign key (dt. Fremdschlüssel).

Produktentwicklungsprozesses im Anwendungskontext mit ihren *+Namen* erfasst. Analog zu den Attributen der Entität *Aktivität* sind die Attribute der Entität *Entscheidung* konzipiert. Ein Unterschied liegt in dem Attribut *+Entscheidung*, welches beim Durchführen einer Prozessvorlage dem Ergebnis einer Entscheidung entspricht. Hierbei wird die *+Verbindung* vermerkt, die der Produktentwickler nach dem Treffen der Entscheidung gefolgt ist. Zur Beschreibung der grafischen Darstellung und Anordnung der Entitäten im UML-Aktivitätsdiagramm sind die Attribute *+Position_X* und *+Position_Y* in der Entität *Aktivität* und *Entscheidung* sowie das Attribut *+Farbe* in der Entität *Phase* vorgesehen.

Die Entität *Verbindung* erfasst die Abfolge der Aktivitäten und Entscheidungen im UML-Aktivitätsdiagramm. Analog zur Entität *Verortung* im ER-Diagramm des Produktdatenmodells in Abschnitt 6.2 werden hier Nullwerte bei den Fremdschlüsseln toleriert, um auf weitere Transformationstabellen verzichten zu können. Hierdurch entstehen optionale Beziehungen zwischen den Entitäten. Startet oder endet eine Verbindung bei einer Aktivität, verweisen die Attribute *+Von_Aktivität_ID* respektive *+Nach_Aktivität_ID* auf die entsprechende *Aktivität*. Ebenso verhält es sich mit den Attributen *+Von_Entscheidung_ID* und *+Nach_Entscheidung_ID* für die Entität *Entscheidung*, die eine Verzweigung im UML-Diagramm repräsentiert. Es kann hierbei von einer Aktivität immer genau eine Verbindung starten, weshalb eine *1-1*-Beziehung zwischen *+Von_Aktivität_ID* und der Entität *Aktivität* realisiert wurde. Von einer Entscheidung oder Aktivität können mehrere Verbindungen starten, respektive enden, weshalb *1-n*-Beziehungen realisiert wurden. Das Attribut *+Bedingung* erfasst die Prämisse für die Wahl einer Verbindungsalternative bei einer Entscheidung (siehe Bild 50), sodass der Produktentwickler im Prozess die richtige Verzweigung wählt.

Wie in Abschnitt 5.3.2.2 dargestellt, werden durch Aktivitäten Daten als Vorbereitung für die Datenanalyse entweder mithilfe des Importassistenten importiert oder vom Produktdatenmodell bezogen. Zum Speichern der Daten ist die Entität *ClientDaten* vorgesehen. Zwischen den Entitäten *Aktivität* und *ClientDaten* besteht eine *m-n*-Beziehung, die durch eine Transformationstabelle in zwei *1-n*-Beziehungen aufgelöst wird. Die *m-n*-Beziehung ist erforderlich, da durch eine *Aktivität* verschiedene *ClientDaten* erhoben werden und die gleichen *ClientDaten* bei verschiedenen *Aktivitäten* zum Einsatz kommen können. Die Entität *ClientDaten* besitzt die Attribute *+Bezeichnung* und *+Beschreibung* zur Benennung eines binär gespeicherten *+Datum*. Das *+Datum* repräsentiert die serialisierte Datentupel (Daten und Metadaten), d. h. eine maschinenlesbare, objektorientierte Implementierung des ML-

Datenmodells im Assistenzsystem ALARM. Als digitaler Fingerabdruck oder Signatur des Attributes *+Datum* ist das Attribut *+Hash* vorgesehen. Der *+Hash* stellt die SHA-256-Prüfsumme des serialisierten Datentupels im Attribut *+Datum* dar. Hierdurch kann eine Datentupel im Produktdatenmodell und in allen Instanzen des Assistenzsystems ALARM eindeutig identifiziert werden. Sofern eine Datentupel vom Produktdatenmodell bezogen oder in das Produktdatenmodell verortet wurde, werden die entsprechenden Entitäten im Produktdatenmodell durch die beiden Fremdschlüssel *+ServerDaten_ID* und *+Verortung_ID* erfasst. Hierdurch kann bei der Interaktion mit dem Produktdatenmodell auf einen erneuten Abgleich der *+Hash*-Werte verzichtet werden.

Zum Austausch der projektbezogenen Wissensbasen nach der Erzeugung durch den PE-Experten ist die Entität *Wissensvorlage* in der zentralen Datenbank vorgesehen (siehe Bild 51 links unten). Die zentrale Datenbank und die *Wissensvorlage* stellen zusammen die zentrale Wissensbasis dar. Die zentrale Datenbank selbst ist durch eine Rechte- und Rollenverwaltung moderiert, wodurch der Zugriff (Lese- und Schreibrechte) auf die Entität abhängig vom Benutzer geregelt wird. Die Entität *Wissensvorlage* besitzt zum Austausch der projektbezogenen Wissensbasen die Attribute *+Projektname*, eine optionale *+Beschreibung* und die *+Projektvorlage*. Der *+Projektname* erfasst den Namen des Projektes. Die *+Projektvorlage* stellt eine durch den PE-Experten erzeugte und serialisierte projektbezogene Wissensbasis dar, d. h. ein initiiertes Datenmodell der rechten Seite in Bild 51 auf Seite 128. Um die Revision einer Projektvorlage zu erfassen, wird der Benutzername und Datum/Uhrzeit der Erstellung, respektive der Veränderung, durch die Attribute *+Erstellt_von*, *+Erstellt_am*, *+Veraendert_von* und *+Veraendert_am* erfasst.

Die beiden Datenmodelle in Bild 51 ermöglichen den Transfer von Wissen zum Vorgehen bei der datengetriebenen Produktentwicklung. PE-Experten erzeugen in ihrer Instanz des Assistenzsystems ALARM eine Projektvorlage. Das Projekt besteht aus Arbeitspaketen mit UML-Aktivitätsdiagrammen. Die UML-Aktivitätsdiagramme können vom PE-Experten in Form von Aktivitäten, Entscheidungen und Verbindungen gerichtet modelliert werden. Danach werden die projektbezogenen Wissensbasen über die zentrale Wissensbasis als Projektvorlagen den Produktentwicklern zur Verfügung gestellt. Im Assistenzsystem ALARM können die Produktentwickler die Projektvorlagen bei entsprechender Berechtigung von der zentralen Wissensbasis beziehen und ausführen. Beim Durchführen der Aktivitäten werden produktbeschreibende Daten importiert oder vom Produktdatenmodell bezogen, Daten

analysiert und Entscheidungen getroffen. Die Ergebnisse und Erkenntnisse können in den jeweiligen Aktivitäten protokolliert werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, eine Projektvorlage mehrfach durchzuführen, um hierdurch verschiedene Szenarien miteinander zu vergleichen. Im nächsten Abschnitt werden die Hauptkomponenten vorgestellt, wodurch PE-Experten und Produktentwickler die Nutzung des Assistenzsystems ALARM ermöglicht wird.

6.4 Umsetzung der Hauptkomponenten des Assistenzsystems ALARM

Grafische Benutzeroberflächen (GUI) gehören im Umfeld der Softwareentwicklung heutzutage zum Stand der Technik, sofern die Bedienung einer Software einem großen Nutzerkreis zur Verfügung gestellt werden soll [235]. Nach WARTZACK [6] zielen Assistenzsysteme für die Produktentwicklung auf eine hohe Integration der Softwarekomponenten in einer leicht bedienbaren, grafischen Benutzeroberfläche ab, um die Bereitschaft der Produktentwickler zur Nutzung der neuen Funktionalitäten zu erhöhen. Darüber hinaus besteht gewöhnlich die IT-Unterstützung der Produktentwickler heutzutage ebenfalls überwiegend aus grafisch bedienbarer Software, weshalb die Hauptkomponenten des Assistenzsystems ALARM als GUI konzipiert wurden. Zur konzeptionellen Gestaltung von GUIs haben sich verschiedene Grundlagen und Normen aus dem Bereich Mensch-Computer-Interaktion etabliert, wobei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen wird (siehe [236; 237]).

In diesem Abschnitt wird zu Beginn auf den *Produktentwicklungsnavigator* eingegangen, der den Experten aus der Produktentwicklung bei der Erzeugung und dem Austausch der projektbezogenen Wissensbasen sowie den Produktentwickler bei der Durchführung der Projekte unterstützt (Abschnitt 6.4.1). In Abschnitt 6.4.2 wird auf den *Importassistenten* eingegangen, womit produktbeschreibende Daten erhoben und im ML-Datenmodell formalisiert werden. Die Interaktion mit dem Produktdatenmodell wird durch das *Synthesewerkzeug* unterstützt, das in Abschnitt 6.4.3 vorgestellt wird. Ein *Analysewerkzeug* wird im Rahmen des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7 konzipiert und umgesetzt, da die Analysewerkzeuge im Rahmen einer Analyseaufgabe vom Experten aus dem Bereich des maschinellen Lernens anwendungsbezogen implementiert und bereitgestellt werden.

6.4.1 Produktentwicklungsnavigator

Der Produktentwicklungsnavigator stellt das Hauptfenster des Assistenzsystems ALARM dar (siehe Bild 52). Nach dem ersten Ausführen des Assistenzsystems muss zuerst die Anbindung an das Produktdatenmodell definiert werden (1). Hier sind insbesondere die Zugangsdaten (Benutzername und Passwort) von Bedeutung (2), da die Rolle und dadurch die Rechte des Nutzers definiert werden. Jeder Anwender des Assistenzsystems ALARM erhält hierzu einen persönlichen Zugang.

In Bild 52 auf der linken Seite werden die lokal verfügbaren und bereits ausgeführten projektbezogenen Wissensbasen angezeigt (4). Die Darstellung erfolgt in einer Baumstruktur, wobei die projektbezogenen Wissensbasen als Wurzelknoten fungieren, und die bereits „ausgeführten“ Projektvorlagen jeweils an die projektbezogenen Wissensbasen als Blätterknoten angegliedert werden. Die Steuerelemente über der Baumstruktur dienen zum Ausführen einer Projektvorlage und dem Erzeugen einer neuen projektbezogenen Wissensbasis (3). Bevor die projektbezogenen Wissensbasen vom Produktentwickler aus der zentralen Wissensbasis bezogen werden, muss ein lokaler Ordner gewählt werden (6). Der Zugang zur zentralen Wissensbasis wird über die Schaltfläche in (5) erreicht.

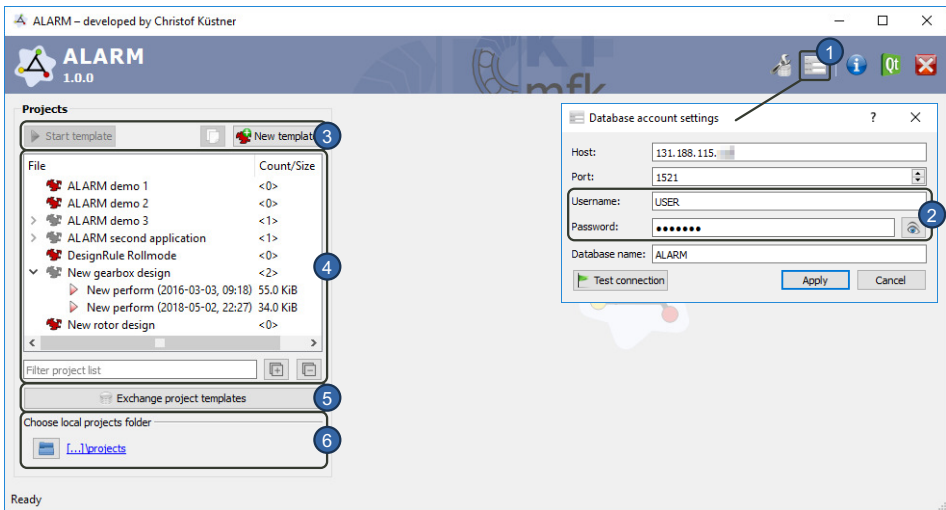


Bild 52: Der Produktentwicklungsnavigator nach dem Ausführen des Assistenzsystems ALARM.

6.4.1.1 Erzeugen und Austauschen der projektbezogenen Wissensbasen

Zur Akquisition des Wissens für das Vorgehen bei der datengetriebenen Produktentwicklung wurde eine Wissensakquisitionskomponente entwickelt. Wie bei der Mehrzahl von wissensbasierten Assistenzsystemen (siehe Abschnitt 2.4.4.1) konnte in den ersten Versionen die Wissensakquisition nur indirekt durchgeführt werden [P3; P6], da zu Beginn der Fokus auf der generellen Umsetzung des Assistenzsystems ALARM lag. Die Weiterentwicklung der Wissensakquisitionskomponente in eine leistungsfähige und intuitiv bedienbare Oberfläche hatte zum Ziel, dass die PE-Experten selbst das Wissen formalisieren können, d. h. die Wissensakquisition direkt erfolgt. Hierdurch wurde dem Konzept in Abschnitt 5.3.3 Rechnung getragen.

Die Wissensakquisitionskomponente in Bild 53 auf der nächsten Seite ist Teil des Produktentwicklungsnavigators. Sie wurde in der letzten Version so konzipiert, dass die UML-Aktivitätsdiagramme direkt durch den PE-Experten modelliert werden können. Hierzu muss der PE-Experte zuerst eine neue, leere Projektvorlage erzeugen und die Arbeitspakete angelegen ①. Danach kann für jedes Arbeitspaket ein UML-Aktivitätsdiagramm durch Aktivitäten, Entscheidungen und Verbindungen erzeugt werden ②. Die verschiedenen Eigenschaften der Arbeitspakete, Aktivitäten, Entscheidungen und Verbindungen können auf der rechten Seiten in Bild 53 definiert werden. Hierzu gehört auch die Wiki-ähnliche Beschreibung, die durch einen Rich-Text Editor umgesetzt wurde ④. Die PE-Experten können hier auf gewohnte Formatierungselemente aus den gängigen Textverarbeitungsprogrammen zurückgreifen. Nach der Fertigstellung der projektbezogenen Wissensbasen können diese in die zentrale Wissensbasis hochgeladen werden, um sie den Produktentwicklern zur Verfügung zu stellen ⑤. Die GUI zum Austausch der projektbezogenen Wissensbasen ist für PE-Experten und Produktentwickler fast identisch. Die „Upload“-Schaltfläche und die Schaltfläche zum Löschen von Projektvorlagen steht nur den PE-Experten zur Verfügung. Im unteren Teil der GUI können die lokalen projektbezogenen Wissensbasen ausgewählt und hochgeladen werden ⑥. Im oberen Teil werden die projektbezogenen Wissensbasen in der zentralen Wissensbasis dargestellt ⑦. Produktentwickler können hierdurch projektbezogene Wissensbasen aus der zentralen Wissensbasis herunterladen.

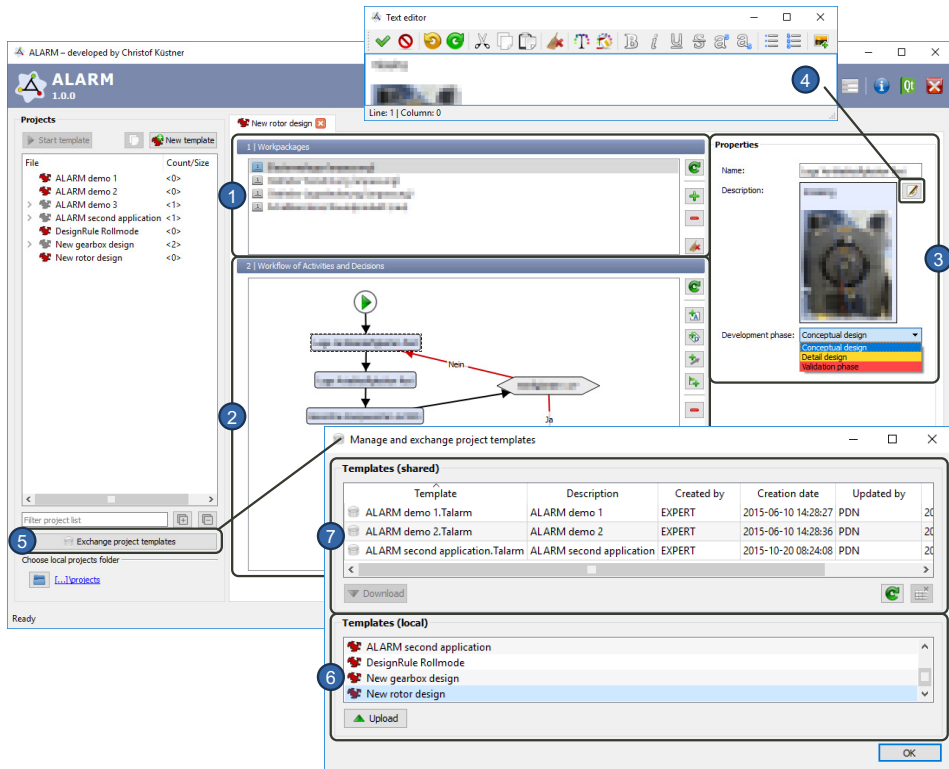


Bild 53: Der Produktentwicklungsnavigator als Wissensakquisitionskomponente und die Bereitstellung von projektbezogenen Wissensbasen durch die PE-Experten.

6.4.1.2 Ausführen einer Prozessvorlage

Nachdem die projektbezogenen Wissensbasen als Projektvorlage von den PE-Experten bereitgestellt und durch die Produktentwickler mit ihren Instanzen des Assistenzsystems ALARM aus der zentralen Wissensbasis bezogen wurden, stehen sie lokal zur Verfügung und können von den Produktentwicklern eingesetzt werden. In Bild 54 ist auf der linken Seite die Baumstruktur der lokalen Projektvorlagen nach dem Ausführen einer Projektvorlage abgebildet ①. In der Mitte ② sind die Arbeitspakete, Aktivitäten und Entscheidungen als Baumstruktur dargestellt, wobei die Entscheidungen als Verzweigungen zu erkennen sind. Die Darstellung als Baumstruktur ist an dieser Stelle sinnvoll, da diese im Fall von sehr großen UML-Aktivitätsdiagrammen beim Durchführen übersichtlicher sind. Auf der rechten Seite ist der Dialog zu einer Aktivität abgebildet. Bei der Durchführung einer Aktivität sind ausgehend von der Wiki-ähnlichen

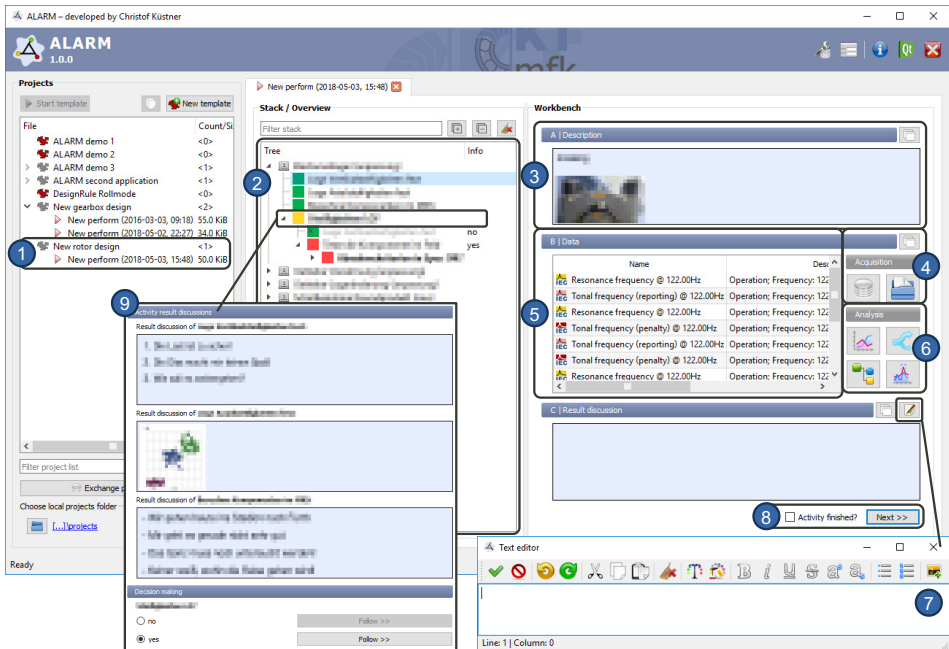


Bild 54: Der Produktentwicklungsnavigator beim Durchführen von Projektvorlagen.

Beschreibung (3) drei Arbeitsschritte erforderlich: Datenakquisition (4), Datenanalyse (6) und die Diskussion und Dokumentation der Ergebnisse (7). Der Produktentwickler wird an dieser Stelle sukzessive durch diesen Prozess geführt: Zuerst wird dem Produktentwickler die Wiki-ähnliche Beschreibung des PE-Experten zur Aktivität angezeigt (3), wodurch ausführlich erklärt wird, was in dieser Aktivität zu tun ist. Im mittleren Teil der rechten Seite kann die Datenakquisition (4) und -analyse (6) durchgeführt werden. Bei der Datenakquisition (4) kann entweder der Importassistent eingesetzt (Abschnitt 6.4.2) oder auf das Produktdatenmodell (Abschnitt 6.4.3) zurückgegriffen werden. Die bereits akquirierten Daten werden in (5) angezeigt, die anschließend in der vorgesehenen Datenanalyse (6) eingesetzt werden können. Hinweise hierzu hat der PE- sowie der ML-Experte in der Beschreibung hinterlegt. Nach dem Abschluss der Datenanalyse müssen die Ergebnisse und Erkenntnisse dokumentiert und diskutiert werden (7). Der Produktentwickler kann abschließend die Aktivität in (8) abschließen und mit dem nächsten Schritt fortfahren, der von der Baumstruktur vorgegeben wird. Trifft der Produktentwickler bei der weiteren Bearbeitung auf eine Entscheidung, so werden die Ergebnisdiskussionen der vorangegangenen

Aktivitäten eingeblendet. Auf Basis dessen kann der Produktentwickler die richtige Verzweigung im Prozess wählen (9). Der Produktentwicklungsnavigator erfasst jeweils den Status einer Aktivität (erledigt, nicht erledigt) und den gewählten Zweig einer Entscheidung, wodurch das Vorgehen bei der datengetriebenen Produktentwicklung durch den Produktentwickler nachvollzogen werden kann.

6.4.2 Importassistent

Der Importassistent stellt ein Werkzeug zur Unterstützung der Produktentwickler dar, um produktbeschreibende Daten in das ML-Datenmodell zu überführen (siehe Abschnitt 5.2.2). Der Importassistent hat die Aufgabe, die produktbeschreibenden Daten auf ihrer Inhaltsebene zu erfassen und zu formalisieren. Hierzu wurde der Fokus in dieser Arbeit auf ASCII-Austauschdokumente gelegt (siehe Abschnitt 5.2.1). Da die formale Struktur der ASCII-Austauschdokumente anwendungs- und dadurch unternehmensabhängig ist (siehe Abschnitt 5.4.2.2), wurde der Importassistent so gestaltet, dass er durch Erweiterungen (genannt Datenquellen) sehr einfach um weitere Arten von ASCII-Austauschformate ergänzt werden kann.

In Bild 55 auf der nächsten Seite ist die informationstechnische Umsetzung des Importassistenten dargestellt. Zuerst muss der Produktentwickler eine Datei oder einen Pfad wählen, der importiert werden soll (1). Durch eine Voranalyse des Pfades oder der Datei erkennt der Importassistent mithilfe einer Definition in den Datenquellen (2), ob die Auswahl des Produktentwicklers eingelesen werden kann. Entsprechend sind die Datenquellen in (2) hervorgehoben oder ausgegraut. Nach der Auswahl der Datenquelle wird der Importvorgang gestartet. Die identifizierten und exportierten Datentupel, bestehend aus Metadaten und Daten, werden in der Liste in (3) angezeigt. Die Produktentwickler können dort die zu importierenden Datentupel selektieren, um sie auf der rechten Seite zu überprüfen und bei Bedarf zu bearbeiten (bspw. die Ergänzung von Metadaten). Hierbei werden in (4) die Metadaten und in (5) die Daten mit ihrer Einheit und Dimension angezeigt (Skalarer Wert, Vektor/Tabelle und Matrix).

Durch den Importassistenten können die Produktentwickler die produktbeschreibenden Daten in das ML-Datenmodell überführen. Hierdurch stehen die produktbeschreibenden Daten auf ihrer Inhaltsebene für weitere Aktivitäten zur Verfügung. Analog zum Methodenwissen für das maschinelle Lernen müssen die Datenquellen nach Bedarf in das Assistenzsystem ALARM implementiert werden.

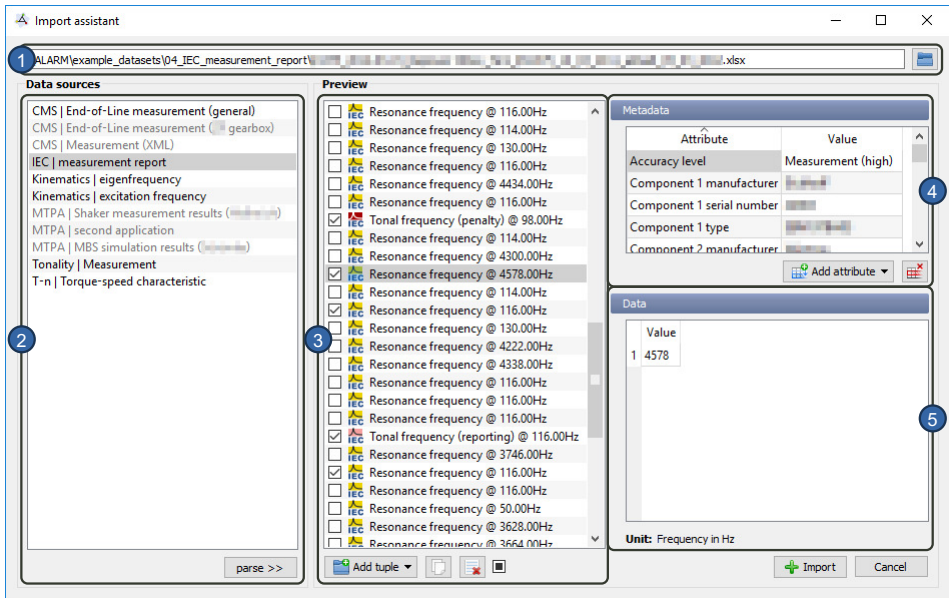


Bild 55: Der Importassistent zur Datenakquisition.

6.4.3 Synthesewerkzeug

Das Synthesewerkzeug dient zur Interaktion mit dem Produktdatenmodell. Es werden hierdurch zum einen die ML-Datenmodelle im Produktdatenmodell verortet (Synthese von Daten und Produktmodell) und zum anderen können bereits verortete Daten gesucht und bezogen werden.

