

Hermann Hannes Schmalenbach

**Ontologien zum Bereitstellen von
Gestaltungswissen am Beispiel von
Ingenieurkeramik**

Ontologies for design knowledge retrieval using the
example of advanced ceramics

Band 68

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Forschungsberichte



Hermann Hannes Schmalenbach

**Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen
am Beispiel von Ingenieurkeramik**

Ontologies for design knowledge retrieval using the
example of advanced ceramics

Band 68

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ■ Institut für Produktentwicklung, 2013
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswis- sen am Beispiel von Ingenieurkeramik

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.- Ing Hermann Hannes Schmalen-
bach
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juli 2013

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Binz

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotential aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie und Monitoring von Lager- und Funktionsreibsystemen, die NVH mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und am Gesamtfahrzeug, die Mikrosystemtechnik mit dem Fokus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 68

Die Komplexität moderner Produkte birgt zunehmend neue Aspekte für die Produktentwicklung. Fast alle Produkte sind heute mechatronische Lösungen, das heißt, Lösungsbeiträge aus unterschiedlichsten Disziplinen, wie dem Maschinenbau, der Elektrotechnik und der Informatik werden zu ganzheitlichen Produktlösungen synthetisiert. Aber nicht nur diese interdisziplinäre Herausforderung der Mechatronik stellt den Konstrukteur solcher Systeme vor neue Herausforderungen, sondern auch innerhalb der Fachdisziplinen ist die Vielfalt möglicher Lösungen geradezu explodiert, sodass die Lösungsräume nur noch schwer zu erfassen sind. Das Beispiel der Werkstoffe und Materialien für die Konstruktion technischer Systeme sei hier exemplarisch diskutiert. In den letzten Jahren ist die Vielfalt unterschiedlicher Werkstofflösungen nahezu exponentiell gestiegen. Nicht nur die klassischen Stähle, die sich zu immer weiter optimierten Lösungen entwickelt haben, sondern auch neue Werkstoffe, wie die Elastomere, die Kunststoffe oder auch Keramiken, bieten dem Konstrukteur ein erheblich erweitertes Leistungspotenzial bei der Gestaltung seiner technischen Lösungen. Diese Werkstoffe sind aber im Allgemeinen auch verknüpft mit Randbedingungen, Einschränkungen, gestalterischen Besonderheiten, sodass für ihre Nutzung ein umfangreiches Wissen erforderlich ist. Dieses Wissen genau in richtigen Zeitpunkt bei der Systemsynthese für den Systemkonstrukteur zur Verfügung zu haben, ist eine große Herausforderung. Verschiedene Ansätze des Wissensmanagements versuchen hier zu unterstützen. Um dies tun zu können, ist es allerdings zwingend erforderlich, den Charakter des Wissens in Produktentstehungsprozessen zu beschreiben, zu erfassen und zu definieren. Auch ist es zwingend notwendig, neue Ansätze zur zumindest teilautomatisierten Verarbeitung dieser vielfältigen Informationen zu finden. Ein möglicher Ansatz sind sog. Ontologien, also geschlossen definierte Sprachkonstrukte, mit denen man technische Inhalte beschreibt und so auch leicht wiederauffindbar macht. Erste Ansätze zur Nutzung solcher Ontologien im Umfeld der Produktentwicklung sind bekannt. Allerdings stellt die Ontologieentwicklung immer noch eine große Herausforderung dar. In einer breiten Praxis in den Unternehmen sind diese Konzepte bisher noch nicht angekommen. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Hannes Schmalenbach an.

Er hat sich zum Ziel gesetzt, einen Ansatz zur Entwicklung einer Ontologie zu erforschen, der ein gemeinsames Verständnis zu interdisziplinär verteiltem und teilweise implizitem Gestaltungswissen in der Produktentwicklung abbildet und dieses Wissen über ein Software-System bereitstellt. Dazu nutzt er als Wissensobjekt das Gestaltungswissen für die Nutzung von technischen Keramiken, wie es im Sonderforschungsbereich 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf

Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ erarbeitet wurde. An diesen konkreten Wissensobjekten wird ein Ansatz zur Ontologieentwicklung mit dem Fokus auf Produktentstehungsprozesse erarbeitet und der bisherige Stand der Ontologieentwicklung und -umsetzung in Software basierte Werkzeuge in seiner Wirksamkeit untersucht und beurteilt. Als Fazit der Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Hannes Schmalenbach stellt er fest, dass Ontologie zwar ein Potential zum Wissensmanagement in der Produktentwicklung haben, dass aber die bestehenden Softwarelösungen noch zu wenig flexibel sind und das der Einsatz in der Praxis wegen des enormen Aufwandes bei der Erstellung immer auf kleinere, spezifische Wissensgebiete beschränkt bleiben muss. Eine komplette „Maschinenbau-Ontologie“ scheint aus heutiger Sicht nicht realisierbar.

August, 2013

Albert Albers

Kurzfassung

Bedingt durch immer komplexere Produkte und Produktentstehungsprozesse hat sich der effiziente Umgang mit Wissen zu dem entscheidenden Wettbewerbsfaktor für Unternehmen entwickelt. Der Wissensaustausch in umfangreichen interdisziplinären Projekten an mehreren Standorten gleichzeitig stellt dabei eine große Herausforderung dar. Die Unterstützung durch rechnerbasierte Systeme leistet dazu einen substanziellen Beitrag.

Die rasante Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie in den letzten Jahrzehnten hat das Wissensmanagement maßgeblich beeinflusst. Heute steht Information in nahezu beliebigem Umfang weltweit zur Verfügung. Es hat sich gezeigt, dass nicht mehr ein Informationsmangel, sondern vielmehr ein Informationsüberschuss problematisch für das Wissensmanagement ist. Konstrukteure müssen aus einer Vielzahl an Informationen solche herausfinden, die es ihnen ermöglichen, ihren Wissensbedarf auf Basis ihrer Problemstellung abzudecken und kreativ in innovative Produkte umzusetzen. Neue Lösungsansätze dazu werden aus der Informatik bereitgestellt. Ihr Transfer in die Produktentwicklung kann jedoch nur am Beispiel konkreter Problemstellungen erfolgen. Ein solches Beispiel ist die Bereitstellung des im Sonderforschungsbereich 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ generierten keramikspezifischen Gestaltungswissens für Konstrukteure.

Ziel der Arbeit ist es, die Möglichkeit der Bereitstellung von Gestaltungswissen in der Produktentwicklung durch Ontologien, einer Technologie des Web 3.0, grundlegend zu analysieren und eine spezifische Vorgehensweise zur Ontologieentwicklung abzuleiten. Deren Anwendung wird am konkreten Beispiel der Aufgabenstellung aus dem Sonderforschungsbereich bei der Entwicklung eines ontologiebasierten Keramik-Konstruktionsinformationssystems auf Basis existierender Softwarelösungen gezeigt. Anhand der Umsetzung an dem konkreten Beispiel im Ingenieursbereich werden Potentiale und Grenzen von Ontologien untersucht und Hinweise abgeleitet, wie diese genutzt werden können. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestehen neben der spezifischen Vorgehensweise auch aus den Erfahrungen des Ontologieentwicklungsprojekts. Es zeigt sich, dass keramikspezifisches Gestaltungswissen grundsätzlich in Ontologien abgebildet und so das Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses als Basis für Wissensaustausch unterstützt werden kann. Weiterhin wird jedoch auch klar, dass die umfassende rechnerbasierte Bereitstellung von Gestaltungswissen durch Ontologien noch durch technische Möglichkeiten begrenzt ist.

Insgesamt leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Integration von Ontologien als Werkzeug des Wissensmanagements in die Produktentstehung.

Abstract

Due to the growing complexity of the products and product development processes the efficient handling of knowledge has become the decisive competitive factor for industrial companies. Exchanging knowledge in comprehensive interdisciplinary projects incorporating different facilities poses a great challenge. The support by computer based systems provides an essential contribution to overcome this challenge.

Knowledge management has been significantly influenced by the rapid evolution of information and communication technologies within the last decades. Today, the global availability of information is nearly unlimited. It has appeared that not a lack of information is a problem of knowledge management. Instead, a spillover of information causes a challenge for knowledge management. Because of this, design engineers have to select from a multitude of information exactly those that enable them to cover their knowledge needs and that can be applied in innovative products. Informatics research offers new approaches for this problem. The implementation of those approaches can only be accomplished by applying them within existing practical problem assignments. The representation and retrieval of the ceramic specific design knowledge generated in the course of the collaborative research center CRC 483 "High performance sliding and friction systems based on advanced ceramics" represents such a problem assignment.

The research objectives of the presented work are to analyze the possibilities of representing and retrieving design knowledge in product development using ontologies, a Web 3.0 technology, and the definition of a specifically adapted approach for ontology development. This approach is exemplarily applied to the problem assignment of the CRC 483 to develop an ontology-based ceramic-design information system (K-KIS) using existing software solutions. The potentials and limits of ontologies are analyzed within this exemplary application and advices for a successful use of ontologies are derived. The results of the presented work are the specific ontology development approach on ontology development as well as the experiences of the ontology development project itself. It becomes apparent that ceramic specific design knowledge generally can be represented within an ontology and that the creation of a common understanding as a basis of knowledge exchange can be supported in this way. Furthermore it becomes clear, that comprehensive representation and retrieval of design knowledge using ontologies is still limited by technical issues.

Altogether, the presented work contributes to the integration of ontologies as a tool of knowledge management within product development.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT (Karlsruher Institut für Technologie), dem Zusammenschluss von Forschungszentrum Karlsruhe und Universität Karlsruhe (TH)). Sie wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ gefördert.

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers. Ich danke ihm für die Möglichkeiten und Freiheiten, die er mir am IPEK gegeben hat. Seine ambitionierten Zielsetzungen und seine Stärke zu motivieren und Dinge voranzutreiben trugen maßgeblich zu meiner beruflichen und persönlichen Weiterentwicklung bei.

Ich danke Herrn Prof. Binz vom Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design der Universität Stuttgart für das entgegengebrachte Interesse an der Arbeit und für die Übernahme des Korreferats.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen, vor allem aus den Forschungsgruppen Entwicklungsmethodik und –management und Friktionssysteme. Die Diskussionskultur und der Teamgeist trugen zum Gelingen meiner Arbeit bei. Für die freundliche und sehr angenehme Arbeitsatmosphäre möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts bedanken, neben den wissenschaftlichen Mitarbeitern auch bei den Kollegen aus der Administration im 8.OG des Maschinenbauhochhauses. Durch Ihre Unterstützung und freundschaftliche Kollegialität haben sie wesentlich dazu beigetragen, dass ich mich sehr positiv an meine Zeit am Institut zurückerinnere.

Meinen Eltern und meinem Bruder danke ich für den Rückhalt und ihre immer verlässliche Unterstützung in allen Lebenslagen und für die Möglichkeiten, die sie mir aufgezeigt und gegeben haben.

Von Herzen danke ich Nici für ihre unerschöpfliche Geduld und vor allem für ihre umfangreiche und liebevolle Unterstützung, trotz ihrer vielen eigenen geplanten und ungeplanten Projekte.

Karlsruhe, den 29. 07 2013

Hermann Hannes Schmalenbach

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung	5
2.1	Ingenieurkeramik	5
2.1.1	Grundlagen, Definition und Eigenschaften	5
2.1.2	Erforschung und Verwendung von ingenieurkeramischen Werkstoffen	8
2.1.3	Ursachen für die schleppende Verwendung von ingenieurkeramischen Werkstoffen in der Wirtschaft.....	12
2.2	Wissen und Wissensbereitstellung.....	18
2.2.1	Wissensmanagement.....	19
2.2.2	Wissensaustausch	25
2.2.3	Abgrenzung der Begriffe Information und Wissen	32
2.2.4	Artikulierbarkeit von Wissen	35
2.2.5	Personalisiertes Wissen und Gruppenwissen.....	39
2.2.6	Sprachgebundenheit von Wissen.....	41
2.2.7	Interdisziplinarität und Komplexität von Wissen.....	43
2.2.8	Handlungsbefähigung	44
2.2.9	Gegenstand des Wissens	45
2.2.10	Zwischenfazit	47
2.3	Ontologien	49
2.3.1	Definition	50
2.3.2	Ontologiebestandteile	52
2.3.3	Formale Ontologiesprachen	56
2.3.4	Klassifizierung von Ontologien	61
2.4	Ontologieentwicklung	64
2.4.1	Ontologieentwicklungsansätze	65
2.4.2	Ontologieeditoren.....	70
2.4.3	Ontologiebasierte Wissensdatenbanksysteme	71
2.4.4	Domänenspezifische Ontologieprojekte und -anwendungen	75
2.4.5	Zwischenfazit	79
3	Zielsetzung	82
4	Ansatz zur Ontologieentwicklung	85
4.1	Spezifikation	88
4.2	Wissensakquise	90
4.3	Konzeptualisierung	95
4.4	Formalisierung	100
4.5	Implementierung	108
4.6	Anwendungen des Ansatzes.....	113

5	Entwicklung des K-KIS	117
5.1	Spezifikation des K-KIS	120
5.2	Wissensakquise im SFB 483	123
5.3	Konzeptualisierung der K-KIS-Ontologie	126
5.4	Formalisierung der K-KIS-Ontologie	129
5.5	Implementierung des K-KIS	134
5.6	Fazit der Ontologieentwicklung für das K-KIS	140
6	Zusammenfassung und Ausblick	144
7	Literaturverzeichnis	147
8	Abbildungsverzeichnis	169
9	Anhang	171
9.1	Laddering-Technik im strukturierten Interview	171
9.2	Kompetenzfragen (Auszug)	173
9.3	Formale K-Kis-Ontologie	176

1 Einleitung

„Alles Gescheite ist schon gedacht worden, man muss nur versuchen, es noch einmal zu denken.“¹

Wenn auch der Dichter Johann Wolfgang von Goethe keine Vorstellung von den Gegebenheiten der modernen Gesellschaft fast 300 Jahre später gehabt haben mag, so trifft er mit diesem Appell doch den Kern einer der größten aktuellen Herausforderungen beim effizienten Umgang mit Wissen. Das erneute Auffinden und Anwenden von vorhandenem Wissen, das sich bereits als „gescheit“ erwiesen hat, scheint oftmals viel schwieriger als die Suche nach neuem Wissen. Die Tatsache, dass bestehende Erkenntnisse vielfach „neu erfunden“ werden, ist allseits bekannt und findet sich in Forscherkreisen in geflügelten Redewendungen wieder.² Und das, obwohl die Suche nach vorhandenem Wissen durch die rasanten Entwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnik in den letzten Jahrzehnten um vielfältige neue Möglichkeiten erweitert wurde. So sollte man meinen, dass es heutzutage dank Internet und Intranet kein Problem mehr darstellt, Zugang zu weltweit vorhandenem Wissen zu bekommen. Diese fast unendlich erscheinenden Zugangsmöglichkeiten haben jedoch das Problem einer „Überflutung“ der Mitarbeiter und die Schwierigkeit der Einschätzung von Qualität, Gültigkeit und Übertragbarkeit von Inhalten zur Folge.³ Die große Bedeutung von Wissen für den Unternehmenserfolg auf der einen Seite und die großen Potentiale im Umgang mit ihm haben dazu geführt, dass Wissen heutzutage als der entscheidende Wettbewerbsfaktor gesehen wird.⁴ Folgerichtig stellt der Umgang mit Wissen, das Wissensmanagement, mittlerweile eine eigene Forschungsdomäne dar.

Die Entwicklung innovativer Produkte wird zunehmend komplexer und erfordert immer umfassenderes tiefgehendes und interdisziplinäres Wissen. Gerade in der Produktgestaltung stellt der Umgang mit Wissen eine besondere Herausforderung dar. Hier sollen für eine möglichst optimale Gestaltung eines technischen Systems

¹ Zitat von Johann Wolfgang Goethe in Johann Wolfgang Goethe: Sämtliche Werke, Briefe, Tagebücher und Gespräche 1993.

² Z.B. „A couple of months in the laboratory can save a couple of hours in the library“ - Frank H. Westheimer (1912-2007), Professor für Chemie der National Academy of Sciences - Harvard University.

³ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2008.

⁴ Vgl. Roth et al. 2010.

die Erkenntnisse aus verschiedenen Domänen zusammengeführt werden.⁵ Konstrukteure verbringen daher die Hälfte ihrer Arbeitszeit mit Informationsbeschaffung und Wissenserwerb.⁶ Die Tätigkeit des Konstrukteurs beruht nicht nur auf dem logischen Anwenden des vorhandenen Wissens, sondern ist immer auch eine kreative Tätigkeit.⁷ Der Konstrukteur steht im Mittelpunkt des Produktentwicklungsprozesses⁸ und ist erster Adressat aller Wissensmanagementaktivitäten, um ihn bei seiner Arbeit zu unterstützen.

Die Unterstützung durch Softwarewerkzeuge stellt einen Teilbereich des Wissensmanagements dar. Die Forschung in der Informatik stellt neue Methoden und Technologien im Bereich des Web 2.0⁹ und des Web 3.0¹⁰ bereit, die immer besser auf den Menschen zugeschnitten sind, und liefert so stetig neue Potentiale im Bereich des Wissensmanagements. Sie sind folglich ein wichtiger Trend für das Wissensmanagement.¹¹ Ontologien sind eine solche neue Technologie des Web 3.0. In ihnen können Zusammenhänge und Bedeutung von Daten abgebildet und auf diese Weise eine Überflutung an Daten und deren Folgen eingeschränkt werden. Ontologien versprechen daher große Potentiale zur Verbesserung der Wissensbereitstellung durch Computer in der Produktentwicklung.

Die Umsetzung dieser Potentiale für das Wissensmanagement im Bereich der Produktentwicklung kann jedoch nicht allein innerhalb der Informatikdomäne erfolgen, sondern nur durch die Anwendung in konkreten Problemstellungen. Eine solche Problemstellung stellt der Wissenstransfer im Bereich ingenieurkeramischer Werkstoffe dar. Dass der Einsatz von Keramik als Konstruktionswerkstoffe weit hinter dem erwarteten Potential zurückbleibt, wird wesentlich auf eine mangelnde Verfügbarkeit von keramikspezifischem Gestaltungswissen bei Konstrukteuren in der Industrie zurückgeführt.¹²

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer

⁵ Im Wissensmanagement steht der Begriff Domäne für ein sachbezogenes Fachgebiet und das Wissen innerhalb dieses Fachgebietes.

⁶ Vgl. Grabowski/Geiger 1997, Albers 2003.

⁷ Vgl. Redtenbacher 1859.

⁸ Vgl. Albers/Braun 2011a, S. 10.

⁹ Web 2.0 oder „Social Web“ ist ein Weiterentwicklungskonzept des Internets in dem Inhalte durch Nutzer dezentral erstellt werden und das durch Kommunikation Interaktion und Kollaboration geprägt ist (vgl. Sauter 2012).

¹⁰ Web 3.0 oder „semantisches Web“ ist eine Weiterentwicklung des Web 2.0, welches dadurch geprägt ist, dass Inhalte mit einer eindeutig beschriebenen Bedeutung versehen werden, die von Computern verarbeitet werden kann.

¹¹ Vgl. Heisig 2007.

¹² Vgl. Tietz 1994, S. 63.

Werkstoffe“ nicht nur neue Ergebnisse, also neues Wissen zu ingenieurkeramischen Werkstoffen generiert, sondern ebenso neue Methoden, um dieses Wissen für Konstrukteure verfügbar zu machen. Für die Bereitstellung des Gestaltungswissens aus dem Sonderforschungsbereich wurde daher in einem gesonderten Teilprojekt eine Ontologie entwickelt und für die Wissensbereitstellung in einem Keramik-Konstruktionsinformationssystem (K-KIS) eingesetzt. Die vorliegende Arbeit basiert auf diesem Teilprojekt mit dem Titel „Ontologiebasierte Entwicklungsumgebung für hochbeanspruchte Systeme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ (Teilprojekt A8).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Definition und die Umsetzung eines Ansatzes zur Ontologieentwicklung für die rechnergestützte Bereitstellung von Gestaltungswissen in der Produktentwicklung generell sowie speziell die Anwendung dieses Ansatzes für die Bereitstellung des keramikspezifischen Gestaltungswissens aus dem Sonderforschungsbereich. Die Arbeit leistet einen Beitrag zum Transfer der Forschungsergebnisse über Ontologien aus der Informatikdomäne in die Produktentwicklung. Nachfolgende Arbeiten, mit dem Ziel Produktentwicklungswissen durch Ontologien zu erfassen und bereitzustellen, erhalten durch diese Arbeit einen Überblick über die Besonderheiten von Wissen in der Produktentwicklung und über Ontologien, ein spezifisches Vorgehensmodell zur Ontologieentwicklung für die Bereitstellung von Produktentwicklungswissen mit konkretisierten Handlungsvorschlägen sowie eine Einschätzung zu Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Ontologien zur Wissensbereitstellung auf Basis des Anwendungsbeispiels aus dem Sonderforschungsbereich 483.

Entsprechend der Wissenschaftstheorie kann die vorliegende Arbeit, als Brücke zwischen Grundlagenforschung und Praxis, in die Kategorie der angewandten Handlungswissenschaften eingeordnet werden. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an dem Forschungsprozess für angewandte Forschung nach Ulrich¹³ und ist gemäß Abbildung 1 strukturiert.

Das Kapitel 2 über den Stand der Forschung deckt mit seinen Unterkapiteln die ersten 3 Schritte des Forschungsprozesses nach Ulrich ab. In Kapitel 2.1 wird das der Arbeit zugrunde liegende praxisrelevante Problem des schleppenden Einsatzes von Ingenieurkeramiken analysiert und die Problematik der Bereitstellung und der mangelnden Verfügbarkeit von keramikspezifischem Gestaltungswissen erläutert. In Kapitel 2.2 werden die Charakteristika von Wissen und insbesondere Gestaltungswissen in der Produktentwicklung vor dem Hintergrund der Wissensbereitstellung

¹³ Ulrich 1981.

allgemein beleuchtet. In Kapitel 2.3 werden Ontologien als vorhandene problemrelevante Lösungsmöglichkeit aus der Informatik vorgestellt und in Kapitel 2.4 werden Ontologieentwicklungsansätze und Anwendungsbeispiele speziell aus dem Umfeld der Produktentwicklung analysiert.

Aufbauend auf dem Stand der Technik werden dann in Kapitel 3 die Zielsetzung konkretisiert und in Kapitel 4 der Ansatz zur Ontologieentwicklung für die Bereitstellung von interdisziplinärem Gestaltungswissen in der Produktentwicklung im Sinne eines Gestaltungsmodells nach Ullrich vorgestellt.

In Kapitel 5 wird die Anwendung des Ansatzes im Rahmen des Teilprojektes A8 des Sonderforschungsbereiches 483 erläutert und analysiert.

Abschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Diskussion der Ergebnisse und darauf aufbauend eine Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen von Ontologien zur Bereitstellung von Gestaltungswissen in der Produktentwicklung auf Basis bestehender Softwaretechnik.

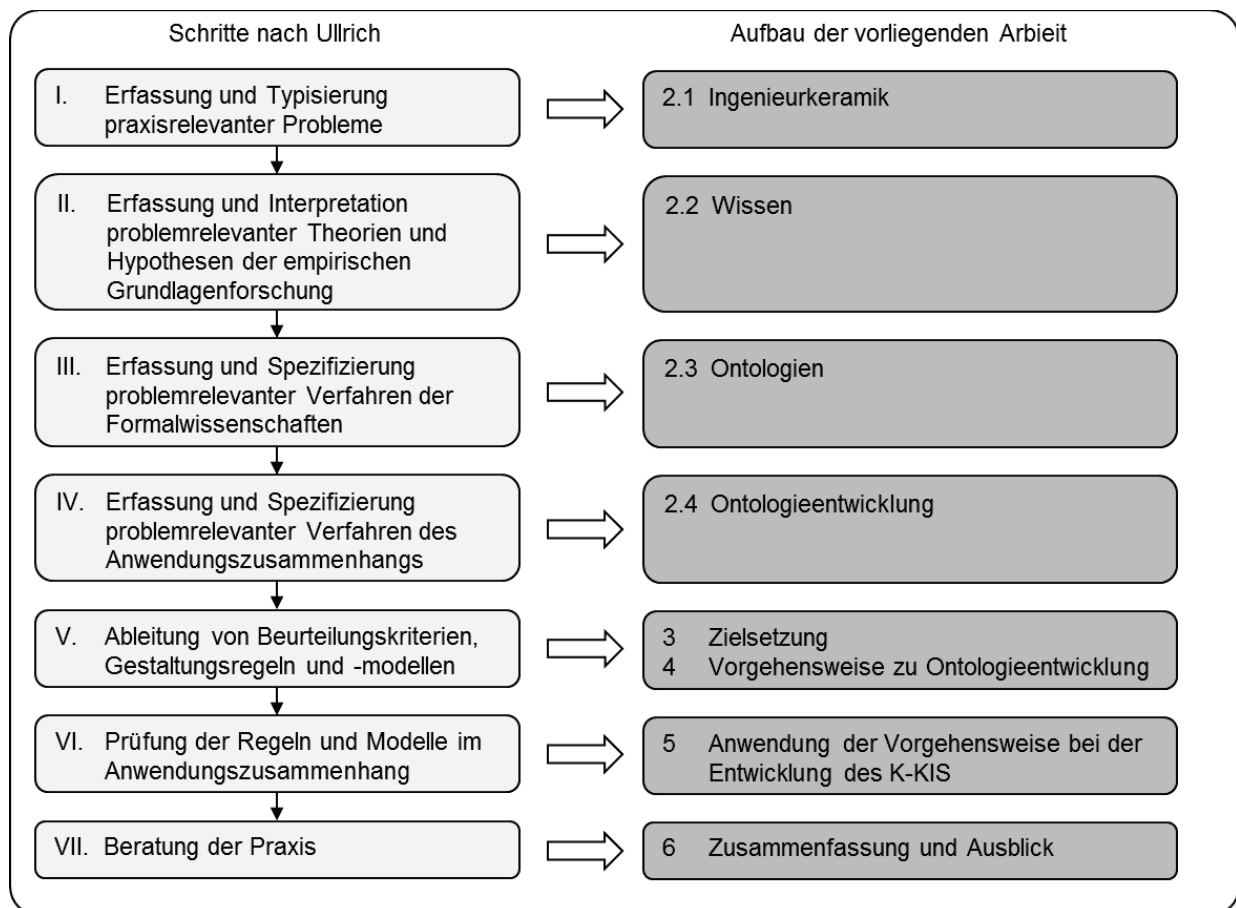


Abbildung 1 Aufbau der Arbeit¹⁴

¹⁴ Eigene Darstellung nach Ulrich 1981, S. 20.

2 Stand der Forschung

Im nachfolgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick über ingenieurkeramische Werkstoffe, deren Eigenschaften und Anwendungen gegeben. Basierend auf den besonderen Eigenschaften der Ingenieurkeramik wird in Kapitel 2.1 die Problematik der mangelnden Verfügbarkeit von keramikspezifischem Gestaltungswissen als Ursache für den schleppenden Einsatz von Ingenieurkeramik als Konstruktionswerkstoff erläutert. Diese Problembeschreibung aus der Praxis dient als Ausgangspunkt für die Analyse des Stands der Forschung zu Wissen und Wissensbereitstellung in Kapitel 2.2, zu Ontologien in Kapitel 2.3 und Ontologieentwicklung in Kapitel 2.4.

2.1 Ingenieurkeramik

Keramik ist einer der ältesten von Menschen genutzten Werkstoffe. Die Herstellung und Verwendung von Keramikgefäßen lässt sich in Asien zurück bis 13.000 vor Christus nachweisen. Einige Kunstgegenstände aus gebrannter Keramik lassen sich sogar noch weiter zurückdatieren. Mit der Entwicklung technischer Keramiken zu Beginn des 20. Jahrhunderts hat die Keramik ein weiteres Anwendungsgebiet neben Töpferware und Baustoff erschlossen. Ingenieurkeramiken bilden eine Unterkategorie der technischen Keramiken.

2.1.1 Grundlagen, Definition und Eigenschaften

Unter Keramiken versteht man im Allgemeinen alle anorganischen nichtmetallischen Werkstoffe, die weitgehend wasserbeständig sind und zu einem großen Teil (mehr als 30 %) oder vollständig kristalline Stoffe bzw. Stoffgemische sind, die durch Sintern hergestellt werden.¹⁵

Keramiken lassen sich nach unterschiedlichen Aspekten einteilen: Anhand ihrer chemischen Zusammensetzung werden Oxid- und Nichtoxidkeramiken unterschieden, manchmal auch zusätzlich noch Silikatkeramiken als eigenständige Gruppe.¹⁶ Die Größe der Gefügebestandteile trennen Feinkeramiken mit Gefügebestandteilen von weniger als 0,2 mm Durchmesser von Grobkeramiken. Anhand des Anwendungsgebietes wird nach Feuerfestkeramiken, Baukeramiken und technischen Keramiken unterschieden. Die technischen Keramiken wiederum teilen sich in Funktionskeramiken, welche als Schichten mit elektrischer, dielektrischer und magnetischer Funktion aufgebracht werden, und in Konstruktionskeramiken, aus

¹⁵ Vgl. Hütte 1996.

¹⁶ Vgl. Munz/Fett 1999 S. 3.

welchen Konstruktionselemente für mechanische, korrosive, thermische und tribologische Beanspruchung hergestellt werden. Letztere werden auch als Strukturkeramiken, Ingenieurkeramiken, Maschinenbaukeramiken oder Mechanokeramiken bezeichnet und lassen sich wiederum in Verbundkeramiken, bei denen zur Erhöhung der Zugbelastbarkeit Fasern in den Werkstoff eingebracht werden, und monolithische Keramiken unterteilen.