Es stehen hierfür zwei Reiter zur Verfügung (siehe Bild 56): Der Upload-Reiter (oben) und der Download-Reiter (unten). Im Upload-Reiter können die produktbeschreibenden Daten, die mit dem Importassistenten im ML-Datenmodell formalisiert wurden, in das Produktdatenmodell hochgeladen werden (Produktdatensynthese). Hierfür werden auf der linken Seite die lokalen Datentupel angezeigt (1). In (2) stehen verschiedene Suchfelder zur Verfügung, wodurch implizit die Ebene im KLaIn-Produktmodell ausgewählt wird. Hierbei kann der Produktentwickler nach Produktklassen oder -instanzen sowie nach Komponentenklassen oder -instanzen suchen, um die Datentupel entsprechend in der Struktur des Produktes zu verorten. In diesem Falls wurden hierzu Produktstrukturdaten aus dem Anwendungskontext „tonhaltige Windenergieanlagen“ hinterlegt. In Bild 56 (2) wurde zur Demonstration nach einer Produktklasse gesucht, weshalb in (3) die zum Suchbegriff passenden Produktklassen angezeigt werden. In (3) kann

anschließend ein Suchergebnis ausgewählt und die Datentupel aus ① zugeordnet und dadurch hochgeladen werden. Ab diesem Zeitpunkt stehen sie für andere Produktentwickler im Produktdatenmodell zur Verfügung.

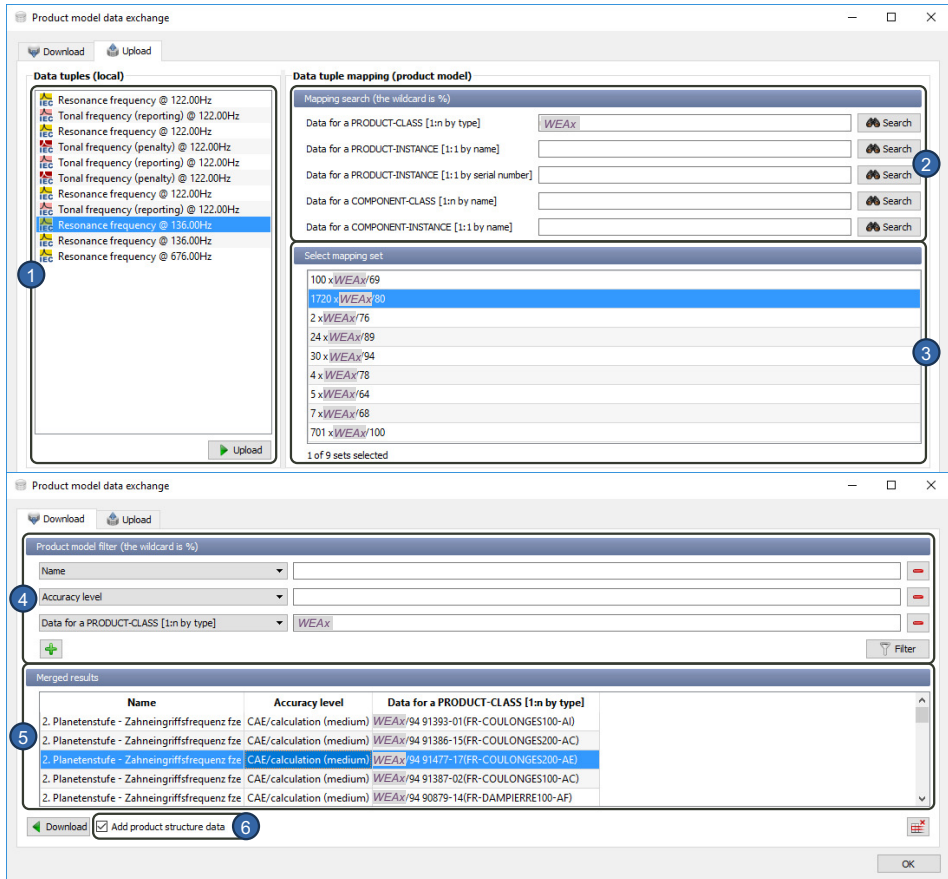


Bild 56: Das Synthesewerkzeug zur Interaktion mit dem Produktdatenmodell. Der exakte Wortlaut des Suchbegriffs sowie die Suchergebnisse sind anonymisiert.

Der Download-Reiter im Synthesewerkzeug dient zum Suchen und Herunterladen von Datentupeln, die bereits in das Produktdatenmodell hochgeladen wurden (siehe Bild 56 unten). Hierbei können mehrere Suchfelder nach Bedarf hinzugefügt und Kriterien in den Suchfeldern definiert werden (4), die durch das Synthesewerkzeug in eine Datenbankabfrage kombiniert werden. Suchkriterien stellen zum einen alle Metadaten der verfügbaren Datentupel dar und zum anderen Bezeichnungen der Produkte oder Komponenten. Hierbei wurden die Eigenschaften des Klain-Produktmodells

zum Gültigkeitsbereich von produktbeschreibenden Daten berücksichtigt (siehe Abschnitt 5.2.4.3). Wird an dieser Stelle nach einer Klasse eines Produktes oder einer Komponente gesucht, so werden entsprechend des KLaIn-Produktmodells auch von den Klassen an die Instanzen vererbte Datentupel angezeigt ⑤. Beim Herunterladen der Datentupel können vorher optional die Daten zur Produktstruktur angehängt werden ⑥.

7 Anwendungsbeispiel: Datengetriebene Konfigurationsanalyse

Ziel des folgenden Kapitels ist durch ein Anwendungsbeispiel das Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung zu validieren und die Umsetzung des Assistenzsystems ALARM zu verifizieren. Hierzu wird eine Herausforderung aus dem Anwendungskontext in Kapitel 4 aufgegriffen und auf Basis des entwickelten Konzeptes in Kapitel 5 in das Assistenzsystem ALARM (Kapitel 6) überführt. Der Fokus liegt hierbei vor allem auf der Unterstützung der Produktentwicklung bei der Absicherung komplexer Produkteigenschaften (Abschnitt 1.1) durch die intensivere Wiederverwendung von produktbeschreibenden Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen.

Die praktische Anwendung in diesem Kapitel soll dem Leser verdeutlichen, wie das Assistenzsystem im industriellen Umfeld eingesetzt werden kann. Zu Beginn wird hierzu eine Herausforderung bei der Absicherung von Produkteigenschaften vorgestellt, die mit konventionellen Werkzeugen bisher nicht abgesichert werden können (Abschnitt 7.1). Der Lösungsansatz für die Herausforderung wird in das Assistenzsystem ALARM überführt, wodurch es verschiedenen Produktentwicklern als Werkzeug verfügbar gemacht wird. Hierfür muss das Expertenwissen unterschiedlicher Domänen gemäß dem Konzept in Kapitel 5 akquiriert, formalisiert oder implementiert werden (Abschnitt 7.2 und Abschnitt 7.3). Nach der Bereitstellung des Wissens können die Produktentwickler das Assistenzsystem ALARM als weiteres Werkzeug im Produktentwicklungsprozess einsetzen, um die implementierte und bereitgestellte datengetriebene Analyse durchzuführen (Abschnitt 7.4). Das Kapitel schließt mit der Kontextualisierung der Analyseergebnisse (Abschnitt 7.5) und einer Diskussion (Abschnitt 7.6).

7.1 Vorstellung des Anwendungsbeispiels

Als Anwendungsbeispiel dient eine zentrale Herausforderung bei der Absicherung der akustischen Produkteigenschaften von Windenergieanlagen: Windenergieanlagen einer Produktgeneration weisen trotz des gleichen Aufbaus und Spezifikation an verschiedenen Betriebsstandorten unterschiedliche akustische Produkteigenschaften auf. Zu den unerwünschten akustischen Produkteigenschaften zählen vor allem die von mechanischen Komponenten verursachten Tonhaltigkeiten (siehe Bild 57). Tonhaltigkeiten

können als störende Einzeltöne im Schallemissionsspektrum vom Menschen wahrgenommen werden, weshalb sie im besonderen Maße bei der Inbetriebnahme von Windenergieanlagen berücksichtigt werden [207]. Sind bei einer Windenergieanlage am Betriebsstandort Tonhaltigkeiten nachzuweisen, kann die Betriebserlaubnis nicht erteilt oder entzogen werden (siehe Abschnitt 4.2). Bei der Absicherung der tatsächlichen akustischen Produkteigenschaften kommen in diesem Fall die konventionellen Werkzeuge der Produktentwickler an ihre Grenzen, da das vermeintlich zufällige Auftreten von Tonhaltigkeiten von Windenergieanlagen in den frühen Phasen „Entwicklung, Konstruktion“ und „Fertigung, Montage, Prüfung“ des Produktlebenszyklus nicht reproduziert werden kann (siehe Abschnitt 4.2.3). Da bei dieser Problemstellung die konventionellen Werkzeuge nicht eingesetzt werden können, ist die Voraussetzung für den Einsatz des Assistenzsystems ALARM erfüllt (siehe Abschnitt 5.1), wodurch datengetriebene Lösungsansätze in Betracht gezogen werden müssen.

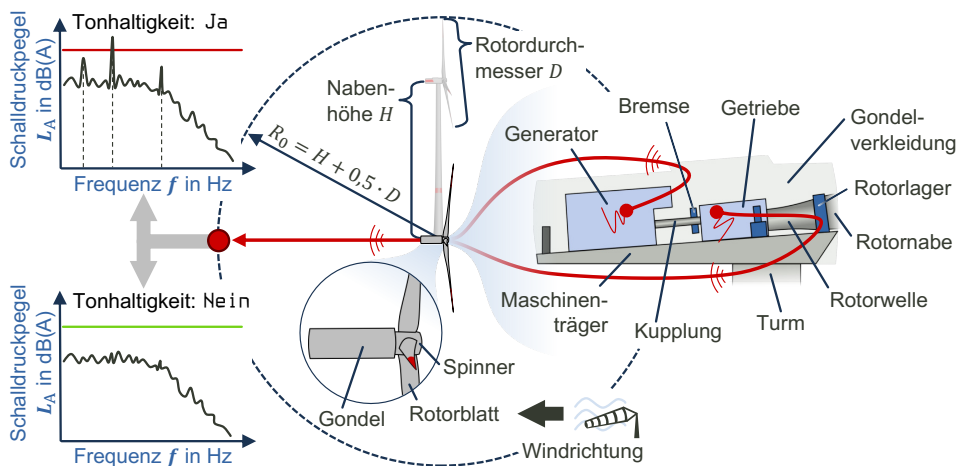


Bild 57: Hypothetische Beispiele zur mechanisch bedingten Schallentstehung, -übertragung und -abstrahlung und die Messung am Schallemissionsmesspunkt nach der Richtlinie IEC 61400-11 (2.1):2006-11 [207] an einer Windenergieanlage.

Legende:

- / Schallentstehung — Schallübertragung)) Schallabstrahlung
- Schallemissionsmesspunkt nach der Richtlinie IEC 61400-11 (2.1):2006-11 [207]

Generell können die wirksamsten Maßnahmen zur Beeinflussung der akustischen Produkteigenschaften in den frühen Phasen „Produktplanung, Aufgabenstellung“ oder „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus in ein Produkt integriert werden (siehe Abschnitt 4.1). Aus diesem Grund

muss der Einsatz von datengetriebenen Analysen zur Unterstützung der Tätigkeiten auf diese frühen Phasen des Produktlebenszyklus fokussiert werden muss. Die Tätigkeiten bei der Entwicklung von lärmreduzierten Produkten werden in der Norm DIN EN ISO 11688-1:2009-11 [202] und in der Richtlinien-Reihe VDI 3720-1:2014-06 [201] vorgestellt (siehe Abschnitt 4.1). Hierbei erfolgt zu Beginn eine Charakterisierung der Komponenten hinsichtlich Schallquelle, Schallübertragungsweg und schallabstrahlende Fläche, um anschließend gezielt konstruktive Lärminderungsmaßnahmen einzuleiten. Unerwünschte, akustische Produkteigenschaften, wie bspw. die Tonhaltigkeiten, werden demzufolge in den Komponenten der Windenergieanlage erzeugt, über verschiedene Komponenten übertragen und schließlich an bestimmten Stellen der Windenergieanlage abgestrahlt. In Bild 57 sind hierzu als Beispiel zwei hypothetische Schalltransferpfade von der Schallentstehung bis zum Schallemissionsmesspunkt dargestellt. Nach der Richtlinie IEC 61400-11 (2.1):2006-11 [207] liegt der Schallemissionsmesspunkt hierbei im Lee, d. h. auf der Wind abgewandten Seite der Windenergieanlage, in einem Abstand von R_0 , welcher der absoluten Höhe der Windenergieanlage entspricht.

Um den Anforderungen der Entwicklung von lärmreduzierten Produkten gerecht zu werden, muss eine datengetriebene Analyse demnach Muster identifizieren, womit der Produktentwickler in den frühen Phasen „Produktplanung, Aufgabenstellung“ oder „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus unterstützt wird. Da in der ersten Phase „Klären und präzisieren der Aufgabenstellung“ der Produktentwicklung nur sehr wenige produktbeschreibende Daten zu den tatsächlichen Produkteigenschaften zur Verfügung stehen, müssen die Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen in Betracht gezogen werden. Produktbeschreibende Daten vorangegangener Produktgenerationen sind wesentlich umfassender und vollständiger und eignen sich deshalb besser für datengetriebene Analysen. Ebenso stehen die tatsächlichen Produkteigenschaften der vorangegangenen Produktgeneration bereits fest, wodurch die Qualitätsklasse höher und somit auch die Analyseergebnisse vertrauenswürdiger sind (siehe Abschnitt 5.2.3).

Im Idealfall haben alle Produkte einer Serie identische Eigenschaften. Im Fall der Tonhaltigkeiten bei den Windenergieanlagen können die akustischen Produkteigenschaften allerdings von Betriebsstandort zu Betriebsstandort variieren. Die einzigen offensichtlichen Unterschiede der verschiedenen Windenergieanlagen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme sind die Hersteller der einzelnen Komponenten (Zweitlieferanten) und die damit einhergehenden Unterschiede in den Produktmerkmalen. Es ist deshalb

anzunehmen, dass die Schallübertragung und Schallabstrahlung aufgrund der unterschiedlichen Produktkonfiguration begünstigt oder verschlechtert wird. Mechanisch bedingt entstehen in verschiedenen Komponenten tonhaltige Geräusche (z. B. Getriebe), die durch ungünstige oder günstige Wechselwirkungen den Schallemissionsmesspunkt erreichen, respektive nicht erreichen. Die datengetriebene Analyse in diesem Anwendungsbeispiel basiert deshalb auf der Hypothese, dass unterschiedliche Produktkonfigurationen die akustischen Produkteigenschaften einer Windenergieanlage beeinflussen.

Die Aufgabenstellung des Datenanalysealgorithmus, die in dieser Arbeit als Demonstration ausgewählt wurde, ist die Identifikation von Herstellerabhängigkeiten und Wechselwirkungen der Komponenten einer Windenergieanlage im Hinblick auf das akustische Produktverhalten. Der Datenanalysealgorithmus wird entwickelt und in das Assistenzsystem ALARM implementiert sowie eine projektbezogene Wissensbasis für den Umgang mit dem Datenanalysealgorithmus im Produktentwicklungsprozess bereitgestellt. Die Wechselwirkungen der Komponenten verschiedener Hersteller und deren Einfluss auf das akustische Produktverhalten stellen in diesem Anwendungsbeispiel die Muster dar. Bei der Kontextualisierung der Muster sind für die Produktentwicklung beide Ergebnisse, d. h. Muster für tonhaltige und nicht tonhaltige Windenergieanlagen, von Interesse: Günstige Wechselwirkungen führen dazu, dass die Tonhaltigkeiten den Schallemissionsmesspunkt nicht erreichen. Ungünstige Wechselwirkungen führen zu tonhaltigen Windenergieanlagen. Sofern der Datenanalysealgorithmus für beide Fälle Wechselwirkungen identifizieren kann, bieten diese für den Produktentwickler die Grundlage für weitere Ursachenuntersuchungen, die keinen Fokus dieser Arbeit darstellen.

7.2 Konfigurationsanalyse: Datenanalysealgorithmus zur Identifikation von Herstellerabhängigkeiten und Wechselwirkungen der Komponenten


In Abschnitt 2.3.3 wurden die Grundlagen zu verschiedenen Data-Mining-Methoden vorgestellt. Zur Identifikation von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in Daten eignet sich vor allem die Assoziationsanalyse. Mittels der Assoziationsanalyse können starke Zusammenhänge oder Regelmäßigkeiten in einem Trainingsdatensatz identifiziert werden. Die Muster werden hierbei durch verschiedene Assoziationsregeln ausgedrückt. Ein Vorteil der Regeln ist hierbei, dass sie von den Produktentwicklern sehr einfach


interpretiert und validiert werden können [238]. Die Grundlagen zur Assoziationsanalyse sind in Abschnitt 2.3.5.3 beschrieben. Die statistischen Grundlagen zur Implementierung der Konfigurationsanalyse (z. B. Auswahl signifikanter Assoziationsregeln) sind nicht Bestandteil der Data-Mining-Methode „Assoziationsanalyse“ und werden deshalb in den jeweiligen Schritten des Konfigurationsanalysealgorithmus beschrieben.

In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung und Implementierung der Konfigurationsanalyse vorgestellt. Alle produktbeschreibenden Daten stammen aus dem industriellen Umfeld, weshalb aus Gründen der Geheimhaltung die Bezeichnungen anonymisiert werden müssen. Die Implementierung der Konfigurationsanalyse erfolgt mittels der freien Programmiersprache *R*²⁷ und der Erweiterung *arules*²⁸. Die graphische Benutzeroberfläche und Visualisierung der Assoziationsregeln wurde analog zum Assistenzsystem ALARM in der Programmiersprache *Python* und dem *Qt-Toolkit* umgesetzt, um dieses Analysewerkzeug in das Assistenzsystem ALARM zu integrieren.

7.2.1 Identifikation der Eingangsdaten

Bevor der Datenanalysealgorithmus entwickelt werden kann, müssen die Eingangsdaten und deren Struktur spezifiziert werden (siehe Abschnitt 2.3.3). Da die Aussagen über die Tonhaltigkeiten verschiedener Produktkonfigurationen in diesem Anwendungsbeispiel von Interesse sind, müssen einerseits Daten zur Produktkonfiguration und andererseits deren Bewertung oder Messung zur Verfügung gestellt werden. In Bild 58 ist hierzu der Prozess von den produktbeschreibenden Daten über das Assistenzsystem ALARM bis zur erforderlichen Struktur der Eingangsdaten dargestellt. Die Daten zur Produktstruktur stammen aus einem ERP-System und müssen in diesem Anwendungsbeispiel nicht erneut importiert werden, da sie bereits zur Erzeugung des Produktdatenmodells genutzt wurden (siehe Abschnitt 6.2). Die Aussagen zur Tonhaltigkeit werden mithilfe von Messungen erhoben. Diese werden von Messingenieuren oder im Fall einer Schallemissionsmessung durch externe Prüfinstitute erhoben. Mithilfe des Importassistenten und dem Synthesewerkzeug müssen diese im Produktdatenmodell verortet werden. Dieser Prozess muss und soll nicht initial von den Experten durchgeführt werden, sondern kann im Verlauf der Produktentwicklung, wenn weitere Messungen gemacht oder zur Verfügung

²⁷ *R*  ist eine freie Programmiersprache für statistische Berechnungen.

²⁸ *arules*  ist ein Paket für *R* zur Identifikation von Assoziationsregeln in Daten. [239; 240]

7 Anwendungsbeispiel: Datengetriebene Konfigurationsanalyse

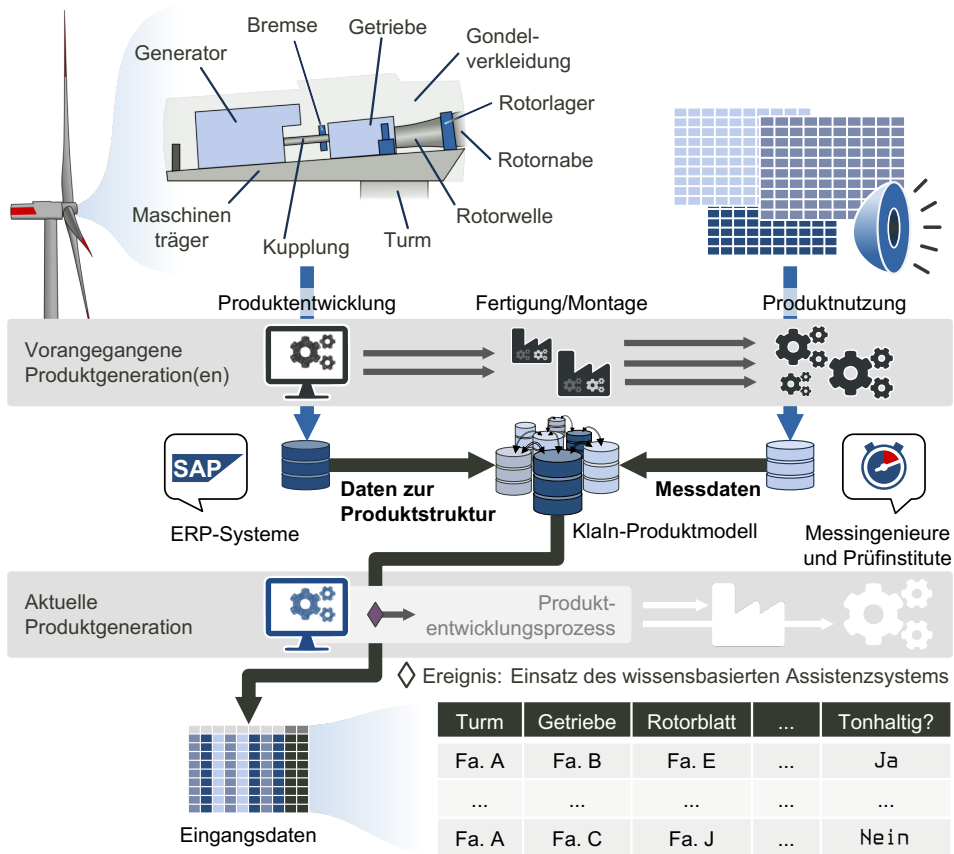


Bild 58: Erhebung und Struktur der Eingangsdaten für die Konfigurationsanalyse.

stehen, auch von den Produktentwicklern oder den Messingenieuren selbst durchgeführt werden. Entsprechende Aktivitäten in der projektbezogenen Wissensbasis müssen hierzu den Produktentwickler sensibilisieren. Die einzelnen Messungen (produktbeschreibenden Daten) können im Assistenzsystem ALARM anschließend durch den Produktentwickler aus dem Produktdatenmodell als Datentupel bezogen werden, wobei die Produktstruktur zu jedem Datum beim Herunterladen angehängt werden kann. Auf diese Weise wird ein Datensatz erzeugt, der die Aussagen zur Tonhaltigkeit und die Produktstruktur der jeweiligen Windenergieanlage beinhaltet, um als Eingangsdatensatz für die Konfigurationsanalyse genutzt zu werden.

Normalerweise findet dieser Prozess der Datenvorbereitung bei der Nutzung von maschinellen Lernmethoden durch den Experten für das maschinelle Lernen manuell statt (siehe Abschnitt 2.3.2). Das liegt daran, dass die produktbeschreibenden Daten auf Dokumentenebene unstrukturiert verwaltet werden (siehe Abschnitt 2.2.5). An dieser Stelle unterstützt das Assistenzsystem ALARM und das Produktdatenmodell den gesamten Prozess zur Strukturierung und Integration der produktbeschreibenden Daten. Der mittels des Assistenzsystem ALARM strukturierte und integrierte Datensatz aus den verfügbaren Daten einer vorangegangenen Produktgeneration ist in Tabelle 14 im Anhang auf Seite 176 dargestellt. Dieser Trainingsdatensatz stellt die Grundlage für das Anwendungsbeispiel dar.

7.2.2 Entwurf der Konfigurationsanalyse

Der Datenanalysealgorithmus für die Konfigurationsanalyse basiert auf der Data-Mining-Methode der Assoziationsanalyse (siehe Abschnitt 2.3.5.3), weil hiermit Wechselwirkungen, Abhängigkeiten und Regelmäßigkeiten in Daten identifiziert werden können [100; 133]. Der Entwurf des Algorithmus zur Konfigurationsanalyse ist in Bild 59 dargestellt und besteht aus vier Schritten. Im Schritt ① werden mithilfe der Assoziationsanalyse die Assoziationsregeln ermittelt (siehe Abschnitt 2.3.5.3). Als Algorithmus für die Assoziationsanalyse wird der weit verbreitete und etablierte Apriori-Algorithmus

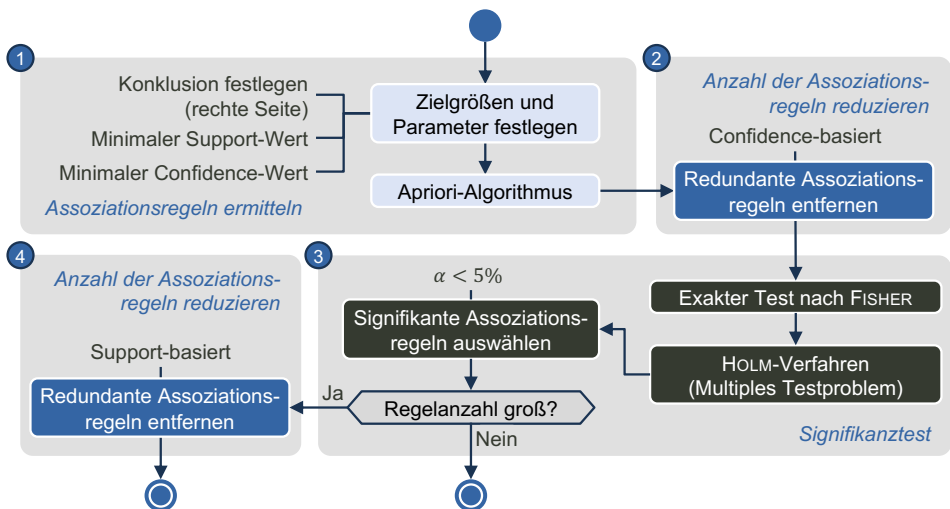


Bild 59: Entwurf des Algorithmus zur Konfigurationsanalyse.

von AGRAWAL & SRIKANT [241] genutzt. Da der Apriori-Algorithmus auch weniger relevante Regeln identifiziert und deshalb die Anzahl der Assoziationsregeln sehr groß ist, wird im Schritt ② die Anzahl der Assoziationsregeln reduziert. Hierbei werden Assoziationsregeln entfernt, deren Aussage bereits durch andere Assoziationsregeln abgedeckt wird. Anschließend erfolgt ein Signifikanztest ③, um statistisch signifikante Assoziationsregeln auszuwählen, d. h. Assoziationsregeln deren linke (Prämisse) und rechte Seite (Konklusion) voneinander abhängig sind (z. B. die Produktkonfiguration von der Aussage zur Tonhaltigkeit *Ja / Nein*). Ist die Anzahl der statistisch signifikanten Assoziationsregeln sehr groß, kann abschließend optional in Schritt ④ eine weitere Reduktion der Assoziationsregeln vorgenommen werden.

Der Entwurf des Algorithmus zur Konfigurationsanalyse in Bild 59 ist generisch gehalten und kann dadurch auf ähnliche Problemstellungen übertragen werden. Die einzelnen Schritte der Konfigurationsanalyse für dieses Anwendungsbeispiel werden im Folgenden genauer vorgestellt. Sofern eine Detaillierung erforderlich ist, wird auf den Datensatz in Tabelle 14 zurückgegriffen.

7.2.2.1 Definition einer Zielgröße und Durchführen der Assoziationsanalyse

Die Assoziationsanalyse gehört zu der Gruppe der unüberwachten Lernverfahren und verfügt aus diesem Grund über keine spezifische Zielgröße. Gegenstand dieser Untersuchung stellt allerdings eine Größe von Interesse dar (Tonhaltig: $TZ=Ja / Nein$). Diese Tatsache steht nicht im Widerspruch mit der Assoziationsanalyse. In der Literatur wird dieser Fall der Assoziationsanalyse bspw. unter den Begriffen „Supervised Descriptive Rule Discovery“ oder „Subgroup Mining“ diskutiert [242]. Technisch wird die Fokussierung auf eine Zielgröße durch die Definition einer Randbedingung gelöst, die in Form einer Filterregel in die Assoziationsanalyse integriert wird. Hierdurch werden nur die Assoziationsregeln identifiziert, die die vorgegebene Bedingung der rechten Seite (Tonhaltig: $TZ=Ja / Nein$) erfüllen [243]:

$$\begin{array}{l} \text{Prämisse X} \qquad \text{Konklusion Y} \\ \{ \dots \} \Rightarrow \{ TZ=yes \} \text{ oder} \\ \{ \dots \} \Rightarrow \{ TZ=no \} \end{array} \quad (7)$$

Hinsichtlich der Definition der Terme „Prämisse“ und „Konklusion“ im Kontext der Assoziationsanalyse wird an dieser Stelle auf Gleichung 3 (S. 46)

verwiesen. Durch die Randbedingung in Gleichung 7 verbleiben nur die Assoziationsregeln, die eine Aussage zur Tonhaltigkeit folgern. Darüber hinaus stellen der minimale Support-Wert und der minimale Confidence-Wert zwei weitere Parameter des Apriori-Algorithmus dar. Durch den Support-Wert kann festgelegt werden, welcher Anteil eines Datensatzes eine Assoziationsregel minimal abdecken muss, um berücksichtigt zu werden. Der Anteil ist eine prozentuale Angabe der minimalen Anzahl an Zeilen bezogen auf die Gesamtzahl aller Zeilen eines Datensatzes. Durch den Confidence-Wert wird die minimale Anforderung an die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten oder nicht-Auftreten einer Tonhaltigkeit festgelegt, wenn eine bestimmte Produktkonfiguration vorliegt. Normalerweise wird der minimale Confidence-Wert auf 0,8 (d. h. > 80 %) festgelegt. Diese beiden Score-Kennzahlen dienen dazu, direkt im Trainingsprozess weniger relevante Assoziationsregeln auszuschließen. Der Apriori-Algorithmus [133; 241] ist im R-Paket *arules* implementiert [239; 240], womit anschließend die Assoziationsregeln unter den definierten Parametern ermittelt werden.

7.2.2.2 Reduzierung der redundanten Assoziationsregeln

Nachdem der Apriori-Algorithmus die Assoziationsregeln ermittelt hat, muss die häufig sehr große Anzahl an Assoziationsregeln gezielt reduziert werden. Hierbei werden Assoziationsregeln als redundant betrachtet, wenn allgemeingültige Assoziationsregeln mit einem gleichen oder höheren Confidence-Wert existieren. Eine Assoziationsregel gilt im Vergleich mit einer anderen Assoziationsregel bei gleicher Konklusion Y als allgemeingültig, wenn sie weniger Bedingungen in der Prämisse X enthält. Spezifischere Assoziationsregeln mit einem geringeren Confidence-Wert gelten als weniger geeignet für eine Vorhersage, weshalb diese bevorzugt entfernt werden. [240; 244]

Nach HAHLER et al. [240] ist demnach eine Assoziationsregel B redundant, wenn gilt

$$\exists X_A \subset X_B \quad \text{confidence}(\underbrace{X_A \Rightarrow Y}_A) \geq \text{confidence}(\underbrace{X_B \Rightarrow Y}_B). \quad (8)$$

Für eine Prämisse X_A einer Assoziationsregel A , deren Bedingungen bereits in der Prämisse X_B der Assoziationsregel B enthalten sind, gilt: Wenn der Confidence-Wert der Assoziationsregel A größer oder gleich des Confidence-Wertes der Assoziationsregel B ist, dann kann die Assoziationsregel B als redundant betrachtet werden. In diesem Fall deckt die Assoziationsregel A

die Assoziationsregel B bereits ab (Assoziationsregel A ist allgemeingültiger) und hat gleichzeitig einen höheren Confidence-Wert (besser geeignet für die Vorhersage), weshalb die Assoziationsregel B keinen Mehrwert erbringt und deshalb entfernt werden kann.

Neben dem Confidence-Wert können im Redundanz-Kriterium in Gleichung 8 auch andere Score-Kennzahlen genutzt werden, z. B. der Support-Wert, wie es im optionalen vierten Schritt der Konfigurationsanalyse erfolgt.

7.2.2.3 Signifikanztest

Zur Sicherstellung der statistischen Signifikanz (Aussagekraft) einer Assoziationsregel muss ein Hypothesentest durchgeführt werden [245]. Hierbei wird statistisch überprüft, ob die Assoziationsregel eine echte Abhängigkeit zwischen der Prämisse X und Konklusion Y ausdrückt. Die Zusammensetzung des Trainingsdatensatzes entsteht hierbei durch die Durchführung von Messungen zur Bestimmung der Produkteigenschaften, die eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit (alle Windenergieanlagen) darstellt. Es soll durch den Signifikanztest ausgeschlossen werden, dass die Assoziationsregel durch den Apriori-Algorithmus aufgrund der zufälligen Zusammensetzung der Stichprobe als relevant identifiziert wurde. Zur Beurteilung der Signifikanz im Hypothesentest muss zuerst eine Nullhypothese H_0 und eine Alternativhypothese H_1 aufgestellt werden. Generell erfolgt die Formulierung der Null- und Alternativhypothese so, dass die Alternativhypothese H_1 die zu untersuchende Aussage enthält [246]. Häufig gibt auch der eingesetzte statistische Test vor, wie die beiden Hypothesen zu formulieren sind. In der Konfigurationsanalyse werden die Nullhypothese H_0 und die dazugehörige Alternativhypothese H_1 ungerichtet wie folgt formuliert:

H_0 : Die untersuchte Produkteigenschaft (Aussage zur Tonhaltigkeit) ist von den Produktmerkmalen (Produktkonfiguration) *unabhängig*.

H_1 : Die untersuchte Produkteigenschaft (Aussage zur Tonhaltigkeit) ist von den Produktmerkmalen (Produktkonfiguration) *abhängig*.

Ein statistischer Test bildet anschließend die Grundlage, um eine Entscheidung zwischen der Nullhypothese H_0 und der Alternativhypothese H_1 herbeizuführen. Das wirkliche Verhalten der Grundgesamtheit ist i. d. R. nicht bekannt, weshalb die Entscheidung zwischen Nullhypothese H_0 und der Alternativhypothese H_1 auf Basis einer Stichprobe getroffen wird. Hierbei können zwei Fehlentscheidungen getroffen werden, welche als α -Fehler

(Fehler 1. Art) und β -Fehler (Fehler 2. Art) bezeichnet werden. Nach BANKHOFFER & VOGEL [245] wird der Fehler 1. Art begangen, wenn die Nullhypothese H_0 abgelehnt wird (H_1 wird akzeptiert), obwohl die Nullhypothese H_0 richtig ist. Der Fehler 2. Art ist analog definiert, wobei die Nullhypothese H_0 angenommen wird, obwohl die Nullhypothese H_0 falsch ist (siehe Tabelle 10). Nach BANKHOFFER & VOGEL [245] ist das Ziel des Signifikanztests, die Wahrscheinlichkeit p_α den Fehler 1. Art für ein Ereignis zu begehen anhand einer vorliegenden Stichprobe abzuschätzen, um diese einem maximal zulässigen Fehlerwahrscheinlichkeitswert α_{sig} gegenüberzustellen. Die Nullhypothese H_0 kann abgelehnt werden, wenn gilt: $p_\alpha \leq \alpha_{\text{sig}}$. Die maximal zulässige Fehlerwahrscheinlichkeit wird in der empirischen Forschung auch als Signifikanzniveau α_{sig} bezeichnet. Hierbei wird i. d. R. ein Ereignis mit der Wahrscheinlichkeit $p_\alpha \leq \alpha_{\text{sig}} = 1,0\%$ als „hoch signifikant“ und $p_\alpha \leq \alpha_{\text{sig}} = 5,0\%$ als „signifikant“ bezeichnet [246]. Je kleiner die Fehlerwahrscheinlichkeit p_α desto größer ist die Sicherheit zum Ablehnen der Nullhypothese H_0 .

Tabelle 10: Entscheidungen im Hypothesentest nach [125; 246].

Entscheidung aufgrund der Stichprobe:		für H_0	gegen H_0 (für H_1)
In der Grundgesamtheit gilt:	H_0	richtige Entscheidung	α -Fehler (Fehler 1. Art)
	H_1	β -Fehler (Fehler 2. Art)	richtige Entscheidung

Eine Abschätzung zur Fehlerwahrscheinlichkeit p_α einer Assoziationsregel $X \Rightarrow Y$ erfolgt mithilfe eines Signifikanztests auf Basis der absoluten Häufigkeiten der Prämisse $h(X)$ und Konklusion $h(Y)$ im Trainingsdatensatz. Aufgrund der diskreten Natur der Häufigkeiten (kategorischen Stichprobendaten) eignet sich für die Assoziationsregeln insbesondere der Exakte Test nach FISHER [247; 248]. Der Exakte Test nach FISHER basiert auf der hypergeometrischen Verteilung [247], womit die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses beim Ziehen ohne Zurücklegen aus einer Urne berechnet wird. Der Trainingsdatensatz mit den Messungen zur Tonhaltigkeit der Windenergieanlagen repräsentiert hier die Stichprobe, die aus der „Urne aller existierender Windenergieanlagen“ ohne Zurücklegen gezogen wurde. Zur Abschätzung der Fehlerwahrscheinlichkeit $p_{F\alpha}$ für eine Assoziationsregel werden die absoluten Häufigkeiten der Prämisse $h(X)$ und Konklusion $h(Y)$ in eine Vier-Felder-Tafel (engl. 2×2 contingency table) [246] überführt

(siehe Tabelle 11). Die Gleichung 9 in Tabelle 11 repräsentiert die Definition von FISHER [249] und dient zur Quantifizierung der Fehlerwahrscheinlichkeit $p_{F\alpha}$ für eine gegebene Assoziationsregel $X \Rightarrow Y$ auf Basis der Vier-Felder-Tafel. Die Gleichung 9 und die Vier-Felder-Tafel kann wie folgt interpretiert werden: Je stärker die Hauptdiagonale in der Vier-Felder-Tafel dominiert, desto kleiner wird die Fehlerwahrscheinlichkeit $p_{F\alpha}$, d. h. desto wahrscheinlicher ist die Konklusion Y von der Prämisse X abhängig.

Tabelle 11: Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit $p_{F\alpha}$ nach FISHER für eine Assoziationsregel $X \Rightarrow Y$.

Vier-Felder-Tafel			Gleichungen nach [248; 250]	Nr.
	X	\bar{X}	Σ	$p_{F\alpha} = \sum_{i=0}^{\min(b,c)} \frac{(a+b)!(c+d)!(a+c)!(b+d)!}{N!(a+i)!(b-i)!(c-i)!(d+i)!}$ $= \sum_{i=0}^{\min(b,c)} \frac{\binom{a+c}{a+i} \binom{b+d}{d+i}}{\binom{N}{a+b}}$ (9)
Y	$h(X \cup Y) = a$	$h(\bar{X} \cup Y) = b$	$h(Y)$	
\bar{Y}	$h(X \cup \bar{Y}) = c$	$h(\bar{X} \cup \bar{Y}) = d$	$h(\bar{Y})$	
Σ	$h(X)$	$h(\bar{X})$	$N = a + b + c + d$	

$h(E)$ ist als die absolute Häufigkeit eines Ereignisses E definiert [245].
 Zudem gilt: $\bar{X} = N \setminus X$ und $\bar{Y} = N \setminus Y$.

Der Exakte Test nach FISHER wird wiederholt, um die Wahrscheinlichkeit $p_{F\alpha}$ jeder Assoziationsregel zu ermitteln, um diese jeweils dem Signifikanzniveau α_{sig} gegenüber zu stellen. Da sich die Exakten Tests nach FISHER für jede einzelne Assoziationsregel auf den gleichen Trainingsdatensatz beziehen, muss das „multiple Testproblem“²⁹ berücksichtigt werden. Das multiple Testproblem besagt, dass sich die Wahrscheinlichkeit einen Fehler 1. Art zu begehen, mit jedem durchgeführten Signifikanztest k an der gleichen Stichprobe (Trainingsdatensatz) auf $1 - (1 - \alpha_{sig})^k$ erhöht [251; 252]. Nach MCLAUGHLIN & SAINANI [253] gehört die BONFERRONI-Korrektur und das HOLM-Verfahren [254] zu den gängigen Korrekturverfahren, die dem multiplen Testproblem entgegenwirken. Da die BONFERRONI-Korrektur von verschiedenen Autoren [248; 255; 252] als pessimistisch oder konservativ beschrieben wird, kommt im Rahmen der Konfigurationsanalyse das HOLM-Verfahren zum Einsatz.

²⁹ Das multiple Testproblem ist auch unter α -Fehlerkumulierung bekannt, engl. multiple comparisons problem. Es muss berücksichtigt werden, wenn mehrere statistische Tests an einer identischen Stichprobe durchgeführt werden.

Das Verfahren nach HOLM [254] ist ein sequentielles Verfahren und basiert auf der BONFERRONI-Korrektur

$$p_{F\alpha} \leq \alpha_{\text{sig,korrigiert}} = \frac{\alpha_{\text{sig}}}{k}, \quad (10)$$

k - Anzahl der durchgeführten Signifikanztests,
d. h. die Anzahl der Assoziationsregeln

wobei zusätzlich nach jedem Signifikanztest der Freiheitsgrad reduziert wird. Hierzu werden alle Assoziationsregeln und ihre Fehlerwahrscheinlichkeiten $p_{F\alpha,i}$ nach ihrer Größe aufsteigend sortiert, sodass gilt: $p_{F\alpha,1} \leq p_{F\alpha,2} \leq \dots \leq p_{F\alpha,k}$. Die korrigierten Signifikanzniveaus $\alpha_{\text{sig,korrigiert},i}$ der einzelnen Assoziationsregeln i nach dem HOLM-Verfahren sind definiert als [254; 252]:

$$p_{F\alpha,i} \leq \alpha_{\text{sig,korrigiert},i} = \frac{\alpha_{\text{sig}}}{k - i + 1} \quad \text{für } i = 1, \dots, k \quad (11)$$

Häufiger werden alternativ anstatt der Signifikanzniveaus $\alpha_{\text{sig,korrigiert},i}$ die Fehlerwahrscheinlichkeitswerte $p_{F\alpha,i}$ korrigiert, da hierdurch die einzelnen Entscheidungen zwischen Nullhypothese H_0 und Alternativhypothese H_1 auf Basis des gewohnten Signifikanzniveaus α_{sig} getroffen werden können [252]:

$$p_{F\alpha,i} \cdot (k - i + 1) = p_{F\alpha,\text{korrigiert},i} \leq \alpha_{\text{sig}} \quad \text{für } i = 1, \dots, k \quad (12)$$

Das HOLM-Verfahren kann so interpretiert werden, dass nach jedem Signifikanztest i das Signifikanzniveau α_{sig} oder alternativ der Fehlerwahrscheinlichkeitswert $p_{F\alpha}$ korrigiert wird. In Gleichung 11 wird hierzu nach jedem Signifikanztest i das Signifikanzniveau α_{sig} von $\alpha_{\text{sig,korrigiert},1} = \alpha_{\text{sig}}/k$ (sehr streng gegenüber dem kleinsten $p_{F\alpha,1}$) bis auf $\alpha_{\text{sig,korrigiert},k} = \alpha_{\text{sig}}$ (weniger streng gegenüber dem größten $p_{F\alpha,k}$) erhöht. Äquivalent dazu wird in Gleichung 12 nach jedem Signifikanztest i der Fehlerwahrscheinlichkeitswert $p_{F\alpha}$ korrigiert, wobei der kleinste $p_{F\alpha,1}$ die stärkste Korrektur und der größte $p_{F\alpha,k}$ keine Korrektur erfährt.

In der Konfigurationsanalyse gilt demnach eine Assoziationsregel i als signifikant, wenn gilt: $p_{F\alpha,\text{korrigiert},i} \leq \alpha_{\text{sig}} = 5,0\%$. In diesem Fall kann die Nullhypothese H_0 (Assoziationsregel war ein Zufall in der Stichprobe) zugunsten der Alternativhypothese H_1 (die Assoziationsregel repräsentiert die Grundgesamtheit) abgelehnt werden. Diese Assoziationsregeln beschreiben einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Produktkonfiguration und der Aussage zur Tönhaltigkeit.

7.2.2.4 Optional: Reduzierung weiterer Assoziationsregeln

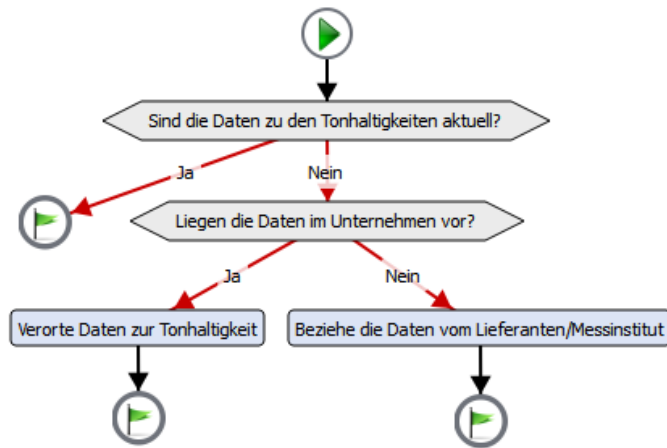
Ist nach dem Signifikanztest die Anzahl der Assoziationsregeln noch sehr groß, können im letzten Schritt weitere Assoziationsregeln mit dem Redundanz-Kriterium in Gleichung 8 entfernt werden, wobei als Score-Kennzahl der Support-Wert genutzt wird.

7.3 Wissen zum Vorgehen bei der Konfigurationsanalyse

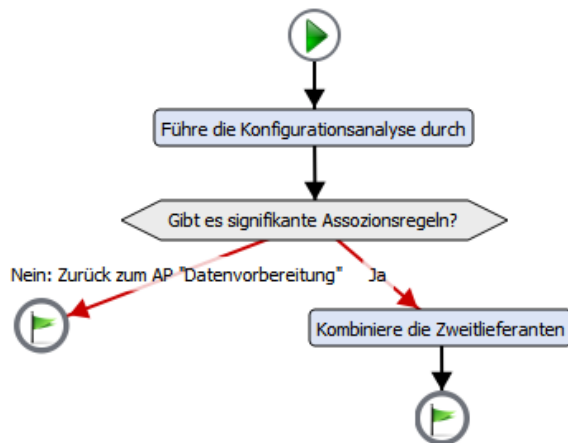
Nachdem der Algorithmus zur Konfigurationsanalyse im vorangegangenen Abschnitt entwickelt und implementiert wurde, wird in diesem Abschnitt das Wissen für die Produktentwickler zur Nutzung des Analysewerkzeugs im Form einer projektbezogenen Wissensbasis erhoben und bereitgestellt. Wie in Abschnitt 7.1 dargestellt, wird in diesem Anwendungsbeispiel die Konfigurationsanalyse eingesetzt, um die Herstellerabhängigkeiten und Wechselwirkungen der Komponenten einer Windenergieanlage im Hinblick auf das akustische Produktverhalten zu identifizieren. Hierdurch wird mit der Konfigurationsanalyse auf die intensivere Wiederverwendung von produktbeschreibenden Daten aus der vorangegangenen Produktgeneration fokussiert. Ziel der Konfigurationsanalyse in diesem Anwendungsbeispiel ist, Herstellerabhängigkeiten ohne Tonhaltigkeiten zu ermitteln oder die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten auf die akustischen Produkteigenschaften der Windenergieanlagen zu identifizieren. Die Erkenntnisse können bspw. bei der Spezifikation der Komponenten oder bei der Auswahl der Zweitlieferanten im Produktentwicklungsprozess der aktuellen Produktgeneration genutzt werden.

Das Vorgehen zur Konfigurationsanalyse besteht aus zwei Arbeitspaketen: die „Datenvorbereitung“ und die „Konfigurationsanalyse“ (siehe Bild 60). Die beiden Arbeitspakete können, je nach Rollenverteilung im Unternehmen, auch von unterschiedlichen Personen durchgeführt werden. Bevor die Konfigurationsanalyse ausgeführt werden kann, müssen die Messungen zu den Tonhaltigkeiten aus der vorangegangenen Produktgeneration entweder aktualisiert oder initial akquiriert werden (siehe Bild 60a). Sofern die Konfigurationsanalyse und der Einsatz des Assistenzsystems ALARM bereits als fester Bestandteil in die Entwicklungsprozesse des Unternehmens für schwer abzusichernde Produkteigenschaften integriert wurde, kann die Datenvorbereitung auch kontinuierlich bei jeder Inbetriebnahme einer Windenergieanlage erfolgen. Generell muss differenziert werden, ob die Daten im Unternehmen bereits vorliegen oder ob diese von Lieferanten oder Messinstituten bezogen werden müssen. Beide Aktivitäten sind situativ

im ersten Arbeitspaket beschrieben. Sofern die Daten vorliegen, können diese mithilfe des Importassistenten aus einem ASCII-Austauschdokument und der Datenquelle „Tonality | Measurement“ in das Assistenzsystem ALARM überführt und anschließend mithilfe des Synthesewerkzeugs im Produktdatenmodell verortet werden. Dieser indirekte Schritt ist im Fall der



(a) Arbeitspaket „Datenvorbereitung“



(b) Arbeitspaket „Konfigurationsanalyse“

Bild 60: Die projektbezogene Wissensbasis „Auswahl der Zweitlieferanten“ mit zwei Arbeitspaketen als Einsatzszenario für die Konfigurationsanalyse.

Konfigurationsanalyse notwendig, da hierdurch die Aussage zur Tonhaltigkeit mit der Produktstruktur verknüpft wird.

Im zweiten Arbeitspaket „Konfigurationsanalyse“ wird das Vorgehen bei der Konfigurationsanalyse sowie die Beschreibung zur Kontextualisierung der Muster abgebildet (siehe Bild 6ob). Die erste Aktivität beschreibt die Tätigkeiten zur Durchführung der Konfigurationsanalyse. Hierzu werden die produktbeschreibenden Daten aus dem Produktdatenmodell bezogen, wobei die Produktstruktur beim Herunterladen an die einzelnen Datentupel mit der Aussage zur Tonhaltigkeit angehängt werden. In der Beschreibung zur Aktivität sind auch ausführlichere Inhalte zu den Grundlagen der Assoziationsanalyse enthalten, sodass der Produktentwickler die Score-Kennzahlen und die Ergebnisdarstellung interpretieren kann. Anschließend kann das Analysewerkzeug mit der eigentlichen Konfigurationsanalyse ausgeführt werden. Auf das Analysewerkzeug und die Durchführung wird im nächsten Abschnitt (Abschnitt 7.4) näher eingegangen. Sofern signifikante Assoziationsregeln ermittelt werden können, muss das Muster durch den Produktentwickler in der letzten Aktivität kontextualisiert werden. In diesem Anwendungsbeispiel bedeutet das, dass die signifikanten Assoziationsregeln, die auf tonhaltige oder nicht-tonhaltige Windenergieanlagen in der vorangegangenen Produktgeneration hinweisen, durch den Produktentwickler genauer betrachtet werden sollten. Hierdurch wird datengetrieben eine Entscheidungsgrundlage für den Produktentwickler geschaffen, womit er die schwer abzusichernden Produkteigenschaften bereits in der Produktentwicklung positiv beeinflussen kann. Für den Fall, dass keine signifikanten Assoziationsregeln identifiziert werden können, müssen weitere Daten zur Verfügung gestellt werden.

7.4 Einsatz der Konfigurationsanalyse als Analysewerkzeug

Nachdem das Vorgehen zur Konfigurationsanalyse im vorangegangenen Abschnitt formalisiert und den Produktentwicklern bereitgestellt wurde, kann diese projektbezogene Wissensbasis von den Produktentwicklern ausgeführt werden. Im Arbeitspaket „Konfigurationsanalyse“ wird hierzu in der Aktivität „Führe die Konfigurationsanalyse durch“ das Analysewerkzeug zur Konfigurationsanalyse eingesetzt, das den Algorithmus zur Konfigurationsanalyse aus Abschnitt 7.2 formal abbildet. Zuerst werden in dieser Aktivität die verfügbaren Daten aus der vorangegangenen Produktgeneration zur Tonhaltigkeit aus dem Produktdatenmodell heruntergeladen. Diese sind aus

Gründen der Geheimhaltung anonymisiert in Tabelle 14 im Anhang auf Seite 176 dargestellt. Die Anonymisierung hat keinen Einfluss auf die Analyse selbst, da hier nur eine einheitliche Umbenennung der Firmennamen durchgeführt wurde.

In Bild 61 ist die grafische Benutzeroberfläche (GUI) des Analysewerkzeugs der Konfigurationsanalyse abgebildet. Der Produktentwickler kann in ① die grundlegenden Einstellungen zum Apriori-Algorithmus und dem Signifikanztest vornehmen. Hierzu zählt der minimale absolute Support-Wert, der minimale Confidence-Wert und das Signifikanzniveau. Der absolute Support-Wert stellt die Anzahl der Einträge im Datensatz dar, die durch eine Assoziationsregel minimal abgedeckt werden muss. Ein absoluter Support-Wert von 5 entspricht in diesem Anwendungsbeispiel einem Support-Wert von 3,18% ($= 5/(N = 157)$). Der Vorteil des absoluten Support-Wertes liegt darin, dass die Produktentwickler für dieses Maß leichter ein Gefühl entwickeln. Der minimale Confidence-Wert liegt in diesem Anwendungsbeispiel bei 80% und das Signifikanzniveau α_{sig} bei 5,0%. In ② kann ausgewählt werden, ob der optionale, vierte Schritt zur erneuten Support-basierten

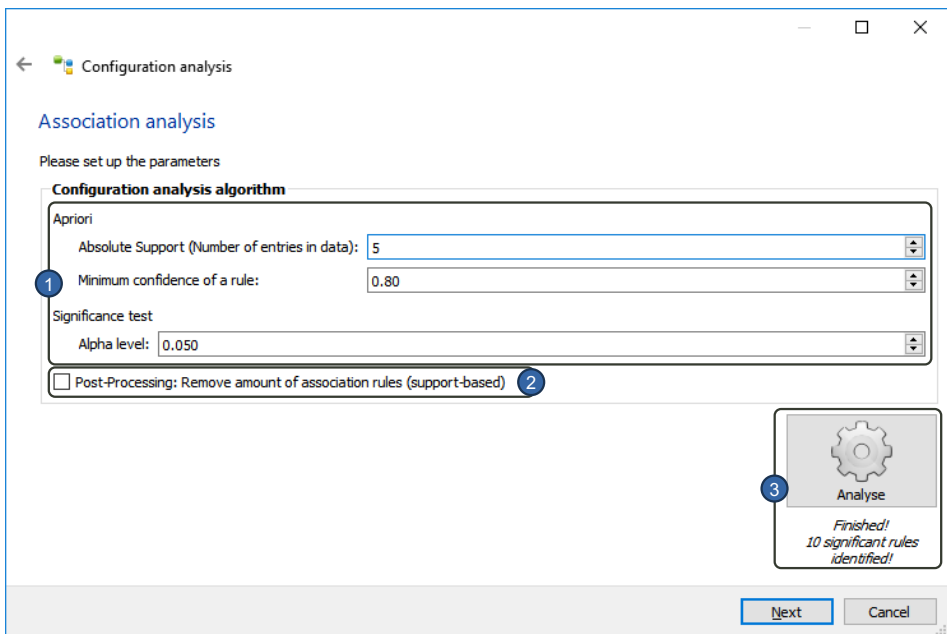


Bild 61: Darstellung der möglichen Einstellungen bei der Konfigurationsanalyse im Analysewerkzeug des Assistenzsystems ALARM.