Ingenieurkeramiken werden aus Pulvern hergestellt. Die Pulverbestandteile werden in der Regel synthetisch hergestellt und besitzen eine Korngröße von bis zu unter $2\ \mu\text{m}$.¹⁷ Bei der Pulveraufbereitung werden die Bestandteile des späteren Werkstoffes möglichst homogen vermischt, um Agglomerate und somit inhomogene Werkstoffeigenschaften zu vermeiden. Da sich die meisten Pulver schlecht mischen lassen, werden Gleitmittel auf Ölbasis eingesetzt und organische Additive, welche den späteren Sinterprozess beeinflussen, hinzugegeben. Bei der Formgebung wird der Grünling des späteren keramischen Bauteils mittels einer Form hergestellt und komprimiert. Die Prozessparameter Druck, Temperatur und Haltezeit müssen für jeden Werkstoff optimiert werden. Durch nachfolgendes Sintern wird der Grünling verfestigt. Dies kann sowohl im festen Zustand, d. h. bei einer Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes des am niedrigsten schmelzenden Bestandteils, als auch mittels einer flüssigen Phase erfolgen. Ebenso kann beim Sinterprozess wahlweise eine Druckbeaufschlagung erfolgen. Die Temperaturführung beeinflusst dabei das Kornwachstum der Gefügestruktur.

Der aufwändige Herstellprozess keramischer Bauteile hat einen großen Einfluss auf die Materialeigenschaften. Die Struktur des Werkstoffes hängt nicht nur von den verwendeten Rohstoffen, sondern maßgeblich auch von den Prozessparametern jedes einzelnen Prozessschrittes ab. Auf diese Weise können insbesondere die Dichte und damit verbunden auch der Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit variiert werden.

Generell besitzen Ingenieurkeramiken im Vergleich zu Metallen im Allgemeinen höhere Temperaturbeständigkeit, bessere Beständigkeit gegen mechanischen, chemischen und korrosiven Verschleiß sowie höhere Steifigkeit, Druckfestigkeit, Kriechfestigkeit und Härte.¹⁸ Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist in der Regel kleiner als bei Stahl, bei Zirkonoxid vergleichbar. Die Wärmeleitfähigkeit ist in der Regel kleiner, bei Zirkonoxid sogar erheblich geringer. Bei Siliciumcarbid ist sie dagegen etwas höher. Diese Eigenschaften lassen sich auch durch Zusatzstoffe, wie

¹⁷ Vgl. Tietz 1994.

¹⁸ Vgl. Gläser/Lori 1993.

z. B. Beimischung von oxidkeramischen Pulvern zu Siliciumcarbid, und gezielte Variation der kristallinen Struktur je nach Führung des Herstellprozesses verändern. So lassen sich die Eigenschaften von Keramik auf besondere Anwendungen gewissermaßen „einstellen“, z. B. für einen Einsatz, der eine genau bestimmte Wärmeausdehnung bei gleichzeitig hoher Festigkeit erfordert.

Diese besonderen Eigenschaften und deren unterschiedliche Ausprägungen bei verschiedenen Keramiken versprechen bei richtiger Werkstoff- und Herstellprozessauswahl große Einsatzpotentiale in technischen Systemen.

- Ökonomisch Potentiale durch längere Lebensdauer und Standzeiten bei längeren Wartungsintervallen.
- Technische Potentiale durch höhere Leistungsdichten und höhere thermische Belastungsgrenzen. Dies erlaubt wiederum kleinere Baugrößen und somit effizientere technische Systeme.

Insbesondere eine potentielle Steigerung der Energieeffizienz technischer Systeme scheint im Angesicht schwindender fossiler Brennstoffe und einem Mangel ausgereifter und verfügbarer alternativer Energiequellen von wachsendem Interesse. So verspricht der werkstoffgerechte Einsatz Ingenieurkeramik in Gleit- und Friktionssystemen wie beispielsweise Fahrzeugkupplungen eine signifikante Steigerung der Leistungsdichte, welche bei gleichen Leistungsdaten eine Reduktion der Baugröße um fast die Hälfte und eine entsprechende Gewichtsreduktion erwarten lässt. Weiterhin versprechen die Werkstoffeigenschaften die Möglichkeit, den Schmierstoffeinsatz in Gleit- und Friktionssystemen zu reduzieren und gar vollständig zu erübrigen und so die Umweltbelastung durch den Austritt toxischer Medien zu reduzieren.¹⁹

Diesen positiven Eigenschaften stehen jedoch auch einige bedeutende Schwächen gegenüber. Zwar ähnelt die Werkstoffstruktur mit kristallinem Aufbau und Gitternetzfehlern der von Metall, jedoch besitzt Keramik keine Makroplastizität, sodass Spannungsspitzen an inneren und äußeren Kerben nicht durch lokale Deformation abgebaut werden. Daraus folgen eine inhärente Sprödigkeit, niedrige Zugfestigkeit, eine niedrige Risszähigkeit durch unterkritisches Risswachstum.²⁰ Im Gegensatz zu duktilen Werkstoffen besteht daher bei keramischen Werkstoffen durch Spannungskonzentration an Bearbeitungsriefen, Rissen und Materialfehlern schon bei geringer Bauteilbelastung die Möglichkeit eines Bauteilversagens. Das Versagen keramischer Bauteile ist nicht von der zu großen Beanspruchung eines

¹⁹ Vgl. Albers et al. 2001; Albers et al. 2004; Arslan-Hürst 2005; Mitariu-Faller 2009.

²⁰ Vgl. Gläser/Lori 1993.

Volumenbereiches mit homogenen Eigenschaften verursacht, sondern von der Aktivierung und plötzlichen Ausbreitung eines einzelnen vorhandenen Mikrorisses oder -fehlers, der ungünstig zur Beanspruchung liegt. Daher weisen keramische Werkstoffe eine große Festigkeitsstreuung auf und keramische Bauteile haben mitunter ein unvorhersehbares Versagensverhalten. Während die mittlere Bruchspannung bei duktilen Werkstoffen typischerweise in einem Toleranzfeld von nur ± 4 % liegt, variiert diese bei keramischen Werkstoffen um bis zu ± 80 %.²¹ „Da ein offener Fehler wesentlich empfindlicher auf Zugspannung als auf Druckspannungen reagiert, ist die Druckfestigkeit um ca. Faktor 10 größer als die Zugfestigkeit.“²² Die Festigkeit keramischer Werkstoffe wird daher über einen Biegeversuch ermittelt, bei dem Zug- und Druckbeanspruchung gleichermaßen auftreten. Die Notwendigkeit Materialfehler zu vermeiden machen Materialherstellung und Qualitätssicherung sehr teuer. Zudem ist wegen der hohen Materialhärte eine spanende Nachbearbeitung keramischer Bauteile schwierig und kostenintensiv.

Einige Werkstoffkennwerte keramischer Werkstoffe erreichen diejenigen von Metallen und übertreffen diese sogar teilweise. Die Substitution durch keramische Werkstoffe liegt in vielen Bereichen auf der Hand. Der einfache Austausch einer Komponente aus Kunststoff oder Metall durch eine baugleiche keramische Komponente führt jedoch in den meisten Fällen nicht zum Erfolg.²³ Der wirtschaftliche Einsatz von Ingenieurkeramiken erfordert stattdessen eine werkstoffgerechte Gestaltung der technischen Systeme, welche die Vorteile der Keramiken nutzt und gleichzeitig ihre nachteiligen Eigenschaften umschifft.^{24,25} Ebenso müssen Entwicklungs- und Herstellprozesse den Werkstoffeigenheiten angepasst werden. Zusammenfassend werden Ingenieurkeramiken meist als eine vielversprechende aber schwierige Werkstoffklasse bezeichnet.²⁶

2.1.2 Erforschung und Verwendung von ingenieurkeramischen Werkstoffen

Seit den 1970er Jahren wird intensiv an der Verwendung von Keramik als Konstruktionswerkstoff geforscht. Seither wurde eine Vielzahl an Forschungsergebnissen in den Bereichen der Werkstoffwissenschaften, der Produktions- und Fertigungstechnik und der Produktentwicklung veröffentlicht. Mit dem ersten in Serie gefertigten keramischen Turbolader im Jahr 1983 wurde ein regelrechter

²¹ Vgl. Tietz 1994, S. 40.

²² Tietz 1994, S. 8.

²³ Vgl. Mitariu-Faller 2009, S. 26f.

²⁴ Tietz 1994, S. 71.

²⁵ Ein Beispiel dafür stellt der Ansatz zur Auslegung von hybriden Querpressverbänden mit Naben aus monolithischer Keramik nach Blacha 2009 dar.

²⁶ Vgl. Petzow 1996.

Entwicklungsschub für keramische Komponenten ausgelöst.²⁷ Heute findet man Ingenieurkeramiken in einigen Anwendungsbereichen, wie z. B. in der Medizintechnik, in militärischen Panzerungen und in Maschinenkomponenten wie Schneidwerkzeugen, Lagern, Ventilen, Düsen und Dichtungen.²⁸ Diese Einsatzbereiche stellen jedoch nur Nischenanwendungen dar.

Durch den zunehmenden Einsatz technischer Systeme mit Ingenieurkeramik hat auch die Forschung über neue ingenieurkeramische Werkstoffe, deren Herstell- und Prüfprozesse sowie keramikgerechte Entwicklungsmethoden steigende Bedeutung gewonnen.

Im Kontext dieser Forschungsarbeiten hat sich eine weltweit verbreitete und vernetzte Forschergemeinschaft gebildet²⁹, wie zahlreiche nationale und internationale Konferenzen und Fachzeitschriften³⁰ rund um die Ingenieurkeramik belegen. Über eine Vielzahl von Publikationen werden Forschungsergebnisse kontinuierlich zur Verfügung gestellt. Insbesondere im Bereich der Werkstoffwissenschaften wurde viel Grundlagenforschung zur Charakterisierung und Herstellung keramischer Werkstoffe betrieben und deren Ergebnisse haben zu neuen Standards und Normen im Umgang mit Ingenieurkeramiken geführt.

So hat sich in der Werkstofftechnik mittlerweile der Biegeversuch zur Festigkeitscharakterisierung keramischer Werkstoffe durchgesetzt. Ebenso wurden für die Charakterisierung keramischer Werkstoffe zusätzliche Kenngrößen etabliert. Ein Beispiel dafür ist die Einführung des Weibullmoduls m als Werkstoffkenngröße.³¹ Die Streuung der Festigkeit eines keramischen Bauteils lässt sich anders als die von metallischen Bauteilen nicht einer Normalverteilung mit geringer Streuung, sondern nur durch eine schiefe Verteilung, mit vergleichsweise großer Streuung abbilden (siehe Abbildung 2).

²⁷ Gugel/Wötting 1998.

²⁸ Vgl. Briggs 2011.

²⁹ Beispiele hierfür sind The American Ceramic Society 2012, European Ceramics Society 2012 oder die Deutsche Keramische Gesellschaft 2012.

³⁰ Beispiele hierfür sind Journal of Ceramic Science 2012 oder International Journal of Ceramics and Composites 2012.

³¹ Vgl. Munz/Fett 1999 S. 137ff.

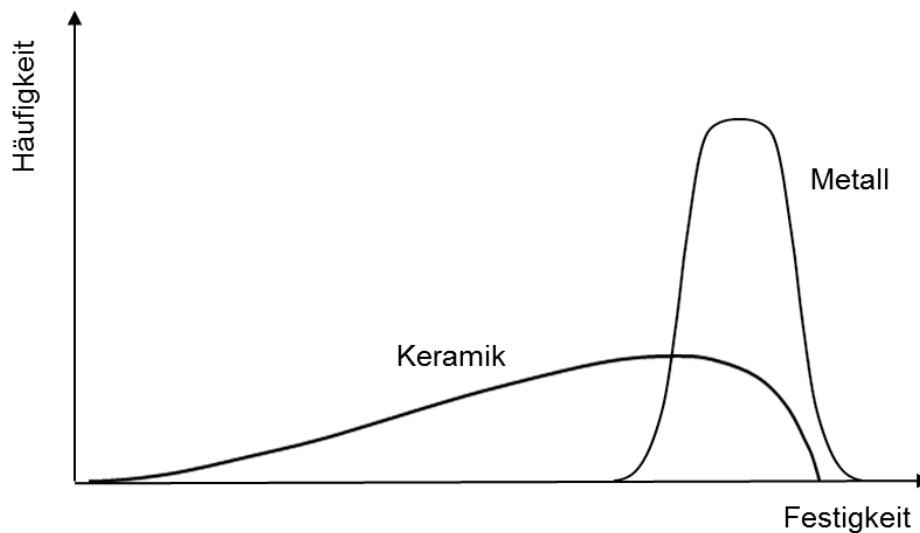


Abbildung 2 Charakteristische Häufigkeitsverteilung der Festigkeit bei Bauteilen aus Keramik und aus Metall³²

Diese schiefe Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit P in Abhängigkeit der maximal auftretenden Hauptnormalspannung σ eines Bauteils wird im Bereich der Keramik über die Weibullverteilung

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

ausgedrückt. Dabei ist σ_0 die charakteristische Bauteilfestigkeit und der Weibullmodul m ein Maß für die Streuung der erreichten Festigkeitswerte. Letzterer kann in der doppelt logarithmischen Darstellung eines Weibull-Diagramms (siehe Abbildung 3) als die Steigung der verbindenden Geraden der erreichten Bruchfestigkeiten mehrerer gleichartiger Bauteile visualisiert werden. Im Gegensatz zur charakteristischen Bauteilfestigkeit σ_0 ist der Weibullmodul m unabhängig vom Bauteilvolumen.³³ Je größer der Weibullmodul m eines Bauteils, desto geringer ist die Streuung der erreichten Festigkeitswerte in Bauteilanwendungen.

³² Eigene Darstellung nach Tietz 1994, S. 69.

³³ Vgl. Munz/Fett 1999, S. 142.

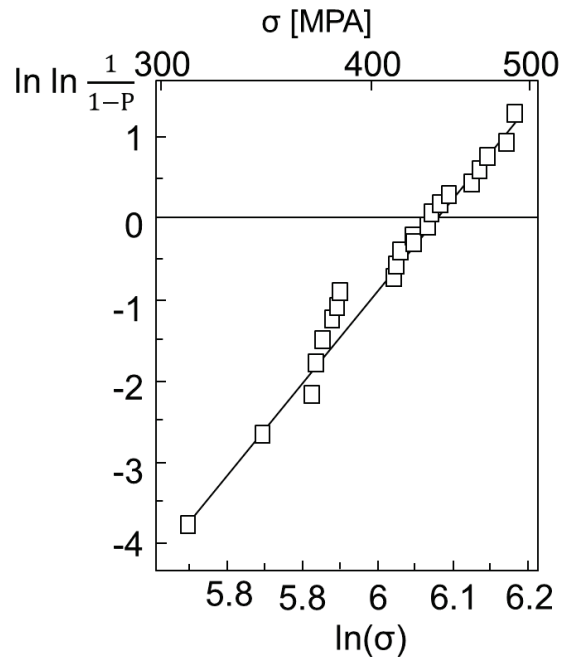


Abbildung 3 Streuung der Festigkeitswerte eines Bauteils aus Al_2O_3 (99,6 %) ³⁴

Weiterhin wurden Ansätze und Vorgehensweisen entwickelt, welche die Produktentwicklung unter Berücksichtigung der besonderen Werkstoffeigenschaften unterstützen. ³⁵

Diese Forschungsergebnisse im Bereich der Ingenieurkeramik finden aber vielfach nicht nachhaltig den Weg in die industrielle Umsetzung. Noch werden 90 % aller Keramikbauteile mit einem Marktumsatz von weltweit ca. 6,4 Mrd. Euro in der Elektrotechnik als Funktionskeramik eingesetzt. ³⁶ Die größte Bedeutung hierbei hat Aluminiumoxid dank seines hohen elektrischen Widerstands bei extremer Durchschlagsfestigkeit sowie seiner Metallisierungs- und Hartlötfähigkeit. Im Bereich der Ingenieurkeramiken lassen sich nur vergleichsweise wenige technische Anwendungen finden. Im Automobilbereich zum Beispiel spielen sie so gut wie keine Rolle. Trotz vielfacher Ansätze beispielsweise bei Ventilen, Ventildführungen, Ventilsitzen, Kipphebeln, Nocken/Stößeln, Dichtringen oder Wasserpumpenlagern, finden sich Keramiken in Serienfahrzeugen nur als Funktionskeramiken in Katalysatoren, Lambdasonden oder in Piezoaktoren. Fachleute sind sich einig, dass die Potentiale keramischer Werkstoffe bisher vielfach ungenutzt bleiben. ³⁷

³⁴ Eigene Darstellung nach Munz/Fett 1999, S. 144.

³⁵ z.B. Mitariu-Faller 2009.

³⁶ Wolf 2006.

³⁷ Vgl. Brevier technische Keramik 2003, S. 40.

2.1.3 Ursachen für die schleppende Verwendung von ingenieurkeramischen Werkstoffen in der Wirtschaft

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte wurde intensiv im Bereich der Ingenieurkeramik geforscht. Es ist eine große Menge an Forschungsergebnissen verfügbar, welche auch teilweise in Anwendungen umgesetzt sind. Diese belegen, dass sich die Ingenieurkeramik nur in wenigen Spezialanwendungen durchsetzen konnte, bei denen die Grenzen metallischer Werkstoffe erreicht sind. Die Verknüpfung von tiefgehendem Wissen sowohl hinsichtlich der jeweiligen Anwendungen als auch hinsichtlich der Ingenieurkeramik hat im Rahmen von interdisziplinären Forschungsprojekten zum Erfolg geführt. Solches Wissen ist jedoch nicht annähernd so weit verbreitet, wie vergleichsweise das Wissen um metallische Werkstoffe oder auch Kunststoffe. Ein Abstrahieren und Übertragen der Erkenntnisse aus diesen Spezialfällen und die industrielle Umsetzung in anderen Bereichen gelingt offensichtlich nicht oder nur schwer, wie das ungenutzte wirtschaftliche Potential von Ingenieurkeramiken belegt.

Eine Hauptursache dafür wird in der mangelnden Verfügbarkeit interdisziplinären Wissens gesehen. Die Ergebnisse von Forschungsprojekten im Bereich der Ingenieurkeramik werden zumeist ausschließlich innerhalb der Forschergemeinschaft der Werkstoffwissenschaften veröffentlicht. Hier existieren fundierte Arbeiten über Methoden zur Klassifizierung und Charakterisierung keramischer Werkstoffe sowie über deren Herstellung. Die Gestaltung von Bauteilen, welche die besonderen Eigenschaften keramischer Werkstoffe im praktischen Einsatz nutzbar machen, liegen für den Werkstoffwissenschaftler nicht im Kern des Forschungsergebnisses, betreffen sie aus seiner Sicht doch „nur“ Anwendungsproblematiken. So werden sie, wenn überhaupt, nur am Rande erwähnt. Es wird zwar deutlich, dass die Anforderungen der jeweiligen Anwendung nicht nur entscheidend für die Bauteilgestaltung, sondern auch für die Auswahl und Anpassung der Herstellprozesse sind. Da die Arbeiten aber meist auf bestimmte Prozessschritte fokussieren, werden Randbedingungen der spezifischen Anwendung des gewählten Lösungswegs und der Herstellprozesse nicht umfassend, sondern nur ausschnittsweise geklärt. Derartige Arbeiten behandeln Ausschnitte einer spezifischen Lösung, der Lösungskontext wird jedoch nicht vollständig dargelegt.

Darüber hinaus gibt es umfassende Sammlungen mit Prozessen, Handlungsanweisungen und Methoden zum Gestalten mit Keramik. Diese sind jedoch meist allgemein gehalten - neben den grundlegenden Materialeigenschaften der Keramik beschreiben sie allgemeine Prozesse und Vorgehensweisungen und Gestaltungsvorschläge für keramische Bauteile. Die werkstoff- und auch problemstellungsspezifischen Aspekte der verschiedenen Handlungs- und Lösungsvorschläge werden jedoch nicht umfassend vermittelt. Die schiere Vielzahl

an möglichen Stellhebeln bei der Gestaltung technischer Systeme mit ingenieurkeramischen Werkstoffen lässt sich auf allgemeinem Level nicht hilfreich darstellen. Diese erstrecken sich von der Materialauswahl über die Bauteilherstellungs- und Bearbeitungsprozesse bis hin zu den Möglichkeiten zur Modifikation der Belastung in keramischen Bauteilen durch das umgebende technische System sowie deren Wechselwirkungen untereinander und deren problemspezifische Festlegung. Einen ausschnittshaften Überblick über die Vielzahl einstellbarer Produkt- und Prozessmerkmale, jedoch ohne hinweisenden Charakter, gibt Wengler (siehe Abbildung 4).³⁸

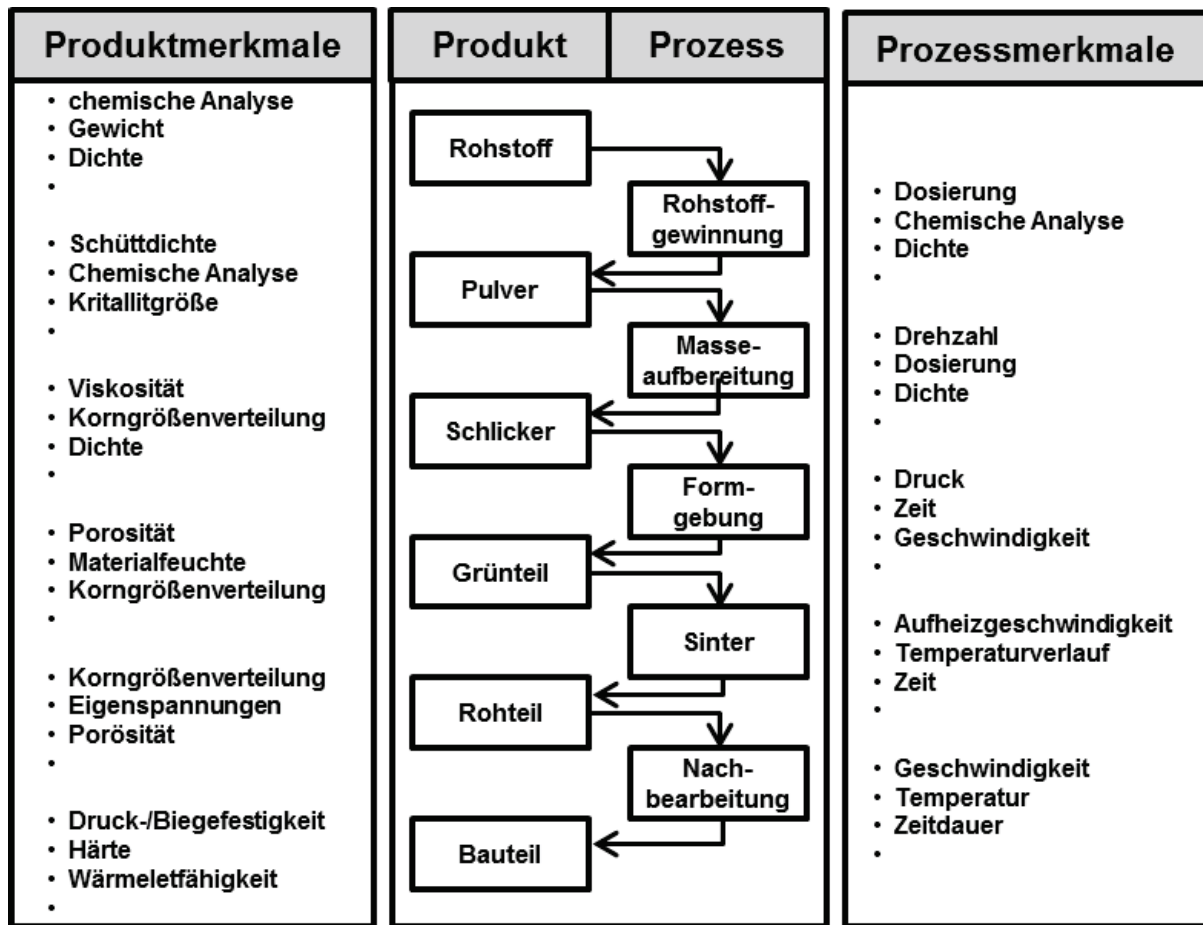


Abbildung 4 Einflussparameter bei der Herstellung eines keramischen Bauteils³⁹

So werden vielfach Sammlungen verschiedener Gestaltungs- und Lösungsvorschläge präsentiert, ohne deren jeweiligen problem- und einsatzspezifischen Kontext aufzuzeigen. Eine effiziente und zielgerichtete Anwendung dieser Lösungsvorschläge gestaltet sich meist schwierig. Vielmehr scheinen sie auf diesem allgemeinen

³⁸ Vgl. Wengler 1996 S. 16.

³⁹ Wengler 1996, S. 16.

Level bekannten Vorgehensweisen für metallische Werkstoffe zu gleichen. Ein Beispiel dafür zeigt folgende Abbildung (siehe Abbildung 5).

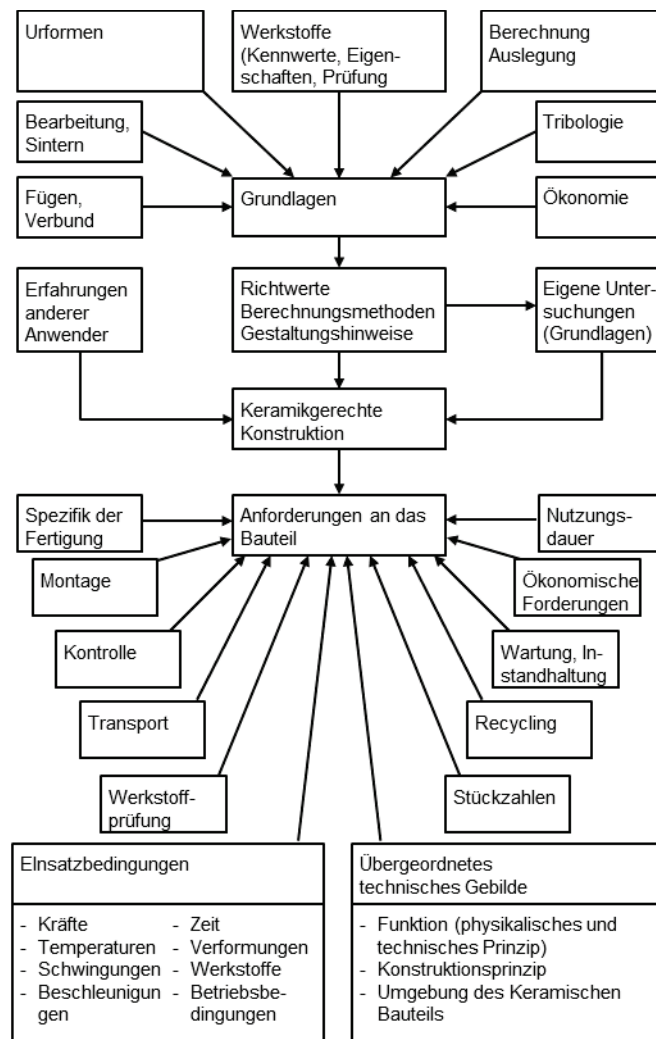


Abbildung 5 Einflüsse auf eine keramikgerechte Konstruktion⁴⁰

Die hier umfassend dargestellten Einflüsse auf eine keramikgerechte Konstruktion sind identisch zu den allgemeinen Einflüssen aus vergleichbaren Darstellungen in Lehrbüchern für metallische Werkstoffe. Inwiefern diese Einflüsse aufgrund der Besonderheiten keramischer Werkstoffe anders zu bewerten und zu handhaben sind als dem Konstrukteur normalerweise bekannt und welche Lösungsmöglichkeiten sinnvoll sind, liegt jedoch im Kontext der jeweiligen konstruktiven Problemstellung. Das Wissen um die für eine gegebene Problemstellung relevanten keramikspezifischen Einflüsse ist nicht ohne Weiteres verfügbar.

Ähnliches lässt sich bei Sammlungen von keramikspezifischen Gestaltungshinweisen feststellen. Diese sind teilweise identisch mit Gestaltungshinweisen für metallische

⁴⁰ Tietz 1994, S. 72.

Sinterbauteile, teilweise weichen sie auch davon ab. Wo Ähnlichkeiten und wo Unterschiede zu beachten, sind bleibt unklar. Darüber hinaus widersprechen sich zum Teil keramikspezifische Gestaltungshinweise, welche unterschiedliche Prozessschritte berücksichtigen. Beispiele dafür zeigen die folgenden beiden Auszüge aus Fachbüchern zur keramikspezifischen Konstruktion:

Vor dem Hintergrund einer guten Brennbarkeit keramischer Teile empfiehlt Bode große Auflageflächen, um Kosten für Hilfsmittel einzusparen (siehe Abbildung 6).⁴¹

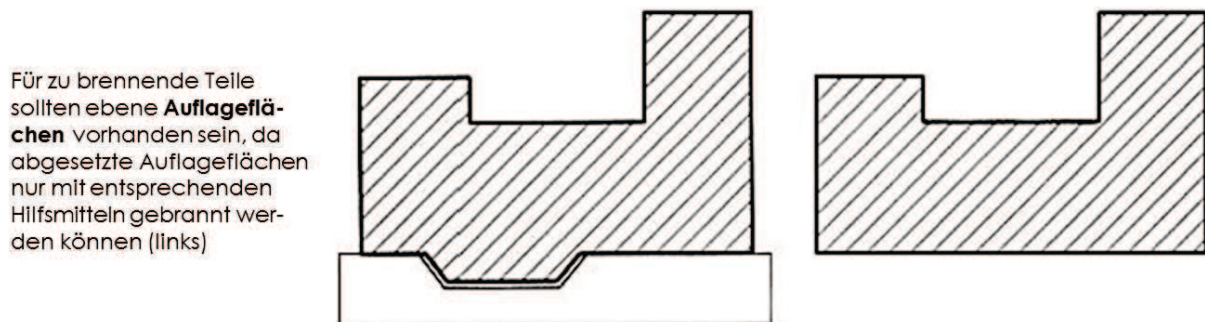


Abbildung 6 Keramikgerechte Gestaltung nach Bode⁴²

Gläser und Lori dagegen raten auf Basis einer Analyse von Patenten und Literatur von großflächigen Böden generell ab (siehe Abbildung 7).⁴³

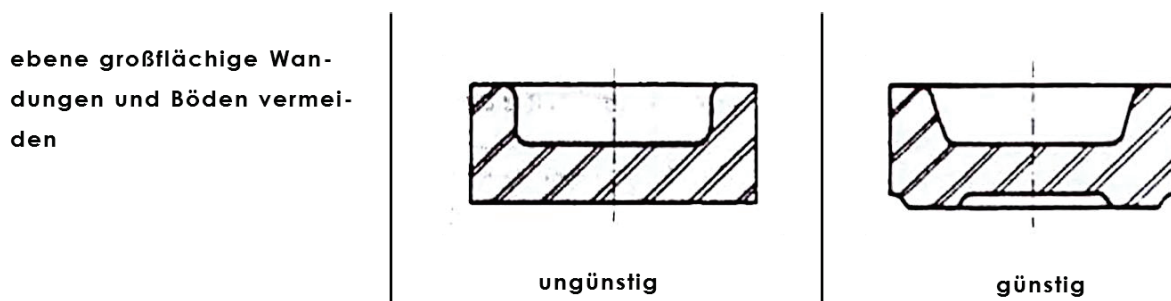


Abbildung 7 Keramikgerechtes Konstruieren nach Gläser/ Lori⁴⁴

Die Randbedingungen, die den Empfehlungen jeweils zugrunde liegen, werden in beiden Fällen jeweils nur ausschnittsweise erläutert. Bedingt durch die komplexen Zusammenhänge bei keramischen Werkstoffen und deren Herstellprozess, lassen sich die wechselseitig bedingten Einflüsse auf einen Gestaltungsvorschlag tatsächlich nur schwer in Buchform darstellen. Bezogen auf ein gegebenes Gestaltungsproblem können sich diese beiden Empfehlungen als unvereinbar

⁴¹ Vgl. Bode 1984, S. 163.

⁴² Bode 1984, S. 163.

⁴³ Vgl. Gläser/Lori 1993, S. 77.

⁴⁴ Gläser/Lori 1993, S. 77.

erweisen. Das Abwägen derartiger unvereinbarer Empfehlungen bleibt dem Konstrukteur überlassen, erfordert jedoch fundiertes keramikspezifisches Wissen oder den Zugang dazu.

Es wird klar, dass bei einer konkreten Problemstellung eine Auswahl der zielführenden Gestaltungshinweise, auch bei Verwendung von Lehrbüchern für keramikgerechtes Gestalten, nur mit tiefergehendem Wissen möglich ist. Konstrukteuren, welche die Nutzung von ingenieurkeramischen Werkstoffen in Unternehmen vorantreiben könnten, fehlt in der Regel der Zugang zu dem notwendigen spezifischen Wissen. Sie sind zumeist durch ihre Ausbildung und auch ihre Berufserfahrung auf den Umgang mit metallischen Werkstoffen geprägt.⁴⁵ Und sie besitzen in der Regel auch keine Erfahrung mit keramischen Werkstoffen. Sie beherrschen das Denken in „Sicherheiten“, nicht aber in Ausfallwahrscheinlichkeiten. Zu einer mangelnden Verfügbarkeit von Wissen kommt noch hinzu, dass Fehlen von spezifischem Wissen nicht erkannt wird. So gibt es eine Vielzahl von Sachverhalten und Zusammenhängen, die Entwicklern wohl bekannt scheinen, bedingt durch die besonderen Werkstoffeigenschaften jedoch anders zu interpretieren sind. Deshalb werden Probleme und Herausforderungen oft zu spät erkannt. Umso mehr ist die Einführung keramischer Werkstoffe mühsam und von vielen Iterationen und Misserfolgen begleitet.

Ein Beispiel dafür ist die aufgrund der verschiedenen Versagensmechanismen notwendige unterschiedliche Interpretation von Werkstoffparametern bei Metallen und Keramiken, wie im folgenden Textauszug dargelegt:

„Unabhängig davon, ob eine Dimensionierung „von Hand“ oder mit einem FEM-Programm durchgeführt wird, kann das Bruchrisiko durch Verwendung unsicherer Werkstoffparameter unterschätzt werden. Eine Beurteilung der Zuverlässigkeit der Werkstoffparameter und damit der Berechnungsergebnisse ist durch Angabe z. B. des 95%-igen Konfidenzniveaus möglich. Diese Informationen stehen dem Konstrukteur aber in der Regel nicht zur Verfügung, sondern nur Mittelwerte der verwendeten Werkstoffparameter. Dies kann insbesondere bei geringen Weibull-Moduln zu einer deutlichen Unterschätzung des Bruchrisikos führen. Daher ist ratsam, zumindest den Weibull-Modul m mit dem dazugehörigen Konfidenzintervall anzugeben. In einigen Fällen gibt der Keramikhersteller aber die Festigkeit „seiner“ Werkstoffe wie bei metallischen Werkstoffen immer noch als deterministische Werte an, was völlig im Widerspruch zur an sich notwendigen statistischen Auslegung

⁴⁵ Vgl. Gläser/Lori 1993, S. 67f; Tietz 1994, S. 63.

*steht. Hier hat der Konstrukteur gar keine Chance, eine Bauteilberechnung vorzunehmen, die Aussicht auf Erfolg hat.*⁴⁶

Diese Beispiele aus dem Bereich Werkstoffkunde und Produktentwicklung verdeutlichen die Herausforderungen, die in der Natur der Produktentwicklung auf Basis von interdisziplinärem Wissen liegen. Als wesentliche Barriere für interdisziplinäre Arbeit im Bereich der Produktentwicklung werden domänenspezifisches Denken und ein fehlendes gemeinsames Verständnis gesehen.⁴⁷

So lässt sich im Bereich der Ingenieurkeramik feststellen, dass eine Vielzahl vielversprechender breiter Forschungsergebnisse vorhanden ist. Aufgrund eines fehlenden disziplinenübergreifenden gemeinsamen Verständnisses sind diese jedoch nicht als Wissen an den Stellen verfügbar, an denen es für eine gesteigerte wirtschaftliche Anwendung erforderlich wäre. Die Entwicklung technischer Systeme mit ingenieurkeramischen Werkstoffen erfordert jedoch genau dieses interdisziplinäre Wissen. Die mangelnde Verfügbarkeit hat zur Folge, dass viele Produktentwickler in Ingenieurkeramik zwar möglicherweise einen potentialreichen, vor allem aber einen unberechenbaren Konstruktionswerkstoff sehen, den sie folglich eher meiden.

Dieses Potential wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft erkannt und hat zu Forschungsprojekten geführt, welche nicht nur die weitere Erforschung von Ingenieurkeramiken als Ziel verfolgen, sondern ganz dediziert auch eine breite Nutzbarmachung dieses Wissens. Ein Beispiel dafür ist der Sonderforschungsbereich „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ (SFB 483). Nicht nur der Erkenntnisgewinn zu Möglichkeiten und Methoden des Einsatzes von Ingenieurkeramiken in Gleit- und Fiktionssystemen war Teil der notwendig disziplinübergreifenden Forschung, sondern auch neue Methoden und Wege der domänenübergreifenden Bereitstellung der Forschungsergebnisse.

Neben der Ausrichtung jedes einzelnen Teilprojektes des Sonderforschungsbereiches an dieser Zielsetzung wurde darüber hinaus mit dem Teilprojekt A8 „Ontologiebasierte Entwicklungsumgebung für hochbeanspruchte Systeme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ eine Möglichkeit der Bereitstellung von Wissen erforscht. Die vorliegende Arbeit basiert maßgeblich auf den Ergebnissen dieses Teilprojekts. Es wurde in der letzten Förderphase des Sonderforschungsbereiches (2009-2012) initiiert und hatte die Zielsetzung, das interdisziplinäre keramikspezifische Gestaltungswissen, welches im SFB generiert wurde, explizit und in einem ontologiebasierten Keramik-Konstruktions-Informationssystem verfügbar zu machen.

⁴⁶ Krüger 1999, S. 38.

⁴⁷ Albers et al. 2010c.

Dabei sollten die Anwendungsmöglichkeiten des Stands der Technik der ontologiebasierten Wissensbereitstellung analysiert werden. Ausgangsbasis für die Initiierung und Bewilligung des Teilprojekts A8 war die Erkenntnis, dass immer noch großer Forschungsbedarf bei der rechnerbasierten Wissensbereitstellung vorhanden ist und dass dieses Potential nicht losgelöst und außerhalb von den einzelnen Wissensdomänen erschlossen werden kann.

2.2 Wissen und Wissensbereitstellung

Der Wissensbegriff ist nur schwer eindeutig zu umschreiben. Es besteht kein allgemeingültiges Verständnis davon. Vielmehr existieren unzählige Veröffentlichungen aus den verschiedensten Wissenschafts- und Wirtschaftsdomänen, die sich dem Thema „Wissen“ und dessen großer Bedeutung für den jeweiligen Bereich auf unterschiedlichste Weise nähern. So prägen vor allem Philosophie, hier insbesondere die Epistemologie (Erkenntnistheorie) sowie Informations-, Ingenieur-, Wirtschafts-, Bildungs- und Sprachwissenschaften den Wissensbegriff. Dies führt zu der von Sveiby attestierten kontextabhängigen Bedeutung des Begriffs „Wissen“.⁴⁸

Obwohl kein einheitliches, interdisziplinär gültiges Verständnis vom Begriff „Wissen“ existiert, so herrscht doch allgemeiner Konsens über das enorme wirtschaftliche Potential der Forschung, die sich mit dem Umgang von Wissen beschäftigt.

Entsprechend der Vielzahl der in diesem Bereich aktiven Wissenschaftsbereiche auf der einen und der großen Menge an Problemstellungen im Umgang mit Wissen auf der anderen Seite findet man unzählige und unterschiedlichste Ausführungen zum Wissensbegriff. Dabei wird in der Regel kein Anspruch auf Vollständigkeit der dargelegten Ausführungen zum Wissensbegriff erhoben, es werden jeweils nur bestimmte Eigenschaften von Wissen genannt, die relevant für die weiteren Inhalte sind. Häufig sind dabei dichotomische Charakterisierungen, welche die Spanne an möglichen Eigenschaftsausprägungen von Wissen darstellen.⁴⁹

Die Zielsetzung der Arbeit ist das ontologiebasierte Bereitstellen von Gestaltungswissen und deckt daher nicht alle im Allgemeinen als wichtig erachteten Aspekte des Wissensbegriffes ab. Dementsprechend werden im Rahmen dieser Arbeit nicht alle Dimensionen von Wissen umfassend beleuchtet. So wird im Abschnitt 2.2.1 zunächst auf den Umgang mit Wissen – dem Wissensmanagement – sowie den damit verbundenen Kernaktivitäten eingegangen. Vor diesem Hintergrund wird in Abschnitt 2.2.2 der „Wissensaustausch“ beleuchtet, welcher im Kontext dieser Arbeit als das

⁴⁸ Sveiby 1997.

⁴⁹ Heisig 2007.

Ziel der (Wissens-)Bereitstellung zu sehen ist. Bezugnehmend auf die Form der Bereitstellung von Gestaltungswissen werden dann in Abschnitt 2.2.3 - 2.2.10 relevante Aspekte des Wissensbegriffs diskutiert.

Unter Gestaltungswissen wird dabei alles Wissen verstanden, welches für die Gestaltung eines technischen Systems erforderlich ist. Die Gestaltung im Sinne der Integrierten Produktentwicklung beinhaltet das Festlegen aller Elemente eines Produktes in seinen Beschaffenheitsmerkmalen (Form, Abmessung, Oberfläche, Werkstoff, Anordnung, Anzahl und Verbindung) und legt damit auch indirekt seine Herstellung fest.⁵⁰ Aus den Beschaffenheitsmerkmalen eines Produktes ergeben sich mittelbar alle seine Funktions- und Relationsmerkmale.⁵¹ In diesem Sinne ist Gestaltungswissen das Wissen, welches unmittelbar für die Festlegung der Gestalt eines technischen Systems im Rahmen eines Gestaltungsprozesses erforderlich ist. Ein Gestaltungsprozess lässt sich nicht a priori in starr abgegrenzte Phasen wie beispielsweise Ideen-, Konzept-, Entwurf- Konstruktions- und Validierungsphase trennen, sondern ist ein iterativer Prozess, von einer vagen Idee bis zur vollständigen und eindeutig definierten Gestalt.⁵² Neben dem erforderlichen Wissen um die theoretische Basis und die Zusammenhänge um die oben genannten Beschaffenheitsmerkmale beinhaltet Gestaltungswissen ebenso Lösungsstrategien, Lösungsprinzipien und Wissen um bereits existierende Lösungen für eine bestimmte Problemstellung.

2.2.1 Wissensmanagement

Der zielgerichtete Umgang mit Wissen wird als Wissensmanagement bezeichnet.⁵³ Durch die große Bedeutung von Wissen für die Produktivität und die Innovationsfähigkeit ist Wissensmanagement von zentraler Bedeutung für den nachhaltigen Erfolg eines Unternehmens.⁵⁴

Ziel des Wissensmanagements ist *„die Verbesserung der organisatorischen Fähigkeiten auf allen Ebenen der Organisation durch einen besseren Umgang mit der Ressource „Wissen“.*⁵⁵ Hinsichtlich des Wissensmanagements wird in einer Organisation zwischen der strategischen, der operativen Ebene und dem Informations- und Datenmanagement als Basisebene unterschieden.⁵⁶

⁵⁰ Vgl. Ehrlenspiel 2003, S. 411.

⁵¹ Vgl. Ehrlenspiel 2003, S. 239.

⁵² Vgl. Albers/Meboldt 2007.

⁵³ Vgl. Reinmann-Rothmeier/Mandl 2000, S. 9.

⁵⁴ Vgl. Peter Drucker, Pionier des modernen Management, zitiert in Köck/Willfort 2007.

⁵⁵ Vgl. Probst/Romhardt 1997.

⁵⁶ Vgl. North 2011, S. 39.

Die große Herausforderung des Wissensmanagements ist es, sämtliche Aktivitäten an den vorhandenen Gegebenheiten einer Organisation bezüglich ihrer Struktur und Kultur auszurichten. Dazu wird in der Literatur das 3-Säulen-Modell des Wissensmanagements herangezogen (siehe Abbildung 8).

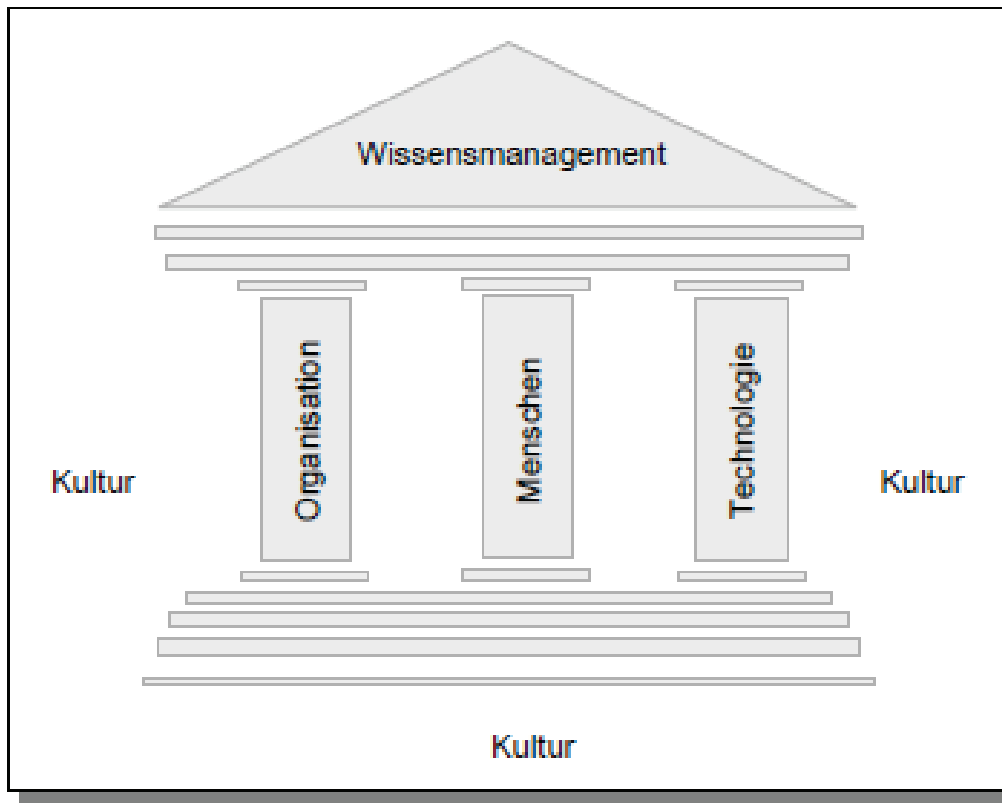


Abbildung 8 Die Säulen des Wissensmanagements⁵⁷

Die Darstellung des Wissensmanagements als Gebäude, das gleichermaßen auf den Säulen Organisation, Mensch und Technologie beruht, unterstreicht, dass Wissensmanagementansätze, die nicht alle Säulen berücksichtigen, langfristig keinen Erfolg haben können.

Die Auswirkung von ungleichgewichtiger Berücksichtigung zeigt sich an der Entwicklung des Wissensmanagementbegriffs selbst: Ende der 1990er Jahre erlebte Wissensmanagement in der Forschung und Wirtschaft einen nie dagewesenen Boom. Große Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie versprachen, alle Probleme des Wissensmanagements durch immer leistungsfähigere Rechner überwinden zu können und so erforderliches Wissen jedermann jederzeit und überall leicht zugänglich machen zu können. Der Begriff der „Ressource Wissen“ - vergleichbar mit anderen Gebrauchsgütern - wurde geprägt. Viele Firmen

⁵⁷ Wolf et al. 1999, S. 752.

investierten riesige Summen in ihre informationstechnische Infrastruktur. Dadurch erfuhr Wissensmanagement eine weite Verbreitung, die auf einmal jeden Mitarbeiter betraf und als Garant für den Unternehmenserfolg gehandelt wurde. Bedingt durch mangelnde Erfahrung wurde die Integration der beiden anderen Säulen, der Unternehmensstruktur und -kultur sowie der individuellen Gegebenheiten der Mitarbeiter, vielfach vernachlässigt. Zwar eröffneten die neuen Technologien neue Möglichkeiten der Daten- und Informationshandhabung, erforderten aber auch einen großen Aufwand bei der Einführung, Nutzung und Pflege. Der erwartete durchschlagende Erfolg der neuen Technologien hinsichtlich der Ziele des Wissensmanagements blieb deshalb aus.⁵⁸

Aufgrund dieser Erfahrungen wird der Begriff „Wissensmanagement“ heute kontrovers diskutiert. Die weite Verbreitung des Begriffes und seine teilweise inflationäre Verwendung tragen maßgeblich dazu bei. Mit dem Hinweis, dass man zwar Menschen nicht aber Wissen managen kann, wird er von manchen Autoren als inhaltsleer bezeichnet.⁵⁹ Konsens besteht dennoch über die wirtschaftliche Bedeutung von Wissen und dessen Weitergabe und darüber, dass Menschen und Organisationen auch in der Zukunft in ihrem Umgang mit Wissen durch ein entsprechendes Umfeld unterstützt werden können und sollen.

Dieser unterstützende Charakter wird auch in der VDI-Richtlinie 56010 „Wissensmanagement im Engineering - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen“ zugrunde gelegt, welche den Stand der Technik zum Thema Wissensmanagement im Ingenieurbereich zusammenfasst. Unter Wissensmanagement wird hier *„die Gesamtheit aller Methoden, Maßnahmen und Werkzeuge“* verstanden, *„welche die Organisation aller Prozesse ermöglichen und unterstützen, in denen Informationen, Erkenntnisse und Erfahrungen identifiziert, erzeugt, gespeichert, verteilt und wiederverwendet werden.“*⁶⁰

Die letztgenannten Aktivitäten werden als die fünf Kernaktivitäten des Wissensmanagements bezeichnet.⁶¹ Sie bilden einen Kreislauf wie in Abbildung 9 dargestellt und stellen ein grobes Rahmenwerk für alle Wissensmanagementaktivitäten innerhalb einer Organisation dar.

⁵⁸ Vgl. North 2011, S. 40.

⁵⁹ Vgl. Malik 2001.

⁶⁰ Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2008.

⁶¹ Vgl. Heisig 2005.

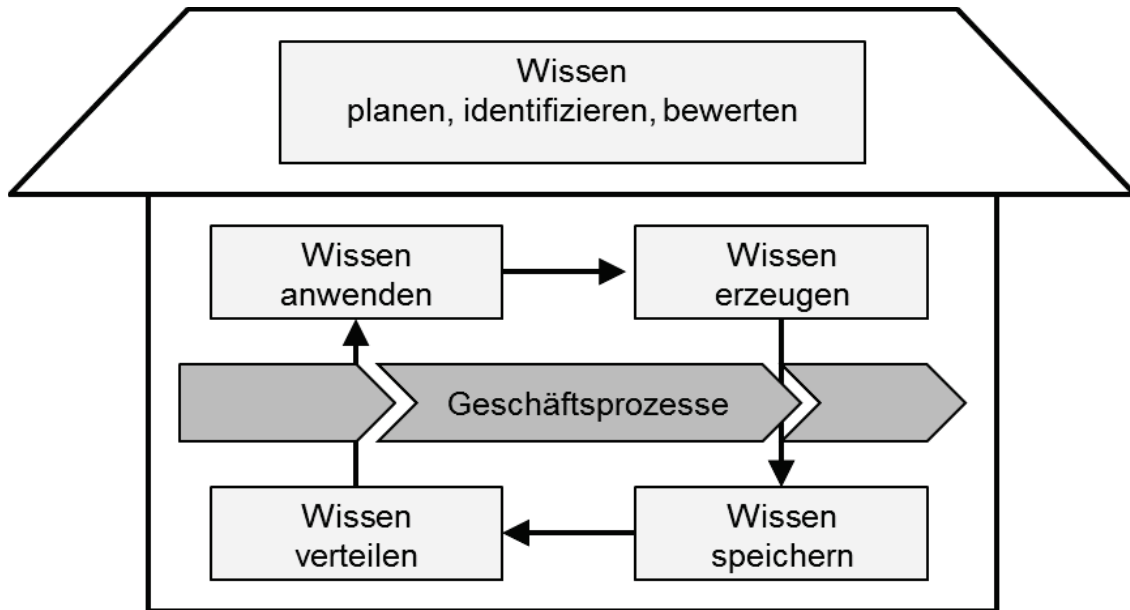


Abbildung 9 Kernaktivitäten des Wissensmanagements⁶²

- Die Aktivität „Wissen planen, identifizieren und bewerten“ steht für Aktivitäten auf strategischer Ebene zur Identifikation und Einschätzung von vorhandenem Wissen und Wissensträgern auf der einen Seite und von aktuellen und zukünftigen Wissensbedarfen auf der anderen Seite.
- „Wissen erzeugen“ wiederum beschreibt den bewussten Wissenszuwachs von Personen oder Personengruppen innerhalb der betrachteten Organisation durch Aufgabenbearbeitung. Wissen entsteht innerhalb einer Organisation durch das Bearbeiten von Aufgaben und Projekten und daneben durch den Wissenszuwachs, den neue Mitarbeiter mitbringen. Im Rahmen der Produktentwicklung nimmt die Validierung eine entscheidende Rolle bei der Erzeugung von Wissen ein, da nur durch Validierung der Arbeitsergebnisse Wissen entstehen kann.⁶³
- „Wissen speichern“ beinhaltet dabei das „Speichern“ bzw. „Bewahren“ sowohl in Form von analogen und digitalen Dokumenten als auch in Form gesammelter Erfahrung einzelner Mitarbeiter bzw. im „kollektiven Gedächtnis“ einer Gruppe.
- „Wissen verteilen“ deckt demnach analog sowohl das Bereitstellen materieller Wissensträger in Form digitaler und analoger Dokumente als auch den Wissenstransfer zwischen Personen und Gruppen im Sinne der Kommunikation ab.

⁶²Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2008 / nach Heisig, P.: Integration von Wissensmanagement in Geschäftsprozesse. Berlin: eureki, 2005, S. 63.

⁶³ Dritte Hypothese zur Produktentstehung nach Albers 2010.

- „Wissen anwenden“ beinhaltet alle Aktivitäten, in denen das vorhandene Wissen gezielt genutzt wird. Dabei können Problemlösungs- und Kreativitätsmethoden genutzt werden, um vorhandenes Wissen zielführend und effizient einzusetzen.

Auch Probst und Romhardt stellen mit den „Bausteinen des Wissensmanagements“ ein vergleichbares Rahmenmodell für Wissensmanagement vor (siehe Abbildung 10).⁶⁴ Sie nutzen eine vergleichbare Einteilung der Aktivitäten. Auch sie trennen in eine strategische und planerische Ebene („Äußerer Kreislauf“) sowie eine operative Ebene („Innerer Kreislauf“). Wissensidentifikation („Wissenstransparenz“) wird hier jedoch der operativen Ebene zugeordnet. Außerdem trennen sie Wissenserzeugung in Wissenserwerb von externen Quellen und Wissensentwicklung im Sinne von Wissenszuwachs innerhalb der Organisation. Abgesehen davon und von einigen abweichenden Bezeichnungen gleichen sich diese beiden Rahmenmodelle in vielen Belangen.

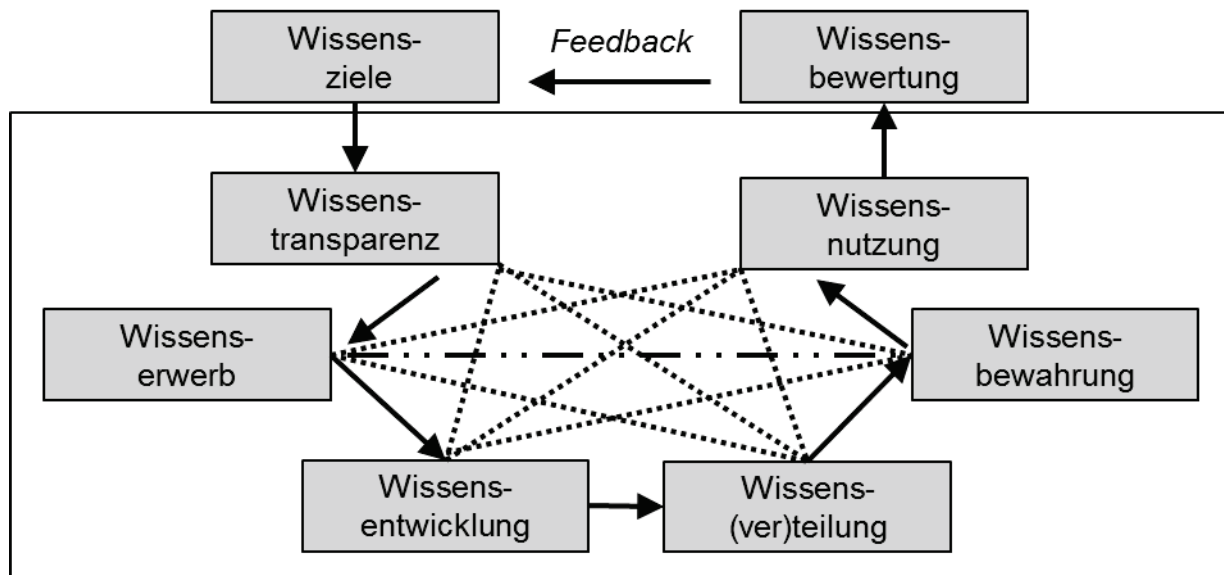


Abbildung 10 Bausteine des Wissensmanagements⁶⁵

Mit Fokus auf Wissensmanagementlösungen, die auf den Werkzeugen der Informationstechnologie (IT) basieren, analysieren Studer et al. die Potentiale von Ontologien. Dabei bauen Sie auf den existierenden Rahmenmodellen des Wissensmanagements auf. Bezüglich der Wissensmanagementaktivitäten auf operativer Ebene (vgl. Abbildung 11) stellen sie noch die Aktivität des Imports von Wissen in Form von Dokumenten und Metadaten heraus. Sie unterstreichen den Bedarf der engen Verknüpfung und wechselseitigen Abstimmung der einzelnen

⁶⁴ Probst/Romhardt 1997.

⁶⁵ Eigene Darstellung nach Probst/Romhardt 1997, S. 5.