Reduzierung durchgeführt werden soll. Diese Option kann situativ aktiviert werden, wenn nach dem ersten Durchlauf zu viele signifikante Assoziationsregeln identifiziert werden. Durch die Schaltfläche in ③ wird die Konfigurationsanalyse ausgeführt. Sobald der Algorithmus beendet wurde, wird die Anzahl der signifikanten Assoziationsregeln angezeigt.

In Bild 62 ist der Dialog mit der Ergebnisdarstellung abgebildet. Hierbei werden dem Produktentwickler in ① die signifikanten Assoziationsregeln als Tabelle dargestellt. Die Tabelle kann nach den verschiedenen Spalten sortiert oder in ② mithilfe von Schlüsselwörtern gefiltert werden (z. B. Hersteller in der Prämisse X). Neben den klassischen Score-Kennzahlen aus der Assoziationsregel ist zusätzlich der absolute Support-Wert an der rechten Seite der Tabelle angefügt. In ③ kann die Tabelle entweder exportiert oder in die Zwischenablage kopiert werden, um die Assoziationsregeln in die „Ergebnisdiskussion“ der Aktivität zu überführen. Die Ursachen und Auswirkungen der Assoziationsregeln können in der Ergebnisdiskussion anschließend durch den Produktentwickler kontextualisiert werden.

Configuration analysis

Analysis results

Evaluate and export analysis results

ID	X	\hat{Y}	support	confidence	lift	absSupport
3 186	{Rotorblatt=I3,Rotornabe=L1}	{TZ=no}	0.185	0.967	1.445	29
4 230	{Getriebe=C1,Spinner=N1}	{TZ=no}	0.363	0.838	1.253	57
7 1659	{Getriebe=C1,Rotornabe=L1,Prüfinstitut=R1}	{TZ=no}	0.217	0.944	1.412	34
8 1663	{Getriebe=C1,Rotornabe=L1,Spinner=N1}	{TZ=no}	0.287	0.918	1.373	45
9 1666	{Getriebe=C1,Gondelverkl.=F1,Rotornabe=L1}	{TZ=no}	0.274	0.915	1.368	43
0 5	{Getriebe=C5}	{TZ=yes}	0.089	0.824	2.486	14
1 68	{Getriebe=C5,Turm=O3}	{TZ=yes}	0.076	0.857	2.588	12
2 75	{Getriebe=C5,Umrichter=P1}	{TZ=yes}	0.089	0.875	2.642	14
5 522	{Getriebe=C5,Rotornabe=L1,Umrichter=P1}	{TZ=yes}	0.070	0.917	2.768	11
6 1545	{NH=A1,Gondelverkl.=F3,Maschinenträger=H4}	{TZ=yes}	0.070	0.917	2.768	11

Filter results

Export

Finish Cancel

Bild 62: Darstellung der Ergebnisse einer Konfigurationsanalyse im Analysewerkzeug des Assistenzsystems ALARM (Herstellernamen anonymisiert, sortiert nach der Konklusion Y).

7.5 Kontextualisierung der Analyseergebnisse

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Assoziationsregeln kontextualisiert und mögliche Schlussfolgerungen gezogen. Zu Beginn werden hierzu Messergebnisse zu den schallabstrahlenden Flächen eines Windenergieanlagen-Prototyps der aktuellen Produktgeneration im Feldversuch vorgestellt. Die Daten zum Anwendungsbeispiel in Abschnitt A.2 (S. 176), die in der Konfigurationsanalyse eingesetzt wurden, stammen aus der vorangegangenen Produktgeneration des Prototypen. Hierdurch soll die Aussagekraft der Assoziationsregeln für die aktuelle Produktgeneration überprüft werden. Diese Gegenüberstellung repräsentiert das fokussierte Szenario dieser Arbeit (siehe Abschnitt 3.2, S. 68).

Wie in Abschnitt 7.1 dargestellt, ist es für die Produktentwickler bei der Entwicklung lärmreduzierter Produkte nach der Norm DIN EN ISO 11688-1:2009-11 [202] und der Richtlinien-Reihe VDI 3720-1:2014-06 [201] von Interesse, die Komponenten nach Schallquellen, Schallübertragungswege und schallabstrahlenden Flächen zu charakterisieren. Mechanisch bedingt entstehen die tonhaltigen Geräusche in verschiedenen Komponenten (z. B. Getriebe). Die angeregten Frequenzen werden über weitere Komponenten in der Windenergieanlage übertragen und schließlich durch Schallabstrahlung am Schallemissionsmesspunkt nach der Richtlinie IEC 61400-11 (2.1):2006-11 [207] bewertet. Aufgrund der Diversität der Zulieferer bei einer serienproduzierten Windenergieanlage, kann eine günstige Kombination der Eigenschaften der einzelnen Komponenten dazu führen, dass die angeregten Frequenzen (Tonhaltigkeiten) den Schallemissionsmesspunkt nicht erreichen. Umgekehrt kann eine ungünstige Kombination dazu führen, dass die Tonhaltigkeiten den Schallemissionsmesspunkt erreichen und zu einem Strafzuschlag führen. Die Herstellerabhängigkeiten und Wechselwirkungen werden mithilfe der Konfigurationsanalyse untersucht und sind im Fall einer erfolgreichen Ermittlung von signifikanten Assoziationsregeln quantifizierbar.

Zur Evaluierung der ermittelten Assoziationsregeln und zur Untersuchung der generellen Validität der Konfigurationsanalyse werden zunächst die schallabstrahlenden Flächen einer neueren Generation der Windenergieanlagen charakterisiert. Hierbei ist eine akustische Kamera am Schallemissionsmesspunkt nach der Richtlinie IEC 61400-11 (2.1):2006-11 [207] positioniert. Die Messungen mit der akustischen Kamera zeigen, dass vor allem das obere Segment des Turms (Bild 63a) und die Naben-nahen Bereiche des Rotorblattes (Bild 63b) als schallabstrahlende Flächen („Lautsprecher“) im

Frequenzbereich der Tonhaltigkeiten fungieren [P4]. VANHOLLEBEKE [256] benennt ebenfalls den Turm und die Rotorflächen als effiziente schallabstrahlende Flächen bei einer Windenergieanlage. Darüber hinaus wird die Gondel als relevanter, aber schwacher Beitragsleister bei der Schallabstrahlung genannt.



(a) Turm

(b) Rotorblatt

Bild 63: Aufnahmen einer akustischen Kamera zur qualitativen Bestimmung des Schall-emissionsortes der Tonhaltigkeiten bei einer Windenergieanlage (Dynamikbereich: 3 dB, Frequenzbereich: 100–200 Hz) – zur Gegenüberstellung entnommen aus [P4].

Ursächlich ist als Schallquelle für die mechanisch bedingten Tonhaltigkeiten vor allem das Getriebe bekannt. Durch die Messung mit der akustischen Kamera wurden als schallabstrahlende Flächen der Turm und die Rotorblätter identifiziert. Die Messungen zu den schallabstrahlenden Flächen der aktuellen Produktgeneration in Bild 63 stellt eine Stichprobe mit einer Messung dar und ist aus diesem Grund zumindest als Indiz anzuerkennen. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der durchgeführten Konfigurationsanalyse dargestellt. Hierbei wurden zehn signifikante Assoziationsregeln auf Basis der produktbeschreibenden Daten aus der vorangegangenen Produktgeneration ermittelt.

Tabelle 12: Signifikante Assoziationsregeln im Datensatz der Tabelle 14, S. 176 (Herstellernamen anonymisiert, sortiert nach der Konklusion Y).

Nr. #	Assoziationsregel $X \Rightarrow Y$	Support-Wert in %	Confidence-Wert in %	Lift-Wert	AbsSupport-Wert (von 157)
186	{Rotorblatt=I3,Rotornabe=L1} \Rightarrow {TZ=no}	18,5	96,7	1,445	29
230	{Getriebe=C1,Spinner=N1} \Rightarrow {TZ=no}	36,3	83,8	1,253	57
1659	{Getriebe=C1,Rotornabe=L1,Prüfinstitut=R1} \Rightarrow {TZ=no}	21,7	94,4	1,412	34
1663	{Getriebe=C1,Rotornabe=L1,Spinner=N1} \Rightarrow {TZ=no}	28,7	91,8	1,373	45
1666	{Getriebe=C1,Gondelverkl.=F1,Rotornabe=L1} \Rightarrow {TZ=no}	27,4	91,5	1,368	43
5	{Getriebe=C5} \Rightarrow {TZ=yes}	8,9	82,4	2,486	14
68	{Getriebe=C5,Turm=O3} \Rightarrow {TZ=yes}	7,6	85,7	2,588	12
75	{Getriebe=C5,Umrichter=P1} \Rightarrow {TZ=yes}	8,9	87,5	2,642	14
522	{Getriebe=C5,Rotornabe=L1,Umrichter=P1} \Rightarrow {TZ=yes}	7,0	91,7	2,768	11
1545	{NH=A1,Gondelverkl.=F3,Maschinenträger=H4} \Rightarrow {TZ=yes}	7,0	91,7	2,768	11

Auf Basis der signifikanten Assoziationsregeln in Tabelle 12 können Hypothesen zur Wechselwirkung der Komponenten und hierzu Schlussfolgerungen formuliert werden, auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird.

Getriebe des Herstellers C5

Eine sehr eindeutige Assoziation zeigt die Regel #5, das sie nur eine Bedingung in der Prämisse aufweist. Die Regel #5 beschreibt, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 82,4 % eine Tonhaltigkeit gemessen wurde, sofern die Getriebe des Herstellers C5 in einer Windenergieanlage montiert sind. Darüber hinaus implizieren die Regeln #68, #75 und #522 mit Wahrscheinlichkeiten von 85,7 %, 87,5 % und 91,7 %, dass durch die Wechselwirkung der Getriebe des Herstellers C5 mit anderen Komponenten eine Tonhaltigkeit begünstigt wird. Hierbei sind insbesondere die schallübertragenden Rotornaben (Regel #522: Hersteller L1) und die schallabstrahlenden Türme (Regel #68: Hersteller O3) signifikant.

Getriebe des Herstellers C₁

Im Gegensatz zu den Getrieben des Herstellers C₅, zeigen die Getriebe des Herstellers C₁ in den Regeln #230, #1659, #1663 und #1666 mit den Wahrscheinlichkeiten von 83,8 %, 91,8 %, 94,4 % und 91,5 % keine Tonhaltigkeit am Schallemissionsmesspunkt. In diesem Fall gibt es keine signifikante Assoziationsregel, in welcher die Getriebe des Herstellers C₁ alleine stehen. Dies impliziert eine positive Wechselwirkung mit anderen Komponenten der Windenergieanlage, die im Schallübertragungsweg zu den schallabstrahlenden Komponenten Turm und Rotorblatt liegen. Hierzu gehören die Spinner der Fa. N₁ (Regel #230 und #1663) und die Rotornaben der Fa. L₁ (Regel #1659, #1663 und #1666). Hierbei kann von einer positiven Beeinflussung des Schallübertragungsweges der Komponenten der Hersteller L₁ und N₁ im Betrieb mit dem Getriebe des Herstellers C₁ ausgegangen werden.

Rotorblätter des Herstellers I₃ und Rotornaben des Herstellers L₁

Die Kombination aus den Rotorblättern der Fa. I₃ und der Rotornaben der Fa. L₁ in der Regel #186 zeigt eine sehr eindeutige Assoziation, bei welcher mit einer Wahrscheinlichkeit von 96,7% keine Tonhaltigkeit gemessen wurde. Da das Rotorblatt als eine der schallabstrahlenden Flächen verstanden wird, impliziert die Regel #186 eine positive Beeinflussung des Schallabstrahlverhaltens. Es kann hierbei von einer dämpfenden oder schallisolierenden Wirkung durch die Rotorblätter der Fa. I₃ in Kombination mit den Rotornaben der Fa. L₁ ausgegangen werden.

Komponenten der Gondeln

Die letzte signifikante Assoziationsregel #1545 beschreibt eine Kombination aus der Nabenhöhe A₁, die Gondelverkleidungen der Fa. F₃ und die Maschinenträger der Fa. H₄. Hierbei wird für diese Konfiguration mit einer Wahrscheinlichkeit von 91,7 % eine tonhaltige Schallemissionsmessung erwartet. Da die Gondel als schallabstrahlende Fläche verstanden wird, impliziert die Regel #1545, dass die Gondelverkleidungen der Fa. F₃ in Kombination mit dem Maschinenträger der Fa. H₄ für Windenergieanlagen mit der Nabenhöhe A₁ einen idealen Radiator sämtlicher angeregter tonhaltiger Frequenzen darstellt.

7.6 Diskussion zur Konfigurationsanalyse

Die Hypothesen und Schlussfolgerungen im vorangegangenen Abschnitt basieren auf den ermittelten Assoziationsregeln, die zur Plausibilisierung mit den bekannten Schallquellen und abstrahlenden Flächen einer Windenergieanlage abgeglichen wurden. Die signifikanten Assoziationsregeln zeigen hierbei neue Zusammenhänge im Trainingsdatensatz. Die Zusammenhänge stellen Regelmäßigkeiten und Muster im Trainingsdatensatz dar und dienen somit als Anhaltspunkt und Ausgangspunkt für weiterführende Überlegungen und Analysen, z. B. einer weiteren Konfigurationsanalyse mit einer anderen Zielgröße. Auf dieser Basis können die Produktentwickler konkrete Maßnahmen ableiten, um die tatsächlichen Produkteigenschaften der aktuellen Produktgeneration positiv zu beeinflussen. Durch die Konfigurationsanalyse erhalten die Produktentwickler eine Möglichkeit, signifikante Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen der Produktkonfiguration und einer Produkteigenschaft zu analysieren. Die Ergebnisse dieser datengetriebenen Analyse zeigen, dass Erkenntnisse für die neue Produktgeneration auf Basis der Daten der vorangegangenen Produktgeneration abgeleitet werden können. Dies ist insbesondere bei den schwierig abzusichernden Produkteigenschaften, wie z. B. die akustischen Produkteigenschaften, von großer Relevanz (siehe Abschnitt 1.1). Das Assistenzsystem ALARM wirkt hierdurch in seiner Gesamtheit als ergänzendes Werkzeug für die Produktentwickler, d. h. als Unterstützung für die datengetriebene Produktentwicklung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept für ein Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung und deren Umsetzung vorgestellt. Das Assistenzsystem unterstützt die Produktentwickler bei der Durchführung von datengetriebenen Analysen mithilfe von maschinellen Lernmethoden und deren Integration in bestehende Produktentwicklungsprozesse. Ziel der datengetriebenen Analysen sind insbesondere die intensivere Wiederverwendung von produktbeschreibenden Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen, um die tatsächlichen Produkteigenschaften der aktuellen Produktgeneration frühzeitig besser abzusichern.

Die Motivation zur Entwicklung des Assistenzsystems liegt in der zunehmenden Digitalisierung der Produktentwicklung. Im gleichen Zug erschwert die stetig steigende Produktkomplexität die Absicherung der Produkteigenschaften. Die vielen etablierten Methoden und Werkzeuge der virtuellen Eigenschaftsabsicherung kommen hierbei an ihre Grenzen, d. h. es gibt zum Teil signifikante Diskrepanzen zwischen den erwarteten und den tatsächlichen Produkteigenschaften (siehe Abschnitt 1.1). In den vergangenen Jahren haben in diesem Kontext Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens ihren Weg in die Produktentwicklung gefunden. Die maschinellen Lernmethoden ermöglichen die Identifikation von Zusammenhängen und Tendenzen in großen Datensätzen. Produktbeschreibenden Daten stehen insbesondere aus den vorangegangenen Produktgenerationen in großer Menge zur Verfügung, weshalb diese in Kombination mit den maschinellen Lernmethoden bei der Absicherung von komplexen Produkteigenschaften der aktuellen Produktgeneration unterstützen können. Allerdings fehlt den Produktentwicklern zum einen die Methodenkompetenz zur Entwicklung und Durchführung von datengetriebenen Analysen mittels maschineller Lernmethoden. Zum anderen ist Wissen zur Datenaufbereitung und zur Kontextualisierung der identifizierten Muster notwendig.

Die wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit ist deshalb ein Konzept zur intensiveren Nutzung von produktbeschreibenden Daten aus vorangegangenen Produktgenerationen, um insbesondere die Lücke zwischen erwarteten und tatsächlichen Eigenschaften von Serienprodukten zu schließen. Ein Fokus liegt vor allem auf der Befähigung der Produktentwickler, sodass selbstständig datengetriebene Analysen in der Produktentwicklung durchgeführt werden können. Zur Annäherung an die wissenschaftlichen Zielsetzung

sind drei Forschungsfragen formuliert und in den nachfolgenden Kapiteln beantwortet worden (siehe Kapitel 3):

1. *Wie müssen produktbeschreibende Daten strukturiert und verwaltet werden, sodass sie in maschinelle Lernmethoden genutzt werden können?*
2. *Wie kann Wissen zum maschinellen Lernen im Kontext der datengetriebenen Produktentwicklung formalisiert werden, sodass die Produktentwickler datengetriebene Analysen durchführen können?*
3. *Wie muss ein wissensbasiertes Assistenzsystem konzipiert werden, um die Produktentwickler bei der datengetriebenen Produktentwicklung im Unternehmen zu unterstützen?*

Das Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung in Kapitel 5 baut auf dem Stand der Technik auf. Hierbei stehen zu Beginn die produktbeschreibenden Daten als Ressource für maschinelle Lernmethoden im Fokus. Produktbeschreibende Daten werden im industriellen Umfeld hauptsächlich dokumentenzentriert in PDM-Systemen verwaltet. Diese Art der Repräsentation eignet sich für einen direkten Einsatz in maschinellen Lernmethoden nicht. Hierzu ist die Repräsentation und Integration auf der Inhaltsebene erforderlich, weshalb das ML-Datenmodell entwickelt wurde. Das ML-Datenmodell ermöglicht die Formalisierung von produktbeschreibenden Daten auf ihrer Inhaltsebene. Zur Strukturierung und Integration der produktbeschreibenden Daten auf ihrer Inhaltsebene wurde das KlIn-Produktmodell entwickelt. Das Klassen-Instanzen-Produktmodell baut hierbei auf dem integrierten Produktmodell (STEP-Standard) auf und erweitert dieses um Produktklassen und -instanzen. Durch die Unterscheidung zwischen Klassen (gilt für mehrere Instanzen) und Instanzen (gilt für eine Instanz) kann der Gültigkeitsbereich für die produktbeschreibenden Daten ausgedrückt werden. Das KlIn-Produktmodell erfüllt somit die Anforderung der maschinellen Lernmethoden an die Struktur der Daten. Neben den Aspekten zur Strukturierung und Integration der produktbeschreibenden Daten ist bei einem Assistenzsystem vor allem auch die Standardisierung und der Transfer von Wissen von Bedeutung. Im Fall der maschinellen Lernmethoden stehen die Produktentwickler vor der Herausforderung, diese Technologie als Werkzeug richtig einzusetzen. Hierbei muss den Produktentwicklern vor allem Wissen zur Integration der datengetriebenen Ansätze in den Produktentwicklungsprozess sowie Wissen zum Umgang mit den maschinellen Lernmethoden bereitgestellt werden. Die entwickelten projektbezogenen Wissensbasen begegnen dieser Herausforderung. Neben der

Akquisition und Bereitstellung des Wissens wurde auch der Wissenstransfer zwischen den Experten in der Domäne der Produktentwicklung und den Produktentwicklern sowie der Wissensschutz im industriellen Umfeld in das Konzept integriert. Die einzelnen Teilaspekte werden in Kapitel 5 abschließend in ein Gesamtkonzept überführt, sodass ein operatives Zusammenwirken und hierdurch eine informationstechnische Umsetzung zur Demonstration und Validierung ermöglicht wird.

Die methodische Beschreibung des Konzeptes wird in Kapitel 6 informationstechnisch umgesetzt. Das Gesamtkonzept wird hierzu in eine Client- und Serverarchitektur überführt, wodurch der Betrieb und Austausch des Assistenzsystems an verschiedenen Standorten ermöglicht wird. Als Clientanwendung ist das wissensbasierte Assistenzsystem ALARM vorgesehen und die Serverseite ist als zentrale Instanz vorgesehen. Der zentrale Server dient zum Transfer der projektbezogenen Wissensbasen und zum Austausch der produktbeschreibenden Daten. Hierzu wird das Konzept des Knowledge-Produktmodell als Produktdatenmodell in Form einer zentralen, relationalen Datenbank umgesetzt. Ebenso werden die projektbezogenen Wissensbasen informationstechnisch als dateibasierte, relationale Datenbanken abgebildet. Die restlichen Komponenten des Gesamtkonzeptes sind als graphische Benutzeroberfläche (GUI) gestaltet, sodass die Produktentwickler und die Experten in der Domäne der Produktentwicklung das Assistenzsystem ALARM als anwendungsfreundliches Softwarewerkzeug nutzen können. Durch die informationstechnische Umsetzung des Konzeptes aus Kapitel 5 kann der gesamte Prozess zur datengetriebenen Produktentwicklung von den Produktentwicklern selbst durchgeführt werden. Dieser beginnt bei der Datenvorbereitung und endet bei der Kontextualisierung der identifizierten Muster. Hierdurch wird den Produktentwicklern ein Werkzeug zur Unterstützung der Eigenschaftsabsicherung durch datengetriebene Analysen zugänglich gemacht.

Mithilfe des prototypisch umgesetzten Assistenzsystems ALARM und anhand eines Anwendungsbeispiels wird in Kapitel 7 das Konzept zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung validiert und das Potential der datengetriebenen Analysen im Kontext der Eigenschaftsabsicherung offengelegt. Die Gefahr von Tonhaltigkeiten bei Windenergieanlagen bietet als Anwendungsbeispiel im Kontext der Aufgabenstellung dieser Arbeit eine geeignete Ausgangssituation. Hierzu wird ein Datenanalysealgorithmus entwickelt, mit welchem die Produktkonfigurationen der vorangegangenen Produktgenerationen datengetrieben untersucht werden können. Die Gegenüberstellung der Zusammenhänge mit den Messwerten eines Prototyps

der aktuellen Produktgeneration zeigt, dass die Produktentwicklung in den frühen Phasen „Produktplanung, Aufgabenstellung“ oder „Entwicklung, Konstruktion“ des Produktlebenszyklus aus den produktbeschreibenden Daten der vorangegangenen Produktgenerationen lernen kann, um die komplexen Produkteigenschaften besser abzusichern. Der Einsatz des Assistenzsystems ALARM befähigt die Produktentwickler, datengetriebene Analysen mithilfe der maschinellen Lernmethoden durchzuführen und die erhobenen Muster zu kontextualisieren. Hierdurch erhält das Assistenzsystem ALARM den Stellenwert eines ergänzenden Werkzeugs, mit welchem ein neuer datenbasierter „Blickwinkel“ auf das Produkt ermöglicht wird.

Generell können weitere datengetriebene Lösungsansätze entwickelt und in das Assistenzsystem ALARM integriert werden. Hier finden in der Arbeitsgruppe „Digital Engineering“ im Moment weitere Forschungsaktivitäten am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg statt [P11]. Im Hinblick auf die Integration und Identifikation von Potentialen für den Einsatz von maschinellen Lernmethoden in der Produktentwicklung besteht ein hohes Forschungspotential. Der Bedarf seitens der Produktentwicklung ist groß, allerdings ist der Einsatz nicht bei jeder Problemstellung sinnvoll. Im Rahmen des Konzeptes zum Assistenzsystem für die datengetriebene Produktentwicklung werden mögliche Anwendungsfälle und Einsatzgebiete durch einen Austausch zwischen Experten aus der Produktentwicklung und dem maschinellen Lernen identifiziert (siehe Abschnitt 5.3). Hier ist eine Methode zur Quantifizierung des Potentials von maschinellen Lernmethoden in der Produktentwicklung erforderlich [257; P13].

Im Themenbereich der schwachen künstlichen Intelligenz kam in den letzten Jahren das „Deep Learning“ auf. In aktuellen Forschungsarbeiten findet diese Methode im Umfeld der Produktentwicklung auch Anwendung in der Absicherung von virtuellen Versuchen [258], Designstudien [259] und der Akquisition von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen [P10; 260]. Die Deep Learning-Methoden haben eine noch höhere Anforderung an den Umfang der Trainingsdaten, als konventionelle Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens. Hier muss untersucht werden, welche neuen Anforderungen diese Methode an die produktbeschreibenden Daten hat und inwieweit das ML-Datenmodell und KlIn-Produktmodell diese bereits abdecken.

Das ML-Datenmodell zur Formalisierung der produktbeschreibenden Daten ist im Assistenzsystem ALARM informationstechnisch durch den

Importassistenten umgesetzt. Hierbei müssen die Datenquellen formal beschrieben werden, was mit einem programmiertechnischen Aufwand verbunden ist. An dieser Stelle muss eine zusätzliche Flexibilität integriert werden, sodass die Produktentwickler die Datenquellen selbst erweitern können. Hier sollte untersucht werden, ob die Themenfelder zum „Linked Data“ [89] und Ontologien verwendet werden können, um die Flexibilität zu erhöhen. Die Forschungsaktivitäten von PANOVA zur „Ontology of Data Mining“ (OntoDM) zeigen hierbei vielversprechende Ergebnisse, wobei mithilfe von Ontologien einerseits Daten [261] und andererseits Prozesse zum maschinellen Lernen [262; 263] repräsentiert werden können.

9 Summary and Outlook

In this work, a concept for an engineering assistance system to support data-driven product development and its implementation is presented. The engineering assistance system supports product developers in performing data-driven analyses using machine learning methods and their integration into existing product development processes. The aim of data-driven analyses is in particular the more intensive reuse of product-describing data from previous product generations in order to better assure the actual product properties of the current product generation at an early stage.

The motivation for the development of the engineering assistance system comes from the increasing digitization of the product development. At the same time, the constantly increasing product complexity makes it more difficult to assure the product properties. The many established methods and tools of virtual product property assurance reach their limits, i.e. there are sometimes significant discrepancies between expected and actual product properties (see Section 1.1). In this context, methods from the field of machine learning have found their way into product development in recent years. Machine learning methods allow the identification of correlations and trends in large data sets. Product-describing data are available in large quantities, especially from previous product generations. Therefore, insights gained by using these data with machine learning methods could be helpful in the validation of complex product properties of the current product generation. However, on the one hand, product developers lack the methodological competence to develop and conduct data-driven analyses using machine learning methods. On the other hand, knowledge is required for data preparation and contextualization of the identified patterns.

Hence, the scientific objective of this thesis is a concept for a more intensive use of product-describing data from previous product generations, in particular to close the gap between expected and actual properties of serial products. One focus is above all on enabling product developers to independently carry out data-driven analyses in product development. Three research questions have been defined and answered in the following chapters to approach the scientific objectives (see Chapter 3):

1. How should product-describing data be structured and managed so that it can be used in machine learning methods?

2. How can knowledge for machine learning in the context of data-driven product development be formalized so that product developers can perform data-driven analysis?
3. How should a knowledge-based engineering assistance system be designed to aid product developers in data-driven product development in the company?

The concept for supporting in data-driven product development in Chapter 5 is based on the state of the art presented in Chapter 2. At the beginning, the focus is on product-describing data as a resource for machine learning. In the industrial environment, product-describing data are mainly managed in a document-based fashion in PDM systems. The document-based representation is not appropriate for direct use in machine learning. It requires a representation and an integration on the content level, which is why the Machine Learning (ML) Data Model was developed. The ML Data Model enables the formalization of product-describing data on its content level. The KlaiN (German: Klassen-Instanzen) Product Model was developed to structure and integrate the product-describing data. The KlaiN Product Model is based on the integrated product model (STEP standard) and extends it by product classes and instances. By differentiating between classes (valid for several instances) and instances (valid for one instance), the scope of validity for product-describing data can be expressed. The KlaiN Product Model thus meets the requirements of machine learning methods regarding the structure of data. In addition to the aspects of structuring and integrating product-describing data, the standardization and transfer of knowledge is of particular importance for an engineering assistance system. In case of machine learning methods, product developers are facing the challenge of correctly using this technology as a tool. Here, product developers particularly need to be provided with knowledge about the integration of data-driven approaches into the product development process as well as knowledge about the proper use of machine learning methods. The developed project-related knowledge bases face this challenge. In addition to the acquisition and provision of knowledge, the transfer of knowledge between experts in the domain of product development and product developers as well as the protection of knowledge in industrial environment were integrated into the concept. In Chapter 5, the overall concept is presented, so that operative interaction and thus an IT implementation for demonstration and validation is facilitated.

In Chapter 6, the implementation of the overall concept is described. For this, the overall concept is translated into a client and server architecture,

which enables the distributed operation of the engineering assistance system. The knowledge-based engineering assistance system ALARM is designed as a desktop application (client) and the central instance is deployed as a server. The central server is used to exchange the project-related knowledge bases and product-describing data. For this purpose, the concept of the KlaiN Product Model is instantiated using a central, relational database. Likewise, the project-related knowledge bases are implemented as file-based, relational databases. The remaining components of the overall concept are implemented as a graphical user interface (GUI), so that product developers and experts in the domain of product development can use the ALARM engineering assistance system as a user-friendly software tool. By implementing the concept from Chapter 5, the entire process for data-driven product development can be carried out by product developers themselves. This process starts with data preparation and ends with the contextualization of identified patterns. This gives product developers a tool to support the assurance of product properties through data-driven analyses.

With the aid of the prototype of the engineering assistance system ALARM and its application in a use case, Chapter 7 validates the concept for supporting data-driven product development and reveals potentials of data-driven analyses in the context of the assurance of product properties. The issue of tonalities in wind turbines offers a good scenario for a use case in the context of the overall objective of this thesis. For this purpose, a data analysis algorithm was developed with which the product configurations of previous product generations can be examined with regard to a complex product property in a data-driven manner. The result shows that data-driven analyses of product-describing data of the preceding product generations can be beneficial for the development of current product generations in the early phases “product planning, task definition” or “product development, product design”. Hence, the use of the engineering assistance system ALARM enables product developers to carry out data-driven analyses using machine learning methods and to contextualize the identified patterns. This gives the engineering assistance system ALARM the status of a complementary tool that facilitates a view from a data-driven angle.

In general, further data-driven solutions can be developed and integrated into the ALARM engineering assistance system. At the moment, further research activities are being conducted in the working group “Digital Engineering” at the Chair of Engineering Design at the Friedrich–Alexander University Erlangen–Nürnberg [P11]. There is a high research demand with regard to the integration and identification of potentials for the utilization

of machine learning techniques in product development. The need from product development side is high, but the utilization of these techniques is not reasonable for every issue. Within the concept of the engineering assistance system for data-driven product development, possible use cases and applications areas are identified through an exchange between experts from product development and machine learning (see Section 5.3). A method for quantifying the potential of machine learning techniques in product development is required here [257; P13].

In the field of weak artificial intelligence, “Deep Learning” has emerged in recent years. In current research work, this method is also used in the field of product development in the assurance of virtual experiments [258], design studies [259] and the acquisition of design-relevant manufacturing knowledge [P10; 260]. The Deep Learning techniques have an even higher demand on the volume of training data than conventional methods from the field of machine learning. It has to be examined which new requirements this technique has on the product-describing data and to what extent the ML Data Model and the Knowledge Product Model already cover them.

The ML Data Model for formalizing the product-describing data is implemented in the engineering assistance system ALARM through the Import Assistant. Here, the data sources have to be formally described, which is technically connected with a programming effort. At this point, additional flexibility need to be integrated so that product developers can extend the data sources themselves. Therefore, it should be examined whether research fields like “Linked Data” [89] or Ontologies can be utilized to increase this flexibility. PANOV’s research activities on the “Ontology of Data Mining” (OntoDM) show promising results in this respect, in which Ontologies can be used to represent both data [261] and machine learning processes [262; 263].

A Anhang

A.1 Erhebung zu den Wissensakquisitionsarten bei der Entwicklung und Pflege von wissensbasierten Assistenzsystemen

Die Tabelle 13 zeigt die Art der Wissensakquisition während der Entwicklung und Pflege verschiedener wissensbasierter Assistenzsysteme. Besonderes Augenmerk wurde bei der Erhebung auf die Wissensakquisition gelegt, da diese als „Flaschenhals“ eines wissensbasierten Assistenzsystems angesehen wird [186; 184; 185]. Hierzu wurde die Entwicklung von wissensbasierten Assistenzsysteme anderer Autoren analysiert. Die Ergebnisse der Erhebung sind in Abschnitt 2.4.4.1 (S. 60) zusammengefasst. Diese wurden bereits zum Teil in [P6] vorgestellt.

Tabelle 13: Wissensakquisitionsarten bei der Entwicklung und der Pflege wissensbasierter Assistenzsysteme aus den Jahren 1987 bis 2013 nach [P6] (ergänzt).

Name	Entwicklung	Pflege	Autor(en)
AS.EXPERT	indirekt	keine Angabe	[264]
Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte	indirekt	direkt	[6]
DEKAS	indirekt	keine Angabe	[265]
FIXPERT	indirekt	keine Angabe	[266]
HyperDesign	keine Angabe	direkt	[267]
ICX	indirekt	nicht vorgesehen	[268]
IDA	direkt	direkt	[269]
KONUS	indirekt	direkt	[270]
KSmfk	direkt, indirekt	indirekt	[226]
MoKon	direkt	direkt	[271]
NOBES	indirekt	keine Angabe	[272]
ProKon	indirekt	direkt	[273]
SLASSY	automatisch	automatisch	[274]
WIKON	direkt	direkt	[275]
WISENT	direkt	direkt	[276]
WKS	indirekt	direkt	[277]

Betrachtete wissensbasierte Assistenzsysteme: $n = 16$

A.2 Anonymisierter Datensatz zum Anwendungsbeispiel

In Tabelle 14 sind die Eingangsdaten des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7 aufgeführt. Die gesamten Daten wurden aus Gründen der Geheimhaltung anonymisiert.

Tabelle 14: Anonymisierter Datensatz des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7.

ID	Nabenhöhe	Generator	Getriebe	Ölkühler (Getriebe)	Gondelkühler	Gondelverkleidung	Kupplung	Maschinenträger	Rotorblatt	Rotorlager	Rotornabe	Rotorwelle	Spinner	Turm	Umrichter	SM1/SM2	Prüfstütut	TZ (tonhaltig?)
1	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R1	no
2	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R2	no
3	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q4	R1	no
4	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q5	R1	no
5	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R2	yes
6	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q3	R1	yes
7	A1	B1	C5	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q10	R6	yes
8	A1	B1	C5	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q10	R1	yes
9	A1	B1	C5	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q3	R1	yes
10	A1	B1	C5	D2	Eo	F1	Go	H2	Io	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R1	yes
11	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R1	no
12	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q11	R2	no
13	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q12	R2	no
14	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q13	R2	yes
15	A4	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R7	no
16	A4	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R7	no
17	A4	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N1	O3	P1	Q1	R7	no
18	A4	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H2	I1	K2	L1	M3	N2	O3	P1	Q1	R7	no
19	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q1	R1	yes
20	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q1	R1	yes
21	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q1	R1	yes
22	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q1	R1	no
23	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q4	R1	no
24	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q5	R1	no
25	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q3	R1	no

Tabelle 14: Anonymisierter Datensatz des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7. (Fortsetzung)

ID	Nabenhöhe	Generator	Getriebe	Ölkühler (Getriebe)	Gondelkühler	Gondelverkleidung	Kupplung	Maschinenträger	Rotorblatt	Rotorlager	Rotornabe	Rotorwelle	Spinner	Turm	Umrichter	SM1/SM2	Prüfnstitut	TZ (tonhaltig?)
26	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q14	R1	no
27	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q15	R1	no
28	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q10	R1	no
29	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q3	R1	no
30	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q4	R1	yes
31	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q5	R1	no
32	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q14	R1	no
33	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q15	R1	no
34	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q10	R1	yes
35	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q4	R1	yes
36	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q15	R1	no
37	A1	B1	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I2	K2	L4	M3	N1	O7	P1	Q15	R1	yes
38	A4	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I1	K2	L1	M11	N3	O5	P1	Q1	R7	no
39	A1	B1	C3	D2	Eo	F3	G2	H4	I1	K2	L1	M12	N3	O3	P1	Q1	R1	yes
40	A1	B1	C3	D2	Eo	F3	G2	H4	I1	K2	L1	M12	N3	O3	P1	Q10	R1	yes
41	A1	B1	C3	D2	Eo	F3	G2	H4	I1	K3	L1	M4	N3	O3	P1	Q1	R1	yes
42	A1	B1	C3	D2	Eo	F3	G2	H4	I1	K3	L1	M4	N3	O3	P1	Q10	R1	yes
43	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H7	I1	K2	L1	M11	N2	O3	P1	Q3	R2	yes
44	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H7	I1	K2	L1	M11	N2	O3	P1	Q14	R2	yes
45	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H7	I1	K2	L1	M11	N2	O3	P1	Q15	R2	no
46	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H7	I1	K2	L1	M11	N2	O3	P1	Q5	R2	yes
47	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I2	K2	L1	M11	N2	O5	P1	Q1	R2	no
48	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I2	K2	L1	M11	N2	O5	P1	Q3	R2	yes
49	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I2	K2	L1	M11	N2	O5	P1	Q4	R2	yes
50	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I2	K2	L1	M11	N2	O5	P1	Q5	R2	yes
51	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I2	K2	L1	M11	N2	O5	P1	Q14	R2	yes
52	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I2	K2	L1	M11	N2	O5	P1	Q15	R2	yes
53	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H4	I2	K2	L1	M11	N2	O5	P1	Q10	R2	yes
54	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H2	I1	Ko	L1	Mo	N1	O8	P1	Q1	R2	no
55	A4	B2	C3	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K3	L1	M11	N2	O5	P1	Q1	R2	yes

Tabelle 14: Anonymisierter Datensatz des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7. (Fortsetzung)

ID	Nabenhöhe	Generator	Getriebe	Ölkühler (Getriebe)	Gondelkühler	Gondelverkleidung	Kupplung	Maschinenträger	Rotorblatt	Rotorlager	Rotornabe	Rotorwelle	Spinner	Turm	Umrichter	SM1/SM2	Prüfstüt	TZ (tonhaltig?)
56	A4	B2	C3	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K3	L1	M11	N2	O5	P1	Q1	R2	yes
57	A4	B2	C3	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K3	L1	M11	N2	O5	P1	Q1	R2	yes
58	A4	B2	C3	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K3	L1	M11	N2	O5	P1	Q4	R2	no
59	A1	B2	C3	D2	Eo	F1	Go	H2	I1	Ko	L1	Mo	N1	O9	P1	Q1	R2	no
60	A1	B1	C3	D2	Eo	F1	Go	H4	I1	Ko	L1	Mo	N2	O9	P1	Q1	R2	no
61	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K2	L1	M11	N3	O3	P1	Q1	R8	no
62	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K2	L1	M11	N3	O3	P1	Q5	R8	no
63	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K2	L1	M11	N3	O3	P1	Q4	R8	no
64	A1	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H3	I4	K2	L1	M11	N3	O3	P1	Q3	R8	no
65	A4	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H7	I4	K3	L1	M11	N3	O3	P1	Q1	R2	no
66	A4	B1	C1	D2	Eo	F3	Go	H7	I4	K3	L1	M11	N3	O3	P1	Q1	R2	no
67	A4	B2	C1	D2	Eo	F3	Go	H3	I1	K2	L1	M5	N3	O5	P1	Q1	R2	no
68	A4	B1	C4	D2	Eo	F1	Go	H2	I4	K3	L1	M13	N1	O3	P1	Q1	R1	yes
69	A4	B1	C4	D2	Eo	F1	Go	H2	I4	K3	L1	M13	N1	O3	P1	Q3	R1	no
70	A4	B1	C4	D2	Eo	F1	Go	H2	I4	K3	L1	M13	N1	O3	P1	Q10	R1	no
71	A1	B2	C6	D2	Eo	F1	Go	H3	I1	K2	L1	M12	N1	O6	P1	Q1	R1	no
72	A1	B2	C6	D2	Eo	F1	Go	H3	I1	K2	L1	M12	N1	O6	P1	Q1	R1	yes
73	A1	B2	C6	D2	Eo	F1	Go	H3	I1	K3	L1	M12	N1	O6	P1	Q5	R1	no
74	A1	B2	C6	D2	Eo	F1	Go	H3	I1	K3	L1	M12	N1	O6	P1	Q4	R1	no
75	A1	B2	C6	D2	Eo	F1	Go	H3	I1	K3	L1	M12	N1	O6	P1	Q1	R1	no
76	A1	B2	C6	D2	Eo	F1	Go	H3	I1	K3	L1	M12	N1	O6	P1	Q1	R1	no
77	A4	B1	C6	D2	Eo	F3	Go	H3	I1	K2	L1	M5	N3	O5	P1	Qo	R9	no
78	A1	B1	C6	D2	Eo	F1	Go	H7	I1	K2	L1	M5	N1	O3	P1	Q1	R10	no
79	A1	B1	C6	D2	Eo	F1	Go	H7	I1	K2	L1	M5	N1	O3	P1	Q1	R1	yes
80	A1	B1	C6	D2	Eo	F1	Go	H7	I1	K2	L1	M5	N1	O3	P1	Q3	R1	yes
81	A4	B1	C6	D2	Eo	F3	Go	H3	I1	K3	L1	M14	N3	O5	P1	Q1	R1	no
82	A4	B1	C6	D2	Eo	F3	Go	H3	I1	K3	L1	M14	N3	O5	P1	Q5	R1	yes
83	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	Go	H4	I1	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q1	R2	no
84	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	Go	H4	I1	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q1	R2	no
85	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	Go	H4	I1	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q5	R2	no

Tabelle 14: Anonymisierter Datensatz des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7. (Fortsetzung)

ID	Nabenhöhe	Generator	Getriebe	Ölkühler (Getriebe)	Gondelkühler	Gondelverkleidung	Kupplung	Maschinenträger	Rotorblatt	Rotorlager	Rotornabe	Rotorwelle	Spinner	Turm	Umrichter	SM1/SM2	Prüfstüt	TZ (tonhaltig?)
86	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	Go	H4	I1	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q4	R2	no
87	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	Go	H4	I1	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q10	R2	no
88	A4	B2	C1	D2	Eo	F3	Go	H2	I4	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q4	R11	no
89	A4	B2	C1	D2	Eo	F3	Go	H2	I4	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q5	R11	yes
90	A4	B2	C1	D2	Eo	F3	Go	H2	I4	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q1	R11	no
91	A4	B2	C1	D2	Eo	F3	Go	H2	I4	K3	L1	M12	N3	O3	P1	Q1	R11	no
92	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q1	R1	no
93	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q1	R1	no
94	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q4	R1	no
95	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q5	R1	no
96	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q1	R1	no
97	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q5	R1	no
98	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q4	R1	no
99	A1	B2	C1	D2	Eo	F1	Go	H4	I4	K2	L1	M12	N1	O5	P1	Q15	R1	no
100	A1	B2	C5	D2	Eo	F3	Go	H3	I1	K2	L1	M2	N3	O5	P1	Q5	R1	yes
101	A1	B2	C5	D2	Eo	F3	Go	H3	I1	K2	L1	M2	N3	O5	P1	Q1	R1	yes
102	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	G1	H3	I1	K2	L1	M12	N1	O3	P2	Q1	R2	yes
103	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	G1	H3	I1	K2	L1	M12	N1	O3	P2	Q5	R2	yes
104	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	G1	H3	I1	K2	L1	M12	N1	O3	P2	Q1	R2	no
105	A4	B1	C3	D2	Eo	F1	G1	H3	I1	K2	L1	M12	N1	O3	P2	Q1	R2	no
106	A4	B2	C3	D2	Eo	F1	Go	H3	I4	K2	L3	M2	N1	O5	P1	Q3	R7	no
107	A4	B2	C3	D2	Eo	F1	Go	H3	I4	K2	L3	M2	N1	O5	P1	Q1	R7	no
108	A4	B2	C3	D2	Eo	F1	Go	H3	I4	K2	L3	M2	N1	O5	P1	Q1	R2	no
109	A4	B2	C3	D2	Eo	F1	Go	H3	I4	K2	L3	M2	N1	O5	P1	Q3	R2	yes
110	A4	B2	C3	D2	Eo	F1	Go	H3	I4	K2	L3	M2	N1	O5	P1	Q1	R2	no
111	A4	B2	C3	D2	Eo	F1	Go	H3	I4	K2	L3	M2	N1	O5	P1	Q3	R2	yes
112	A4	B2	C1	D2	Eo	F3	G2	H3	I3	K1	L1	M12	N3	O3	P1	Q4	R12	no
113	A1	B2	C1	D2	Eo	F3	G2	H3	I1	K3	L3	M12	N3	O3	P1	Q15	R2	no
114	A1	B2	C1	D2	Eo	F3	G2	H3	I1	K3	L3	M12	N3	O3	P1	Q14	R2	no
115	A1	B2	C1	D2	Eo	F3	G2	H3	I1	K3	L3	M12	N3	O3	P1	Q16	R2	no

Tabelle 14: Anonymisierter Datensatz des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7. (Fortsetzung)

ID	Nabenhöhe	Generator	Getriebe	Ölkühler (Getriebe)	Gondelkühler	Gondelverkleidung	Kupplung	Maschinenträger	Rotorblatt	Rotorlager	Rotornabe	Rotorwelle	Spinner	Turm	Umrichter	SM1/SM2	Prüfstüt	TZ (tonhaltig?)
116	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q1	R1	no
117	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q3	R1	no
118	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q4	R1	no
119	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q5	R1	no
120	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q14	R1	no
121	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q15	R1	no
122	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q10	R1	no
123	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q1	R1	no
124	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q3	R1	no
125	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q4	R1	no
126	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q5	R1	no
127	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q14	R1	no
128	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q15	R1	no
129	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q10	R1	no
130	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q16	R1	yes
131	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q1	R1	no
132	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q3	R1	no
133	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q4	R1	no
134	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q5	R1	no
135	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q14	R1	no
136	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q15	R1	no
137	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q10	R1	no
138	A3	B3	C1	D2	Eo	F1	G2	H7	I3	K1	L1	M2	N1	O6	P1	Q16	R1	no
139	A4	B2	C1	D2	Eo	F1	G1	H3	I3	K3	L1	M12	N1	O3	P1	Q1	R2	no
140	A4	B2	C1	D2	Eo	F1	G1	H3	I3	K3	L1	M12	N1	O3	P1	Q15	R2	no
141	A4	B2	C1	D2	Eo	F1	G1	H3	I3	K3	L1	M12	N1	O3	P1	Q16	R2	no
142	A4	B2	C1	D2	Eo	F1	G1	H3	I3	K3	L1	M12	N1	O3	P1	Q5	R2	no
143	A4	B3	C5	D2	Eo	F3	G1	H4	I3	K2	L1	M10	N1	O6	P2	Q1	R13	no
144	A4	B2	C1	D2	Eo	F3	G2	H3	I1	K1	L1	M10	N3	O9	P1	Q3	R12	yes
145	A4	B2	C3	D2	Eo	F3	G1	H3	I3	K1	L1	M10	N1	O6	P1	Q0	R12	no







Tabelle 14: Anonymisierter Datensatz des Anwendungsbeispiels in Kapitel 7. (Fortsetzung)










ID	Nabenhöhe	Generator	Getriebe	Ölkühler (Getriebe)	Gondelkühler	Gondelverkleidung	Kupplung	Maschinenträger	Rotorblatt	Rotorlager	Rotornabe	Rotorwelle	Spinner	Turm	Umrichter	SM1/SM2	Prüfstütut	TZ (tonhaltig?)
146	A4	B2	C5	D2	Eo	F3	G2	H3	I5	K1	L1	M10	N3	O3	P1	Q1	R11	no
147	A4	B2	C5	D2	Eo	F1	G1	H4	I3	K3	L3	M10	N3	O3	P1	Q1	R2	yes
148	A4	B2	C5	D2	Eo	F1	G1	H4	I3	K3	L3	M10	N3	O3	P1	Q1	R2	yes
149	A4	B2	C5	D2	Eo	F3	G1	H4	I3	K3	L3	M10	N1	O3	P1	Q1	R2	yes
150	A4	B2	C5	D2	Eo	F3	G1	H4	I3	K3	L3	M10	N1	O3	P1	Q3	R2	no
151	A4	B2	C5	D2	Eo	F3	G2	H3	I5	K1	L1	M10	N3	O3	P1	Q3	R2	yes
152	A4	B2	C5	D2	Eo	F3	G2	H3	I5	K1	L1	M10	N3	O3	P1	Q5	R2	yes
153	A4	B2	C5	D2	Eo	F3	G2	H3	I5	K1	L1	M10	N3	O3	P1	Q1	R2	yes
154	A4	B2	C5	D2	Eo	F3	G2	H3	I5	K1	L1	M10	N3	O3	P1	Q0	R2	yes
155	A1	B4	C5	D2	Eo	F3	G1	H4	I5	K3	L1	M10	N3	O3	P1	Q0	R8	yes
156	A1	B2	C1	D2	Eo	F3	G1	H3	I1	K2	L1	M2	N3	O10	P1	Q1	R2	no
157	A1	B2	C1	D2	Eo	F3	G1	H3	I1	K2	L1	M2	N3	O10	P1	Q0	R10	no

Literaturverzeichnis








- [1] BMBF: Bericht der Bundesregierung: Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan). Techn. Ber. Bonn, Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2012.
- [2] BMWi: Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft: Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation. Broschüre. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BmWi), 04/2015.
- [3] BECKER, T.; KNOP, C.: Upload: Wo steht Deutschland beim Thema Digitalisierung? In: BECKER, T.; KNOP, C. (Hrsg.): Digitales Neuland: Warum Deutschlands Manager jetzt Revolutionäre werden. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 1–22. DOI: [10.1007/978-3-658-09692-2_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-09692-2_1).
- [4] GREBE, M.; RÜSSMANN, M.; LEYH, M.: Beyond the Hype: The real champions of building the digital future. Techn. Ber. The Boston Consulting Group (BCG), 10. 07. 2017.
- [5] VDI 2221:1993-05: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth.
- [6] WARTZACK, S.: Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, 2001. ISBN: [3-18-333601-4](https://www.isbn-international.org/product/3-18-333601-4).
- [7] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. DOI: [10.1007/978-3-642-29569-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0).
- [8] EIGNER, M.; STELZER, R.: Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2. Auflage. Berlin: Springer, 2009. DOI: [10.1007/b93672](https://doi.org/10.1007/b93672).
- [9] REICH, Y.; BARAI, S. V.: Evaluating machine learning models for engineering problems. Artificial Intelligence in Engineering Bd. 13 (1999) Nr. 3, S. 257–272. DOI: [10.1016/S0954-1810\(98\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0954-1810(98)00021-1).
- [10] VAJNA, S.; WEBER, C.; ZEMAN, K.; HEHENBERGER, P.; GERHARD, D.; WARTZACK, S.: CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. DOI: [10.1007/978-3-662-54624-6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54624-6).








- [11] VANHOLLEBEKE, F.: Dynamic analysis of a wind turbine gearbox: Towards prediction of mechanical tonalities. Dissertation, Faculty of Engineering Science, Catholic University of Leuven, 2015. LIRIAS: [123456789/471065](#) .
- [12] MEYER, A.; ABERSFELDER, S.; URBAN, N.; SCHNEIDER, M.; FRANKE, J.: Fertigungsbegleitende Qualitätskontrolle in der Elektromotorenfertigung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Bd. 112 (2017) Nr. 4, S. 200–203. DOI: [10.3139/104.111694](#) .
- [13] FRÖHLICH, P.: FEM-Anwendungspraxis: Einstieg in die Finite Elemente Analyse. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2005. DOI: [10.1007/978-3-663-10053-9](#) .
- [14] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: An Approach of a Knowledge-based Process to Integrate Real Geometry Models in Product Simulations. Procedia CIRP Bd. 50 (2016), S. 813–818. DOI: [10.1016/j.procir.2016.04.176](#) .
- [15] SRINIVASAN, V.: Computational Metrology for the Design and Manufacture of Product Geometry: A Classification and Synthesis. Journal of Computing and Information Science in Engineering Bd. 7 (2006) Nr. 1, S. 3–9. DOI: [10.1115/1.2424246](#) .
- [16] SCHLEICH, B.: Skin Model Shapes: A new Paradim for the Tolerance Analysis and the Geometrical Variations Modelling in Mechanical Engineering. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, 2017. ISBN: [978-3-18-343801-3](#) .
- [17] VDI 2211:2003-03: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung: Berechnungen in der Konstruktion. Berlin: Beuth.
- [18] WALTER, M. S. J.: Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, 2016. ISBN: [978-3-18-343701-6](#) .
- [19] NEUBACH, M.: Wissensbasierte Rückführung von Produktnutzungsinformationen in die Produktentwicklung im Rahmen einer Product Lifecycle Management (PLM)-Lösung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, 2010. ISBN: [978-3-8322-9683-4](#) .