Aktivitäten aufeinander, um Wissensmanagement effizient durch ontologiebasierte Systeme zu unterstützen.⁶⁶

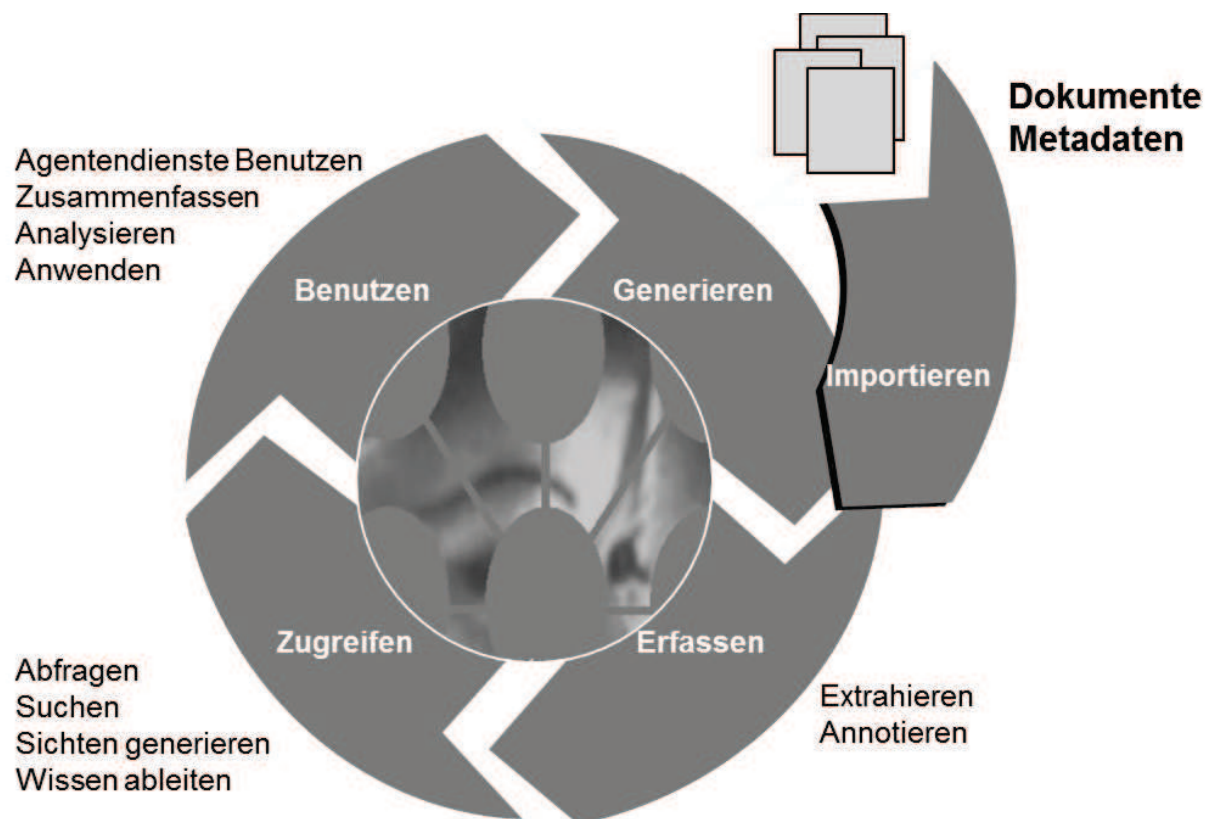


Abbildung 11 Wissensprozess nach Studer⁶⁷

Das ontologiebasierte Bereitstellen von Gestaltungswissen ist vor diesem Kontext als eine elektronische Unterstützung der Aktivität „Wissen verteilen“ einzuordnen. Bedingt durch die Notwendigkeit der engen Abstimmung der Aktivitäten aufeinander kann dieses Bereitstellen nicht isoliert betrachtet werden. Die Möglichkeiten des Bereitstellens werden insbesondere durch die Art und Qualität der Aktivität „Wissen speichern“ beeinflusst. In vielen Ansätzen werden sie daher integral betrachtet und gemeinsam als Wissensaustausch oder Wissenstransfer betrachtet. Effizienter Wissensaustausch ist von essentieller Bedeutung für die effiziente Nutzung von bereits vorhandenem und die Erzeugung von neuem Wissen.⁶⁸

⁶⁶ Studer et al. 2001.

⁶⁷ Eigene Darstellung nach Studer et al. 2001 S. 6.

⁶⁸ Vg. Nonaka/Takeuchi 1997 S. 104f.

2.2.2 Wissensaustausch

In der Literatur finden sich verschiedene Methoden und Techniken zur Unterstützung des Wissensaustausches im Rahmen des Wissensmanagements wieder. Sie reichen von Hinweisen zur grundlegenden strategischen Unternehmensausrichtung bis hin zu einzelnen Methoden und Softwarewerkzeugen. Beispielhaft für diese Bandbreite werden im Folgenden einige Ansätze erläutert.

Probst und Romhardt sehen die Anpassung der Aufbau- und Ablauforganisation eines Unternehmens an die Möglichkeiten moderner Kommunikationstechnologien wie Groupware oder Intranet mit Blick auf den Faktor Mensch als wichtigstes Mittel zur Verbesserung des Wissensaustausches.⁶⁹ Wolf et al. schlagen dazu ein Konzept zur „Wissensmanagement-Middleware“ vor, welches die Ablauforganisation durch agentenbasierte Systeme zur Wissensbereitstellung unterstützt.⁷⁰

Kogut und Zander analysieren die Eigenschaften von Unternehmenswissen und dessen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit. Dabei lenken Sie ihren Fokus weg von den einzelnen Mitarbeitern und betrachten das ganze Unternehmen als Wissensträger. Aus ihrer Analyse schließen sie, dass Wissensaustausch durch einen langfristig stabilen organisatorischen Aufbau eines Unternehmens unterstützt werden muss und dass insbesondere das Abwägen zwischen langfristigen und kurzfristigen Maßnahmen eine besondere Herausforderung darstellt.⁷¹

Die Erforschung und Definition von einheitlichen Modellen zur Beschreibung und Planung von Produktentwicklungsprozessen, wie zum Beispiel das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM, dienen unter anderem dazu, ein allgemeingültiges gemeinsames Verständnis der beteiligten Personen zu schaffen und so den Wissensaustausch innerhalb von Produktentwicklungsprojekten zu vereinfachen.⁷²

North et al. schlagen die Bildung sogenannter Wissensgemeinschaften vor, um Wissen wiederzubeleben, auszutauschen, transparenter zu machen und neue Kompetenzen zu entwickeln. Diese Gemeinschaften bilden eine Plattform, welche die intrinsische Motivation zum Wissensaustausch eines jeden Menschen nutzt und diese zum gezielten Wissensaufbau im Unternehmen einsetzt.⁷³

Groupware oder auch „Computer supported collaborative work“ ist ein Sammelbegriff für verschiedene Softwareansätze zur Unterstützung des Wissensaustauschs.

⁶⁹ Vgl. Probst/Romhardt 1997.

⁷⁰ Vgl. Wolf et al. 1999, S. 764.

⁷¹ Vgl. Kogut/Zander 1992.

⁷² Vgl. Albers/Braun 2011a.

⁷³ Vgl. North et al. 2000.

Groupware wurde ursprünglich in den 1980er Jahren als ein integraler Softwareansatz zur elektronischen Unterstützung von Teamarbeit entwickelt.⁷⁴ Dieser Name hat sich seither zu einem Überbegriff für verschiedenste Softwaresysteme entwickelt, die folgende Anforderungen erfüllen:

1. Expliziter Gruppenbezug
2. Elektronische Kommunikationsmöglichkeiten
3. Informationsmanagementfunktionen⁷⁵

Zu Groupware werden Softwareprogramme gezählt, welche den Wissensaustausch im Sinne der Kommunikation unterstützen, ohne das Wissen als solches am Rechner zu modellieren. Sie reichen von E-Mail- und Terminabstimmungssoftware, über Software zur digitalen Zusammenarbeit bis hin zu Internetportalen und sogenannten Yellowpages, welche die Identifikation und das Kontaktieren von Wissensträgern unterstützen. Groupware kann nach den Dimensionen der zeitlichen und räumlichen Integration unterschieden werden (siehe Abbildung 12)

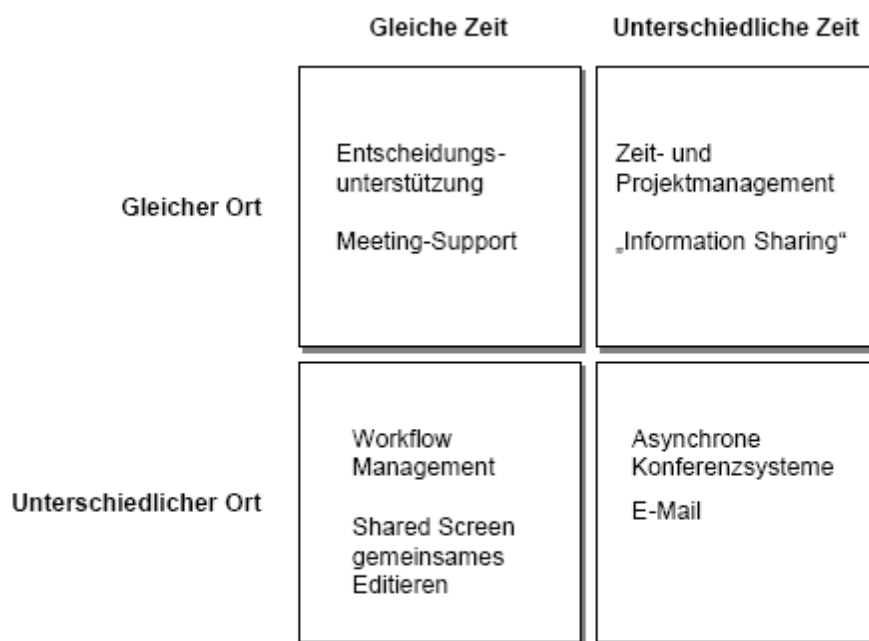


Abbildung 12 Dimensionen von Groupware⁷⁶

Auch heute noch wird Groupware durch immer neue Softwarelösungen erweitert, die den Wissensaustausch zwischen Personen unterstützen, indem dieser dokumentiert und zeitlich und/oder räumlich entkoppelt wird.

⁷⁴ Vgl. Wagner 1995.

⁷⁵ Dier/Lautenbacher 1994.

⁷⁶ Wagner 1995.

Ein weitverbreitetes Werkzeug zur Wissensbereitstellung in Unternehmen sind Wiki-Systeme. Sie bestehen aus einer Sammlung von Webseiten mit Text- und Bildinformationen – den Wikiseiten. Durch die Verwendung einer einfachen Syntax können Links erzeugt werden, sodass Elemente auf einer Wikiseite auf eine andere Wikiseite oder auf beliebige Webinhalte verweisen. Dadurch können enthaltene Informationen beliebig vernetzt werden und erlauben es einem Wissensträger, sein Verständnis über Zusammenhänge darzustellen. Wikiseiten können immer wieder editiert und erweitert werden. So können mehrere Wissensträger einen gemeinsamen Wissensspeicher aufbauen. Der Zugriff auf Wikiseiten erfolgt in der Regel über Schlagwortsuche. Dazu kann der Nutzer mithilfe der Links den Wissensspeicher explorativ entsprechend seines Bedarfs erforschen und sich anhand der enthaltenen vernetzten Informationen Wissen aufbauen. Viele Wikis sind frei zugänglich und es existiert eine Vielzahl an Zusatzprogrammen, die das Editieren und Suchen von Informationen erleichtern. Wikis werden auf der einen Seite als umfangreiche und dauerhafte Wissensspeicher genutzt, welche ständig erweitert und verbessert werden. Das bekannteste Beispiel dafür ist Wikipedia⁷⁷, welches ein umfassendes Lexikon darstellt und mittlerweile dank der extremen Vielzahl von freiwilligen Autoren allen anderen Lexika bezüglich Umfang und Anzahl der Nutzer den Rang abgelaufen hat. Auf der anderen Seite eignen sich Wikis ebenso hervorragend dazu, eine temporäre Wissensbasis im Rahmen von Produktentwicklungsprojekten aufzubauen.⁷⁸

Eine Weiterentwicklung von Wikis stellen semantische Wikis dar. Diese erlauben die Annotation semantischer Daten an einzelne Wikiseiten. Auf diese Weise kann die Bedeutung der auf einer Wikiseite enthaltenden Information genauer spezifiziert werden. Dadurch lässt sich der eigentlich chaotische Aufbau einer Wikiseitensammlung strukturieren. Die annotierte semantische Information erlaubt eine verbesserte Suche und so einen insgesamt gezielteren Zugriff auf das System.⁷⁹

Knowledge-based Engineering als weitere Methode fasst Ansätze zusammen, die Wissen in sogenannten CAX-Systemen bereitstellen. Dazu gehören wissensbasierte Parametrik, erweiterte Features, „intelligente“ Komponentenkataloge und wissensbasierte Produktkonfiguratoren.⁸⁰ Gestaltungswissen wird in Regeln oder anderen Wissensrepräsentationsmethoden abgebildet und dazu genutzt den

⁷⁷ Wikipedia 2012.

⁷⁸ Vgl. Albers et al. 2007.

⁷⁹ Vgl. Decker et al. 2005.

⁸⁰ Vgl. Vajna et al. 2009, S. 433; Albers et al. 2012b.

Konstrukteur bei der Gestaltung seines Produktmodells zu unterstützen. Generell unterscheidet man zwischen regelbasierten und agentenbasierten Systemen.⁸¹

Ein regelbasiertes System in der Konstruktion beinhaltet geometrische Regelsätze, die die Konformität eines Bauteils mit zuvor definierten Restriktionen sicherstellen. Die wissensbasierte Entwicklungsumgebung für urgeformte Mikrobauteile⁸² stellt ein Beispiel für ein regelbasiertes System dar. Diese überprüft die Herstellbarkeit eines Bauteils durch Mikro-Urformprozesse auf Basis von CAD-Daten. Agentenbasierte Systeme stellen modellbasierte Ansätze zur Integration von Wissen auf Basis verschiedener Wissensstrukturen und -quellen dar. Ein Beispiel dafür ist das ProKon-System, das eine Konstruktion anhand des gespeicherten Konstruktionswissens in Bezug auf Auslegung und Normkonformität überprüft und daraus Vorschläge zur Verbesserung der Gestaltung ableitet.⁸³

In existierenden Ansätzen zum Wissensaustausch werden meist zwei grundlegende Arten von Wissensmanagementstrategien identifiziert. Auf der einen Seite solche, die Wissen von Person zu Person weitergeben und so das Wissen verbreiten und kollektivieren. Auf der anderen Seite solche, die Wissen über Speichermedien verfügbar machen.⁸⁴ Für diese beiden Arten sind die Bezeichnungen Personalisierungsstrategie und Kodifizierungsstrategie üblich.⁸⁵

Die Personalisierungsstrategie (engl.: personalization strategy) behandelt Wissen als etwas, das nicht allgemeingültig definiert werden kann und nur in der Praxis, im Rahmen von Aktivitäten und bei der Interaktion zwischen Individuen entsteht. Diese Strategie verfolgt das Ziel, den Wissensaustausch zwischen Personen zu verbessern. Auch hier können informationstechnische Systeme unterstützen. Der Computer dient dann in erster Line als Kommunikationsunterstützung.

Fuchs-Kittowski trennt die personengebundenen Ansätze zum Wissensaustausch in Personalisierungs- und Sozialisationsstrategien und differenziert so zwischen solchen Techniken, die einzelne Wissensträger analysieren, fördern und verfügbar machen, und jenen Techniken, die Wissenserzeugung, -austausch und -anwendung in der Gruppe unterstützen.⁸⁶

⁸¹ In der Informationstechnik bezeichnet (Software-)Agent ein Computerprogramm, das innerhalb einer Softwareumgebung zu eigenständigen Aktionen fähig ist, um seine vorgegebenen Ziele zu erreichen. Vgl. Wooldridge 2002, S.5.

⁸² Vgl. Albers et al. 2005.

⁸³ Vgl. Kratzer et al. 2010.

⁸⁴ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2008, Probst/Romhardt 1997 VDI, North 2011, McMahon et al. 2004, u.a..

⁸⁵ Vgl. Hansen et al. 1999.

⁸⁶ Vgl. Fuchs-Kittowski et al. 2004.

Bei der Kodifizierungsstrategie (engl.: „codification strategy“) wird Wissen auf einem Medium gespeichert, mit dem Ziel, es jedermann innerhalb der betreffenden Organisation gleichermaßen zugänglich zu machen. Diese Strategie basiert auf der Annahme, dass es sich bei Wissen um ein Gut handelt, das in Form von Artefakten und diskreten Einheiten gehandhabt werden kann. Entsprechend erlaubt ein solches wissensbasiertes System sowohl Wissensrepräsentation – etwa in der Form einer Speicherung von Wissen auf einem Datenträger – als auch Wissensbereitstellung, welche das Wissen für Personen verfügbar und nutzbar macht.⁸⁷ Die gewaltigen Fortschritte in der Informationstechnologie haben rechnerbasierten Ansätzen zu großer Popularität und Verbreitung verholfen. Besser als auf jedem anderen Medium kann man auf Computern große Mengen verschiedener Informationen abspeichern und verarbeiten. Heutzutage basieren sämtliche Ansätze zur umfassenden Wissensrepräsentation und -bereitstellung im Bereich der Produktentwicklung auf Computeranwendungen. Hansen stellt fest, dass in Unternehmen mit hochgradig standardisierten Produkten die Kodifizierungsstrategie zum Einsatz kommt und in Unternehmen mit Individualprodukten dagegen die Personalisierungsstrategie.⁸⁸

Back bezeichnet diese beiden grundlegenden Strategien des Wissensmanagements als „people to people“-Ansätze – also Wissensaustausch zwischen Personen – und „people to document“-Ansätze, welche das Wissen – basierend auf Datenbanken – langfristig verfügbar machen.⁸⁹

Ziel dieser Wissensmanagementstrategien ist es immer, Wissen zu nutzen und zu erhalten, indem es von einzelnen Personen gelöst wird. Sie fokussieren jeweils die Aktivität „Wissen verteilen“. Während jedoch die Personalisierungsstrategie durch direkten Wissensaustausch erfolgt, wird bei der Kodifizierungsstrategie Wissen immer zunächst auf einem Medium gespeichert, um dann mittelbar auf einen Wissensanwender übertragen zu werden. Der Vorteil des Wissensaustausches durch direkte Kommunikation zwischen Personen liegt in der Tatsache begründet, dass durch wechselseitige iterative Kommunikation auf den individuellen Wissensbedarf des Wissensempfängers eingegangen und dadurch ein gemeinsames Verständnis als Basis für den Austausch sichergestellt werden kann (siehe Abbildung 13).

⁸⁷ Vgl. Göbler 1992, S. 21ff.

⁸⁸ Vgl. Hansen et al. 1999.

⁸⁹ Vgl. Back 2001.

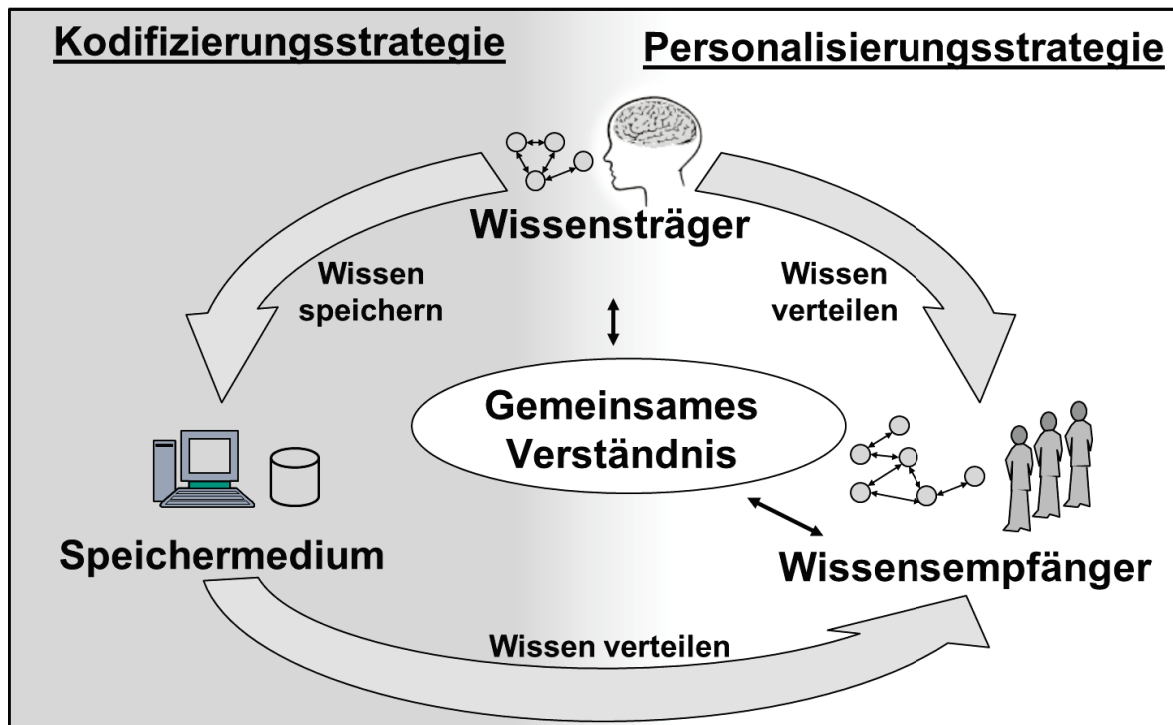


Abbildung 13 Wissensaustausch durch Kodifizierung und Personalisierung⁹⁰

Methoden und Werkzeuge des Wissensmanagements lassen sich nicht eindeutig, sondern nur tendenziell den beiden grundlegenden Strategien zuordnen. McMahon et al. analysieren die Wissensmanagementtechniken Communities of Practice, Company Organisation, Groupware, Informationssysteme, Ontologien und Klassifizierungen, Data Mining und Knowledge-based Engineering und ordnen sie entlang einer Achse mit den grundlegenden Strategien als Pole ein (siehe Abbildung 14).⁹¹

⁹⁰ Eigene Darstellung nach Albers et al. 2011a.

⁹¹ Vgl. McMahon et al. 2004.

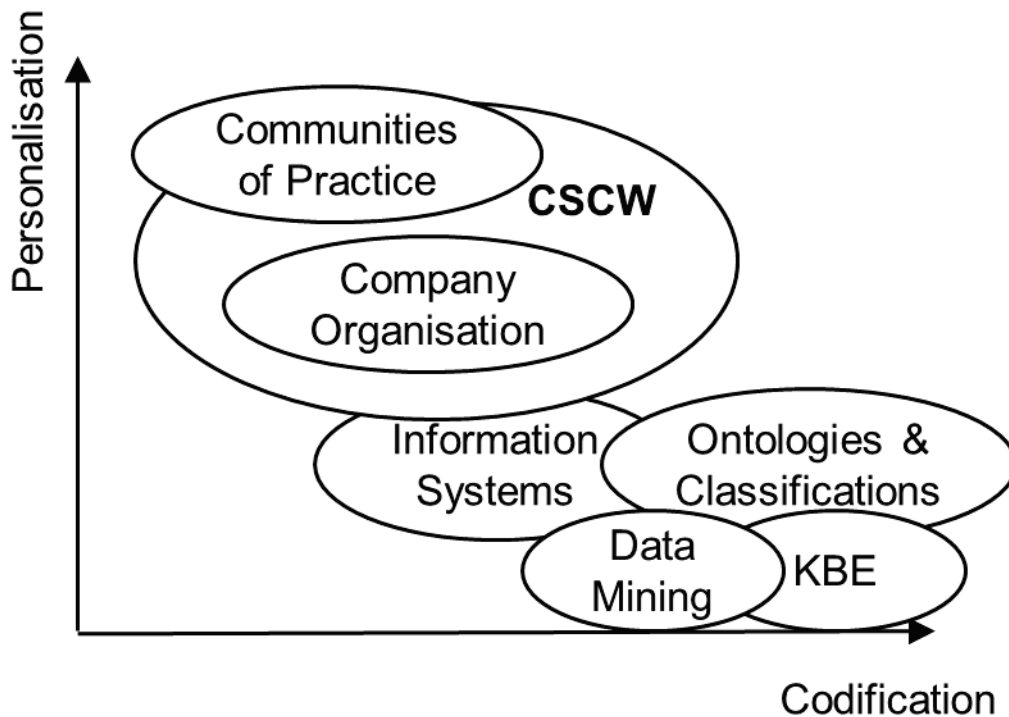


Abbildung 14 Techniken des Wissensmanagements geordnet hinsichtlich Personalisierungs- und Kodifizierungsstrategie.⁹²

Sie kommen zu dem Schluss, dass beim Wissensaustausch entsprechend der Kodifizierungsstrategie Ontologien besonderes Potential besitzen. Jedoch stellen sie auch fest, dass für ein umfassendes Wissensmanagement in Unternehmen nur die Vereinigung verschiedener Wissensmanagementtechniken zum Erfolg führen kann und diese je nach Situation ausgewählt und eingesetzt werden müssen. Vielfach beobachtetes Scheitern von Ansätzen, die rein auf Informationstechnik fokussieren, bestätigt diese Schlussfolgerung und hat neue Ansätze des Business Social Networking unter Verwendung von Web 2.0 und Social Tagging begründet.⁹³ Diese bieten interessante Möglichkeiten etablierte, PDM- und ERP-Systeme zu ergänzen und so das Wissensmanagement in der Produktentstehung zu verbessern.⁹⁴

Evaluation von Wissensaustausch ist nur bedingt möglich. Der Wissenstand eines Wissensträgers – ganz gleich, ob es sich um eine Person oder einen informationstechnischen Agenten in weiterem Sinne handelt – ist nicht direkt messbar. Es ist nur indirekt, nämlich durch das Verhalten eines Wissensträgers, möglich, auf seinen Wissensstand zurückzuschließen.⁹⁵ Gestaltungswissen ist demzufolge nur durch die

⁹² McMahan et al. 2004, S. 309.

⁹³ Vgl. Schütt 2007.

⁹⁴ Sauter 2012.

⁹⁵ Vgl. Newell 1981.

Bearbeitung von Gestaltungsproblemen nachweisbar. Beim Bearbeiten von Aufgaben entsteht aber zugleich neues Wissen.⁹⁶ Das „Messen“ des Wissenstands eines Wissensträgers ist folglich immer mit Wissenszuwachs verbunden. Eine einfache Vorher-Nachher-Betrachtung zur Analyse des Erfolges und der Qualität des Austausches von Gestaltungswissen ist daher nicht möglich.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der rechnergestützten Bereitstellung von Gestaltungswissen und adressiert somit auf die beiden eng miteinander verknüpften Aktivitäten Wissen speichern und Wissen bereitstellen. Die anderen Kernaktivitäten im Umgang mit Wissen gemäß Abbildung 9 – „Planen“, „Identifizieren“, „Bewerten“ – sowie „Wissensanwendung“ und „Wissensgenerierung“ stehen nicht im Fokus dieser Arbeit. Im Hinblick auf diese spezifische Problemstellung werden im Folgenden nur solche Eigenschaften von Wissen erläutert, welche Aufschluss darüber geben, in welcher Form Wissen vorhanden ist, inwiefern es computergestützt abgebildet bzw. transportiert werden kann und welche Arten von vorhandenem Produktentwicklungswissen existieren.

2.2.3 Abgrenzung der Begriffe Information und Wissen

Informationstechnische Systeme dienen in erster Linie der Informations- und Datenverarbeitung. Im Hinblick auf die elektronische Bereitstellung von Wissen drängt sich die Frage auf, inwieweit Wissen in derartigen Systemen erfasst und bereitgestellt werden kann. Dazu gilt es zunächst den Zusammenhang zwischen Wissen, Information und Daten zu analysieren.

Die in der Produktentwicklung am häufigsten anzutreffende Beschreibung bezeichnet Wissen als *„vernetzte Information, die in die Lage versetzt, Vergleiche anzustellen, Verknüpfungen herzustellen und Entscheidungen zu treffen“*.⁹⁷ Information steht dabei für strukturierte Daten, welche wiederum auf objektiven Fakten beruhen.

Auch wenn die Begriffe „Daten“ und „Information“ aus der Informationstechnik wohlbekannt sind und für digitale und physikalische Dokumente verwendet werden, ist festzuhalten, dass sie bei der Verwendung dieser Einteilung zur Beschreibung von Wissen, Daten und Informationen keineswegs auf digitale und physische Objekte beschränkt ist, sondern in der Regel auch menschengebundene Daten und Information beinhaltet. Auch der Mensch erfasst schließlich über seine Sinne zunächst Daten, die er über Nerven an sein Gehirn leitet und dort zu Information verarbeitet und so Wissen generiert.

⁹⁶ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2008.

⁹⁷ Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2008.

North erweitert die Abgrenzung von Daten, Information und Wissen vor dem Hintergrund des Wissensmanagements in Unternehmen.⁹⁸ Er setzt die Begriffe in direkten Zusammenhang mit dem Unternehmenserfolg und stellt sie in der „Wissenstreppe“ dar (siehe Abbildung 15).

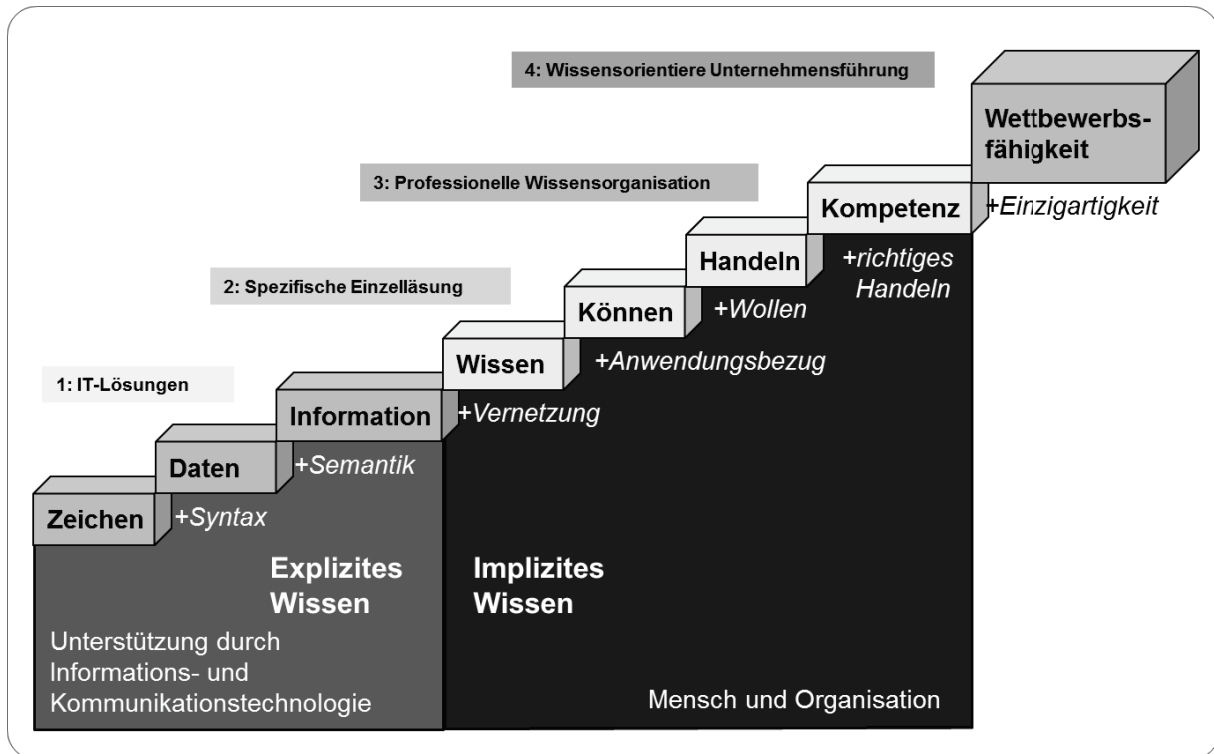


Abbildung 15 Wissenstreppe nach North⁹⁹

Wissen ist dabei die Basis für anwendungsorientiertes Handeln. Richtiges Handeln wiederum bedeutet Kompetenz. Alleinstellungsmerkmale in bestimmten Kompetenzbereichen sind die Grundlage für die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. IT-Lösungen können lediglich Daten und Informationen nicht aber Wissen bereitstellen. Sie können den Menschen jedoch beim Aufbau und Austausch von Wissen durch Wiedergabe relevanter Informationen unterstützen.¹⁰⁰

North unterstreicht so die zentrale Bedeutung des Wissens für den Unternehmenserfolg, hält aber auch fest, dass Wissensmanagementansätze, die rein auf IT-Lösungen ohne begleitende organisatorische Maßnahmen basieren, lediglich begrenztes Potential haben.¹⁰¹

⁹⁸ Vgl. North 2011.

⁹⁹ Darstellung nach Meboldt 2008, S. 63.

¹⁰⁰ Albers et al. 2010a.

¹⁰¹ Vgl. North 2011, S. 40f.

Nach Probst und Romhardt ist die Abgrenzung von Daten, Wissen und Information in vielen Fällen nicht eindeutig. Beide sprechen viel mehr von einem kontinuierlichen Übergang zwischen den drei Zuständen Daten, Information und Wissen. Dabei bilden Daten und Wissen die extremen Pole. Diese Pole werden durch einige dichotomische Merkmale charakterisiert (siehe Abbildung 16).¹⁰²

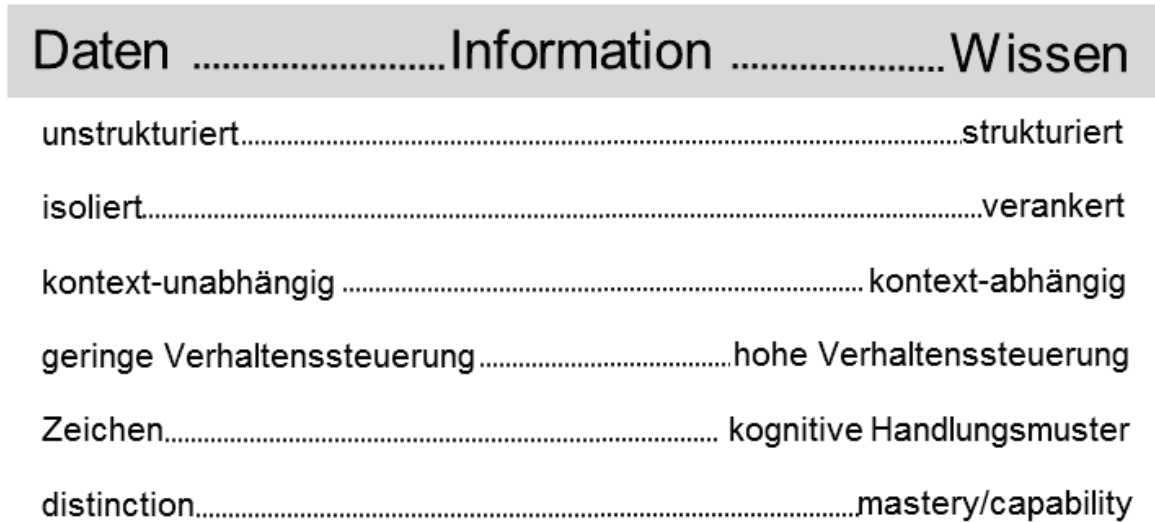


Abbildung 16 Das Kontinuum von Daten, Informationen und Wissen.¹⁰³

Demnach ist die strikte Unterscheidung von Daten, Informationen und Wissen nicht möglich. Ahmed ergänzt diese Tatsache um die Feststellung, dass diese Unterscheidung jeweils abhängig von der Person ist, welche mit Daten, Informationen und Wissen umgeht. Wissen ist für eine Person nur durch Interpretation auf Basis des eigenen Verständnisses von Information zu unterscheiden. Informationen sind von Daten wiederum nur durch das Bewusstsein einer Person über deren Kontext zu trennen.¹⁰⁴

Durch dieses Kontinuitätsverständnis von Daten, Information und Wissen erübrigt sich auch die zu Eingang dieses Abschnitts aufgeworfene Frage, inwiefern Wissen über eine Datenbank bereitgestellt werden kann. Zwar können IT-Lösungen mit elektronischen Speichermedien nur Daten, nicht aber Wissen enthalten, sie können aber dennoch genutzt werden, um Wissen bereitzustellen. In einem Informationssystem enthaltene Daten ermöglichen es einem Nutzer, Wissen durch die Interpretation der Daten zu erlangen. Voraussetzung dafür ist jedoch ein gewisses Vorwissen und eine aktive Rolle des Nutzers. Eine gute Strukturierung der Inhalte, eine umfassende

¹⁰² Probst/Romhardt 1997.

¹⁰³ Probst/Romhardt 1997 S. 2.

¹⁰⁴ Ahmed et al. 1999.

Kontextinformation und die Bezugnahme auf mögliches Vorwissen erleichtern es einem Nutzer, sich auf diese Weise Wissen zu erarbeiten.

Auch Gestaltungswissen liegt nur teilweise in Form dokumentierter Gestaltungsvorschläge, Richtlinien etc. vor. Kennt der Nutzer den Kontext bezüglich deren Gültigkeit und Anwendbarkeit nicht oder kann diesen nicht aus ihnen selbst ableiten, stellen sie für ihn nur Daten ohne jegliche Bedeutung dar. Das Wissen, welches ein Nutzer aus einem dokumentierten Gestaltungsvorschlag extrahiert, ist stark von seinem subjektiven Verständnis und seiner momentanen Problemstellung abhängig.

McMahon sieht eine große wissenschaftliche Herausforderung in der Erfassung von Begründungen von Entscheidungen in der Produktentwicklung, da im bisherigen Wissensmanagement zwar die Ergebnisse von Entscheidungen festgehalten werden, nicht aber deren Begründungen.¹⁰⁵ Dies gilt insbesondere für Gestaltungswissen: Ein großer Teil dieses Wissens liegt nicht in Form von Daten vor, sondern lässt sich nur anhand erfolgreicher Arbeitsergebnisse und effizienter Vorgehensweisen der Wissensträger erkennen. Für die elektronische Bereitstellung derartigen Wissens stellt das Erfassen solchen nicht dokumentierten Wissens eine große Herausforderung dar und bedarf intensiver Wissensakquise.

2.2.4 Artikulierbarkeit von Wissen

Beim Wissensaustausch liegt die Herausforderung nicht nur darin, dass Wissen vielfach nicht dokumentiert ist, sondern dass es schlichtweg nicht möglich ist, es vollständig zu dokumentieren. Mit seiner Feststellung „*Wir wissen mehr als wir zu sagen wissen*“ prägt Polanyi den Begriff des impliziten Wissens (englisch: implicit knowledge) als nicht artikulierbares Wissen.¹⁰⁶ Ausgehend von den japanischen Forschungsarbeiten von Nonaka und Takeuchi im Bereich Wissensmanagement, wird für nicht artikulierbares Wissen auch der Begriff des *taziten* oder *stillen* Wissens (englisch: tacit knowledge) verwendet.¹⁰⁷

Diese beiden Adjektive „implizit“ und „tazit“ sind jedoch nicht synonym zu verwenden, da ihrer Definition in den genannten Arbeiten unterschiedliche Annahmen zugrunde liegen. Unter der Berücksichtigung der Wissensdefinitionen der Wirtschaftswissenschaften, der Informatik und Philosophie definiert Meyer ein Dimensionsmodell des Wissens mit den Polen „explizierbar“ und „nicht explizierbar“ und ordnet die Wissensbegriffe darin ein (vgl. Abbildung 17).¹⁰⁸

¹⁰⁵ Vgl. McMahon et al. 2004.

¹⁰⁶ Polanyi 1985, S.14.

¹⁰⁷ Nonaka 1991.

¹⁰⁸ Meyer 2005.

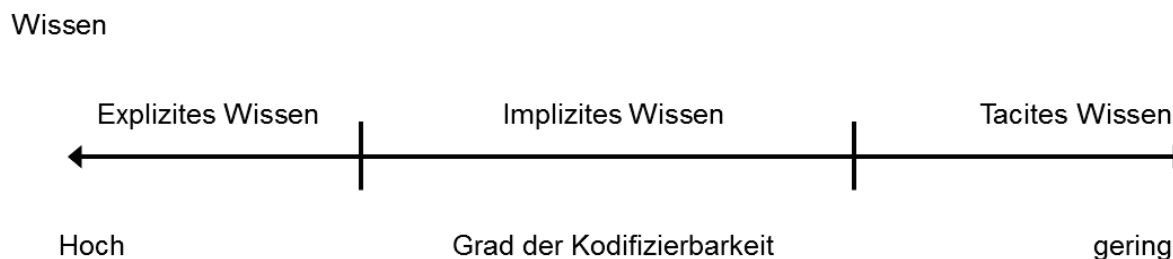


Abbildung 17 Wissenstypen in dimensionaler Darstellung¹⁰⁹

Explizites Wissen (englisch: explicit knowledge) ist artikulierbar und kann in Worten und Zahlen formalisiert werden, weshalb es leicht in Form von Daten, Formeln, Spezifikationen, Handlungsanweisungen etc. kommunizierbar ist. Es kann daher formal und systematisch ausgetauscht werden.¹¹⁰ Es lässt sich durch Medien außerhalb des Menschen speichern und wird daher auch als körperloses Wissen (englisch disembodied knowledge) bezeichnet. Explizites Wissen eignet sich besonders, um über Kommunikations- und Informationstechnologie ausgetauscht zu werden.¹¹¹

Implizites Wissen (englisch: implicit knowledge) ist nur schwer artikulierbar. Es stellt das individuelle Wissen einer Person dar und beruht nicht nur auf Fakten, sondern gleichermaßen auf Idealen, Werten und Gefühlen des Wissensträgers.¹¹² Es kann nur sehr viel schwerer und nur unvollständig formuliert und formalisiert werden. Es ist daher schwer zu kommunizieren.¹¹³

Tacites Wissen umfasst stilles Wissen, das grundsätzlich nicht verbalisiert oder formalisiert werden kann. Es kann daher auch nicht direkt ausgetauscht werden, sondern ist nur durch Erfahrung zu erlangen.¹¹⁴ Ein Beispiel aus dem Bereich der Produktentwicklung dafür ist das Wissen um die Wahl des richtigen Abstraktionsgrades eines technischen Systems beim Lösen eines Gestaltungsproblems.¹¹⁵ Dieses nichtartikulierbare Wissen wird in vielen Veröffentlichungen nicht in die Betrachtung eingeschlossen oder als Teilmenge des impliziten Wissens gesondert erwähnt.

¹⁰⁹ Vgl. Meyer 2005, S.4.

¹¹⁰ Vgl. Nonaka/Kanna 1998.

¹¹¹ Vgl. North 2011, S.47.

¹¹² Vgl. North 2011, S.47.

¹¹³ Nonaka 1991.

¹¹⁴ Vgl. Neuweg 1999 S16ff.

¹¹⁵ Vgl. Alink 2010, S. 20ff.

In den meisten Veröffentlichungen im Bereich des Wissensmanagements wird jedoch nur zwischen explizitem und implizitem Wissen als artikulierbarem Wissen und nicht artikulierbarem Wissen unterschieden. Generell empfiehlt Hansen für den Wissensaustausch in solchen Unternehmen, deren Mitarbeiter auf Basis explizitem Wissen arbeiten, die Kodifizierungsstrategie und dagegen für Unternehmen, deren Mitarbeiter vornehmlich auf Basis von nicht artikulierbarem Wissen arbeiten, die Personalisierungsstrategie.¹¹⁶

Die beiden Arten implizites und explizites Wissen werden meistens jedoch nicht als streng getrennte Wissensarten angesehen. Es wird davon ausgegangen, dass zumindest ein Teil des implizit vorhandenen Wissens auch explizit und formalsprachlich dargestellt werden kann.¹¹⁷ Das dynamische Modell zur Wissensbeschaffung und -erweiterung von Nonaka&Takeuchi fußt auf der kontinuierlichen Wissensumwandlung von implizit zu explizit und umgekehrt.¹¹⁸

Snowden kategorisiert Wissen in seinem HANSE-Modell (engl.: ASHEN-Modell) entsprechend der Artikulierbarkeit (siehe Abbildung 18). Er gliedert es in **H**euristiken, **A**rtefakte, **N**atürliche Begabungen, **S**kills (Fertigkeiten) und **E**rfahrungen und trägt jeweils den Grad der Artikulierbarkeit auf. Auch dabei wird keine eindeutige Zuordnung bezüglich der Artikulierbarkeit durchgeführt, vielmehr zeigt er nur jeweils Tendenzen auf. Während Begabungen nur sehr schwer zu artikulieren sind, ist Wissen, das mit Objekten verbunden ist und in Form von Artefakten vorliegt, leicht artikulierbar.¹¹⁹

¹¹⁶ Vgl. Hansen et al. 1999.

¹¹⁷ Apke et al. 2004.

¹¹⁸ Vgl. Nonaka/Takeuchi 1997.

¹¹⁹ Vgl. Snowden 2000.

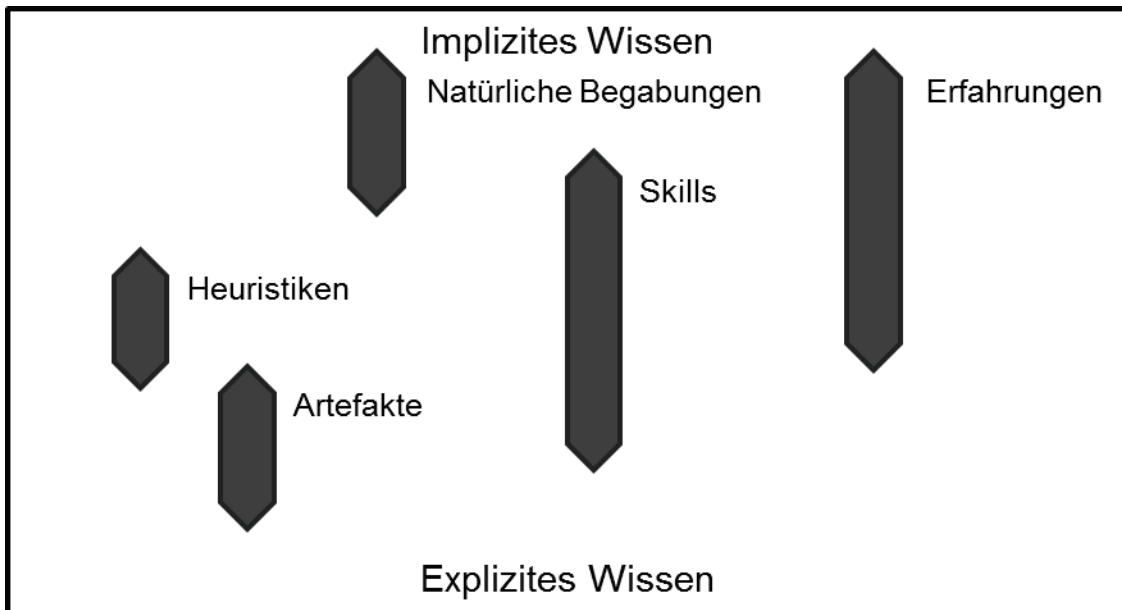


Abbildung 18 HANSE-Modell nach Snowden¹²⁰

Auch Gestaltungswissen liegt nur teilweise in expliziter Form vor, so zum Beispiel in Form existierender Gestaltungshinweise, -vorschläge und -lösungen oder -vorgehensweisen. Anforderungen, Randbedingungen und Entscheidungen, welche zu einer Lösung geführt haben, liegen jedoch in der Regel nicht vollständig explizit vor. Sie basieren mitunter auf langer Erfahrung hinsichtlich Werkstoffen und Anwendungen, welche nicht leicht artikuliert werden kann und somit implizit ist. Gerade dieser Kontext aber ist von grundlegender Bedeutung für die Anwendung und Anpassung einer existierenden Lösung oder Vorgehensweise bei einem neuen Gestaltungsproblem. Dem großen Bedarf der Vermittlung derartigen Wissens steht das Problem einer schwierigen Artikulierbarkeit gegenüber.

Alink beschreibt beispielsweise die Herausforderung der Wahl des adäquaten Abstraktionsgrades bei der Lösungssuche für Gestaltungsprobleme. Diese ist zwar ein grundlegender und allgegenwärtiger, jedoch nur schwach definierter Vorgang beim Problemlösen: Der Abstraktionsgrad ist nicht deterministisch, sondern subjektiv. Der „richtige“ Abstraktionsgrad ist von dem individuellen Erfahrungs- und Kenntnisstand des Problemlösers und auch von dem Problemkontext abhängig, der in der Regel nicht vollständig explizit erfasst werden kann.¹²¹ Folglich können auch Vorgehenshinweise bezüglich der Wahl des Abstraktionsgrades, die sicherlich einen wichtigen Teil von Gestaltungswissen darstellen, letztlich nicht oder nur unzureichend explizit formuliert werden.

¹²⁰ Eigene Darstellung nach Snowden 2000.

¹²¹ Vgl. Alink 2010, S.20ff.

2.2.5 Personalisiertes Wissen und Gruppenwissen

Wissen liegt sowohl in einzelnen Personen (Individuen) als auch in höheren Organisationsformen wie Personengruppen und Unternehmen vor. Diese Zuordnung wird auch als ontologische Dimension des Wissens beschrieben.¹²²

Wissen wird im Allgemeinen durch den Verstand einzelner Personen erzeugt und kann zunächst auch nur von einzelnen Personen angewendet werden kann.¹²³ Im Bereich der Produktentwicklung wird jedoch immer das Handeln von einzelnen Personen innerhalb von Organisationen betrachtet. Hier ist das Erzeugen und Anwenden von Wissen immer auch mit Interaktion und Austausch mit anderen Personen sowie mit Zusammenarbeit verbunden.

Das SECI-Modell von Nonaka und Takeuchi basiert auf der Annahme, dass der Zustand, in dem Wissen vorliegt, veränderbar ist. SECI steht dabei für die vier Möglichkeiten des Wissensübergangs zwischen vier möglichen Zuständen. Diese werden zwischen den beiden Achsen „Organisationsstufe“ und „Formalisierung“ (für explizites und implizites Wissen) aufgespannt (siehe Abbildung 19).

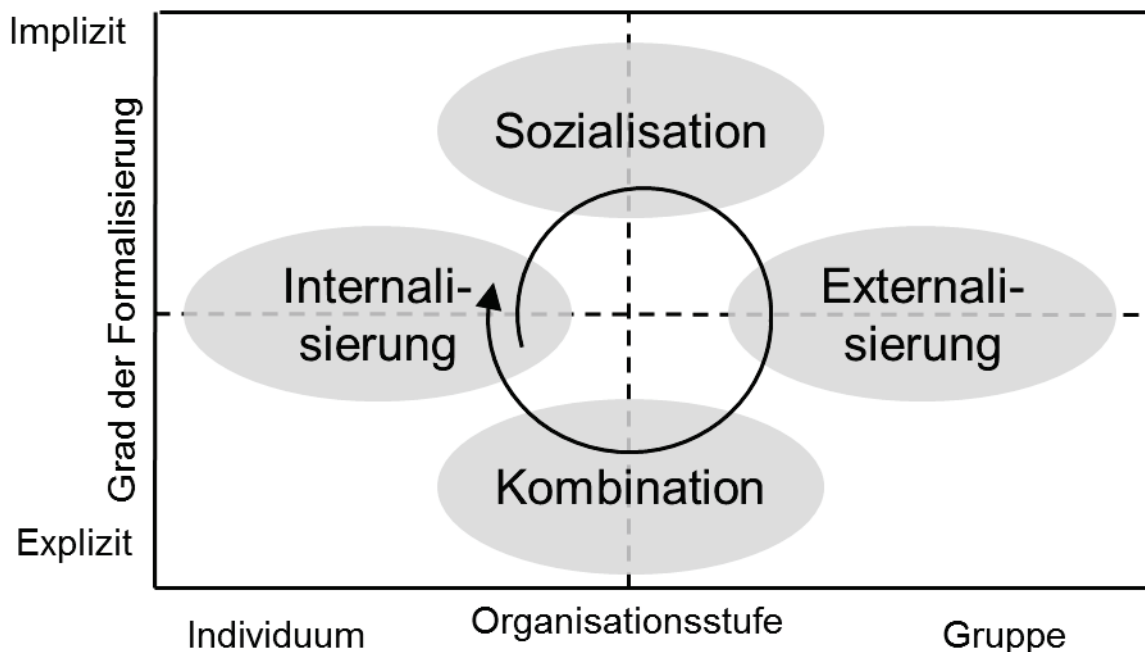


Abbildung 19 SECI-Modell nach Nonaka&Takeuchi¹²⁴

Sozialisation (implizit/Person → implizit/Gruppe) steht für den Erfahrungsaustausch. Externalisierung (implizit/Gruppe → explizit/Gruppe) beschreibt den gemeinschaftli-

¹²² Vgl. Nonaka/Takeuchi 1997.

¹²³ Vgl. Davenport/Prusak 1998.

¹²⁴ Eigene Darstellung nach Nonaka/Takeuchi 1997.

chen Prozess der Artikulation von implizitem Wissen, Kombination (englisch: Combination, explizit/Gruppe → explizit/Person) bezeichnet den Prozess der Erfassung von Konzepten innerhalb eines Wissenskomplexes zur Verbindung verschiedener Wissensbereiche. Bei der Internalisierung (explizit/Person → implizit/Person) wird das explizite Wissen verinnerlicht und in das implizite Wissen einzelner Personen eingegliedert. Nach Nonaka&Takeuchi können Unternehmen Wissen nur dadurch erzeugen und erweitern, dass die vier Wissenszustände kontinuierlich durchlaufen werden.¹²⁵

Im Bereich der Produktentwicklungsforschung unterstreichen auch andere Autoren die Wichtigkeit des Wissensaustausches als notwendige Voraussetzung der Wissensanwendung und –erzeugung, besonders vor dem Hintergrund steigender Interdisziplinarität.¹²⁶

Der Gruppenaspekt von Wissen hat außerdem eine besondere Bedeutung in Bezug auf die Gültigkeit und Richtigkeit von Wissen. Schon Machlup stellt fest, dass auch im technischen Bereich Wissen eng mit Wahrheit verknüpft ist. So muss Wissen nicht zwangsweise auf validierten Theorien basieren, und es gibt oftmals verschiedene widersprüchliche Hypothesen zu denselben Sachverhalten, von denen sich bestenfalls eine einzige als wahr erweisen kann. Trotzdem sind diese Hypothesen Teil unseres Wissens.¹²⁷ Er folgert, dass der Wissensbegriff eng mit der Akzeptanz einer Gemeinschaft verbunden ist.

Vor dem Hintergrund des Wissensmanagements analysiert Geiger verschiedene philosophische Ansätze zur Charakterisierung von Wissen und identifiziert die Unterscheidung zwischen Wissen und Narration als kleinsten gemeinsamen Nenner. Er schließt aus seiner Analyse, dass Wissen immer sozial konstruiert ist und ein sozial anerkanntes Prüfverfahren durchlaufen haben muss. Er folgert daher, dass nur eine Gemeinschaft über die Gültigkeit von Wissen entscheiden kann und nur Gemeinschaften das Attribut „Wissen“ verleihen können.¹²⁸

Die Gültigkeit von Gestaltungswissen kann ebenfalls nicht nur auf validierten Fakten beruhen, da beim Gestalten, bedingt durch ein effizientes heuristisches Vorgehen, praktisch nie alle möglichen Randbedingungen einer Problemstellung vollständig erfasst und überprüft werden.¹²⁹ Insbesondere wenn Gestaltungswissen als Ergebnis eines abgeschlossenen Projektes erfasst und für weitere Problemstellungen

¹²⁵ Vgl. Nonaka/Takeuchi 1997.

¹²⁶ Vgl. Nonaka/Takeuchi 1995, Bullinger et al. 1997, Rehäuser 1999, Albers et al. 2010c

¹²⁷ Vgl. Machlup 1962, S. 23.

¹²⁸ Vgl. Geiger 2005.

¹²⁹ Vgl. Alink 2010, S.14ff.

wiederverwendbar gemacht werden soll, muss dieses verallgemeinert werden. Inwieweit der Geltungsbereich des Gestaltungswissens von dem einen bekannten Einsatzfall auf andere erweitert werden kann, lässt sich nicht validieren und muss daher durch die Gruppe der an dem Projekt beteiligten Personen und Fachleute festgelegt werden.

2.2.6 Sprachgebundenheit von Wissen

Neben der sozialen Konstruktion von Wissen¹³⁰ folgert Geiger aus den Arbeiten zum Wissensbegriff in der Philosophie die Sprachgebundenheit von Wissen. Als erstes Kriterium, dem Wissen entsprechen muss, definiert er: „*Wissen ist immer originär sprachlich verfasst, (...). Außerhalb von Sprache kann es kein Wissen geben*“.¹³¹

Auch wenn die Gültigkeit dieser These im Rahmen dieser Arbeit nicht für den Wissensbegriff in allen seinen Facetten beleuchtet werden soll, so ist doch grundsätzlich festzustellen, dass zumindest der Wissensaustausch immer mit Sprache verbunden ist. Unabhängig ob durch direkte Kommunikation oder über Medien als Zwischenspeicher, erfolgt Wissensaustausch immer explizit und zumindest teilweise über Sprache. Im Bereich des Ingenieurwissens sind dabei auch normierte Darstellungsweisen, wie sie etwa in Zeichnungen, Skizzen und Diagrammen verwendet werden, als eine Form der Sprache zu verstehen.

In der Linguistik wird Wissenstransfer durch Kommunikation anhand vierer psycholinguistischer Ebenen beschrieben.¹³² Ein Sprecher wandelt Wissen, welches er in einer bestimmten Situation (pragmatische Ebene) kommunizieren möchte, auf Basis seines Verständnisses (semantische Ebene) über seinen Wortschatz in Sprache (morphosyntaktische Ebene) um, welche in Form von Lauten oder Schrift (Laut- bzw. Schriftebene) ausgetauscht werden kann. Zu Schrift werden neben Buchstaben auch Symbole in weiterem Sinne wie Zeichnungen, Skizzen und Diagramme etc. gezählt. Der Hörer bzw. Empfänger wandelt dann wiederum Laute bzw. Zeichen über Morphologie und Syntax auf Basis seines Wortschatzes in Bedeutung um und kann sich so auf Basis seines Verständnisses Wissen aneignen (vgl. Abbildung 20).

¹³⁰ Siehe Abschnitt 2.2.5.

¹³¹ Vgl. Geiger 2005.

¹³² Vgl. Müller 2009, S. 383ff.

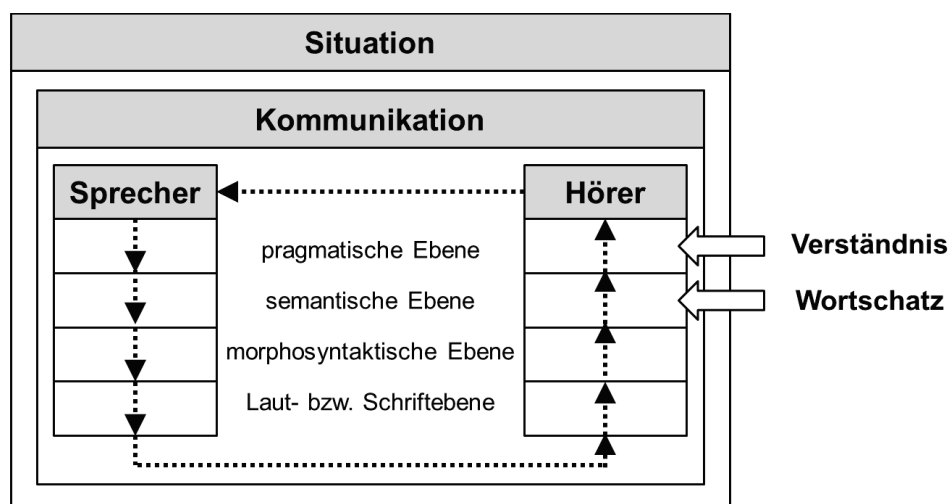


Abbildung 20 Kommunikationssystem der Linguistik¹³³

Die Umwandlung zwischen den psycholinguistischen Ebenen und der Transfer von Lauten bzw. Schriftzeichen sind jeweils potentiell fehlerbehaftet, was die Kommunikation störanfällig macht. Eine Herausforderung bei der verbalen Kommunikation ist beispielsweise, dass Begriffe häufig keine eindeutig festgelegte Bedeutung haben. Diese ist vielmehr abhängig von der jeweiligen Person, die ihn gebraucht, und der Situation, in der sie sich befindet. In der Produktentwicklung zum Beispiel besitzt der Funktionsbegriff eine Vielzahl verschiedener Bedeutung, die je nach Problemstellung variieren.¹³⁴ Verschiedene Begriffsbedeutungen führen zwangsweise zu Störungen in der Kommunikation und beim Wissensaustausch. Über sprachliches Feedback kann der Wissenstransfer bei direkter Kommunikation überprüft werden. So kann der Sprecher das „gesendete Wissen“ auf die spezifische Problemstellung und das Verständnis des Hörers (Wissensempfängers) anpassen.

In der Produktentwicklung wird Wissen oftmals über Bilder oder Datensätze transportiert, also auf nicht verbale Art und Weise. Die Bedeutung der Bilder oder Daten wird dann aber zumeist durch sprachliche Ergänzungen spezifiziert, zum Beispiel über Bildunterschriften oder Kopfzeilen von Datentabellen. Ebenso ist auch eine Vermittlung von Fähigkeiten, z. B. handwerklichen Fähigkeiten, nur durch sprachliches Feedback effizient möglich.