- [20] MÜLLER, M.; STAUDACHER, S.; FRIEDL, W.; KÖHLER, R.; WEISS-SCHUH, M.: Probabilistische Modellierung des Einflusses variierender Umwelt- und Betriebsbedingungen auf die Triebwerksinstandhaltung. In: DLRK Tagungsband 2010: 59. Deutsche Luft- und Raumfahrtkongress. 31. 08. – 02. 09. 2010, Hamburg. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2010, S. 237–246.
- [21] NORTH, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung: Wissensmanagement gestalten. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. DOI: [10.1007/978-3-658-11643-9](https://doi.org/10.1007/978-3-658-11643-9) .
- [22] VENKATRAMAN, N.: IT-Enabled Business Transformation: From Automation to Business Scope Redefinition. Sloan Management Review Bd. 35 (1994) Nr. 2, S. 73–87.
- [23] MERTENS, P.; BODENDORF, F.; KÖNIG, W.; HESS, T.; BUXMANN, P.: Grundzüge der Wirtschaftsinformatik. 12. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. DOI: [10.1007/978-3-662-53362-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53362-8) .
- [24] MATT, C.; HESS, T.; BENLIAN, A.: Digital Transformation Strategies. Business & Information Systems Engineering Bd. 57 (2015) Nr. 5, S. 339–343. DOI: [10.1007/s12599-015-0401-5](https://doi.org/10.1007/s12599-015-0401-5) .
- [25] HORLACHER, A.; HESS, T.: What Does a Chief Digital Officer Do? Managerial Tasks and Roles of a New C-Level Position in the Context of Digital Transformation. In: Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). 05. – 08. 01. 2016, Koloa/HI/Vereinigte Staaten. IEEE, 2016, S. 5126–5135. DOI: [10.1109/hicss.2016.634](https://doi.org/10.1109/hicss.2016.634) .
- [26] DAPP, M. M.; BALTA, D.; PALMETSHOFER, W.; KRCCMAR, H.: Open Data. The Benefits: Das volkswirtschaftliche Potential für Deutschland. Sankt Augustin, Berlin: Konrad-Adenauer-Stiftung e.V., 2016. ISBN: [978-3-95721-202-3](https://doi.org/10.1007/978-3-95721-202-3) .
- [27] GIMPEL, H.; RÖGLINGER, M.: Digital Transformation: Changes and Chances – Insights based on an Empirical Study. Augsburg/Bayreuth: Project Group Business und Information Systems Engineering (BISE) of Fraunhofer Institute for Applied Information Technology FIT, 2015. FRAUNHOFER: [N-391990](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53362-8) .
- [28] BLOCHING, B.; LEUTIGER, P.; OLTMANN, T.; ROSSBACH, C.; SCHLICK, T.; REMANE, G.; QUICK, P.; SHAFRANYUK, O.: Die digitale Transformation der Industrie. Techn. Ber. Roland Berger Strategy Consultants & Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), 01. 02. 2015.









- [29] EROL, H.; FRIEDL, W.-H.: Der Rolls-Royce Ansatz für Lebenszykluskostenmodellierung von Triebwerken für den Geschäfts-, Kurz- und Mittelstreckenflugzeugmarkt. In: DLRK Tagungsband 2012: 61. Deutsche Luft- und Raumfahrtkongress. 10. – 12. 09. 2012, Berlin. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2012. OCLC: [864046393](#) .
- [30] BERMAN, S. J.: Digital transformation: opportunities to create new business models. *Strategy & Leadership* Bd. 40 (2012) Nr. 2, S. 16–24. DOI: [10.1108/10878571211209314](#) .
- [31] HESMONDHALGH, D.; MEIER, L. M.: What the digitalisation of music tells us about capitalism, culture and the power of the information technology sector. *Information, Communication & Society* (2017), S. 1–16. DOI: [10.1080/1369118x.2017.1340498](#) .
- [32] FROHMANN, F.: *Digitales Pricing: Strategische Preisbildung in der digitalen Wirtschaft mit dem 3-Level-Modell*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018. DOI: [10.1007/978-3-658-22573-5](#) .
- [33] SPUR, G.; KRAUSE, F.-L.: *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. 1. Auflage. München: Hanser, 1997. ISBN: [978-3-446-19176-1](#) .
- [34] HARGROVES, K. J.; SMITH, M. H. (Hrsg.): *The Natural Advantage of Nations: Business Opportunities, Innovations and Governance in the 21st Century*. London/Vereinigtes Königreich: Earthscan, 2005. DOI: [10.4324/9781849773133](#) .
- [35] COPELAND, B. J.; SOMMARUGA, G.: The Stored-Program Universal Computer: Did Zuse Anticipate Turing and von Neumann? In: SOMMARUGA, G.; STRAHM, T. (Hrsg.): *Turing's Revolution*. Cham/Schweiz: Birkhäuser, 2015, S. 43–101. DOI: [10.1007/978-3-319-22156-4_3](#) .
- [36] SUTHERLAND, I. E.: *Sketchpad, a man-machine graphical communication system*. Dissertation, Department of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1963. DOI: [1721.1/14979](#) .
- [37] LOSSACK, R.-S.: *Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. DOI: [10.1007/3-540-29947-5](#) .









- [38] BERNERS-LEE, T.; FISCHETTI, M.: Weaving the Web: The Original Design and Ultimate Destiny of the World Wide Web. 1. Auflage. New York/NY/Vereinigte Staaten: HarperCollins, 2000. ISBN: 0-06-251587-X [↗](#).
- [39] DIN EN ISO 9001:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. Berlin: Beuth.
- [40] HALES, C.; GOOCH, S.: Managing Engineering Design. 2. Auflage. London: Springer, 2004. DOI: [10.1007/978-0-85729-394-7](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-394-7) [↗](#).
- [41] KESSELRING, F.: Technische Kompositionslehre: Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewußtem Schaffen. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1954. DOI: [10.1007/978-3-642-92624-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-92624-2) [↗](#).
- [42] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-642-01423-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9) [↗](#).
- [43] RUDE, S.: Wissensbasiertes Konstruieren. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Fridericiana (TH) Karlsruhe, 1998. ISBN: [978-3-8265-3985-5](https://www.springer.com/978-3-8265-3985-5) [↗](#).
- [44] VDI 2243:2002-07: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Berlin: Beuth.
- [45] VDI 2220:1980-05: Produktplanung: Ablauf, Begriffe und Organisation. Berlin: Beuth.
- [46] VDI 2222-1:1997-06: Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth.
- [47] VDI 2223:2004-01: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth.
- [48] VDI 2249:2003-09: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung CAD-Benutzungsfunktionen. Berlin: Beuth.
- [49] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1: Konstruktionslehre. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. ISBN: [3-540-57324-0](https://www.springer.com/978-3-540-57324-0) [↗](#).
- [50] WEBER, C.: CPM/PDD – An extended theoretical approach to modelling products and product development processes. In: BLEY, H.; JANSEN, H.; KRAUSE, F. L.; SHPITALNI, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes. 07. – 08. 07. 2005, Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2005, S. 159–179.




- [51] VDI 2219:2016-09: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung: Einführung und Betrieb von PDM-Systemen. Berlin: Beuth.
- [52] NIEMANN, J.; SCHUH, G.; BAESSLER, E.; EIGNER, M.; STOLZ, M.; STEINHILPER, R.; JANUSZ-RENAULT, G.; HIEBER, M.: Management des Produktlebenslaufs. In: BULLINGER, H.-J.; SPATH, D.; WARNECKE, H.-J.; WESTKÄMPER, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, S. 223–315. DOI: [10.1007/978-3-540-87595-6_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87595-6_4) .
- [53] MAROPOULOS, P. G.; CEGLAREK, D.: Design verification and validation in product lifecycle. CIRP Annals – Manufacturing Technology Bd. 59 (2010) Nr. 2, S. 740–759. DOI: [10.1016/j.cirp.2010.05.005](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.005) .
- [54] PRODHAF TG:1989-12: Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte (Produkthaftungsgesetz - ProdHaftG): Produkthaftungsgesetz vom 15. Dezember 1989 (BGBl. I S. 2198), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2421) geändert worden ist. 15. 12. 1989. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/prodhaftg/>  [Abgerufen am: 25. 09. 2017].
- [55] KRAUSE, F.-L.; ULBRICH, A.; WOLL, R.: Methods for Quality-Driven Product Development. CIRP Annals Bd. 42 (1993) Nr. 1, S. 151–154. DOI: [10.1016/s0007-8506\(07\)62414-7](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62414-7) .
- [56] VDI 2888:1999-12: Zustandsorientierte Instandhaltung. Berlin: Beuth.
- [57] GULLEDGE, T.; HIROSHIGE, S.; IYER, R.: Condition-based Maintenance and the product improvement process. Computers in Industry Bd. 61 (2010) Nr. 9, S. 813–832. DOI: [10.1016/j.compind.2010.07.007](https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.07.007) .
- [58] HRIBERNIK, K. A.; RABE, L.; THOBEN, K. D.; SCHUMACHER, J.: The product avatar as a product-instance-centric information management concept. International Journal of Product Lifecycle Management Bd. 1 (2006) Nr. 4, S. 367–379. DOI: [10.1504/ijplm.2006.011055](https://doi.org/10.1504/ijplm.2006.011055) .
- [59] WUEST, T.; HRIBERNIK, K.; THOBEN, K.-D.: Digital Representations of Intelligent Products: Product Avatar 2.0. In: ABRAMOVICI, M.; STARK, R. (Hrsg.): Smart Product Engineering: Lecture Notes in Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 675–684. DOI: [10.1007/978-3-642-30817-8_66](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_66) .

- [60] WUEST, T.; HRIBERNIK, K.; THOBEN, K.-D.: Accessing servitisation potential of PLM data by applying the product avatar concept. *Production Planning & Control Bd. 26* (2015) Nr. 14–15, S. 1198–1218. DOI: [10.1080/09537287.2015.1033494](https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1033494) .
- [61] WELLSANDT, S.; HRIBERNIK, K.; THOBEN, K.-D.: Sources and Characteristics of Information about Product Use. *Procedia CIRP Bd. 36* (2015), S. 242–247. DOI: [10.1016/j.procir.2015.01.060](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.060) .
- [62] DENG, Q.; FRANKE, M.; HRIBERNIK, K.; THOBEN, K.-D.: Exploring the integration of social media feedback for user-oriented product development. In: MAIER, A.; ŠKEC, S.; KIM, H.; KOKKOLARAS, M.; OEHMEN, J.; FADEL, G.; SALUSTRI, F.; DER LOOS, M. V. (Hrsg.): *DS 87-4 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)*. Bd. 4: Design Methods and Tools. 21. – 25. 08. 2017, Vancouver/Kanada. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2017, S. 453–462. DESIGNSOCIETY: [39694](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.060) .
- [63] ABRAMOVICI, M.; GÖBEL, J. C.; SAVARINO, P.: Virtual Twins as Integrative Components of Smart Products. In: HARIK, R.; RIVEST, L.; BERNARD, A.; EYNARD, B.; BOURAS, A. (Hrsg.): *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries. 13th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2016 Columbia, SC, USA, July 11–13, 2016 Revised Selected Papers*. Springer International Publishing, 2016, S. 217–226. DOI: [10.1007/978-3-319-54660-5_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54660-5_20) .
- [64] GRIEVES, M.; VICKERS, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: KAHLEN, F.-J.; FLUMERFELT, S.; ALVES, A. (Hrsg.): *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer International Publishing, 2016, S. 85–113. DOI: [10.1007/978-3-319-38756-7_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4) .
- [65] VDI 4500:2006-06: Technische Dokumentation: Begriffsdefinitionen und rechtliche Grundlagen. Berlin: Beuth.
- [66] DIN EN ISO 9000:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth.
- [67] SENDLER, U.: *Das PLM-Kompodium: Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-540-87898-8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87898-8) .
- [68] CONRAD, S.: *Föderierte Datenbanksysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997. DOI: [10.1007/978-3-642-59028-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59028-3) .









- [69] JUNGKUNZ, R. M.: PDM-basierte Überwachung komplexer Entwicklungsprojekte. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, 2005. OCLC: [76781908](#) ↗.
- [70] KATZENBACH, A.; STEIERT, H.-P.: Engineering-IT in der Automobilindustrie – Wege in die Zukunft. Informatik-Spektrum Bd. 34 (2010) Nr. 1, S. 7–19. DOI: [10.1007/s00287-010-0502-y](#) ↗.
- [71] RANGAN, R. M.; CHADHA, B.: Engineering Information Management to Support Enterprise Business Processes. Journal of Computing and Information Science in Engineering Bd. 1 (2001) Nr. 1, S. 32–40. DOI: [10.1115/1.1353845](#) ↗.
- [72] GRUNDEL, M.; ABULAWI, J.; MOESER, G.; WEILKIENS, T.; SCHEITHAUER, A.; KLEINER, S.; KRAMER, C.; NEUBERT, M.; KÜMPEL, S.; ALBERS, A.: FAS4M – No more: “Please mind the gap!” In: MAURER, M.; SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering 2014. 12. – 14. 11. 2014, Bremen. Carl Hanser, 2014, S. 63–74. DOI: [10.3139/9783446443761.007](#) ↗.
- [73] RANGAN, R. M.; ROHDE, S. M.; PEAK, R.; CHADHA, B.; BLIZNAKOV, P.: Streamlining Product Lifecycle Processes: A Survey of Product Lifecycle Management Implementations, Directions, and Challenges. Journal of Computing and Information Science in Engineering Bd. 5 (2005) Nr. 3, S. 227–237. DOI: [10.1115/1.2031270](#) ↗.
- [74] BS ISO 10303-11:1994: Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual. London/Vereinigtes Königreich: BSi.
- [75] GRABOWSKI, H.; ANDERL, R.; POLLY, A.: Integriertes Produktmodell. Berlin: Beuth, 1993. ISBN: [978-3-410-12920-2](#) ↗.
- [76] DIN EN 82045-1:2002-11: Dokumentenmanagement – Teil 1: Prinzipien und Methoden (IEC 82045-1:2001). Berlin: Beuth.
- [77] DIN 6789:2013-10: Dokumentationssystematik – Verfälschungssicherheit und Qualitätskriterien für die Freigabe digitaler Produktdaten. Berlin: Beuth.
- [78] NEUMANN, F.: Analyzing and Modeling Interdisciplinary Product Development. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. DOI: [10.1007/978-3-658-11092-5](#) ↗.










- [79] GERHARD, D.: Daten- und Informationsmanagement PDM/PLM. In: LINDEMANN, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 215–246. DOI: [10.3139/9783446445819](https://doi.org/10.3139/9783446445819) .
- [80] DIN EN 82045-2:2005-11: Dokumentenmanagement – Teil 2: Metadaten und Informationsreferenzmodelle (IEC 82045-2:2004). Berlin: Beuth.
- [81] SZEGHÖ, K.: Integriertes, föderiertes und domainübergreifendes Produktmodell in der frühen Phase der Produktentwicklung. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technische Universität Kaiserslautern, 2012. ISBN: [978-3-941438-96-5](https://doi.org/978-3-941438-96-5) .
- [82] HAHN, A.: Integration verteilter Produktmodelle durch Semantic-Web-Technologien. Wirtschaftsinformatik Bd. 47 (2005) Nr. 4, S. 278–284. DOI: [10.1007/bf03254915](https://doi.org/10.1007/bf03254915) .
- [83] PANETTO, H.; DASSISTI, M.; TURSI, A.: ONTO-PDM: Product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment. Advanced Engineering Informatics Bd. 26 (2012) Nr. 2, S. 334–348. DOI: [10.1016/j.aei.2011.12.002](https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.12.002) .
- [84] HITZLER, P.; KRÖTZSCH, M.; RUDOLPH, S.; SURE, Y.: Semantic Web: Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. DOI: [10.1007/978-3-540-33994-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-33994-6) .
- [85] STAAB, S.; STUDER, R. (Hrsg.): Handbook on Ontologies. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-540-24750-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24750-0) .
- [86] WEBER, A.: CSR und Produkttraceability am Beispiel Spielwaren. In: WEBER, T. (Hrsg.): CSR und Produktmanagement: Langfristige Wettbewerbsvorteile durch nachhaltige Produkte. Springer, 2015, S. 197–207. DOI: [10.1007/978-3-662-45573-9_12](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45573-9_12) .
- [87] HAHN, A.; GRÜNING, F.; HAUSMANN, K.: Ontology-based product data management. In: EUROSTEP SWEDEN (Hrsg.): Proceedings of the PDT Europe 2015, the 14th Product Data Technology Europe Symposium. 26. – 28. 09. 2005, Amsterdam. Stockholm: Eurostep AB, 2005, S. 183–190.
- [88] HARTH, A.; HOSE, K.; SCHENKEL, R. (Hrsg.): Linked Data Management. Boca Raton: CRC Press, 2014. DOI: [10.1201/b16859](https://doi.org/10.1201/b16859) .







- [89] PELLEGRINI, T.; SACK, H.; AUER, S. (Hrsg.): *Linked Enterprise Data: Management und Bewirtschaftung vernetzter Unternehmensdaten mit Semantic Web Technologien*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. DOI: [10.1007/978-3-642-30274-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30274-9) .
- [90] KADIRI, S. E.; MILICIC, A.; KIRITSIS, D.: *Linked Data Exploration in Product Life-Cycle Management*. In: PRABHU, V.; TAISCH, M.; KIRITSIS, D. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains. APMS 2013. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Bd. 415. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 460–467. DOI: [10.1007/978-3-642-41263-9_57](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41263-9_57) .
- [91] LI, C. L.; MCMAHON, C.; NEWNES, L.: *Supporting multiple engineering viewpoints in computer-aided design using ontology-based annotations*. In: LINDEMANN, U.; SRINIVASAN, V.; KIM, Y. S.; LEE, S. W.; CLARKSON, J.; CASCINI, G. (Hrsg.): *DS 75-6: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13)*. Bd. 6: *Design Information and Knowledge*. 19. – 22. 08. 2013, Seoul/Südkorea. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2013, S. 249–258. DESIGNSOCIETY: [35074](https://doi.org/10.1002/ds.35074) .
- [92] CASPAR, J.: *IT-Integration mit semantischer Vernetzung für durchgängiges Digital Engineering*. In: SCHULZE, S.-O.; MUGGEO, C. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering 2015*. 11. – 13. 11. 2015, Ulm. Carl Hanser, 2015, S. 27–36. DOI: [10.3139/9783446447288.004](https://doi.org/10.3139/9783446447288.004) .
- [93] FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P.: *From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases*. *AI Magazine* Bd. 17 (1996) Nr. 3, S. 37–54. DOI: [10.1609/aimag.v17i3.1230](https://doi.org/10.1609/aimag.v17i3.1230) .
- [94] FAYYAD, U.; STOLORZ, P.: *Data mining and KDD: Promise and challenges*. *Future Generation Computer Systems* Bd. 13 (1997) Nr. 2–3, S. 99–115. DOI: [10.1016/S0167-739X\(97\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0167-739X(97)00015-0) .
- [95] BEIERLE, C.; KERN-ISBERNER, G.: *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. DOI: [10.1007/978-3-8348-2300-7](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2300-7) .
- [96] SIMPSON, T. W.; POPLINSKI, J. D.; KOCH, P. N.; ALLEN, J. K.: *Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations*. *Engineering with Computers* Bd. 17 (2001) Nr. 2, S. 129–150. DOI: [10.1007/plo0007198](https://doi.org/10.1007/plo0007198) .



- [97] AHMED, S.; WALLACE, K. M.; BLESSING, L. T.: Understanding the differences between how novice and experienced designers approach design tasks. *Research in Engineering Design* Bd. 14 (2003) Nr. 1, S. 1–11. DOI: [10.1007/s00163-002-0023-z](https://doi.org/10.1007/s00163-002-0023-z) .
- [98] FISHER, R. A.: *The design of experiments*. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1935. OCLC: [250600649](https://oclc.org/number/oclc/250600649) .
- [99] SIEBERTZ, K.; VAN BEBBER, D.; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplannung: Design of Experiments (DoE)*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. DOI: [10.1007/978-3-642-05493-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-05493-8) .
- [100] TAN, P.-N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V.: *Introduction to Data Mining*. 1. Auflage. Boston: Pearson, 2006. ISBN: [0-321-42052-7](https://www.pearson.com/de/9780321420527) .
- [101] KNOBLOCH, B.: *Der Data-Mining-Ansatz zur Analyse betriebswirtschaftlicher Daten*. Reihe Bamberger Beiträge zur Wirtschaftsinformatik, Nr. 58. Bamberg: Otto-Friedrich-Universität Bamberg, 2000.
- [102] LINOFF, G. S.; BERRY, M. J. A.: *Data mining techniques: for marketing, sales, and customer relationship management*. 3. Auflage. Indianapolis/IN/Vereinigte Staaten: Wiley, 2011. ISBN: [978-0-470-65093-6](https://www.wiley.com/de/9780470650936) .
- [103] BIGUS, J. P.: *Data Mining With Neural Networks: Solving Business Problems from Application Development to Decision Support*. New York/NY/Vereinigte Staaten: McGraw-Hill, 1996. ISBN: [0-07-005779-6](https://www.mhprofessional.com/9780070057796) .
- [104] ESTER, M.; SANDER, J.: *Knowledge Discovery in Databases: Techniken und Anwendungen (German Edition)*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. DOI: [10.1007/978-3-642-58331-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-58331-5) .
- [105] PIATETSKY-SHAPIO, G.: Knowledge discovery in databases: 10 years after. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter* Bd. 1 (2000) Nr. 2, S. 59–61. DOI: [10.1145/846183.846197](https://doi.org/10.1145/846183.846197) .
- [106] MARISCAL, G.; MARBÁN, Ó.; FERNÁNDEZ, C.: A survey of data mining and knowledge discovery process models and methodologies. *The Knowledge Engineering Review* Bd. 25 (2010) Nr. 2, S. 137–166. DOI: [10.1017/s0269888910000032](https://doi.org/10.1017/s0269888910000032) .
- [107] CHAPMAN, P.; CLINTON, J.; KERBER, R.; KHABAZA, T.; REINARTZ, T.; SHEARER, C.; WIRTH, R.: *CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide*. Techn. Ber. The CRISP-DM consortium, 08/2000.


- [108] WITTEN, I. H.; FRANK, E.; HALL, M. A.; PAL, C. J.: Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. 4. Auflage. Cambridge/MA/Vereinigte Staaten: Morgan Kaufmann, 2017. ISBN: [978-0-12-804291-5](#) .
- [109] BOURIER, G.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik. Wiesbaden: Springer, 2013. DOI: [10.1007/978-3-658-01447-6](#) .
- [110] OTTE, R.; OTTE, V.; KAISER, V.: Data Mining für die industrielle Praxis. München: Hanser, 2004. ISBN: [3-446-22465-3](#) .
- [111] MOHR, H.: Wissensnetze heute. In: BEYRER, K.; ANDRITZKY, M. (Hrsg.): Das Netz: Sinn und Sinnlichkeit vernetzter Systeme. Heidelberg: Braus, 2002, S. 115-124.
- [112] SCHNEIDER, T.: Automatisierte Akquisition von erfahrungsbasiertem Fertigungswissen im Werkzeug- und Formenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Chemnitz, 2010. URN: [urn:nbn:de:bsz:chi-qucosa-70916](#) .
- [113] RUSSELL, S.; NORVIG, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3. Auflage. Upper Saddle River/NJ/Vereinigte Staaten: Pearson, 2010. ISBN: [978-0-13-604259-4](#) .
- [114] HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J.: Data Mining: Concepts and Techniques, Second Edition. 2. Auflage. San Francisco/CA/Vereinigte Staaten: Morgan Kaufmann, 2006. ISBN: [978-1-55860-901-3](#) .
- [115] MICHALSKI, R. S.: A theory and methodology of inductive learning. Artificial Intelligence Bd. 20 (1983) Nr. 2, S. 111-161. DOI: [10.1016/0004-3702\(83\)90016-4](#) .
- [116] PETERSOHN, H.: Data Mining: Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur. München, Wien: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2005. DOI: [10.1524/9783486593334](#) .
- [117] KLEIJNEN, J. P. C.: Statistical Tools for Simulation Practitioners (Statistics: a Series of Textbooks and Monographs). New York: Dekker, 1987. ISBN: [0-8247-7333-0](#) .
- [118] PAWLOW, I. P.: Conditional reflexes: An investigation of the physiological activity of the cerebral cortex. London: Oxford University Press, 1928. OCLC: [30729264](#) .
- [119] ERTEL, W.: Grundkurs Künstliche Intelligenz. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. DOI: [10.1007/978-3-658-13549-2](#) .








- [120] SILVER, D.; SCHRITTWIESER, J.; SIMONYAN, K.; ANTONOGLU, I.; HUANG, A.; GUEZ, A.; HUBERT, T.; BAKER, L.; LAI, M.; BOLTON, A.; CHEN, Y.; LILICRAP, T.; HUI, F.; SIFRE, L.; VAN DEN DRIESSCHE, G.; GRAEPEL, T.; HASSABIS, D.: Mastering the game of Go without human knowledge. *Nature Bd.* 550 (2017) Nr. 7676, S. 354–359. DOI: [10.1038/nature24270](https://doi.org/10.1038/nature24270) .
- [121] SCHMIDHUBER, J.: On Learning to Think: Algorithmic Information Theory for Novel Combinations of Reinforcement Learning Controllers and Recurrent Neural World Models. *Techn. Ber.* 2015. ARXIV: [1511.09249](https://arxiv.org/abs/1511.09249) .
- [122] FAHRMEIR, L.; KNEIB, T.; LANG, S.: *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen.* 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-642-01837-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01837-4) .
- [123] BOX, G. E. P.; WILSON, K. B.: On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* Bd. 13 (1951) Nr. 1, S. 1–45.
- [124] GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A.: *Deep Learning.* Cambridge/MA/Vereinigte Staaten: MIT Press, 2016. ISBN: [978-0-262-03561-3](https://www.isbn-international.org/product/9780262035613) .
- [125] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.: *Applied Statistics and Probability for Engineers.* New York/NY/Vereinigte Staaten: Wiley, 2002. ISBN: [0-471-20454-4](https://www.isbn-international.org/product/0471204544) .
- [126] MAYER, D. G.; BUTLER, D. G.: Statistical validation. *Ecological Modelling* Bd. 68 (1993) Nr. 1–2, S. 21–32. DOI: [10.1016/0304-3800\(93\)90105-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90105-2) .
- [127] WILLETT, J. B.; SINGER, J. D.: Another cautionary note about R^2 : Its use in weighted least-squares regression analysis. *The American Statistician* Bd. 42 (1988) Nr. 3, S. 236–238. DOI: [10.1080/00031305.1985.10479448](https://doi.org/10.1080/00031305.1985.10479448) .
- [128] SPIESS, A.-N.; NEUMEYER, N.: An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. *BMC Pharmacol* Bd. 10 (2010) Nr. 1, S. 1–11. DOI: [10.1186/1471-2210-10-6](https://doi.org/10.1186/1471-2210-10-6) .
- [129] MOST, T.; WILL, J.: Recent advances in Meta-model of Optimal Prognosis. In: *Proceedings of the Weimar Optimization and Stochastic Days 7.0 (WOST 2010).* 21. – 22. 10. 2010, Weimar. 2010.