Man kann damit zusammenfassen, dass auch der Transfer von Gestaltungswissen immer explizit über Information erfolgt und erst durch das Verständnis des Wissensempfängers wieder zu Wissen wird. Der Wissensaustausch ist daher störanfällig. Das Bereitstellen von Wissen sollte mit besonderer Rücksicht auf das

¹³³ Eigene Darstellung nach Müller 2009 S.384.

¹³⁴ Vgl. Alink 2010, S. 74ff.

Verständnis und die subjektive Begriffswelt des Wissensempfängers erfolgen und es diesem auf Basis der bereitgestellten Information leicht ermöglichen, sich Wissen anzueignen. Entsprechend der Abgrenzung von Informationen und Wissen¹³⁵ kann der Wissensaustausch unterstützt werden, indem der Wissenskontext explizit zugänglich gemacht wird.

2.2.7 Interdisziplinarität und Komplexität von Wissen

Produktentwicklung scheint auf den ersten Blick allein auf der Anwendung von detailliertem Wissen um die Anwendung physikalischer Gesetze in technischen Systemen aufzubauen. Erfahrungen und Studien zeigen jedoch, dass die rein technische Dimension von Wissen in der Produktentwicklung allein nicht handlungsbefähigend ist. „*Technologisches Handeln ist von Natur aus mehrdimensional, erfordert Verständnis aus einer Vielzahl verschiedener Sichten und stützt sich daher auf Fachgebiete wie Naturwissenschaft, Mathematik, Wirtschaft und Sozialforschung.*“¹³⁶ Entsprechend muss auch die Basis des technischen Handelns – das technische Wissen oder Produktentwicklungswissen – immer mehrdimensional sein und immer eine Vielzahl verschiedener Sichten und Aspekte verschiedener Disziplinen beinhalten und berücksichtigen.

Ehrlenspiel stellt den hohen Vernetzungsgrad von Produktentwicklungswissen heraus und unterstreicht, dass besonders beim Gestalten eine sehr große Zahl von Parametern zu berücksichtigen ist, die zudem stark vernetzt sind.¹³⁷

Zu der Vielzahl an vernetzten Elementen kommt noch die Tatsache, dass Gestaltungs- und Produktentwicklungswissen sich ständig und schnell verändert, bzw. veraltet, also obsolet wird.¹³⁸ Wenn diese Aussage auch für Grundlagenwissen im Ingenieursbereich angezweifelt werden muss, so trifft sie doch für problem- und projektspezifisches Wissen vielfach zu. Jedes Produktentwicklungsprojekt ist einzigartig.¹³⁹ Entsprechend müssen einmal projektspezifisch erworbenes Wissen und dabei gemachte Erfahrungen stetig neuen Problemstellungen gegenübergestellt und angepasst werden.

Bedingt durch diese Dynamik, verbunden mit der Vielzahl an Elementen und beteiligten Disziplinen, ist die Gestaltung in der Produktentwicklung durch große Komplexität gekennzeichnet, welche in der Praxis auch nicht reduziert werden

¹³⁵ Siehe Abschnitt 2.2.3.

¹³⁶ Vgl. McCormick 1997.

¹³⁷ Vgl. Ehrlenspiel 2009, S. 10.

¹³⁸ Vgl. Klein 1998.

¹³⁹ Vgl. Albers 2010.

kann.¹⁴⁰ Diese Komplexität muss auch beim Wissensaustausch berücksichtigt werden. Die Tatsache, dass diese Komplexität in den frühen Wissensmanagementansätzen über Datenbanken unterschätzt bzw. ignoriert wurde, ist einer der Gründe für ein Scheitern dieser Ansätze.¹⁴¹

2.2.8 Handlungsbefähigung

Kennzeichnend für Produktentwicklung ist das Bestreben, durch zielgerichtetes Handeln Innovationen herbeizuführen, wobei Irrtümer und Zufälle naturgemäß eine große Rolle spielen und nicht planbar sind.¹⁴² Wissen wird dabei als die Menge von Information angesehen, die notwendig ist, um Entscheidungen zu treffen. Auch stellt es einen essentiellen Bestandteil und eine Voraussetzung der Kompetenz dar, die Personen zum Handeln im Unternehmensumfeld befähigt.¹⁴³ Im Vergleich zu Daten und Information liegt Wissen näher am Handeln und wird an den Entscheidungen und den Handlungen gemessen, die es ermöglicht.¹⁴⁴

In seiner Abhandlung über die Definition eines Wissenslevels von informationstechnischen Systemen mit künstlicher Intelligenz versteht Newell Wissen als Medium, welches es einem Agenten, also einem Menschen oder einer Maschine, ermöglicht, Handlungen durchzuführen, um Ziele zu erreichen.¹⁴⁵ Wissen liegt dabei nicht direkt, in expliziter Form vor, sondern lediglich in indirekter Form als Information und Daten. Wissen existiert nur auf dem abstrakten Wissenslevel des Agenten und kommt nur durch seine Handlungsbefähigung zum Ausdruck.

Gestaltungswissen liegt vielfach in expliziter Form nur in vorhandenen Lösungen für spezifische Problemstellungen und abstrakt im Verständnis der beteiligten Personen und deren spezifischen Erfahrungen vor. Der Kontext dieses Wissens ist durch die Randbedingungen der bearbeiteten Problemstellung geprägt. Bedingt durch die Einzigartigkeit jedes Produktentwicklungsprozesses¹⁴⁶, muss dieser spezifische Kontext analysiert und generalisiert werden, um die Anwendbarkeit und Gültigkeit dieses Wissens für die Handlungsbefähigung in neuen ähnlichen Problemstellungen zu gewährleisten. Das Erkennen, Aufgreifen und Anpassen relevanter vorhandener Lösungen ist eine besondere Herausforderung, die entscheidend für den Erfolg ist. Bedingt durch steigende Komplexität von Produkten und Prozessen müssen immer

¹⁴⁰ Vgl. Meboldt 2008, S. 22f.

¹⁴¹ Vgl. Meboldt 2008, S. 61.

¹⁴² Vgl. Meboldt 2008, S. 14/ S. 18.

¹⁴³ Sveiby 1997.

¹⁴⁴ Vgl. Davenport/Prusak 1998.

¹⁴⁵ Newell 1981.

¹⁴⁶ Vgl. Albers 2010.

größere Mengen an Information bezüglich Entwicklungszielen, Entscheidungskriterien und verschiedener Arten von Randbedingungen, Konfliktlösungen etc. verarbeitet werden.¹⁴⁷

2.2.9 Gegenstand des Wissens

Die im Vorangegangenen aufgeführten Dimensionen von Wissen beleuchten die Eigenschaften von Wissen, die Art und Weise, in der Wissen vorliegt und wie mit Wissen umgegangen wird. Im Folgenden werden Dimensionen von Wissen betrachtet, welche unterscheiden „worüber Wissen ist“ – also den Gegenstand, den Inhalt oder das Objekt des Wissens.

Am häufigsten anzutreffen ist die Unterscheidung nach deklarativem Wissen (engl.: declarative knowledge) und prozessuaalem Wissen (procedural knowledge).¹⁴⁸

Deklaratives Wissen – auch symbolisches Wissen genannt – wird im Allgemeinen als Wissen um Fakten und - im Bereich der Produktentwicklung - zu Produkten und technischen Systemen beschrieben. Explizites Produktwissen liegt zu einem erheblichen Teil in Form von CAX-Daten vor, welche in der Regel vorwiegend geometrische Produktinformationen beschreiben.¹⁴⁹ In den 1980er/1990er Jahren wurden umfassende Forschungsarbeiten durchgeführt mit dem Ziel, den Wissensaustausch zwischen den verschiedenen Bereichen (CAD, CAM, CAE etc.) zu gewährleisten. Sie resultierten letztendlich in Datenaustauschformaten wie IGES oder STEP, welche eine durchgängige Verwendung der Produktinformationen in allen Bereichen ermöglichen und so zum Beispiel auch eine Schnittstelle zur FEM-Analyse darstellen. Heutzutage werden die Möglichkeiten der durchgängigen geometrischen Modellierung von Produkten umfassend genutzt. CAD-Ansätze wurden vielfach erweitert, wie zum Beispiel durch das Hinterlegen von Materialangaben in CAD-Modellen. Die Erfahrungen in der Industrie und auch in der Forschung zeigen jedoch, dass diese Art von Wissensaustausch noch viele Wünsche offen lässt. So besteht heute Konsens über den Bedarf hinsichtlich Produktinformationen nicht nur Geometriedaten, sondern auch Funktionen und Verhalten zu erfassen.¹⁵⁰

Prozessuales Wissen oder Prozesswissen ist das „Wissen um“ sowohl kognitives als auch physikalisches Handeln und wird gemeinhin auch als „Know-how“ bezeichnet. Prozesswissen wird generell als wichtiger angesehen als deklaratives Wissen zu

¹⁴⁷ Vgl. Klein 1998.

¹⁴⁸ Vgl. z.B. Kogut/Zander 1992 ;ten Berge/van Hezewijk 1999 oder Ahmed et al. 2005.

¹⁴⁹ Szykman/Sriram 2001.

¹⁵⁰ Fenves/Sriram 2005.

Produkten,¹⁵¹ denn es beinhaltet vielfach auch Techniken, um sich Wissen anzueignen. Deklaratives Wissen ist zwar in der Regel leichter zu verbalisieren als prozessuales, es wird jedoch auch als umfangreicher angesehen. So dauert es länger, ein Experte für deklaratives Wissen um technische Systeme zu werden als ein solcher für Prozesswissen.¹⁵²

Die Wissenskategorisierung nach Klein trennt Wissen in allgemeines Domänenwissen (engl.: general domain knowledge), fallspezifisches Sachwissen (engl.: case specific object level knowledge) und Problemlösungs- und Steuerungswissen (engl.: problem solving and control knowledge). Allgemeines Domänenwissen beschreibt die Zusammenhänge zwischen Gestalt, Funktion und Verhalten auf verschiedenen Abstraktionsebenen. Fallspezifisches Wissen beinhaltet im Wesentlichen Anforderungen sowie Gestaltbeschreibungen und -abhängigkeiten. Problemlösungs- und Steuerungswissen umfasst die erforderlichen Kenntnisse, um allgemeines Domänenwissen und fallspezifisches Wissen erfolgreich einsetzen zu können.¹⁵³

Neben diesen abstrakten Einteilungen existieren ebenso verschiedene Sammlungen zu Wissenskategorien, welche nach Wissensinhalten im technischen Bereich unterscheiden. Im Folgenden werden einige Beispiele dafür dargelegt.

Im Rahmen seiner Systemtheorie der Technik definiert Ropohl technisches Können, funktionales Regelwissen, technologisches Gesetzwissen, öko-sozio-technologisches Systemverständnis und strukturelles Regelwissen als grundlegende Formen des technischen Wissens.¹⁵⁴

Vincenti listet auf Basis verschiedener Fallstudien aus der Praxis der Produktentwicklung die Kategorien Wissen um grundlegende Gestaltungsvorschläge, um Kriterien und Spezifikationen, um theoretische Werkzeuge, um quantitative Daten, um praktische Erwägungen und um Gestaltungshilfsmittel auf.¹⁵⁵

Anhand einer umfassenden Umfrage unter Managern und Ingenieuren in der Produktentwicklung untersucht Heisig Wissensbedarfe in der Produktentwicklung. Das Ergebnis sind 69 Arten übergeordneter Kategorien von Wissen, welche den gesamten Produktlebenszyklus von „Anforderungen“ über „Gestaltungslösungen“ bis hin zu „Produktlebensende-Informationen“ abdecken.¹⁵⁶

¹⁵¹ Vgl. ten Berge/van Hezewijk 1999; Ahmed et al. 2005.

¹⁵² Vgl. Ahmed et al. 2005.

¹⁵³ Vgl. Klein 1998.

¹⁵⁴ Vgl. Ropohl 2009, S.206ff.

¹⁵⁵ Vgl. Vincenti 1990.

¹⁵⁶ Heisig et al. 2010.

Roth et al. sammeln 14 generische Wissensarten in der Produktentstehung auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche und fassen diese in einem allgemeingültigen Strukturierungsmodell für Wissen in Produktentwicklungsprozessen zusammen. Sie stellen fest, dass die theoretisch postulierte strikte Trennung dieser Kategorien in der Praxis nicht umgesetzt werden kann.¹⁵⁷

Der Vergleich existierender Kategorien von technischem Wissen lässt erkennen, dass diese weitestgehend deckungsgleich sind und dass die Einteilungen meist je nach Anwendungsbedarf angepasst sind.¹⁵⁸

Eine besondere Stellung nimmt Wissen über Wissen, das sogenannte Metawissen ein. Wissen selbst ist eine notwendige Voraussetzung zur Bildung von Wissen.¹⁵⁹ Dazu gehört sowohl das Wissen um die Einschätzung des eigenen Wissensstandes bezüglich einer Aufgabe oder Problemstellung als auch das Wissen um die Möglichkeiten und Wege zum Erlangen erforderlichen Wissens. Dieses Wissen um die Einschätzung des eigenen Wissens bezüglich einer Aufgabe oder eines Problems wird als metakognitives Wissen bezeichnet.¹⁶⁰ Hinsichtlich der Potentiale keramischer Werkstoffe ist fehlendes metakognitives Wissen seitens der Konstrukteure eine der Hauptursachen für eine mangelnde Verwendung im industriellen Umfeld. Den Konstrukteuren fehlt häufig nicht nur das Wissen zu keramischen Werkstoffen, sondern sie sind nicht in der Lage, ihre diesbezüglichen Wissenslücken und den Bedarf nach fundiertem Wissen überhaupt zu erkennen. So werden keramische Werkstoffe meist gar nicht erst in Betracht gezogen.

Bezüglich der Bereitstellung von Gestaltungswissen lässt sich feststellen, dass die Verwendung von Wissenskategorien zwar hilfreich bei der Wissensakquise sein kann, um beispielsweise die Vollständigkeit des gesammelten Wissens zu überprüfen. Eine eindeutige Zuordnung des Wissens zu einzelnen Kategorien ist aber oft nicht objektiv möglich. Für die Bereitstellung selber ist eine frühe Festlegung und Einschränkung der betrachteten Kategorien nicht sinnvoll. Gestaltungswissen lässt sich nicht auf eine Teilmenge existierender Kategorisierungen einschränken.

2.2.10 Zwischenfazit

Fasst man die relevanten Arbeiten zum Thema Wissen und Wissensaustausch in einem Zwischenfazit zusammen, so sind folgende Aussagen in Bezug auf Gestaltungswissen und den Umgang mit Wissen in der Produktentwicklung

¹⁵⁷ Roth et al. 2010.

¹⁵⁸ Broens/de Vries 2003.

¹⁵⁹ Nonaka/Takeuchi 1997.

¹⁶⁰ Vgl. Mielke 2001, S. 182.

wesentlich: Wissen ist von zentraler Bedeutung für den Erfolg jedes Wirtschafts- und Forschungsunternehmens, unabhängig von Branche oder Domäne. Entsprechend vielfältig sind die betrachteten Aspekte von Wissen. In der Produktentwicklung, insbesondere im Bereich komplexer und interdisziplinärer Problemstellungen, ist ein effizienter Wissensaustausch wichtig für den Erfolg.

Wissen lässt sich als vernetzte Information verstehen, die in einem klaren Kontext steht und eine Person zu zielgerichtetem Handeln befähigt. Grundsätzlich ist Wissen zunächst an Menschen oder Gruppen von Menschen gebunden. Auch Gestaltungswissen lässt sich nicht vollständig explizit in Gestaltungsregeln und Musterlösungen niederlegen. Darüber hinaus braucht man das Wissen um die Gültigkeit und den Hintergrund einer Gestaltungslösung und auch um die unzähligen verworfenen Lösungsansätze. Nur durch Personen kann vorhandenes Gestaltungswissen im Hinblick auf eine neue Problemstellung bewertet und wieder angewendet werden. Dadurch bedingt unterliegt Wissen stetiger Dynamik und fortwährendem Wandel und kann nicht als statisch angesehen werden. Die Fähigkeit dieser Dynamik gerecht zu werden ist eine Notwendigkeit für den erfolgreichen Umgang mit Wissen.¹⁶¹ Daher ist der Mensch das zentrale Element in der Produktentwicklung¹⁶², das durch Werkzeuge und Methoden bei Wissenserwerb und –anwendung unterstützt wird.

Ein Rechner kann nur Daten und Informationen erfassen und bereitstellen. Dennoch kann der Wissensaustausch durch informationstechnische Systeme unterstützt werden, indem relevante abgespeicherte Daten und Informationen einem Nutzer erlauben, sich das abgespeicherte Wissen auf Basis seines eigenen Verständnisses zu erarbeiten. Hat der Nutzer die Möglichkeit, durch Interaktion mit dem System für ihn relevante Daten und Informationen zu selektieren, kann der Wissensaustausch ähnlich der direkten verbalen Kommunikation zwischen Personen erfolgen. Auf diese Weise ist der Wissensaustausch dann zwar räumlich und zeitlich entkoppelt, bietet jedoch zusätzliche potentielle Fehlerquellen. Die Güte eines solchen rechnergestützten Wissensaustausches ist maßgeblich davon abhängig, wie richtig und eindeutig der Kontext der bereitgestellten Information für einen Nutzer erkennbar ist. Im Idealfall kann der Nutzer durch ein entsprechendes Informationssystem direkt auf problemspezifische Information zugreifen, entsprechend seiner Bedürfnisse und seines Verständnisses weitergehende Informationen abfragen und sich auf diese Weise neues Wissen relativ einfach erarbeiten. Dabei kommuniziert er iterativ mit dem System und spezifiziert sowohl seine Problemstellung als auch seinen

¹⁶¹ Vgl. North 2011, S. 64f.

¹⁶² Vgl. Albers et al. 2011b

Informationsbedarf, basierend auf seinem Verständnis und seinem Kenntnisstand, vergleichbar mit der zwischenmenschlichen Kommunikation.

2.3 Ontologien

Der Begriff „Ontologie“ ist seit ersten großen Forschungsprojekten im Bereich des computerbasierten Wissensmanagements einer der Leitbegriffe in dieser Disziplin und erfreut sich seither stetig wachsender Verbreitung. Wurden Ende 2007 eine Trefferzahl von 5 Millionen bei der Suche im Internet nach dem englischen Plural 'ontologies' als Beleg für wachsende Relevanz von Ontologien genannt¹⁶³, so sind es heute, 5 Jahre später, schon fast 8,3 Millionen Treffer, mehr als eineinhalbmal so viele. Bei Verwendung des Singulars 'ontology' als Suchbegriff sind es sogar 19,4 Millionen.

Der Begriff Ontologie blickt auf eine lange Historie zurück und hat heutzutage im Wesentlichen zwei Bedeutungen:

Die Ontologie als Disziplin der theoretischen Philosophie entstand im 17. Jahrhundert und steht für die „*Lehre von dem Wesen und den Eigenschaften des Seienden*“.¹⁶⁴ Etymologisch betrachtet setzt sich der Begriff „Ontologie“ aus den beiden griechischen Silben ontos – „seiend“ das Partizip Präsens zu einai: „sein“ - sowie „logos“ - die Lehre – zusammen. Mit Beginn der Neuzeit wird diese Wissenschaft auch als allgemeine Metaphysik bezeichnet. Sie hat das Ziel, die grundlegenden Zusammenhänge der Wirklichkeit zu erkennen und in Form von Entitäten (Personen, Gegenstände, Eigenschaften oder Prozessen) und deren strukturellen Beziehungen zu beschreiben.¹⁶⁵

Im Bereich der Informatik und Linguistik hat der Begriff eine andere Bedeutung bekommen. Hier steht Ontologie vielmehr für das Ergebnis der Analyse und Modellbildung der Wirklichkeit. Eine Ontologie in der Informatik und in der Linguistik beschreibt eine sprachlich gefasste Darstellung eines bestimmten Gegenstandsgebietes - also das Ergebnis der Ontologie im Sinne der ersten oben genannten Bedeutung. Im Vergleich zu andern Modellen für die explizite Beschreibung von Verständnis und Bedeutung, den sogenannten semantischen Modellen, besitzen Ontologien eine höhere „semantische Mächtigkeit“, d. h., sie können komplexere Sachverhalte präziser beschreiben.¹⁶⁶ In der Informatik wird besonders der formale Charakter einer Ontologie unterstrichen, da dieser Voraussetzung für die

¹⁶³ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S. V.

¹⁶⁴ Vgl. Meyers großes Taschenlexikon : in 24 Bänden .

¹⁶⁵ Vgl. Ontologie 2012.

¹⁶⁶ Ullrich et al. 2003.

Rechnerlesbarkeit ist. Hier werden Ontologien als „*sprachlich gefasste und formal geordnete Darstellungen einer Menge von Begrifflichkeiten und der zwischen ihnen bestehenden Beziehungen in einem bestimmten Gegenstandsbereich*“ umschrieben.¹⁶⁷

Schon in den 60er Jahren beschäftigte Ross Quilian sich mit der modellhaften Darstellung des menschlichen Gedächtnisses bei der Verarbeitung von Sprache und deren Bedeutung, nämlich als Netzwerke von Begriffen als Knoten mit deren semantischen Beziehungen als Kanten. Auf diese Arbeiten wird die Abbildung von ontologischem Wissen in Graphen zurückgeführt.¹⁶⁸

Heute stehen Ontologien in engem Zusammenhang mit dem Semantic Web und werden als dessen semantischer Grundbaustein¹⁶⁹ oder Schlüsseltechnologie¹⁷⁰ bezeichnet. In diesem Kontext wird die Semantik nicht einfach als die Lehre von der Bedeutung einer Information in weiterem Sinne verstanden, sondern vielmehr als ihre Verarbeitungsmöglichkeit durch Computeranwendungen (machine processable).¹⁷¹ Semantik wird in Softwareprogrammen durch Computer-lesbare „Daten über Daten“¹⁷², sogenannte Metadaten, abgebildet. Auf diese Weise können Daten im World Wide Web verlinkt werden. Ontologien können gemeinsame Verständnismodelle von Personen abbilden und diese auf Basis formaler Ontologiebeschreibungssprachen mit maschinenlesbaren Inhalten verbinden.¹⁷³

2.3.1 Definition

„An ontology is an explicit specification of a conceptualization“

Diese wohl am häufigsten zitierte Definition des Ontologiebegriffes in der Informatik, der zufolge eine Ontologie die explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung ist, stammt von Gruber¹⁷⁴. Gruber leitet seine Definition aus dem Ontologiebegriff in der Philosophie ab. Er erweitert diesen und prägt für die Informatik Ontologie als formalisiertes und dadurch rechnerlesbares gemeinsames Verständnis für die Unterstützung der Wissensteilung und Wiederverwendung. Die beiden Aspekte Rechnerlesbarkeit und geteiltes Verständnis werden dem Ontologiebegriff in der Informatik nahezu immer zugrunde gelegt. Entsprechend wird auch eine erweiterte

¹⁶⁷ Vgl. Ontologie (Informatik) 2012.

¹⁶⁸ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S.31.

¹⁶⁹ Vgl. Stollberg 2002.

¹⁷⁰ Vgl. Fensel et al. 2003.

¹⁷¹ Vgl. Dumbill 2000.

¹⁷² Vgl. Hansen 1996.

¹⁷³ Vgl. Ding et al. 2009, S. 595.

¹⁷⁴ Gruber 1993.

Definition verwendet, welche auf der von Gruber aufbaut und diese Aspekte explizit enthält. So haben beispielsweise Studer und Fensel die Definition wie folgt erweitert:

*„An Ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization“*¹⁷⁵

Der Begriff Konzeptualisierung wird im Zusammenhang mit Ontologien als eine abstrakte vereinfachte Sicht auf die Welt zu einem bestimmten Zweck verstanden.¹⁷⁶ Diese Beschreibung ist deckungsgleich mit der Modelldefinition in der allgemeinen Modelltheorie nach Stachowiak durch die drei Merkmale Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal und pragmatisches Merkmal.¹⁷⁷ Folglich spiegeln auch Ontologien nicht ein universales Abbild der Realität wider, sondern sind immer an die subjektive Sicht des Erstellers bzw. des Betrachters gebunden.¹⁷⁸

Der Zusammenhang zwischen einer Darstellung (Symbol), dem Verständnis einer Person und dem Objekt (Referent) wird in dem semiotischen Dreieck basierend auf den Arbeiten von Odgen und Richardson zur Bedeutung von Symbolen und Sprache dargestellt (siehe Abbildung 21).¹⁷⁹

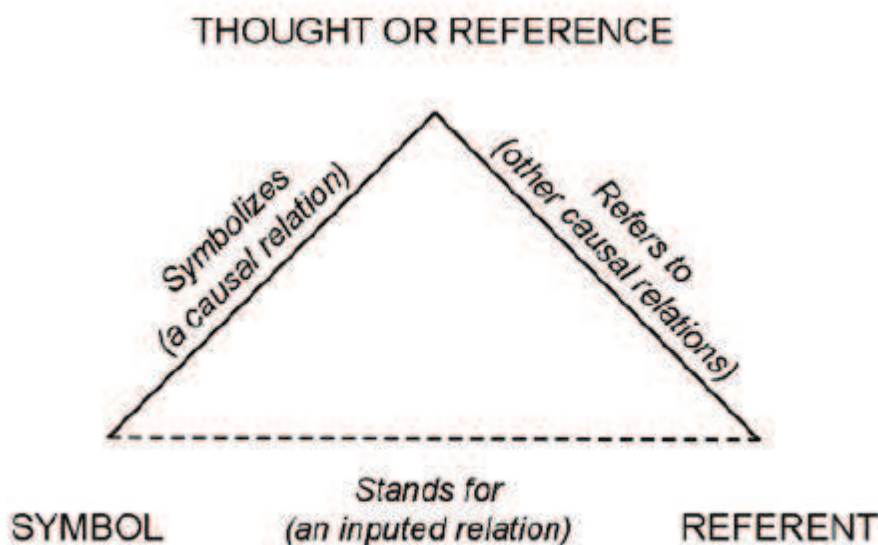


Abbildung 21 Semiotisches Dreieck¹⁸⁰

¹⁷⁵ Vgl. Fensel 2000.

¹⁷⁶ Vgl. Gruber 1993; Gruber 1995.

¹⁷⁷ Vgl. Stachowiak 1973, S. 131.

¹⁷⁸ Vgl. Meboldt 2008 S. 74.

¹⁷⁹ Vgl. Odgen/Richards 1923.

¹⁸⁰ Eigene Darstellung nach Odgen/Richards 1923.

Nach dieser Betrachtung wird ein Symbol durch einen Betrachter bzw. Zuhörer zunächst mit einem Gedanken und Zusammenhängen (Thought or Reference) in Verbindung gebracht. Diese wiederum ordnet er einem Referenten zu - also einem realen Objekt, einer Person oder einer Tatsache. Der Bezug zwischen dem Symbol und dem Referenten, für den das Symbol steht, ist daher nur indirekt vorhanden und durch das Verständnis der beteiligten Person beeinflusst.¹⁸¹ Ontologien ermöglichen nun, das Element an der Spitze der semiotischen Pyramide, Gedanken und Zusammenhänge zu formalisieren und so den Bezug zwischen Symbolen einer informationstechnischen Darstellung und den Erwartungen an die dadurch dargestellten Objekte herzustellen.¹⁸² Die explizite und formalisierte Darstellung erlaubt mehreren Personen ihr Verständnis abzugleichen und einheitlich sowie rechnerlesbar abzubilden. Somit ist eine Ontologie eine explizite Beschreibung eines gemeinsamen Verständnisses einer Domäne, welche die Kommunikation zwischen Personen, Organisationen und Softwaresystemen verbessern kann.¹⁸³

Ein gemeinsames Verständnis in Form intersubjektiver Mentalmodelle ist Voraussetzung für die Produktentstehung.¹⁸⁴ Das Abbilden eines vereinbarten gemeinsamen Verständnisses ist ein zentraler Aspekt einer Ontologie und stellt daher für die Unterstützung der Produktentwicklung ein großes Potential dar.

Formalisierte semantische Netze, die automatisiert von Softwareagenten erstellt werden, bezeichnet man in der Regel nicht als Ontologien, auch wenn Sie ähnliche Strukturen wie Ontologien bilden und auch im Bereich des Wissensmanagements Anwendung finden. Solche Anwendungen stellen zwar auch Modelle eines Ausschnittes der realen Welt dar, jedoch werden sie auf Basis von Datamining und Statistik erstellt und bilden daher nicht ein vereinbartes Verständnis ab. Beispiele für derartige Anwendungen sind das selbstlernende Simultanübersetzungswerkzeug des Interactive System Labs z. B. für Vorlesungen¹⁸⁵ am KIT oder das Goldfire® - Softwarewerkzeug¹⁸⁶ zur Unterstützung der Recherche in Innovationsprozessen.

2.3.2 Ontologiebestandteile

Ontologien sind eine formale und explizite Beschreibung eines Verständnisses, welches eine Sicht auf die Welt im Hinblick auf eine bestimmte Wissensdomäne verkörpert. Diese Sicht wird oft als eine Sammlung von Begriffen, deren Definitionen

¹⁸¹ Vgl. Sure/Studer 2002, S.10f.

¹⁸² Vgl. Stuckenschmidt 2009, S.8.

¹⁸³ Vgl. Uschold/Gruninger 1996.

¹⁸⁴ Vgl. Meboldt 2008, S.203.

¹⁸⁵ Open Domain Speech Translation .

¹⁸⁶ Goldfire .

und Beziehungen zueinander verstanden.¹⁸⁷ Ontologien greifen diese grundlegenden Bausteine auf und erlauben daher, die Struktur des menschlichen Verständnisses explizit und formal abzubilden. Im Folgenden wird auf diese verschiedenen Grundbausteine von Ontologien sowie auf deren gängige Bezeichnungen und ihre Funktionen hinsichtlich der Ontologiemodellierung eingegangen. Zur Visualisierung der Erläuterung dient das Beispiel einer Ontologie zur Darstellung verschiedener Kupplungen und Kupplungsbelägen sowie deren Zugehörigkeit und Gewicht in der nachfolgenden Abbildung (Abbildung 22).

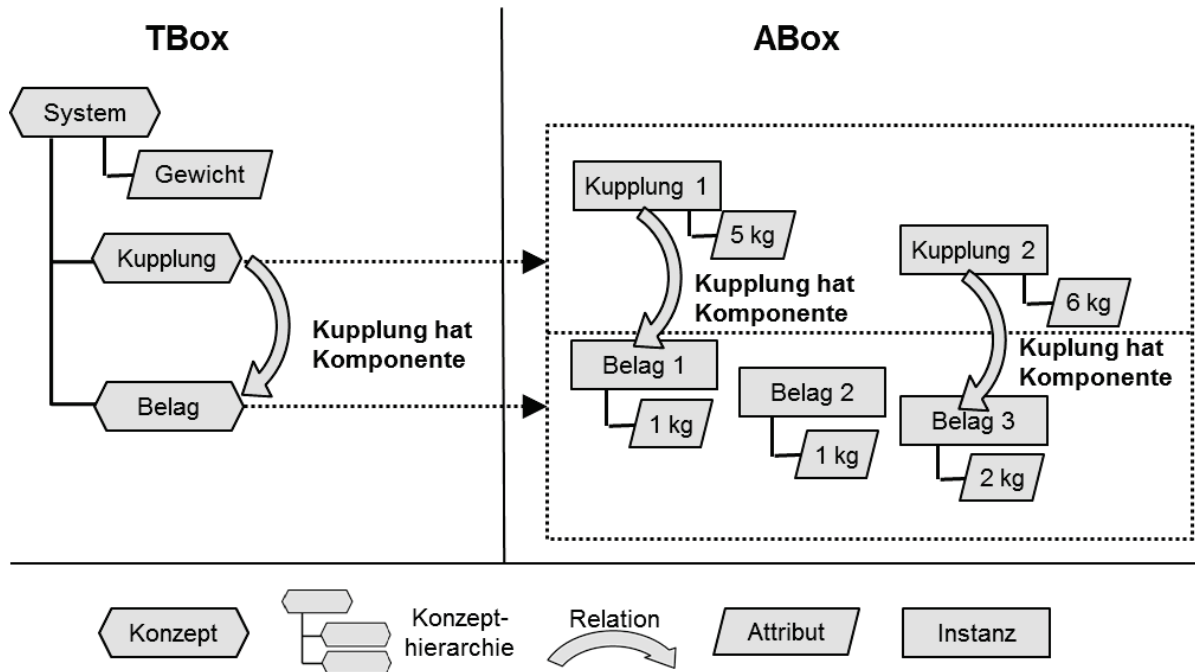


Abbildung 22 Hauptbestandteile einer Ontologie - Beispiel

Die Hauptbestandteile einer Ontologie sind die identifizierten Konzepte, welche auch als Klassen oder schlicht als Begriffe bezeichnet werden. Konzepte stehen jeweils für eine Menge ähnlicher Elemente, die durch gemeinsame Eigenschaften charakterisiert werden. Die einzelnen Elemente eines Konzeptes werden als Instanzen oder auch Individuen oder Entitäten bezeichnet. Sie repräsentieren reale und abstrakte Objekte der Verständniswelt, und jeder Instanz werden konkrete Werte für die charakteristischen Eigenschaften zugewiesen.¹⁸⁸

Die Unterscheidung von Konzepten und Instanzen geht auf die Beschreibungssprache Krypton zurück.¹⁸⁹ Hier wurde erstmals die Modellierung von Definitions- und Faktenwissen getrennt in den beiden Komponenten TBox (terminological

¹⁸⁷ Vgl. Uschold/Gruninger 1996.

¹⁸⁸ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S.23.

¹⁸⁹ Vgl. Guarino 2009.

knowledge - terminologisches Wissen) und ABox (assertional knowledge - Faktenwissen) festgehalten. Die TBox enthält das terminologische Wissen der abzubildenden Wissensdomäne in Form einer Sammlung von Axiomen, welche die Struktur der Wissensdomäne beschreiben. In der ABox sind die konkreten Fakten in Form der Instanzen enthalten. Diese Trennung erlaubt es, grundlegende Konzepte und deren charakteristischen Eigenschaften nach gemeinsamem Verständnis losgelöst von einzelnen Fakten in einem Metamodell, dem Ontologieschema, zu definieren. Das in der TBox definierte grundlegende terminologische Wissen unterliegt in viel geringerem Maße der Subjektivität als spezifisches Faktenwissen, welches in der ABox beschrieben wird.¹⁹⁰ Aufgrund dieser Trennung kann gemeinsames Verständnis klarer und begründeter in einer Ontologie modelliert werden und ist so auch besser wiederverwendbar.¹⁹¹ Zudem können dann auch in einem Softwaresystem die Benutzerschnittstellen zu dem grundlegenden Ontologieschema und zu Faktenwissen unterschiedlich gehandhabt und so auch Fehlnutzungen des Systems eingeschränkt werden.¹⁹²

Die charakteristischen Eigenschaften der Konzepte, auch *Differentiae* (Philosophie), *Slots* (Informatik) oder *Properties* (entlehnt aus dem Englischen) genannt, trennen sich üblicherweise in *Attribute* und *Relationen*.

Relationen beschreiben die charakteristischen Beziehungen zwischen Konzepten. Ihnen werden jeweils ein oder mehrere Ausgangskonzepte (*Domain*) und ebenso eine beliebige Anzahl Zielkonzepte (*Range*) zugeordnet. Ausgangskonzept und Zielkonzept können dabei identisch sein. Im Beispiel in Abbildung 22 wurde die Relation „Kupplung hat Komponente“ mit dem Ausgangskonzept „Kupplung“ und dem Zielkonzept „Belag“ definiert. Diese könnte weitere Zielkonzepte, wie „Kupplungsglocke“, „Belagträger“, „Belagfeder“ u. Ä., erhalten und so als ontologische Beschreibung einer Produkthierarchie für Kupplungen dienen.

Eine der wichtigsten Relationen ist die *Meronymie* bzw. *Subsumptionsbeziehung*, also die Beziehung zwischen einem Element und seinen Teilelementen. Sie ermöglicht die Modellierung von Konzepthierarchien. Ist ein Konzept ein Unterkonzept eines übergeordneten Konzeptes, so grenzt es eine Teilmenge der zugeordneten Instanzen ab und erbt automatisch alle charakteristischen Beziehungen des Konzeptes. In der Linguistik wird die Beziehung zwischen Ober-

¹⁹⁰ Vgl. Brachman et al. 1983.

¹⁹¹ Vgl. Guarino 2009.

¹⁹² Vgl. Brachman et al. 1983

und Unterbegriffen als Hyponomie bzw. Hypernomie bezeichnet, in der Informatik oft nur abgekürzt als ako-Relation für „a kind of“ bezeichnet.¹⁹³

Attribute dienen zur genaueren Beschreibung von Konzepten und Instanzen. Die informationstechnische Beschreibung von Ontologiesprachen stellt Attribute als Relationen auf Konzepte vom Typ String (Zeichenkette), Long (ganze Zahl), Boolean (Wahrheitswert) etc. dar, deren Eigenschaften global definiert sind. Für Relationen und Attribute wird über die Festlegung der Kardinalität beschrieben, wie viele Werte jeweils einer Instanz zugewiesen werden können. Im Beispiel in Abbildung 22 wurde für das Konzept „System“ das Attribut „Gewicht“ als ganzzahliger Wert definiert. Wenn alle betrachteten Instanzen des Konzeptes „System“ ein eindeutiges Gewicht haben, ist es sinnvoll, dieses Attribut mit der Kardinalität 1 zu versehen. Durch die Subsumptionsbeziehung erhalten automatisch auch die dem Konzept „System“ untergeordneten Konzepte „Kupplung“ und „Belag“ das Attribut „Gewicht“.

Als letztes Element einer Ontologie können Regeln definiert werden. Diese weisen Instanzen auf Basis logischer Schlussfolgerung Werte für Attribute und Relationen zu. In den meisten Ontologiebeschreibungssprachen existieren global definierte Regeln. So werden einige grundlegende Eigenschaften von Funktionen durch global definierte Regeln beschrieben:

- Symmetrie: Sind Ausgangs- und Zielkonzept einer Relation identisch und ist sie nicht gerichtet, sondern gilt gleichermaßen für beide beteiligten Elemente, so wird sie als symmetrisch bezeichnet (Bsp.: „Person ist Bruder von Person“).
- Transitivität: Die Transitivität einer Relation ist gegeben, wenn aus der Tatsache, dass eine Relation zwischen einer Instanz A und einer Instanz B besteht und ebenso auch zwischen der Instanz B und einer Instanz C, so folgt daraus automatisch, dass die Relation auch zwischen A und C besteht. („Person ist Nachfahre von Person“)
- Inversivität: Zwei Relationen werden als invers bezeichnet, wenn eine jeweils als der logische Umkehrschluss der anderen definiert ist („Person ist Vater von Person“ und „Person ist Sohn von Person“).

Neben global definierten Regeln können Regeln auch innerhalb einer Ontologie definiert werden und so spezifische logische Schlussfolgerungen und Zusammenhänge innerhalb einer Wissensdomäne abbilden.

Es müssen nicht zwangsweise alle der oben genannten Elemente in einer Ontologie enthalten sein. Je weniger Elemente Verwendung finden, desto geringer ist jedoch

¹⁹³ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S. 24.

auch die Aussagekraft einer Ontologie. In der Literatur wird entsprechend zwischen „lightweight ontologies“, welche nur Konzepthierarchien und Relationen enthalten, und „heavyweight ontologies“ unterschieden, welche darüber hinaus noch umfassende Regeldefinitionen mithilfe formaler Logik abbilden.¹⁹⁴

2.3.3 Formale Ontologiesprachen

Der Formalisierungsgrad eines Modells sagt aus, inwieweit Syntax und Semantik innerhalb des Modells vollständig definiert und eindeutig sind. Der Formalisierungsgrad von Ontologien ist entsprechend der in Abschnitt 2.3.1 gegebenen gängigen Definition beliebig. Schon einfache Synonymdefinitionen können als Ontologien bezeichnet werden. Sie lassen sich ebenso wie Hierarchien, Taxonomien, Mindmaps und Conceptmaps¹⁹⁵ den nicht- oder nur geringfügig formalen Ontologien zuordnen und dienen in erster Line zur Verbesserung der zwischenmenschlichen Kommunikation und zur Wissensexplizierung. Wenn eine Ontologie nur zur Kommunikationsunterstützung zwischen Personen genutzt wird, ist ein niedriger Formalisierungsgrad ausreichend, solange sie das gemeinsame Verständnis richtig wiedergibt. Für die Verwendung einer Ontologie in Softwareanwendungen ist jedoch ein hoher Formalisierungsgrad Voraussetzung.¹⁹⁶

Bei der rechnergestützten Wissensrepräsentation finden ausschließlich Ontologien auf Basis formalisierter Modellierungssprachen Verwendung. Diese Modellierungssprachen werden als formale Ontologie-Beschreibungssprachen oder kurz Ontologiesprachen bezeichnet und erlauben, ontologiebasiertes Wissen in Softwaresystemen abzubilden. Durch diese Beschreibungssprachen kann ein Ontologieschema rechnerlesbar abgebildet und mit Informationen als Instanzen verknüpft werden. Auf diese Weise kann Wissen als Information mit verknüpftem Kontext formal dargestellt werden. Solche ontologiebasierten Wissens-Softwaresysteme basieren auf der Trennung des Wissens in ein Ontologieschema und die Ontologieinstanzen. Das Ontologieschema beschreibt auf Basis von Konzepten, Attributen und Relationen welche Informationselemente abgebildet werden und was sie für Eigenschaften haben können. Die Ontologieinstanzen wiederum sind die einzelnen Informationselemente, für die Eigenschaften auf Basis der Ontologie festgehalten werden können. Eine solche Struktur erlaubt es, sowohl komplexe Zusammenhänge und damit auch komplexes Wissen am Rechner abzubilden als auch große Datenmengen zu verarbeiten.

¹⁹⁴ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S 172f.

¹⁹⁵ Vgl. Novak 1990.

¹⁹⁶ Vgl. Uschold/Grüniger 1996.

Ursprüngliches Ziel der Ontologieformalisierung war die Erstellung einer Universalontologie zur Beschreibung der realen Welt über ein rechnerbasiertes System. Parallel wurden mehrere verschiedene Ansätze mit verschiedenen Ontologie-Beschreibungssprachen entwickelt, die alle für sich in Anspruch nahmen, das Wissen der Menschheit „korrekt“ wiederzugeben. Diese parallelen Entwicklungen basierten auf unterschiedlichen Ausgangspunkten und gingen aufgrund verschiedener Forschungsschwerpunkte der beteiligten Personen unterschiedliche Wege. Sie mündeten daher in einem wissenschaftlichen Diskurs darüber, welcher Ansatz die richtige Ontologie hervorbringen würde.¹⁹⁷ Da in den verschiedenen Modellen jeweils der Fokus auf unterschiedliche Aspekte der realen Welt gelegt worden war, konnte keine Einigung erzielt werden.

Darüber hinaus führte die Erkenntnis, dass die Kapazitäten von Wissensspeichern, unabhängig von ihrer Form, zwar einerseits immer steigen, andererseits jedoch auch immer begrenzt sein werden, Wissen hingegen einen unbegrenzten Charakter hat, zu der elementaren Einsicht: Die Vision, das gesamte Wissen der Welt in einem Modell explizit abzubilden, ist nicht realisierbar. Newell fasst diese Problematik wie folgt zusammen:

*“The answer in a nutshell is that knowledge of the world cannot be captured in a finite structure. [...] A representation of any fragment of the world (whether abstract or concrete), reveals immediately that the knowledge is not finite”*¹⁹⁸

„Die kurze Antwort ist, dass das Wissen der Welt nicht in einer endlichen Struktur erfasst werden kann.[...] Eine Repräsentation eines beliebigen Teils der Welt (gleich ob abstrakt oder real), zeigt augenblicklich, dass Wissen nicht endlich ist.“

Basierend auf dieser These entwickelte sich die Idee der domänenspezifischen Ontologien, welche jeweils begrenztes Wissen aus einer bestimmten Sicht auf einen Ausschnitt der realen Welt abbilden. Besonders im Bereich der Produktentwicklung besteht großer Bedarf für solche domänenspezifischen Ontologien. Wichtig zu wissen ist in dieser Hinsicht, dass die hier verwendeten Begriffe verschiedener Ontologien weitestgehend identisch scheinen, jedoch ihre Anordnung in der Struktur und ihre Beziehungen und damit ihre Bedeutung unterschiedlich und in höchstem Maße von der gewünschten Anwendung abhängig ist.¹⁹⁹

Die Koexistenz verschiedener Ontologien für Computeranwendungen erforderte eine Standardisierung der Modellierungssprachen, um einen Austausch und die

¹⁹⁷ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S. 97.

¹⁹⁸ Newell 1981, S. 10.

¹⁹⁹ Vgl. Ahmed/Storga 2009.

gemeinsame Verarbeitung unterschiedlicher Modelle zu ermöglichen. Die verschiedenen Ansätze sind so in verschiedenen Ontologie-Formalisierungssprachen aufgegangen, die heute nebeneinander existieren.²⁰⁰ Insbesondere in den Jahren 1995-2000 ist die Zahl an Ontologien und ebenso die Zahl an formalen Ontologie-Beschreibungssprachen explosionsartig angestiegen.²⁰¹ Durch die ständigen Weiterentwicklungen sind seitdem noch weitere Formalisierungssprachen hinzugekommen, wobei verschiedene Entwicklungsstufen parallel existieren und gleichermaßen verwendet werden.

Im Folgenden werden einige der gängigsten formalen Ontologie-Sprachen aufgeführt, welche für eine Implementierung in ontologiebasierten Systemen zur Abbildung von Wissen geeignet sind und üblicherweise Verwendung finden. Ebenso dienen sie als Basis für weitere formale Ontologie-Sprachen, welche verschiedene funktionale Erweiterungen zu den Standard-Sprachen einführen.

RDF (Resource Description Framework), eine Empfehlung des W3C²⁰², stellt eine Sprache zur Beschreibung von Ressourcen auf Basis von Graphen dar. RDF-Modelle können über die Abwandlung RDF/XML in der Programmiersprache XML formuliert werden.²⁰³ RDF wurde ursprünglich entwickelt, um Webressourcen (z. B. Webseiten) zu beschreiben. Im Gegensatz zu Programmiersprachen wie XML erlaubt RDF die Annotierung von Metadaten („Daten über Daten“), welche die Webressourcen näher beschreiben und in Beziehung zueinander setzen. RDF kann jedoch ebenso zur Beschreibung beliebiger anderer Ressourcen wie z. B. realer Objekte genutzt werden.²⁰⁴ Die Bezeichnungen für Konzepte, Relationen und Attribute, welche in einem RDF-Modell verwendet werden, sind in dem RDF-Schema (RDFS) festgehalten. RDFS unterstützt aber nicht die Abbildung von grundlegenden ontologischen Eigenschaften wie Äquivalenz, inverse Relationen oder Kardinalitäts-Einschränkungen, wie es in anderen Ontologiesprachen üblich ist. Daher muss es um ausdrucksmächtigere Ontologiesprachen wie beispielsweise OWL erweitert werden, um komplexe Zusammenhänge abbilden zu können.²⁰⁵

OWL (Web Ontology Language)²⁰⁶ stellt einen Endpunkt verschiedener gleichzeitiger und voneinander unabhängiger Entwicklungsbestrebungen zur Erweiterung von RDF

²⁰⁰ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S. 98.

²⁰¹ Vgl. Guarino 2009.

²⁰² World Wide Web Consortium – internationale Gemeinschaft, die offene Standards für das Internet definiert.

²⁰³ Lassila/McGuinness 2001.

²⁰⁴ Vgl. McBride 2009, S. 51.

²⁰⁵ Vgl. McBride 2009, S. 63.

²⁰⁶ McGuinness/Harmelen 2004.

bzw. RDFS dar. Sie baut auf der gemeinsamen Ontologiesprache DAML+OIL²⁰⁷ auf, welche die Vereinigung des amerikanischen Ansatzes DAML-ONT (DARPA²⁰⁸ Markup Language - Ontology) und des europäischen Ansatzes OIL (Ontology Inference Layer) darstellt. Zusätzlich zu RDF erlaubt OWL die Modellierung komplexerer Aussagen wie z. B. die Disjunktion von Klassen (z. B. die Klassen Mann und Frau sind disjunkt), die frei definierbare Kardinalität von Relationen und Attributen sowie Transitivität, Einzigartigkeit oder Inversivität von Relationen. Es existieren drei Unterarten von OWL: OWL-Full beinhaltet alle OWL-Elemente und ist voll aufwärtskompatibel zu RDF. OWL-DL (DL - Description Logic) schränkt die Elemente von OWL ein, um effizienteres rechnerbasiertes Schlussfolgern zu gewährleisten. Die Sprache ist daher nicht voll zu RDF kompatibel. OWL-DL wurde zum Beispiel während eines Kooperationsprojektes in den Jahren 2006 und 2007 eingesetzt, um eine Ontologie für bio-medizinisches und bioinformatisches Wissen abzubilden.²⁰⁹ OWL-Lite ist noch weiter eingeschränkt als OWL-DL. Sie beinhaltet nicht alle Modellierungselemente (z. B. Disjunktivität oder frei wählbare Kardinalität), dadurch aber ist es für Nutzer einfacher, Ontologien zu erstellen oder diese in Software zu implementieren.

Obwohl man OWL mit dem Ziel einer standardisierten und weltweit anerkannten Ontologiebeschreibungssprache entwickelt hat, wurden und werden nach wie vor neue Erweiterungen geschrieben, um weitere logische Features wie beispielsweise Regeln zu integrieren.²¹⁰ Anzuführen wäre hier etwa die Erweiterung OWL2, die im Jahr 2009 vorgestellt wurde.²¹¹

F-Logic (kurz für „Frame logic“) erlaubt die Beschreibung von Ontologien auf objektorientierte Art und Weise. Konkret heißt dies, dass Konzepte – hier als Objekte bezeichnet – intern durch Objektidentifikatoren dargestellt werden. Beziehungen zwischen Konzepten und Attributen wiederum bildet man durch Methoden ab, welche softwareintern durch sogenannte F-Atome ausgedrückt werden. Mehrere Attribute und Relationen können zusammengefasst in F-Molekülen ausgedrückt werden. Objektidentifikatoren sind für den Nutzer nicht sichtbar. Er spricht Konzepte, Instanzen, Attribute und Relationen nur über deren Bezeichnung an.

Die Definition von Regeln in Form von Wenn-Dann-Beziehungen erlaubt die Ableitung neuer Information aus definierten Fakten. Über eine spezielle Form dieser

²⁰⁷ Connolly et al. 2001.

²⁰⁸ DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency.

²⁰⁹ Vgl. Stevens et al. 2007.

²¹⁰ Vgl. Antoniou/Harmelen 2009, S. 67ff.

²¹¹ OWL 2 Web Ontology Language 2009.

Regeln, die sogenannten Queries, kann auch diese abgeleitete Information dargestellt werden. Die Queries liefern alle Instanzen, für die die gegebenen Bedingungen erfüllt sind – etwa die Zugehörigkeit zu einem Konzept, Beziehungen zu bestimmten anderen Instanzen oder definierte Attributwerte. Durch ihren Aufbau und ihre Funktionalität ist F-Logic eine Ontologiesprache, welche sowohl für die Abbildung einer Wissensdomäne als auch für die Implementierung in einer ontologiebasierten Rechnerapplikation geeignet ist.²¹²

Da existierende Ontologiemodelle zwischen verschiedenen Formalisierungssprachen nicht einfach austauschbar sind, werden Teilbereiche von Wissensdomänen in neuen Ontologieentwicklungsprojekten immer wieder von Grund auf neu geschrieben. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden sogenannte portable Ontologiesprachen entwickelt, mit dem Ziel, Wissensmodelle von einer Sprache in eine andere Sprache zu übersetzen. Auf diese Weise kann vorhandenes formalisiertes Wissen zwischen Softwaresystemen austauschgetauscht werden, wodurch sich unnötiger Aufwand reduzieren lässt.²¹³ Zu diesen portablen Ontologiesprachen gehören unter anderem KIF²¹⁴ und Ontolingua²¹⁵.

Mit den beschriebenen vielfältigen Möglichkeiten der formalen Beschreibung von Ontologien in maschinenlesbaren Sprachen sind jedoch auch einige Restriktionen verbunden. So können beispielsweise nur binäre Relationen abgebildet werden. Das heißt, es kann nur die Beziehung zwischen genau zwei Elementen beschrieben werden. Mehrwertige Relationen, zum Beispiel ein Systemverhalten, das aus dem Zusammenspiel mehrerer Parameter resultiert, können nicht direkt abgebildet werden. Ebenso sind Dynamik und Anpassbarkeit von Ontologien in Abhängigkeit von ihrem Umfang beschränkt. Der Aufwand für die Wahrung der Konsistenz bei der Durchführung von Änderungen einer Ontologie steigt überproportional mit der Menge der Konzepte, da alle möglichen Verknüpfungen überprüft werden müssen.²¹⁶

Darüber hinaus sind die Informationen, die zur Ontologie geführt haben, nicht explizit in der Ontologie enthalten und bleiben so im Kopf des Ontologie-Entwicklers verborgen, was die Überarbeitung einer existierenden Ontologie durch Dritte zusätzlich erschwert.²¹⁷ Folgerichtig stellen auch Brewster/O'Hara fest, dass der zu erwartende Aufwand für die Wahrung der Konsistenz einer Ontologie zur Abbildung

²¹² Vgl. Angele/Lausen 2009.

²¹³ Vgl. Patil et al. 1993.

²¹⁴ Genesereth/Fikes 1992.

²¹⁵ Vgl. Gruber 1992.

²¹⁶ Vgl. Mitra/Wiederhold 2009, S. 95f.

²¹⁷ Vgl. Guarino 2009.

einer dynamischen Konzeptualisierung eine der größten Herausforderungen für Ontologieentwickler darstellt.²¹⁸

2.3.4 Klassifizierung von Ontologien

Es existieren verschiedene Klassifizierungen von Ontologien nach unterschiedlichen theoretisch analysierten Gesichtspunkten. Dazu gehören die Klassifizierungsmodelle von Guarino & Giaretta²¹⁹, Mizoguchi²²⁰, Uschold & Grueninger²²¹, van Heijst²²², Lassila&McGuinness²²³ sowie Schreiber & Wielinga²²⁴. Bullinger fasst diese existierenden Modelle in einem dreidimensionalen Klassifizierungsmodell, genannt Ontocube, zusammen (siehe Abbildung 23).²²⁵

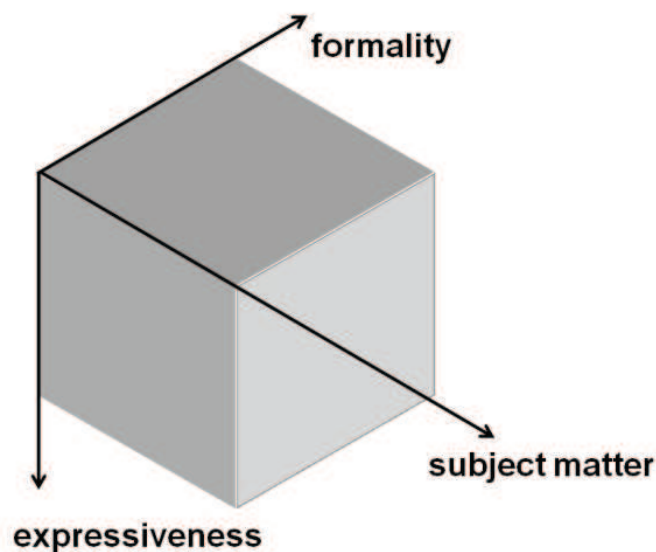


Abbildung 23 Die Dimensionen des Ontocube-Modells nach Bullinger²²⁶

Der Ontocube spannt drei Dimensionen auf, die Ontologien charakterisieren, nämlich Formalisierungsgrad (engl.: formality), Ausdrucksstärke (engl.: expressiveness) und Anwendungsgebiet (engl.: subject matters).

²¹⁸ Vgl. Brewster/O'Hara 2007.

²¹⁹ Vgl. Guarino/Giaretta 1995.

²²⁰ Vgl. Mizoguchi et al. 1995.

²²¹ Vgl. Uschold/Gruninger 1996.

²²² Vgl. van Heijst et al. 1995.

²²³ Vgl. Lassila/McGuinness 2001.

²²⁴ Vgl. Schreiber et al. 2000.

²²⁵ Vgl. Bullinger 2009, S. 172ff.

²²⁶ Bullinger 2009, S. 181.

Die Dimension Formalisierungsgrad ist in vier Abstraktionsstufen unterteilt. In aufsteigender Formalisierung sind das informale/ natürliche Sprache, die semi-informale Darstellung, die semi-formale Darstellung und die formale Sprache.

Die Ausdrucksstärke unterteilt Ontologien nach ihrem Informationsgehalt und der Dichte der Menge an internen Relationen. In aufsteigender Ausdrucksstärke werden Taxonomien, Thesauri und Topic Maps, „lightweight ontologies“ und „heavyweight ontologies“ als Beispiele für diese Einteilung genannt.

Die Dimension des Anwendungsgebietes unterscheidet Ontologien nach verschiedenen Zwecken, für die eine Ontologie entwickelt werden kann. Bullinger identifiziert folgende mögliche Anwendungsgebiete:

- Anwendungsontologien
- Task-Ontologien
- Domänenontologien
- Universale Ontologien
- Abbildungsontologien

Nach Bullinger lässt sich jede Ontologie in den Raum einordnen, welcher durch die drei Achsen aufgespannt wird. Obwohl dieser Ansatz hilfreich sein kann, um die grundlegende Zielsetzung einer Ontologieentwicklung zu diskutieren, scheint eine eindeutige Zuordnung einer Ontologie zu den einzelnen Achsen meist nicht möglich und nur wenig hilfreich.

Kitamura analysiert existierende Ontologien zur Abbildung von Entwicklungswissen und kategorisiert sie entsprechend ihrer Rollen. Er identifiziert so neun grundlegende Rollen, welche Ontologien in der Produktentwicklung erfüllen können²²⁷:

1. Gemeinsames Begriffsverständnis: Ontologien können ein „kontrolliertes Vokabular“ für Objekt-bezogenes Wissen darstellen und so lexikalische Eindeutigkeit in Modellen und Verschlagwortungen sicherstellen.
2. Konzeptionelles Datenschema: Ontologien können dazu genutzt werden, den Austausch, die Integration und die Ablage von Daten im Rahmen von Produktdatenmanagementsystemen zu realisieren.
3. Metadatenchema für Dokumente: Insbesondere im Bereich des Semantic Web werden Ontologien als Metadatenchema für Web-Dokumente genutzt. Anhand dieser Metadaten werden die Beziehungen zwischen Dokumenten und ihre Bedeutung festgehalten.

²²⁷ Kitamura 2006.