- [130] CHEN, C.-H.; HÄRDLE, W. K.; UNWIN, A. (Hrsg.): Handbook of data visualization. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. DOI: [10.1007/978-3-540-33037-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-33037-0) .
- [131] CLEVELAND, W. S.; MCGILL, R.: Graphical Perception: The Visual Decoding of Quantitative Information on Graphical Displays of Data. Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General) Bd. 150 (1987) Nr. 3, S. 192–229. DOI: [10.2307/2981473](https://doi.org/10.2307/2981473) .
- [132] SARKAR, S.; JIN, X.; RAY, A.: Data-Driven Fault Detection in Aircraft Engines With Noisy Sensor Measurements. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Bd. 133 (2011) Nr. 8, S. 081602-1–10. DOI: [10.1115/1.4002877](https://doi.org/10.1115/1.4002877) .
- [133] AGRAWAL, R.; IMIELINSKI, T.; SWAMI, A.: Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases. ACM SIGMOD Record Bd. 22 (1993) Nr. 2, S. 207–216. DOI: [10.1145/170036.170072](https://doi.org/10.1145/170036.170072) .
- [134] FORBES: Birth of a legend. Forbes Inc. 06. 04. 1998. URL: <https://www.forbes.com/forbes/1998/0406/6107128s1.html>  [Abgerufen am: 05. 12. 2017].
- [135] BLATTBERG, R. C.; KIM, B.-D.; NESLIN, S. A.: Database Marketing: Analyzing and Managing Customers. New York/NY/Vereinigte Staaten: Springer, 2008. DOI: [10.1007/978-0-387-72579-6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-72579-6) .
- [136] PADMANABHAN, B.; TUZHILIN, A.: Unexpectedness as a measure of interestingness in knowledge discovery. Decision Support Systems Bd. 27 (1999) Nr. 3, S. 303–318. DOI: [10.1016/S0167-9236\(99\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(99)00053-6) .
- [137] TIAN, J. F.; LI, L. X.: Applied Research on Client Identification Based on Association Rules. Applied Mechanics and Materials Bd. 66–68 (2011). TAN, H. (Hrsg.), S. 432–435. DOI: [10.4028/www.scientific.net/amm.66-68.432](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.66-68.432) .
- [138] ALI, K.; MANGANARIS, S.; SRIKANT, R.: Partial Classification Using Association Rules. In: HECKERMAN, D. E. (Hrsg.): Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'97). 14. – 17. 08. 1997, Newport Beach/CA/Vereinigte Staaten. Menlo Park/CA/Vereinigte Staaten: AAAI Press, 1997, S. 115–118.
- [139] KUMAR, S.; TOSHNIWAL, D.: A data mining approach to characterize road accident locations. Journal of Modern Transportation Bd. 24 (2016) Nr. 1, S. 62–72. DOI: [10.1007/s40534-016-0095-5](https://doi.org/10.1007/s40534-016-0095-5) .







- [140] BRIN, S.; MOTWANI, R.; SILVERSTEIN, C.: Beyond market baskets: generalizing association rules to correlations. *ACM SIGMOD Record Bd.* 26 (1997) Nr. 2, S. 265–276. DOI: [10.1145/253262.253327](https://doi.org/10.1145/253262.253327) .
- [141] LIN, W.-Y.; TSENG, M.-C.; SU, J.-H.: A Confidence-Lift Support Specification for Interesting Associations Mining. In: *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002, S. 148–158. DOI: [10.1007/3-540-47887-6_14](https://doi.org/10.1007/3-540-47887-6_14) .
- [142] SHAHBAZ, M.; SRINIVAS, M.; HARDING, J. A.; TURNER, M.: Product Design and Manufacturing Process Improvement Using Association Rules. *Journal of Engineering Manufacture Bd.* 220 (2006) Nr. 2, S. 243–254. DOI: [10.1243/095440506x78183](https://doi.org/10.1243/095440506x78183) .
- [143] TIBSHIRANI, R.; WALTHER, G.; HASTIE, T.: Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) Bd.* 63 (2001) Nr. 2, S. 411–423. DOI: [10.1111/1467-9868.00293](https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293) .
- [144] AGGARWAL, C. C.: *Data Mining: The Textbook*. Cham/Schweiz: Springer, 2015. DOI: [10.1007/978-3-319-14142-8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14142-8) .
- [145] WALLIS, R.; EROHIN, O.; STROMBERGER, F.; DEUSE, J.: Data Mining Application in Digital Process Planning: RapidMiner in Automotive Industry. In: FISCHER, S.; MIERSWA, I.; MOREIRA, J. M.; SOARES, C. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th RapidMiner Community Meeting and Conference (RCOMM 2013)*. 27. – 30. 08. 2013, Oporto/Portugal. Aachen: Shaker, 2013, S. 165–174.
- [146] ALBERS, A.; BURSAC, N.; WINTERGERST, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: BINZ, H.; BERTSCHE, B.; BAUER, W.; ROTH, D. (Hrsg.): *Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP2015)*. 19. 06. 2015, Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer IAO, 2015. FRAUNHOFER: [H-56207](https://doi.org/10.56207) .
- [147] BURSAĆ, N.: *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie, 2016. DOI: [10.5445/IR/1000054484](https://doi.org/10.5445/IR/1000054484) .








- [148] ABRAMOVICI, M.; NEUBACH, M.; FATHI, M.; HOLLAND, A.: Knowledge-Based Feedback of Product Use Information into Product Development. In: NORELL BERGENDAHL, M.; GRIMHEDEN, M.; LEIFER, L.; SKOGSTAD, P.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): DS 58-8: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design. Bd. 8: Design Information and Knowledge. 24. – 27. 08. 2009, Palo Alto/CA/Vereinigte Staaten. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2009, S. 227–238. DESIGNSOCIETY: [28816](#) .
- [149] ABRAMOVICI, M.; FATHI, M.; HOLLAND, A.; NEUBACH, M.: Integration von Feedbackdaten aus der Produktnutzungsphase im Rahmen des PLM-Konzepts. In: BICHLER, M.; KRČMAR, H.; LECHNER, U.; MATTHES, F.; HESS, T.; SPEITKAMP, B.; WOLF, P.; PICOT, A. (Hrsg.): Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2008. 26. – 28. 02. 2008, Garching. Berlin: GITO, 2008, S. 531–542.
- [150] ABRAMOVICI, M.; LINDNER, A.: Providing product use knowledge for the design of improved product generations. CIRP Annals Bd. 60 (2011) Nr. 1, S. 211–214. DOI: [10.1016/j.cirp.2011.03.103](#) .
- [151] DENKENA, B.; MÖRKE, T.; KRÜGER, M.; SCHMIDT, J.; BOUJNAH, H.; MEYER, J.; GOTTWALD, P.; SPITSCHAN, B.; WINKENS, M.: Development and first applications of gentelligent components over their lifecycle. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Bd. 7 (2014) Nr. 2, S. 139–150. DOI: [10.1016/j.cirpj.2013.12.006](#) .
- [152] LACHMAYER, R.; MOZGOVA, I.; REIMCHE, W.; COLDITZ, F.; MROZ, G.; GOTTWALD, P.: Technical Inheritance: A Concept to Adapt the Evolution of Nature to Product Engineering. Procedia Technology Bd. 15 (2014), S. 178–187. DOI: [10.1016/j.protcy.2014.09.070](#) .
- [153] GOTTWALD, P. R.: Prozess einer generationsübergreifenden Produktentwicklung durch technische Vererbung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Hannover, 2016. ISBN: [978-3-95900-067-3](#) .
- [154] LACHMAYER, R.; GOTTWALD, P.: An Approach to Integrate Data Mining into the Development Process. In: SCHABACKER, M.; GERICKE, K.; SZÉLIG, N.; VAJNA, S. (Hrsg.): Modelling and Management of Engineering Processes: Proceedings of the 3rd International Conference 2013. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, S. 175–185. DOI: [10.1007/978-3-662-44009-4_15](#) .

- [155] HARDING, J. A.; SHAHBAZ, M.; SRINIVAS; KUSIAK, A.: Data Mining in Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Bd. 128 (2006) Nr. 4, S. 969–976. DOI: [10.1115/1.2194554](https://doi.org/10.1115/1.2194554) .
- [156] LIN, H. K.; HARDING, J. A.: A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration. *Computers in Industry* Bd. 58 (2007) Nr. 5, S. 428–437. DOI: [10.1016/j.compind.2006.09.015](https://doi.org/10.1016/j.compind.2006.09.015) .
- [157] GIESS, M. D.; CULLEY, S. J.; SHEPHERD, A.: Informing Design Using Data Mining Methods. In: *ASME DETC 2002: International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Bd. 2: 28th Design Automation Conference. 29. 09. – 02. 10. 2002, Montreal/Québec/Kanada. New York/NY/Vereinigte Staaten: ASME, 2002, S. 207–215. DOI: [10.1115/detc2002/dac-34058](https://doi.org/10.1115/detc2002/dac-34058) .
- [158] ISHINO, Y.; JIN, Y.: Data Mining for Knowledge Acquisition in Engineering Design. In: BRAHA, D. (Hrsg.): *Data Mining for Design and Manufacturing: Methods and Applications*. Dordrecht/Niederlande: Springer, 2001, S. 145–160. DOI: [10.1007/978-1-4757-4911-3_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4911-3_6) .
- [159] ROMANOWSKI, C. J.; NAGI, R.: A Data Mining-Based Engineering Design Support System: A Research Agenda. In: BRAHA, D. (Hrsg.): *Data Mining for Design and Manufacturing: Methods and Applications*. Dordrecht/Niederlande: Springer, 2001, S. 161–178. DOI: [10.1007/978-1-4757-4911-3_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4911-3_7) .
- [160] ROMANOWSKI, C. J.; NAGI, R.: A Data Mining Approach to Forming Generic Bills of Materials in Support of Variant Design Activities. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* Bd. 4 (2004) Nr. 4, S. 316. DOI: [10.1115/1.1812556](https://doi.org/10.1115/1.1812556) .
- [161] ROMANOWSKI, C. J.; NAGI, R.: On Comparing Bills of Materials: A Similarity/ Distance Measure for Unordered Trees. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* Bd. 35 (2005) Nr. 2, S. 249–260. DOI: [10.1109/tsmca.2005.843395](https://doi.org/10.1109/tsmca.2005.843395) .
- [162] ROMANOWSKI, C. J.: A data mining-based engineering design support system. Dissertation, Department of Industrial Engineering, State University of New York at Buffalo, 2004. OCLC: [56400747](https://oclc.org/number/56400747) .
- [163] DRUCKER, P. F.: *Post-capitalist Society*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993. ISBN: [0-7506-0921-4](https://www.isbn-international.org/number/0-7506-0921-4) .






- [164] LASSMANN, W. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik: Nachschlagewerk für Studium und Praxis. 1. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2006. DOI: [10.1007/978-3-8349-9152-2](https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9152-2) .
- [165] BITKOM: Big-Data-Technologien – Wissen für Entscheider: Leitfaden. Techn. Ber. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (BITKOM), 02/2014.
- [166] CHEN, M.; MAO, S.; LIU, Y.: Big Data: A Survey. Mobile Networks and Applications Bd. 19 (2014) Nr. 2, S. 171–209. DOI: [10.1007/s11036-013-0489-0](https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0) .
- [167] VDI 5610-1:2009-03: Wissensmanagement im Ingenieurwesen: Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Berlin: Beuth.
- [168] VDI 5610-2:2017-05: Wissensmanagement im Ingenieurwesen: Wissensbasierte Konstruktion (KBE). Berlin: Beuth.
- [169] AHMED, S.; BLESSING, L.; WALLACE, K.: The relationships between data, information and knowledge based on a preliminary study of engineering designers. In: Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference (DETC99/DTM-8754). 12. – 15. 09. 1999, Las Vegas/NV/Vereinigte Staaten. New York/NY/Vereinigte Staaten: ASME, 1999, S. 1–10.
- [170] ROTH, D.; BINZ, H.; WATTY, R.: Generic structure of knowledge within the product development process. In: MARJANOVIC, D.; STORGA, M.; PAVKOVIC, N.; BOJCETIC, N. (Hrsg.): DS 60: Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference. 17. – 20. 05. 2010, Dubrovnik/Kroatien. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2010, S. 1681–1690. DESIGNSOCIETY: [29514](https://doi.org/10.1007/978-3-8322-6825-1) .
- [171] THEL, M.: Wissensstrukturierung und -repräsentation im Produktentwicklungsprozess. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt, 2007. ISBN: [978-3-8322-6825-1](https://doi.org/10.1007/978-3-8322-6825-1) .
- [172] SCHNAUFFER, H.-G.; STIELER-LORENZ, B.; PETERS, S.: Wissen vernetzen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. DOI: [10.1007/978-3-642-17031-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17031-7) .
- [173] NONAKA, I.: A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation. Organization Science Bd. 5 (1994) Nr. 1, S. 14–37. DOI: [10.1287/orsc.5.1.14](https://doi.org/10.1287/orsc.5.1.14) . JSTOR: [2635068](https://www.jstor.org/stable/2635068) .







- [174] VON KROGH, G.; TAKEUCHI, H.; KASE, K.; CANTÓN, C. G. (Hrsg.): Towards Organizational Knowledge: The Pioneering Work of Ikujiro Nonaka. Houndmills, Basingstoke, Hampshire/England: Palgrave Macmillan, 2013. DOI: [10.1057/9781137024961](https://doi.org/10.1057/9781137024961) .
- [175] MERTINS, K.; SEIDEL, H. (Hrsg.): Wissensmanagement im Mittelstand: Grundlagen - Lösungen - Praxisbeispiele. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-540-69363-5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69363-5) .
- [176] ORTH, R.; VOIGT, S.; KOHL, I.: Praxisleitfaden Wissensmanagement: prozessorientiertes Wissensmanagement nach dem ProWis-Ansatz einführen. Stuttgart: Fraunhofer, 2011. URN: [urn:nbn:de:0011-n-1924776](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0011-n-1924776) .
- [177] TURKI, T.; ALBERS, A.: Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung. Konstruktion Bd. 3 (2014), S. 85–90.
- [178] GRONAU, N.; FRÖMING, J.: KMDL® Eine semiformale Beschreibungssprache zur Modellierung von Wissenskonversionen. Wirtschaftsinformatik Bd. 48 (2006) Nr. 5, S. 349–360. DOI: [10.1007/s11576-006-0080-4](https://doi.org/10.1007/s11576-006-0080-4) .
- [179] LUFT, T.; WARTZACK, S.: Requirement Analysis for Contextual Management and Supply of Process- and Design Knowledge – a Case Study. In: DORIAN, M.; MARIO, S.; NEVEN, P.; NENAD, B. (Hrsg.): DS 70: Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference. 21. – 24. 05. 2012, Dubrovnik/Kroatien. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2012, S. 1515–1524. DESIGNSOCIETY: [32121](https://designsociety.org/32121) .
- [180] ALBERS, A.; BURSAC, N.; URBANEC, J.; LÜDCKE, R.; RACHENKOVA, G.: Knowledge Management in Product Generation Development – an empirical study. In: WARTZACK, S.; KRAUSE, D.; PAETZOLD, K. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 25. DfX-Symposium. 01. – 02. 10. 2014, Bamberg. Hamburg: TuTech, 2014, S. 13–24. DESIGNSOCIETY: [36706](https://designsociety.org/36706) .
- [181] VDI/VDE 2621:1996-12: Qualitätsmanagement mit Wissensbasierten Systemen: Anwenderleitfaden. Berlin: Beuth.
- [182] LUTZ, C.: Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individueller Produkte: Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme in die Konstruktion. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Technische Universität Wien, 2011. URN: [urn:nbn:at:at-ubtuw:1-42805](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-42805) .

- [183] RAULEFS, P.: Expertensysteme. In: BIBEL, W.; SIEKMANN, J. H. (Hrsg.): Künstliche Intelligenz. Informatik-Fachberichte. Bd. 59. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982, S. 61–98. DOI: [10.1007/978-3-642-68828-7_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-68828-7_2) .
- [184] BUCHANAN, B. G.; BARSTOW, D.; BECHTAL, R.; BENNETT, J.; CLANCEY, W.; KULIKOWSKI, C.; MITCHELL, T.; WATERMAN, D. A.: Constructing an Expert System. In: HAYES-ROTH, F.; WATERMAN, D. A.; LENAT, D. B. (Hrsg.): Building Expert Systems. London: Addison-Wesley, 1983, S. 127–167.
- [185] KURBEL, K.: Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen: Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer, 1992. DOI: [10.1007/978-3-642-58120-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-58120-5) .
- [186] FEIGENBAUM, E. A.: The art of artificial intelligence: themes and case studies of knowledge engineering. In: Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-'77). Bd. 2. 22. – 25. 08. 1977, Cambridge/MA/Vereinigte Staaten. San Francisco/CA/Vereinigte Staaten: Stanford University, Department of Computer Science, 1977, S. 1014–1029. DOI: [10.21236/ada046289](https://doi.org/10.21236/ada046289) .
- [187] VDI 2889:1998-04: Einsatz wissensbasierter Diagnosemethoden und -systeme in der Instandhaltung. Berlin: Beuth.
- [188] GADATSCH, A.: Grundkurs Geschäftsprozess-Management: Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: eine Einführung für Studenten und Praktiker. 7. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2013. DOI: [10.1007/978-3-8348-2428-8](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2428-8) .
- [189] SCHNÄGELBERGER, S.: Umfrage Status Quo Prozessmanagement 2008/2009. Techn. Ber. BPM&O Architects GmbH, 11/2009.
- [190] STOKES, M.: Managing engineering knowledge: MOKA: methodology for knowledge based engineering applications. London: Professional Engineering, 2001. ISBN: [978-1-86058-295-0](https://www.isbn-international.org/product/978-1-86058-295-0) .
- [191] KLEUKER, S.: Grundkurs Software-Engineering mit UML. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011. DOI: [10.1007/978-3-8348-9843-2](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9843-2) .








- [192] OVERHAGE, S.; SCHLAUDERER, S.; BIRKMEIER, D.: Sind Ereignisgesteuerte Prozessketten besser für Fachanwender geeignet als UML Aktivitätsdiagramme? Eine empirische Untersuchung. In: BERNSTEIN, A.; SCHWABE, G. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Conference on Wirtschaftsinformatik. Bd. 2. 16. – 18. 02. 2011, Zurich/Schweiz. Raleigh/NC/Vereinigte Staaten: Lulu.com, 2011, S. 745–755.
- [193] HANSMANN, H.; LASKE, M.; LUXEM, R.: Einführung der Prozesse – Prozess-Roll-out. In: BECKER, J.; KUGELER, M.; ROSEMAN, M. (Hrsg.): Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 277–301. DOI: [10.1007/978-3-642-33844-1_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33844-1_8) .
- [194] LEIMEISTER, J. M.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik. 12. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. DOI: [10.1007/978-3-540-77847-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77847-9) .
- [195] MITCHELL, W. J.: Three paradigms for computer-aided design. Automation in Construction Bd. 3 (1994) Nr. 2–3, S. 239–245. DOI: [10.1016/0926-5805\(94\)90023-x](https://doi.org/10.1016/0926-5805(94)90023-x) .
- [196] STADLER, S.; HIRZ, M.: A contribution to advanced knowledge-based design in the development of complex mechanical products. In: LINDEMANN, U.; SRINIVASAN, V.; KIM, Y. S.; LEE, S. W.; CLARKSON, J.; CASCINI, G. (Hrsg.): DS 75-6: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13). Bd. 6: Design Information and Knowledge. 19. – 22. 08. 2013, Seoul/Südkorea. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2013, S. 381–390. DESIGNSOCIETY: [35087](https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.08.007) .
- [197] KOLLMANN, F. G.; SCHÖSSER, T. F.; ANGERT, R.: Praktische Maschinenakustik. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. DOI: [10.1007/3-540-30975-6](https://doi.org/10.1007/3-540-30975-6) .
- [198] RIEG, F.; STEINHILPER, R.: Handbuch Konstruktion. München, Wien: Carl Hanser, 2012. DOI: [10.3139/9783446434035](https://doi.org/10.3139/9783446434035) .
- [199] EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: Integrierte Produktentwicklung. 5. Auflage. München, Wien: Carl Hanser, 2013. DOI: [10.3139/9783446436275](https://doi.org/10.3139/9783446436275) .
- [200] MEERKAMM, H.; WARTZACK, S.: Fertigungsgerechtes Konstruieren – Potenzial und aktuelle Tendenzen. Werkstatt + Betrieb Bd. 133 (2000) Nr. 1-2, S. 24–29.









- [201] VDI 3720-1:2014-06: Konstruktion lärmarmen Maschinen und Anlagen Konstruktionsaufgaben und -methodik. Berlin: Beuth.
- [202] DIN EN ISO 11688-1:2009-11: Akustik – Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte – Teil 2: Planung. Berlin: Beuth.
- [203] GUMMERSBACH, F.: Lärmarm konstruieren XIX – Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten: Ein Beitrag zum systematischen Zugriff auf konstruktive Lärminderungsmöglichkeiten. Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2001. ISBN: 3-89701-665-6 [↗](#).
- [204] DIETZ, P.; GUMMERSBACH, F.: Lärmarm konstruieren XVIII: Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1999. ISBN: 3-89701-525-0 [↗](#).
- [205] EEG:2014-07: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist. 21. 07. 2014. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/ [↗](#) [Abgerufen am: 23. 03. 2018].
- [206] BAYBO:2007-08: Bayerische Bauordnung (BayBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007 (GVBl. S. 588, BayRS 2132-1-1), die zuletzt durch § 2 des Gesetzes vom 12. Juli 2017 (GVBl. S. 375) geändert worden ist. 14. 08. 2007. URL: <http://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBO>true> [↗](#) [Abgerufen am: 23. 03. 2018].
- [207] IEC 61400-11 (2.1):2006-11: Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Berlin: Beuth.
- [208] FGW-1:2008-02: Technische Richtlinie für Windenergieanlagen – Teil 1: Bestimmung der Schallemissionswerte. Berlin: FGW e.V. – Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien.
- [209] HAU, E.: Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-28877-7 [↗](#).
- [210] GASCH, R.; TWELE, J. (Hrsg.): Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 7. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1460-9 [↗](#).
- [211] WAGNER, S.; BAREISS, R.; GUIDATI, G.: Wind Turbine Noise. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996. DOI: 10.1007/978-3-642-88710-9 [↗](#).



- [212] GENG, G.; SPOONER, E.: Cancellation of noise and vibration in modular permanent-magnet wind turbine generators. In: Proceedings of the Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives. 11. – 13. 09. 1995, Durham/Vereinigtes Königreich. London/Vereinigtes Königreich: Institution of Electrical Engineers (IEE), 1995, S. 467–471. DOI: [10.1049/cp:19950916](https://doi.org/10.1049/cp:19950916) .
- [213] PETITJEAN, B.; DROBIETZ, R.; KINZIE, K.: Wind Turbine Blade Noise Mitigation Technologies. In: WTN 2011 – 4th International Meeting on Wind Turbine Noise. 12. – 14. 04. 2011, Rome/Italien. Indianapolis/IN/Vereinigte Staaten: Institute of Noise Control Engineering / Europe, 2011, S. 1–14.
- [214] PINDER, J. N.: Mechanical noise from wind turbines. Wind Engineering Bd. 16 (1992) Nr. 3, S. 158–168.
- [215] DIN 45681:2005-03: Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen. Berlin: Beuth.
- [216] OERLEMANS, S.; FISHER, M.; MAEDER, T.; KÖGLER, K.: Reduction of Wind Turbine Noise Using Optimized Airfoils and Trailing-Edge Serrations. AIAA Journal Bd. 47 (2009) Nr. 6, S. 1470–1481. DOI: [10.2514/1.38888](https://doi.org/10.2514/1.38888) .
- [217] ZORRIASSATINE, F.; WYKES, C.; PARKIN, R.; GINDY, N.: A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture Bd. 217 (2003) Nr. 4, S. 513–530. DOI: [10.1243/095440503321628189](https://doi.org/10.1243/095440503321628189) .
- [218] KERBER, L.: Tonal emission control for wind turbines. Patent, Vereinigte Staaten, US 8021110 (B2), 20. 09. 2011. PATENT: [US8021110B2](https://patents.google.com/patent/US8021110B2) .
- [219] MITSCH, F.; HANUS, K.-H.: Schwingungs- und Schallreduzierung durch den Einsatz einstellbarer Schwingungsdämpfer. In: Schwingungen in Verarbeitungsanlagen, VDI-Berichte 1887. 26. – 27. 04. 2005, Leonberg, VDI-Gesellschaft, 2005, S. 101–114.
- [220] BAUM, G.: Innovationen als Basis der nächsten Industrierevolution. In: SENDLER, U. (Hrsg.): Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 37–53. DOI: [10.1007/978-3-642-36917-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36917-9_3) .







- [221] MÜLLER, P.; PASCH, F.; DREWINSKI, R.; HAYKA, H.: Kollaborative Produktentwicklung und digitale Werkzeuge: Defizite heute – Potenziale morgen; eine Studie der CONTACT Software GmbH, des Fraunhofer IPK und des VDI. Berlin: Fraunhofer IPK, 2013. ISBN: [978-3-00-039111-8](#) .
- [222] LUFT, T.; BOCHMANN, J.; WARTZACK, S.: Enhancing the Flow of Information in the PLM by Using Numerical DSMs – an Industrial Case Study. In: BERNARD, A.; RIVEST, L.; DUTTA, D. (Hrsg.): Product Lifecycle Management for Society (PLM 2013). IFIP Advances in Information and Communication Technology. Bd. 409. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 90–99. DOI: [10.1007/978-3-642-41501-2_10](#) .
- [223] DUCELLIER, G.; CHARLES, S.; EYNARD, B.; CAILLAUD, E.: Traceability of simulation data in a PLM environment: Proposition of a step-based system that support parameter integration. In: MARJANOVIĆ, D. (Hrsg.): DS 36: Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference. 15. – 18. 05. 2006, Dubrovnik/Kroatien. Glasgow/-Vereinigtes Königreich: Design Society, 2006, S. 511–518. DESIGNSOCIETY: [19041](#) .
- [224] OUERTANI, M.Z.; BAĬNA, S.; GZARA, L.; MOREL, G.: Traceability and management of dispersed product knowledge during design and manufacturing. Computer-Aided Design Bd. 43 (2011) Nr. 5, S. 546–562. DOI: [10.1016/j.cad.2010.03.006](#) .
- [225] ROHWEDER, J. P.; KASTEN, G.; MALZAHN, D.; PIRO, A.; SCHMID, J.: Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe. In: HILDEBRAND, K.; GEBAUER, M.; HINRICHS, H.; MIELKE, M. (Hrsg.): Daten- und Informationsqualität: Auf dem Weg zur Information Excellence. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015, S. 25–46. DOI: [10.1007/978-3-658-09214-6_2](#) .
- [226] BACHSCHUSTER, S.: Architektur und Konzept zur Realisierung eines produktspezifisch erweiterbaren Konstruktionssystems. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997. OCLC: [231706867](#) .
- [227] VDI 2209:2009-03: 3-D-Produktmodellierung: Technische und organisatorische Voraussetzungen Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. Berlin: Beuth.

- [228] VAN VLIET, J. W.; VAN LUTTERVELT, C. A.; KALS, H. J. J.: A requirement analysis for DFM design support in a DFX context. In: KALS, H.; VAN HOUTEN, F. (Hrsg.): Integration of Process Knowledge into Design Support Systems. Dordrecht/Niederlande: Springer, 1999, S. 269–278. DOI: [10.1007/978-94-017-1901-8_24](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1901-8_24) .
- [229] ANDERL, R.; TRIPPNER, D. (Hrsg.): STEP Standard for the Exchange of Product Model Data: Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP). Stuttgart, Leipzig: Vieweg+Teubner, 2000. DOI: [10.1007/978-3-322-89096-2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-89096-2) .
- [230] WOLL, R.: Informationsrückführung zur Optimierung der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät 3 – Maschinenbau, Technische Universität Berlin, 1994. ISBN: [3-446-17745-0](https://www.isbn-international.org/product/3-446-17745-0) .
- [231] KARBACH, W.; LINSTER, M.: Wissensakquisition für Expertensysteme: Techniken, Modelle und Softwarewerkzeuge. München: Carl Hanser, 1990. ISBN: [3-446-15979-7](https://www.isbn-international.org/product/3-446-15979-7) .
- [232] ROSE, T.; FÜNFFINGER, M.; KNUBLAUCH, H.; RUPPRECHT, C.: Prozessorientiertes Wissensmanagement. Künstliche Intelligenz (2002) Nr. 1 Intelligente Systeme für das Wissensmanagement, S. 19–24.
- [233] STEINER, R.: Grundkurs Relationale Datenbanken: Einführung in die Praxis der Datenbankentwicklung für Ausbildung, Studium und IT-Beruf. 9. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017. DOI: [10.1007/978-3-658-17979-3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-17979-3) .
- [234] STUDER, T.: Relationale Datenbanken: Von den theoretischen Grundlagen zu Anwendungen mit PostgreSQL. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. DOI: [10.1007/978-3-662-46571-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46571-4) .
- [235] LI, P.; HUYNH, T.; REFORMAT, M.; MILLER, J.: A practical approach to testing GUI systems. Empirical Software Engineering Bd. 12 (2007) Nr. 4, S. 331–357. DOI: [10.1007/s10664-006-9031-3](https://doi.org/10.1007/s10664-006-9031-3) .
- [236] HEINECKE, A. M.: Mensch-Computer-Interaktion: Basiswissen für Entwickler und Gestalter. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. DOI: [10.1007/978-3-642-13507-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-13507-1) .
- [237] DIN EN ISO 9241-110:2008-09: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006). Berlin: Beuth.

- [238] BREITSPRECHER, T.: Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems zur automatischen Akquisition von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, 2019. ISBN: [978-3-18-344901-9](#) .
- [239] HAHLER, M.; GRÜN, B.; HORNIK, K.: arules – A Computational Environment for Mining Association Rules and Frequent Item Sets. Journal of Statistical Software Bd. 14 (2005) Nr. 15. DOI: [10.18637/jss.v014.i15](#) .
- [240] HAHLER, M.; BUCHTA, C.; GRUEN, B.; HORNIK, K.: arules: Mining Association Rules and Frequent Itemsets – R package version 1.6-1. 2018. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=arules>  [Abgerufen am: 18. 05. 2018].
- [241] AGRAWAL, R.; SRIKANT, R.: Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases. In: Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB '94). 12. – 15. 09. 1994, Santiago/Chile. San Francisco/CA/Vereinigte Staaten: Morgan Kaufmann, 1994, S. 487–499.
- [242] NOVAK, P. K.; LAVRAČ, N.; WEBB, G. I.: Supervised Descriptive Rule Discovery: A Unifying Survey of Contrast Set, Emerging Pattern and Subgroup Mining. Journal of Machine Learning Research Bd. 10 (2009), S. 377–403.
- [243] KLEMETTINEN, M.; MANNILA, H.; RONKAINEN, P.; TOIVONEN, H.; VERKAMO, A. I.: Finding interesting rules from large sets of discovered association rules. In: Proceedings of the third international conference on Information and knowledge management (CIKM '94). 29. 11. – 02. 12. 1994, Gaithersburg/MD/Vereinigte Staaten. New York/NY/Vereinigte Staaten: ACM Press, 1994. DOI: [10.1145/191246.191314](#) .
- [244] BAYARDO JR., R. J.; AGRAWAL, R.; GUNOPULOS, D.: Constraint-Based Rule Mining in Large, Dense Databases. Data Mining and Knowledge Discovery Bd. 4 (2000) Nr. 2/3, S. 217–240. DOI: [10.1023/a:1009895914772](#) .
- [245] BANKHOFER, U.; VOGEL, J.: Datenanalyse und Statistik. Wiesbaden: Gabler, 2008. DOI: [10.1007/978-3-8349-9654-1](#) .
- [246] KUCKARTZ, U.; RÄDIKER, S.; EBERT, T.; SCHEHL, J.: Statistik: Eine verständliche Einführung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. DOI: [10.1007/978-3-531-19890-3](#) .







- [247] HAHSLER, M.; HORNIK, K.: New probabilistic interest measures for association rules. *Intelligent Data Analysis* Bd. 11 (2007) Nr. 5, S. 437–455. arXiv: [0803.0966](https://arxiv.org/abs/0803.0966).
- [248] WEBB, G.I.: Discovering Significant Patterns. *Machine Learning* Bd. 68 (2007) Nr. 1, S. 1–33. DOI: [10.1007/s10994-007-5006-x](https://doi.org/10.1007/s10994-007-5006-x) .
- [249] FISHER, R.A.: *Statistical Methods for Research Workers*. 6. Auflage. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1925. OCLC: [43966135](https://oclc.org/number/oclc/43966135) .
- [250] PETERSEN, H.; POON, J.; POON, S.; LOY, C.: Better Rulesets by Removing Redundant Specialisations and Generalisations in Association Rule Mining. *Australasian Journal of Information Systems* Bd. 21 (11/2017). DOI: [10.3127/ajis.v21i10.1542](https://doi.org/10.3127/ajis.v21i10.1542) .
- [251] FAHRMEIR, L.; PIGEOT, I.; TUTZ, G.: *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. DOI: [10.1007/978-3-540-69739-8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69739-8) .
- [252] BRETZ, F.; HOTHORN, T.; WESTFALL, P.: *Multiple Comparisons Using R*. Boca Raton/FL/Vereinigte Staaten: Taylor und Francis Group, 2011. ISBN: [978-1-58488-574-0](https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/978-1-58488-574-0) .
- [253] McLAUGHLIN, M. J.; SAINANI, K. L.: Bonferroni, Holm, and Hochberg Corrections: Fun Names, Serious Changes to P Values. *PM&R* Bd. 6 (06/2014) Nr. 6, S. 544–546. DOI: [10.1016/j.pmrj.2014.04.006](https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2014.04.006) .
- [254] HOLM, S.: A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics* Bd. 6 (1979) Nr. 2, S. 65–70. JSTOR: [4615733](https://www.jstor.org/stable/4615733) .
- [255] BORTZ, J.; SCHUSTER, C.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Lehrbuch mit Online-Materialien*. Springer, 2010. ISBN: [3-642-12769-X](https://www.springer.com/978364212769X) .
- [256] VANHOLLEBEKE, F.: ALARM: Research on wind turbine tonalities. In: *3rd Technology Workshop on Wind Turbine Sound*. 17. – 18. 11. 2016, Gdansk/Polen. 2016.
- [257] DWORSCHAK, F.; WARTZACK, S.: Scenario analysis and potential identification for autonomous design. In: *11th Graz Symposium VIRTUAL VEHICLE*. 15. – 15. 05. 2018, Graz/Österreich. 2018.





- [258] SPRÜGEL, T.; SCHRÖPPEL, T.; WARTZACK, S.: Generic approach to plausibility checks for structural mechanics with deep learning. In: MAIER, A.; ŠKEC, S.; KIM, H.; KOKKOLARAS, M.; OEHMEN, J.; FADEL, G.; SALUSTRI, F.; DER LOOS, M. V. (Hrsg.): DS 87-1: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17). Bd. 1: Resource Sensitive Design, Design Research Applications and Case Studies. 21. – 25. 08. 2017, Vancouver/Kanada. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2017, S. 299–308. DESIGNSOCIETY: [39529](#) .
- [259] PAN, Y.; BURNAP, A.; LIU, Y.; LEE, H.; GONZALEZ, R.; PAPALAMBROS, P. Y.: A Quantitative Model for Identifying Regions of Design Visual Attraction and Application to Automobile Styling. In: MARJANOVIĆ, D.; ŠTORGA, M.; PAVKOVIĆ, N.; BOJČETIĆ, N.; ŠKEC, S. (Hrsg.): DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. 16. – 19. 05. 2016, Dubrovnik/Kroatien. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2016, S. 2157–2174. DESIGNSOCIETY: [39024](#) .
- [260] SAUER, C.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Deep learning in sheet-bulk metal forming part design. In: MARJANOVIĆ, D.; ŠTORGA, M.; ŠKEC, S.; BOJČETIĆ, N.; PAVKOVIĆ, N. (Hrsg.): DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference. 21. – 24. 05. 2018, Dubrovnik/Kroatien. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2018, S. 2999–3010. DOI: [10.21278/idc.2018.0147](https://doi.org/10.21278/idc.2018.0147) .
- [261] PANOV, P.; DŽEROSKI, S.; SOLDATOVA, L.: OntoDM: An Ontology of Data Mining. In: 2008 IEEE International Conference on Data Mining Workshops. 15. – 19. 12. 2008, Pisa/Italien. IEEE, 2008, S. 752–760. DOI: [10.1109/icdmw.2008.62](https://doi.org/10.1109/icdmw.2008.62) .
- [262] PANOV, P.; SOLDATOVA, L. N.; DŽEROSKI, S.: Representing Entities in the OntoDM Data Mining Ontology. In: DŽEROSKI, S.; GOETHALS, B.; PANOV, P. (Hrsg.): Inductive Databases and Constraint-Based Data Mining. New York/NY/Vereinigte Staaten: Springer, 2010, S. 27–58. DOI: [10.1007/978-1-4419-7738-0_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7738-0_2) .
- [263] PANOV, P.; SOLDATOVA, L.; DŽEROSKI, S.: OntoDM-KDD: Ontology for Representing the Knowledge Discovery Process. In: FÜRNKRANZ, J.; HÜLLERMEIER, E.; HIGUCHI, T. (Hrsg.): Discovery Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 126–140. DOI: [10.1007/978-3-642-40897-7_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40897-7_9) .

- [264] TROPSCHUH, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, 1988. OCLC: [645293119](#) .
- [265] WEST, G.; STRACHAN, S.; McDONALD, J.; DUFFY, A. H. B.; FARRELL, J.; GWYN, B.: DEKAS – an evolutionary case-based reasoning system to protection scheme design. In: CULLEY, S.; DUFFY, A.; McMAHON, C.; WALLACE, K. (Hrsg.): WDK 28: Proceedings of ICED 01. Bd. Design Management – Process and Information Issues. 21. – 23. 08. 2001, Glasgow/Vereinigtes Königreich. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2001, S. 123–130.
- [266] NEITZEL, R.: Entwicklung Wissensbasierter Systeme für die Vorrichtungskonstruktion. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 1990. DOI: [10.1007/978-3-322-88805-1](#) .
- [267] FORKEL, M.; GÖBLER, T.: HyperDesign – Eine wissensbasierte Arbeitsumgebung für die Konstruktion. In: PRITSCHOW, G.; SPUR, G.; WECK, M. (Hrsg.): Künstliche Intelligenz in der Fertigungstechnik. Reihe Fortschritte der Fertigung auf Werkzeugmaschinen. München, Wien: Carl Hanser, 1989. Kap. 4.2, S. 135–149. ISBN: [3-446-15792-1](#) .
- [268] CHEMNITIUS, R.: Das wissensbasierte CAD-System ICX zur Entwicklung von Kunststoff-Metall-Klebverbindungen. Dissertation, Fachbereich 17 Werkstoffwissenschaften, Technische Universität Berlin, 1991. ISBN: [3-7983-1437-3](#) .
- [269] EVERSHEIM, W.; NEITZEL, R.: Ein Expertensystem für die Vorrichtungskonstruktion. Konstruktion Bd. 40 (1988), S. 97–101.
- [270] LOHSE, G.; KÜHN, O.: Product and knowledge conserving with the design-support-system "KONUS". In: HUBKA, V. (Hrsg.): WDK 23: Proceedings of ICED 95. 22. – 24. 08. 1995, Prag/Tschechische Republik. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 1995, S. 1443–1448.
- [271] SOMMER, C.: MoKon – ein Ansatz zur wissensbasierten Konfiguration von Variantenerzeugnissen. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, 1993. ISBN: [3-929037-32-7](#) .
- [272] SCHACHT, M.: Methodische Neugestaltung von Normen als Grundlage für eine Integration in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess. Dissertation, Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Technische Universität Berlin, 1991. ISBN: [3-410-12558-2](#) .

- [273] KRATZER, M.; CROSTACK, A.; KADADIHI, R.; RAUSCHER, M.; BINZ, H.; GOEHNER, P.: A concept of direct knowledge acquisition for multi-agent design systems. In: LINDEMANN, U.; SRINIVASAN, V.; KIM, Y. S.; LEE, S. W.; CLARKSON, J.; CASCINI, G. (Hrsg.): DS 75-6: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13). Bd. 6: Design Information and Knowledge. 19. – 22. 08. 2013, Seoul/Südkorea. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2013, S. 219–228. DESIGNSOCIETY: [35071](#) .
- [274] BREITSPRECHER, T.; WARTZACK, S.: Architecture and realization of a self-learning engineering assistance system for the use within sheet-bulk metal forming. In: HANSEN, P. K.; RASMUSSEN, J.; JØRGENSEN, K. A.; TOLLESTRUP, C. (Hrsg.): DS 71: Proceedings of NordDesign 2012, the 9th NordDesign conference. 22. – 24. 08. 2012, Aalborg/Dänemark. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2012. DESIGNSOCIETY: [38528](#) .
- [275] GROEGER, B.: Die Einbeziehung der Wissensverarbeitung in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess. Dissertation, Fachbereich Informatik, Technische Universität Berlin, 1991. ISBN: [3-7983-1490-X](#) .
- [276] LEHMANN, C. M.; ABUOSBA, M.; SCHLINGHEIDER, J.: WISENT – Wissensbasiertes System zum Konfigurieren und Konstruieren. In: CAD in Maschinenbau und Fahrzeugtechnik. 24. – 25. 10. 1990, München. Reihe Datenverarbeitung in der Konstruktion. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990, S. 85–100.
- [277] KATZENBACH, A.; BROCK, H.-J.; MÜLLER, F.: WKS – ein wissensbasiertes Konstruktionssystem für Presswerkzeuge im Automobilbau. In: GESELLSCHAFT ENTWICKLUNG, KONSTRUKTION, VERTRIEB (Hrsg.): Wissensverarbeitung in Entwicklung und Konstruktion: Nutzen und neue Chancen. 20. – 21. 09. 1995, Nürnberg. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995, S. 19–40.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] **KÜSTNER, C.**; BREITSPRECHER, T.; WARTZACK, S.: Design for noise reduction – The architecture of an engineering assistance system for the development of noise-reduced rotating systems. In: LINDEMANN, U.; SRINIVASAN, V.; KIM, Y. S.; LEE, S. W.; CLARKSON, J.; CASCINI, G. (Hrsg.): DS 75-5: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13). Bd. 5: Design for X, Design to X. 19. – 22. 08. 2013, Seoul/Südkorea. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2013, S. 081–090. DESIGNSOCIETY: [34985](#) .
- [P2] **KÜSTNER, C.**; BREITSPRECHER, T.; WARTZACK, S.: Die Auswirkung der Reihenfolge von Mess- und Simulationsdaten auf das Ergebnis der Kreuzvalidierung in KDD Prozessen. In: KRAUSE, D.; PAETZOLD, K.; WARTZACK, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 24. DfX-Symposium. 19. – 20. 09. 2013, Jesteburg. Hamburg: TuTech, 2013, S. 175–186. DESIGNSOCIETY: [35366](#) .
- [P3] **KÜSTNER, C.**; WARTZACK, S.: Wissensbasierte Navigation für die lärmreduzierte Auslegung rotierender Maschinen in der Produktentwicklung. In: WARTZACK, S.; KRAUSE, D.; PAETZOLD, K. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 25. DfX-Symposium. 01. – 02. 10. 2014, Bamberg. Hamburg: TuTech, 2014, S. 313–324. DESIGNSOCIETY: [36732](#) .
- [P4] BAYERBACH, R.; RIBBENTROP, A.; SCHNEIDER, L.; WARTZACK, S.; **KÜSTNER, C.**; MARKIEWICZ, M.: Schlussbericht Forschungs-Verbundprojekt EUREKA-ALARM: Assistenzsystem zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen. Forschungsber. Hamburg: Senvion SE; ESM Energie- und Schwingungstechnik Mitsch GmbH; Novicos GmbH; Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), 31. 08. 2015. OCLC: [956522996](#) .
- [P5] BREITSPRECHER, T.; KESTEL, P.; **KÜSTNER, C.**; SPRÜGEL, T.; WARTZACK, S.: Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozessen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Bd. 110 (2015) Nr. 11, S. 744–750. DOI: [10.3139/104.111423](#) .
- [P6] **KÜSTNER, C.**; WACHSMUTH, P.; WARTZACK, S.: Datenakquisition und -analyse im Assistenzsystem zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen. In: BINZ, H.; BERTSCHE, B.; BAUER, W.; ROTH, D. (Hrsg.): Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP2015). 19. 06. 2015, Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer IAO, 2015. FRAUNHOFER: [H-56207](#) .

- [P7] **KÜSTNER, C.**; WARTZACK, S.: The realization of an engineering assistance system for the development of noise-reduced rotating machines. In: WEBER, C.; HUSUNG, S.; CANTAMESSA, M.; CASCINI, G.; MARJANOVIC, D.; GRAZIOSI, S. (Hrsg.): DS 80-4: Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15). Bd. 4: Design for X, Design to X. 27. – 30. 07. 2015, Milan/Italien. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2015, S. 071–080. DESIGNSOCIETY: [37771](#) .
- [P8] **KÜSTNER, C.**; BEYER, F.; KUMOR, D.; LODERER, A.; WARTZACK, S.; WILLNER, K.; BLUM, H.; RADEMACHER, A.; HAUSOTTE, T.: Simulation-based development of Pareto-optimized tailored blanks for the use within sheet-bulk metal forming. In: MARJANOVIĆ, D.; ŠTORGA, M.; PAVKOVIĆ, N.; BOJČETIĆ, N.; ŠKEC, S. (Hrsg.): DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. 16. – 19. 05. 2016, Dubrovnik/Kroatien. Glasgow/Vereinigtes Königreich: Design Society, 2016, S. 291–300. DESIGNSOCIETY: [38839](#) .
- [P9] **KÜSTNER, C.**; MITSCH, J.; HEGWEIN, M.; MEINTKER, N.; MÖNKS, K.; FRÖHLICH, M.; WARTZACK, S.: Zustandsdiagnose von Maschinen im Kontext von Industrie 4.0 unter Einsatz von Data-Mining Methoden. In: KRAUSE, D.; PAETZOLD, K.; WARTZACK, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 27. DfX-Symposium. 05. – 06. 10. 2016, Jesteburg. Hamburg: TuTech, 2016, S. 169–180. DESIGNSOCIETY: [39404](#) .
- [P10] SAUER, C.; **KÜSTNER, C.**; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Einsatz von Deep Learning zur orts aufgelösten Beschreibung von Bauteileigenschaften. In: KRAUSE, D.; PAETZOLD, K.; WARTZACK, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 28. DfX-Symposium. 04. – 05. 10. 2017, Jesteburg. Hamburg: TuTech, 2017, S. 49–60. DESIGNSOCIETY: [39981](#) .
- [P11] WARTZACK, S.; **KÜSTNER, C.**: Maschinelles Lernen zur schallemissionsarmen Entwicklung von Maschinen: Prognose und Reduzierung der Schallemission am Beispiel von Windenergieanlagen. WiGeP-News Ausg. 2 (11/2017), S. 17.
- [P12] WARTZACK, S.; SAUER, C.; **KÜSTNER, C.**: What does Design for Production mean? – From Design Guidelines to Self-learning Engineering Workbenches. In: MEYER, A.; SCHIRMEYER, R.; VAJNA, S. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Workshop on Integrated Design Engineering. 05. – 07. 04. 2017, Magdeburg. Magdeburg: Universität Magdeburg Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, 2017, S. 93–102.

- [P13] DWORSCHAK, F.; **KÜSTNER, C.**; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Szenario-Analyse zur Digitalisierung und Automatisierung des Produktentwicklungsprozesses. In: RIEG, F.; BRÖKEL, K.; SCHARR, G.; GROTE, K.-H.; MÜLLER, N.; LOHRENGEL, A.; NAGARAJAH, A.; CORVES, B. (Hrsg.): Beiträge zum 16. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2018 (KT2018). 11. – 12. 10. 2018, Bayreuth. Bayreuth: Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, 2018, S. 61–70.





Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] CARTON, B.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Evaluation der Multi-level Transferpfadanalyse Methode am Beispiel einer modernen Windenergieanlage. Unveröffentlichte Masterarbeit Nr. 37/14, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 02/2014.
- [S2] HÄSNER, S.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Entwicklung eines Werkzeugs zur Visualisierung von Akustikdaten. Unveröffentlichte Bachelorarbeit Nr. 181/14, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 09/2014.
- [S3] RAAB, C.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Wissensakquisition in bestehenden Assistenzsystemen – Stand der Wissenschaft. Unveröffentlichte Projektarbeit Nr. 60/14, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 02/2014.
- [S4] SCHMIDTNER, F.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Entwicklung eines Werkzeugs zur Verarbeitung von SKF Betriebszustandsüberwachungsdaten. Unveröffentlichte Bachelorarbeit Nr. 180/14, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 09/2014.
- [S5] WACHSMUTH, P.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Wissensakquisitionskomponenten in bestehenden Assistenzsystemen – Stand der Technik und Forschung. Unveröffentlichte Bachelorarbeit Nr. 183/14, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 10/2014.
- [S6] WISSERNER, B.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Einflüsse auf die Emission von Schall in Windenergieanlagen. Unveröffentlichte Bachelorarbeit Nr. 184/14, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 10/2014.
- [S7] LIEBL, K.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Ermittlung des Einflusses der Produktstruktur von Windenergieanlagen auf deren akustisches Verhalten. Unveröffentlichte Projektarbeit Nr. 91/15, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 04/2015.

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in

- [S8] TIETZ, O.; KÜSTNER, C.; BREITSPRECHER, T.; WARTZACK, S.: Fahr-situationen mit potentiellm Fahrzeugschaden. Unveröffentlichte Masterarbeit Nr. 69/15, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 05/2015.
- [S9] ROPPELT, M.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Umsetzungsmethoden der wissensbasierten Konstruktion im Unternehmen und deren Einführung durch Rollout-Strategien. Unveröffentlichte Masterarbeit Nr. 130/16, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 11/2016.
- [S10] JÄGER, M.; KÜSTNER, C.; WARTZACK, S.: Identifikation und Visualisierung von Assoziationen in Daten mithilfe von Data-Mining Methoden. Unveröffentlichte Projektarbeit Nr. 195/17, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 08/2017.

Bildnachweis

- Das Piktogramm „action/milestone“ aus dem [Oxygen Icon Theme](#) ist unter der [GNU LGPLv3](http://www.gnu.org/copyleft/lesser.html) lizenziert. Es wird in dieser Arbeit als Symbol für ein Arbeitspaket in Bild 41 (S. 105) verwendet.
- Das Piktogramm „action/arrow-right“ aus dem [Oxygen Icon Theme](#) ist unter der [GNU LGPLv3](http://www.gnu.org/copyleft/lesser.html) lizenziert. Es markiert in dieser Arbeit als Symbol den Start einer projektbezogenen Wissensbasis in Bild 60 (S. 155).
- Das Piktogramm „action/flag-green“ aus dem [Oxygen Icon Theme](#) ist unter der [GNU LGPLv3](http://www.gnu.org/copyleft/lesser.html) lizenziert. Es markiert in dieser Arbeit als Symbol das Ende einer projektbezogenen Wissensbasis in Bild 60 (S. 155).
- Das Piktogramm  „cogs“ von [Font Awesome v5.0.0](#) ist unter der [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) lizenziert. Es wird in dieser Arbeit als Symbol für das Produkt in Bild 1 (S. 2), Bild 27 (S. 70), Bild 33 (S. 85), Bild 42 (S. 106) und Bild 58 (S. 146) verwendet.
- Das Piktogramm  „external-link“ von [Font Awesome v4.7.0](#) ist unter der [CC BY 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/) lizenziert. Es wird in dieser Arbeit zur Kennzeichnung von externen Verweisen verwendet.
- Das Piktogramm  „desktop“ von [Font Awesome v5.0.0](#) ist unter der [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) lizenziert. Es wird in dieser Arbeit als Symbol für die Produktentwicklung in Bild 1 (S. 2), Bild 27 (S. 70), Bild 31 (S. 79), Bild 33 (S. 85), Bild 42 (S. 106) und Bild 58 (S. 146) verwendet.
- Das Piktogramm  „industry“ von [Font Awesome v5.0.0](#) ist unter der [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) lizenziert. Es wird in dieser Arbeit als Symbol für den Fertigungsprozess (Fertigung und Montage) von Produkten in Bild 1 (S. 2), Bild 27 (S. 70), Bild 33 (S. 85) und Bild 58 (S. 146) verwendet.
- Die Aufnahmen mit einer akustischen Kamera von einer Windenergieanlage in Bild 63 (S. 160) sind zur Gegenüberstellung entnommen aus [P4].

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozesskette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-
scher Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokusslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und
der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für
die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahliefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlenschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LFT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischeneschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für disk-
ret ereignisorientierte Simulationen in
der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidlinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbauteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißscrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses
zur Verbesserung der tribologischen
Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour
of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung hochfester Aluminiumblech-
bauteile in einem kombinierten Umform-
und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung
in einer hybriden Produktion mittels
betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-348-9

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeingenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1

Abstract

Digital transformation, along with globalization, is a major challenge for companies today. In this change, engineers are challenged with new requirements on technical products and constantly increasing product complexity. Despite the diverse methodologies and tools available to engineers, it is often not possible to identify the root causes for deviating product properties, which prevents or at least makes it more difficult for virtual assurance of product properties in product development. In recent years, methods from the field of machine learning have found their way into product development. Machine learning methods enable the identification of correlations and trends in large data sets. On the one hand, however, product developers lack the methodological competence to develop and conduct analyses using machine learning methods. On the other hand, knowledge is required for data preparation and contextualization of the identified patterns.

In this work, a concept for a knowledge-based engineering assistance system to support data-driven product development and its implementation is presented. By utilizing machine learning methods and their integration into existing product development processes, the potential of data-driven analyses in the context of product properties assurance is revealed.

Der digitale Wandel stellt neben der Globalisierung heutzutage eine große Herausforderung für Unternehmen dar. Die Ingenieure sind in diesem Wandel mit neuen Anforderungen an die technischen Produkte und stetig steigender Produktkomplexität konfrontiert. Trotz der vielseitigen Methoden und Werkzeuge, die den Ingenieuren zur Verfügung stehen, können häufig die Einflüsse auf abweichende Produkteigenschaften nicht benannt werden, wodurch die virtuelle Eigenschaftsabsicherung in der Produktentwicklung verhindert oder zumindest erschwert wird. In den vergangenen Jahren haben Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens ihren Weg in die Produktentwicklung gefunden. Die maschinellen Lernmethoden ermöglichen die Identifikation von Zusammenhängen und Tendenzen in großen Datensätzen. Allerdings fehlt den Produktentwicklern zum einen die Methodenkompetenz zur Entwicklung und Durchführung von Analysen mittels maschineller Lernmethoden. Zum anderen ist Wissen zur vorangestellten Datenaufbereitung und zur Kontextualisierung der identifizierten Muster notwendig. In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept für ein wissensbasiertes Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung und dessen Umsetzung vorgestellt. Mithilfe von maschinellen Lernmethoden und deren Integration in bestehende Produktentwicklungsprozesse wird das Potential der datengetriebenen Analysen im Kontext der Eigenschaftsabsicherung offengelegt.

ISBN 978-3-96147-348-9