4. Semantische Restriktionen für die Modellierung: In Ontologien können Modellsprachen definiert werden, welche Begriffsdefinitionen und mögliche Beziehungen enthalten. Indem Modelle auf Basis dieser ontologiebasierten Modellsprachen erstellt werden, können ihre Konsistenz und ihre Wiederverwendbarkeit verbessert werden. Derartige Ontologien erfüllen dann eine „Metamodell“-Funktion.
5. Generisches Wissen und Muster: Während die meisten Ontologien nur domänenspezifische Konzeptdefinitionen enthalten, kann ebenso allgemeingültiges Wissen, wie beispielsweise grundlegende physikalische Gesetze und Effekte abgebildet werden. Diese wiederum können dann als Kontext für domänenspezifisches Wissen genutzt werden, um beispielsweise den Zusammenhang zwischen Anforderungen und Komponentenarten abzubilden.
6. Datenaustausch und -integration: Ontologien können genutzt werden, um Datentypen verschiedener Modelle aufeinander abzubilden und so den Datenaustausch zwischen diesen Modellen zu ermöglichen. So gibt es beispielsweise ontologiebasierte Ansätze, um Daten zwischen CAE- und CAD-Modellen auszutauschen und die Modelle so zu integrieren.
7. Kommunikationsunterstützung und Suchanfragebearbeitung: Begriffsdefinitionen und Taxonomien können sowohl Software-gestützte Suchfunktionen verbessern als auch die zwischenmenschliche Kommunikation unterstützen. Die Kommunikation zwischen Person und Computer erweist sich einerseits aufgrund der Tatsache als schwierig, dass der Mensch in der Regel nicht das intuitive Verständnis für maschinenlesbare Beschreibungssprachen mitbringt. Auf der anderen Seite kann der Computer nicht die verknüpfte Struktur menschlichen Wissens abbilden. Ontologien bieten dafür eine Lösung, die Möglichkeit domänenspezifische Denkmodelle zu verbinden und ein gemeinsames Begriffs- und Verständnismodell explizit abzubilden. Nach Blumaur/Fundneider werden Ontologien als Mediatoren genutzt, um Wissen - zum Beispiel in Form mentaler Modelle - mit Daten und strukturierter Information zu verbinden.²²⁸
8. Erfassen von implizitem Wissen: Darunter versteht Kitamura die Möglichkeit, durch ontologiebasierte Definitionen verdeckte Mehrdeutigkeiten und Unklarheiten in Modellen und Beschreibungen zu vermeiden.
9. Basis für Wissenssystematisierung: Durch Ontologien kann Wissen über eine bestimmte Domäne systematisch in Form von einzelnen Begriffen und deren Zusammenhänge abgebildet und in rechnerlesbarer Form erfasst werden.

²²⁸ Vgl. Blumauer/Fundneider 2006.

In der Analyse verschiedener Anwendungen von Ontologien zur Beschreibung von Funktionswissen im Entwicklungsprozess kommt Kitamura zu dem Schluss, dass sich die oben beschriebenen Rollen nicht eindeutig zuordnen lassen, sondern vielmehr dass jede Ontologie mehrere Rollen erfüllt.

Die Klassifizierung von Ontologien erfolgt nach unterschiedlichen Dimensionen. Es existieren sowohl theoretisch als auch praktisch motivierte Klassifizierungsmodelle. Eine eindeutige Zuordnung einer Ontologie zu genau einer Klasse einer Dimension ist in der Regel nicht möglich und auch nicht zielführend. Vielmehr können existierende Klassifizierungsmodelle dazu dienen, die Zielsetzung einer Ontologieentwicklung strukturiert zu analysieren.²²⁹

Hinsichtlich Wissensmanagementstrategien können Ontologien sowohl dazu genutzt werden, die zwischenmenschliche Kommunikation im Sinne der Personalisierungsstrategie zu verbessern als auch als Werkzeug verwendet werden, um die Wissensabbildung am Computer im Rahmen der Kodifizierungsstrategie zu unterstützen. In dieser Arbeit wird im Folgenden der Schwerpunkt der Ausführungen auf Ontologien, Ontologieentwicklung und Ontologieanwendung für diesen letztgenannten Zweck gelegt.

2.4 Ontologieentwicklung

Seit den 1990er Jahren wird das Gebiet der Ontologieentwicklung (engl. „ontology engineering“ oder „ontology development“) als eigene Forschungsdomäne bezeichnet. Sie verfolgt das Ziel der *„Entwicklung ingenieursartiger Methodologien zur Erstellung von Ontologien – ähnlich der des Software Engineering für die Entwicklung von Software-Systemen.“*²³⁰

Gruber schlägt Kriterien für Ontologien vor, die auf einem gemeinsamen Verständnis aufbauen und den softwaregestützten Wissensaustausch unterstützen sollen. Sie dienen als Leitlinien für einen Ontologieentwicklungsprozess und können auch für eine abschließende Evaluation herangezogen werden.²³¹

Kriterien für die Ontologieentwicklung nach Gruber:

1. **Klarheit** (engl. clarity) erfordert eine eindeutige und klare Bedeutung der verwendeten Begriffe, deren Objektivität und die Vollständigkeit der verwendeten Definitionen.

²²⁹ Vgl. Albers et al. 2011a.

²³⁰ Stollberg 2002, S. 2.

²³¹ Vgl. Gruber 1995, S. 2.

2. **Kohärenz** (engl. coherence) einer Ontologie ist gegeben, wenn alle Konzepte, sowohl formal als auch informell in natürlicher Sprache beschrieben sowie alle aus der Ontologie abgeleiteten Aussagen konsistent sind.
3. **Erweiterbarkeit** (engl. extendibility) einer Ontologie wird mit der Möglichkeit gleichgesetzt, diese für spezielle Zwecke anpassen zu können. Es müssen also neue Begriffe definiert werden können, ohne dass die Definitionen der existierenden überarbeitet werden müssen.
4. **Minimaler Implementierungseinfluss** (engl. minimal encoding bias) bedeutet, dass der Einfluss der Formalisierungssprache auf die Ontologie möglichst gering sein sollte. Implementierungseinfluss besteht dann, wenn eine Wissensrepräsentation maßgeblich durch die Beschreibungssprache oder durch Softwareimplementierung beeinflusst wird. Der Aufbau einer Ontologie sollte dagegen im Idealfall ausschließlich auf Basis der relevanten Inhalte der Wissensdomäne durchgeführt werden, ohne durch die Formalisierungssprache und die Implementierung beeinflusst zu werden.
5. **Minimale ontologische Verpflichtung** (engl. minimal ontological commitment) ist die Forderung, nur die minimal notwendige Anzahl an Aussagen in einer Ontologie zu definieren, um möglichst große Freiheit beim Instanzieren²³² zu gewährleisten.²³³

Gruber unterstreicht, dass ein Ontologieentwicklungsprozess, wie jeder Entwicklungsprozess, ein Abwägen (engl. tradeoff) zwischen den Kriterien erfordert. Diese Kriterien werden vielfach aufgegriffen und angewendet wie zum Beispiel in Stollberg²³⁴ oder Gómez-Pérez²³⁵. Andere Autoren modifizieren und erweitern diese Kriterien geringfügig, um sie den spezifischen Anforderungen ihrer Ontologieentwicklung anzupassen.²³⁶ Die Kriterien nach Gruber können insgesamt als kleinster gemeinsamer Nenner an Anforderungen an Ontologieentwicklungen zur Wissensabbildung angesehen werden.

2.4.1 Ontologieentwicklungsansätze

Entsprechend der Vielzahl an Ontologiesprachen auf verschiedenen Formalisierungsebenen und der Vielzahl an möglichen Anwendungen gibt es ein weites Feld an Ansätzen zur Ontologieentwicklung. Diese adressieren vielfach softwaretechni-

²³² Instanzieren bezeichnet das Erzeugen von einzelnen Objekten bzw. Instanzen einer bestimmten Klasse.

²³³ Vgl. Gruber 1995, S. 2f.

²³⁴ Vgl. Stollberg 2002, S. 39.

²³⁵ Gómez-Pérez 1999 S. 34.

²³⁶ Apke et al. 2004.

sche Problemstellungen oder spezifische Teilprobleme innerhalb eines Ontologieentwicklungsprozesses. Verschiedene weitere Entwicklungsprozesse beschäftigen sich mit der gezielten Identifikation und Verwendung geeigneter (in formaler Form) existierender Ontologien. Einige davon werden beispielsweise bei Simperl²³⁷ beleuchtet. Ebenso werden regelmäßig wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht, die einen Überblick über existierende verfügbare Ontologien und Ontologie-Bibliotheken geben. Beispiele dafür sind die Arbeiten von Ding/Fensel²³⁸ und d'Aquin/Noy²³⁹. Im Hinblick auf die Zielsetzung der Neuentwicklung einer domänenspezifischen Ontologie zur Wissensabbildung und Wissensbereitstellung in der Produktentwicklung werden diese Ansätze jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Es existieren weiterhin einige interessante Ansätze, welche eine Ontologieentwicklung vom „weißen Blatt Papier“ bis zur Implementierung und Evaluation abdecken. Diese Ansätze werden im folgenden Abschnitt anhand ihres grundlegenden Ablaufs und ihrer Besonderheiten diskutiert.

Die Ontologieentwicklungsmethode nach Gruninger and Fox wurde für die TOVE (Toronto Virtual Enterprise) zur Abbildung von Unternehmensprozessen und Unternehmensaktivitäten entwickelt. Die Autoren führen die Nutzung sprachlicher Kompetenzfragen (engl. competency questions) ein, um die Spezifikation durchzuführen und um die Hauptkonzepte zu definieren. Der Ansatz fokussiert auf die Verwendung von Wissensabbildung mit Prädikatenlogik.²⁴⁰

Die Entwicklungsmethode nach Uschold and King wurde im Rahmen der Entwicklung der „Enterprise Ontology“ definiert. Der Ontologieentwicklungsprozess besteht aus vier konsekutiven Aktivitäten: 1. Absichtsidentifikation; 2. Ontologieaufbau; 3. Evaluation; 4. Dokumentation.²⁴¹

Die Methontology nach Fernandez et al. beinhaltet eine umfassende und strukturierte Methode und Lebenszyklusdefinitionen zur Ontologieentwicklung bestehend aus sechs Schritten: 1. Spezifikation; 2. Konzeptualisierung; 3. Formalisierung; 4. Integration; 5. Implementierung und 6. Wartung. Während die Ontologie diese Entwicklungsstadien durchläuft, wird der Prozess fortwährend durch die Aktivitäten „Wissensakquise, Dokumentation und Evaluation unterstützt.“²⁴²

²³⁷ Simperl 2009.

²³⁸ Ding/Fensel 2001.

²³⁹ d'Aquin/Noy 2012.

²⁴⁰ Vgl. Gruninger/Fox 1995, Fernández-López/Gómez-Pérez 2002b.

²⁴¹ Vgl. Uschold/King 1995.

²⁴² Vgl. Fernandez et al. 1997.

Die OnTo-Knowledge Methodology²⁴³ nach Sure/Studer besteht aus den vier Schritten „Machbarkeitsstudie“, „Kickoff“, „Überarbeitung“, „Evaluation“ sowie „Anwendung und Weiterentwicklung“, welche jeweils iterativ durchgeführt werden. Außerdem werden hier drei grundlegende Strategien der Konzeptidentifikation bei der Wissensakquise spezifiziert: der manuell durchgeführte „top-down“-Ansatz für die Erstellung von qualitativ hochwertigen Konzepten, welcher zunächst auf einem generischen Level Konzepte und Relationen definiert und diese immer weiter überarbeitet. Der „bottom-up“-Ansatz, bei dem auf Basis vorhandener Dokumente über sog. Textmining semiautomatisch Konzepte und deren Verbindungen abgeleitet werden. Schließlich der „middle-out“-Ansatz, der eine Mischung aus den beiden vorigen darstellt und in der Praxis am häufigsten anzutreffen ist.²⁴⁴

Jüngere Arbeiten beschäftigen sich auch mit der Ontologieentwicklung im Bereich der Produktentwicklung. Diese analysieren und vergleichen diese etablierten Methoden, um Lösungen für jeweils spezifische Anwendungen abzuleiten.

Stollberg analysiert drei solcher Ansätze, nämlich von Uschold/King, von Gruninger/Fox und den Methontology-Ansatz von Fernandez et al., und stellt deren grundlegenden Ablauf einander gegenüber (siehe Abbildung 24).²⁴⁵ Er schließt, dass der grundlegende Aufbau der Ontologieentwicklungsmethoden ähnlich ist und kondensiert diese zu den vier grundlegenden Schritten Spezifikation, Konzeptualisierung, Formalisierung und Evaluation (siehe Abbildung 24).

Gemeinsame Phasen	Uschold, King	Grüniger, Fox	METHONTOLOGY
Spezifikation	1) Zweck der Ontologie identifizieren	1) motivierende Szenarien 2) Kompetenzfragen formulieren (informell)	1) Spezifikation 2) Wissensakquisition
Konzeptionalisierung	2) Erstellung der Ontologie a. Eroberung	3) Terminologie-Spezifikation (formal)	3) Konzeptionalisierung 4) Integration
Formalisierung	b. Kodierung c. Integration	4) Kompetenzfragen formalisieren 5) Axiomatisierung	5) Implementierung
Evaluation	3) Evaluation 4) Dokumentation	6) Vollständigkeitstheoreme	6) Evaluation 7) Dokumentation

²⁴³ Vgl. Sure/Studer 2002.

²⁴⁴ Vgl. Sure/Studer 2002, S. 48.

²⁴⁵ Vgl. Stollberg 2002, S. 23ff.

Abbildung 24 Gegenüberstellung existierender Ontologieentwicklungsansätze nach Stollberg²⁴⁶

Apke und Dietmann führen im Rahmen des KOWIEN-Projektes eine umfassende Analyse verschiedener existierender Ansätze aus dem Software-Engineering, dem Knowledge-Engineering und der Ontologieentwicklung durch.²⁴⁷ Auf dieser Basis entwickeln Sie einen Ansatz zur Ontologie-Konstruktion bestehend aus fünf Aktivitäten (siehe Abbildung 25). Dieser ähnelt im Kern dem Ansatz von Stollberg, ordnet im Gegensatz der Wissensakquise jedoch eine eigene Phase zu und integriert die Formalisierung in die Implementierung und unterstreicht die Projektintegration durch begleitendes Projektmanagement und Dokumentation.²⁴⁸

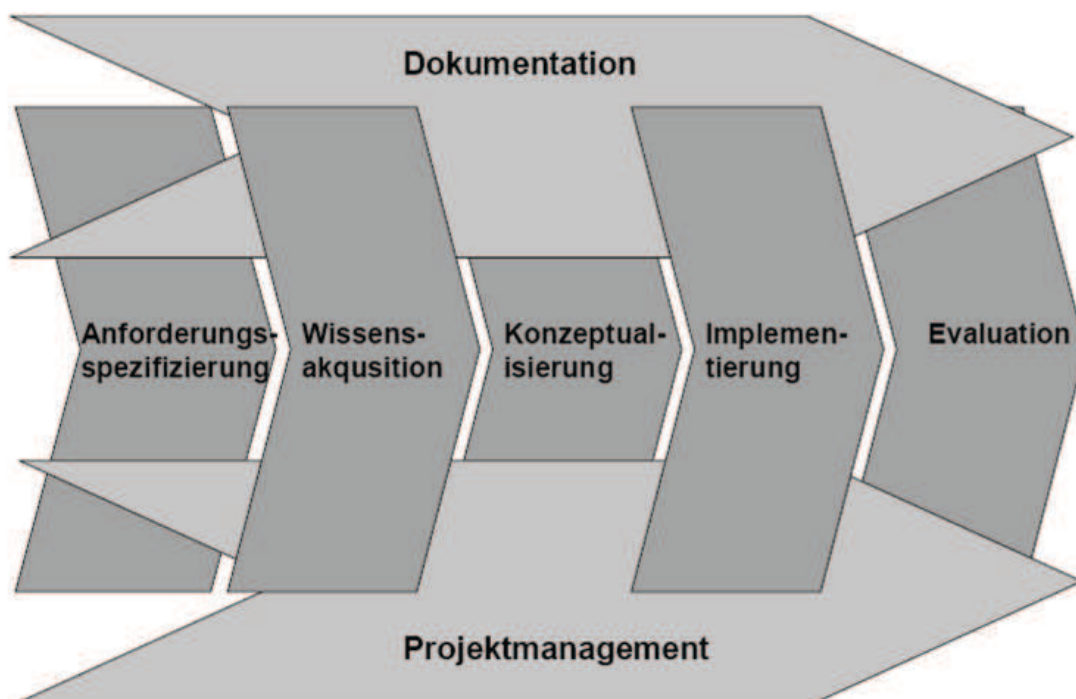


Abbildung 25 Ontologie-Konstruktion nach Apke/Dietmann²⁴⁹

Auch Welp, Labenda und Bludau analysieren existierende Ontologieentwicklungsansätze und leiten daraus einen eigenen Ansatz für die Entwicklung einer mechatronikspezifischen Domänenontologie her. Auch der von ihnen vorgestellte Ansatz ähnelt den beiden vorangegangenen. Durch die explizite Trennung der Wissensakquise, Konzeptualisierung, Formalisierung und Implementierung gliedern

²⁴⁶ Stollberg 2002, S. 26.

²⁴⁷ Apke/Dittmann 2003a.

²⁴⁸ Apke/Dittmann 2003b.

²⁴⁹ Apke/Dittmann 2003b.

sie ihn in insgesamt sechs Kernaktivitäten und die begleitende Dokumentation (siehe Abbildung 26). Sie unterstreichen die Wichtigkeit der Wissensakquise für Ontologien, die verteilt und nicht explizit vorhandenes Wissen abbilden sollen. Als Folge parallelisieren sie Wissensakquise und Konzeptualisierung und empfehlen diese alternierend iterativ zu durchlaufen.²⁵⁰

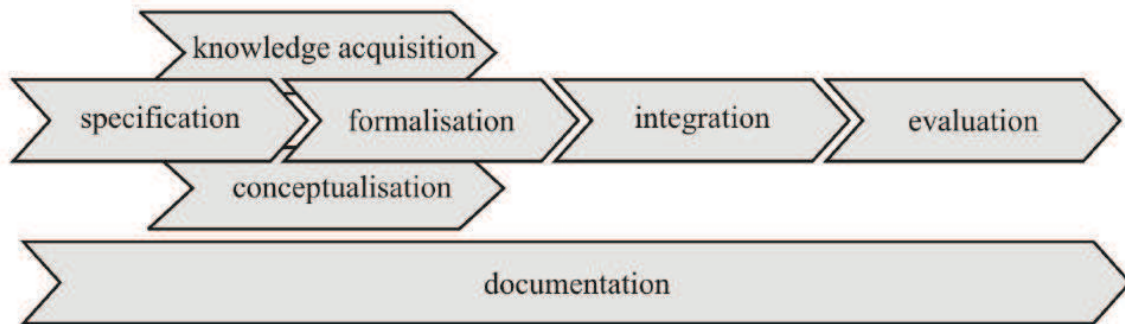


Abbildung 26 Ontologieentwicklungsprozess nach Welp et al.²⁵¹

Aus dieser Übersicht vorhandener Ontologieentwicklungsansätze lässt sich erkennen, dass deren grundlegender Aufbau sehr ähnlich ist. Als wiederkehrende Elemente können dabei identifiziert werden: Spezifikation, Wissensakquise, Konzeptualisierung, Formalisierung, Implementierung und Evaluation. Eine detaillierte Betrachtung der Inhalte der einzelnen Schritte, sowie verwendeter Werkzeuge und Methoden wird soweit für diese Arbeit relevant im Kapitel 4 „Ansatz zur Ontologieentwicklung“ durchgeführt.

Die jeweiligen Entwicklungsprozessschritte werden in der Regel nacheinander und nur in einzelnen Fällen teilweise parallel durchlaufen, wobei in einigen Ansätzen explizit auf den Bedarf und die Möglichkeit der iterativen Abfolge hingewiesen wird. Der sequentielle Ablauf eines Entwicklungsprozesses entspricht nicht dem aktuellen Stand der Entwicklungsprozessforschung, wo sich die Erkenntnis durchsetzt, dass eine strikte Trennung eines Entwicklungsprozesses in sequentielle Schritte nicht möglich ist, sondern dass eine konsequente Parallelisierung der Entwicklungsaktivitäten für die Beschreibung erforderlich ist.²⁵²

Die hier vorgestellten Ontologieentwicklungsansätze haben zum Ziel, nicht explizites Wissen²⁵³ zu erfassen und abzubilden. Dabei spielt die Wissensakquise in allen Ansätzen eine zentrale Rolle. Dennoch wird auf Methoden der Wissensakquise nur geringfügig eingegangen. Ebenso wird die Evaluation in der Ontologieentwicklung in

²⁵⁰ Welp et al. 2007.

²⁵¹ Welp et al. 2007.

²⁵² Vgl. Meboldt 2008, S. 31ff.

²⁵³ Siehe Abschnitt 2.2.4.

den meisten Ansätzen allenfalls nur im Ansatz beschrieben und scheint eine besondere Herausforderung darzustellen. Zu diesem Schluss kommen auch Kim et al. Sie vergleichen existierende Ontologieentwicklungsansätze von dreizehn Veröffentlichungen anhand von elf unterschiedlichen Vergleichskriterien. Sie sehen unter anderem in der Ontologie-Evaluation eines der zentralen Themen, auf das zukünftige Ontologieprojekte fokussieren sollten.²⁵⁴

2.4.2 Ontologieeditoren

Die Entwicklung einer Ontologie kann durch die Verwendung von Software entscheidend unterstützt werden. Insbesondere der Schritt der Formalisierung bietet hierfür besonderes Potential. Das Konzept einer Ontologie, welches auf Basis einer Wissensakquise aufgebaut wurde, existiert explizit zumeist nur in verteilten Bruchstücken, wie Begriffslisten, Taxonomien oder Graphen, und teilweise nur implizit in Form von mentalen Modellen der Ontologieersteller. Bei der Formalisierung müssen diese Bauteile nun konsistent zusammengesetzt, vervollständigt und auf Basis der gewählten formalen Ontologiesprache ausgedrückt werden. Kennt und beherrscht man eine formalisierte Ontologiesprache, so kann eine Ontologie mithilfe eines einfachen Texteditors erstellt werden. Hierfür bieten jedoch auch spezielle Softwareprogramme, sogenannte Ontologieeditoren, Unterstützung in Form von Benutzeroberflächen, die es ermöglichen, den aktuellen Stand einer Ontologie leicht zu editieren, zu visualisieren und auf Konsistenz zu überprüfen. Insbesondere bieten sie durch vereinfachte Listendarstellung und -bearbeitung sowie benutzerfreundliche Funktionen wie Drag&Drop die Möglichkeit, Ontologien zu erstellen und zu editieren, ohne tatsächlich die eigentliche grammatikalisch korrekte Syntax einer Ontologie zu bearbeiten. Diese wird im Hintergrund durch die Software verwaltet und bei Bedarf ausgegeben. Ebenso wird das Überprüfen und Korrigieren der Syntax einer Ontologie durch sogenanntes automatisches Debugging unterstützt. Zusätzlich bieten verschiedene Programme die Möglichkeit, Instanzen und testweise Abfragen zu erstellen, um die Funktionalität der Ontologie in einer späteren Anwendung zu antizipieren. Die meisten Editoren erlauben es, eine Ontologie in verschiedenen Sprachen zu exportieren und so für die gewünschte Anwendung bereitzustellen.

Zu den bekanntesten Ontologieeditoren dieser Art gehören Protégé und Ontostudio®. Protégé²⁵⁵ ist ein frei verfügbarer Ontologieeditor, der ursprünglich an der Stanford University für Ontologien im Bereich biomedizinischer Anwendungen entwickelt wurde. Nach seinem anfänglichen Erfolg wurde Protégé ständig

²⁵⁴ Vgl. Kim et al. 2008.

²⁵⁵ Protégé .

weiterentwickelt und fand weite Verbreitung. Protégé unterstützt die OWL-Sprachen OWL Lite, OWL DL und OWL Full.²⁵⁶ Ontostudio ist der kommerzielle Nachfolger von Ontoedit²⁵⁷ und bietet Schnittstellen zu verschiedenen Datenbanksystemen wie Oracle, Microsoft SharePoint und MySQL. Ontostudio unterstützt die Ontologiesprachen RDF, OWL und F-Logic. Beispiele für weitere Ontologieeditoren sind die frei verfügbaren Ontologieeditoren WebODE²⁵⁸, Chimæra²⁵⁹ sowie WebOnto²⁶⁰ und kommerzielle Ontologieeditoren wie a.k.a.Software²⁶¹, TopBraid Composer²⁶², Semaphore Ontology Manager²⁶³ oder Be Informed Studio²⁶⁴. Insbesondere im Bereich frei verfügbarer Ontologieeditoren gibt es eine unüberschaubare Anzahl von Angeboten mit vielfach eingeschränkter und in der Entwicklung befindlicher Funktionalitäten.

Die verschiedenen etablierten Ontologieeditoren bieten vergleichbare Funktionalitäten, unterscheiden sich jedoch in der Benutzerführung und in den unterstützten Ontologiesprachen. Durch die Verwendung von Ontologieeditoren ist für das Erstellen einer Ontologie in einer formalen Ontologiesprache die genaue Kenntnis der Syntax nicht unbedingt erforderlich. Kommerzielle Systeme wie Ontostudio, Semaphore Ontology Manager oder TopBraid Composer unterstützen darüber hinaus noch die Implementierung in ein Datenbanksystem durch vorbereitete Softwareschnittstellen und sind daher für die Erstellung von ontologiebasierten Anwendungen von besonderem Interesse.

2.4.3 Ontologiebasierte Wissensdatenbanksysteme

Ein Datenbanksystem dient der elektronischen Datenbankverwaltung und besteht in der Regel aus der eigentlichen Datenbank, dem Datenspeicher und einem Datenbankmanagementsystem. Letzteres strukturiert die interne Datenstruktur und verwaltet den Lese- und Schreibzugriff auf die Datenbank.

Ein ontologiebasiertes Wissensdatenbanksystem macht Wissen verfügbar, indem Informationen dort abgelegt, über eine Ontologie verknüpft und zur Verfügung gestellt werden. Einem derartigen System liegt das Verständnis zugrunde, dass Wissen in Form von vernetzter Information abbildbar ist. Eine Ontologie wird dabei

²⁵⁶ Siehe Abschnitt. 2.3.3.

²⁵⁷ Vgl. Sure et al. 2002.

²⁵⁸ WebODE .

²⁵⁹ Chimæra .

²⁶⁰ Domingue .

²⁶¹ a.k.a.Software .

²⁶² TopBraid Composer .

²⁶³ Semaphore Ontology Manager

²⁶⁴ Be Informed Studio

zur Vernetzung der Informationen genutzt. Sie kann dabei auf verschiedenen Wegen Verwendung finden.

Zum einen kann eine Ontologie genutzt werden, um die grundlegende Struktur einer Datenbank festzulegen. Die Ontologie dient während der Entwicklung einer Datenbank als Werkzeug zum Explizieren des gemeinsamen Verständnisses der Entwickler und als Ausgangspunkt für die Erstellung der späteren Datenbankstruktur. Ontologiekonzepte, Attribute und Relationen werden dann in Datentypen und deren Eigenschaften überführt. Ontologieinstanzen stehen für einzelne Informationselemente in Form von Datensätzen, Webseiten oder Dateien eines bestimmten aus der Ontologie abgeleiteten Datentyps und werden in der Datenbank abgelegt. Auf diese Weise können auch Ontologien implementiert werden, welche nicht zuvor in einer formalisierten Ontologiesprache ausgedrückt wurden. Kommerzielle Ontologieeditoren, wie z. B. Ontostudio, ermöglichen jedoch eine softwaregestützte Ableitung einer Datenbankstruktur aus einer formalen Ontologie. Auf diese Weise besteht ein direkter Bezug zwischen der Ontologie und der Datenbankstruktur. Ebenso sind iterative Modellierung und Evaluation von Ontologie und Datenbankstruktur einfacher möglich.

Auf der anderen Seite kann eine Ontologie genutzt werden, um den Zugriff auf Informationen zu unterstützen. Dazu werden vorhandene Informationen mit der Ontologie verknüpft. Dies kann entweder automatisiert durchgeführt werden, indem Datenbankinhalte indiziert, d. h. die textuellen Inhalte erfasst werden und auf Basis des Ergebnisses mit den entsprechenden Begriffen in der Ontologie verknüpft werden, oder durch eine manuelle Verknüpfung von Datenbankinhalten und Ontologieelementen oder auch eine Kombination aus beidem. Über in der Ontologie definierte Regeln²⁶⁵ können automatisiert weitere logische Schlussfolgerungen in Form weiterer Verknüpfungen und Attribute abgeleitet werden. Der Vorgang, dass Softwaresysteme auf diese Weise selbstständig Schlussfolgerungen auf Basis logischer Regeln ziehen, wird als Inferenz bezeichnet. Derartige Suchmaschinen, auch Inferenzmaschinen genannt, können selbstständig Informationen vernetzen und so Zusammenhänge ableiten, welche nicht vorher definiert wurden. Dies ist insbesondere für domänenübergreifende Wissensdatenbanksysteme von Interesse, da so explizit nicht vorhandenes Wissen über Zusammenhänge automatisiert abgeleitet werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur Bezug auf solche Datenbanksysteme zur Wissensrepräsentation genommen, in welchen Ontologien auf beide Arten

²⁶⁵ Siehe Abschnitt 2.3.2.

gleichermaßen verwendet werden. Diese erlauben es, gezielt Wissen als vernetzte Information sowohl abzulegen als auch bereitzustellen. Der Zugriff auf Informationen, welche auf Basis einer Ontologie strukturiert und verknüpft sind, kann über eine ontologiebasierte Suche erfolgen. Dabei wird nicht einfach nach Zeichenketten gesucht, wie es bei einer Volltextsuche der Fall ist. Vielmehr erlaubt eine Suchmaschine die Suche nach bestimmten Begriffen, deren Bedeutung in der Ontologie festgelegt ist. Ergebnis einer derartigen Suche sind alle Informationen, welche mit diesem Begriff verknüpft sind. Derartige ontologiebasierte Suchfunktionen liefern Suchergebnisse von grundsätzlich höherer Qualität als normale Textsuchmechanismen.²⁶⁶

Ein Nutzer kann sich über ein derartiges System abgelegtes Wissen aneignen, indem er auf Informationen zugreift, welche anhand der Ontologie auf Basis seiner Suchanfrage als relevant eingeschätzt werden und deren Bedeutung und Kontext er anhand der Ontologie erfassen und mit seinem eigenen Verständnis verknüpfen kann.

Der grundlegende Aufbau eines derartigen Softwaresystems soll im Folgenden kurz erläutert werden. Die Basis bildet ein Datenbanksystem, dessen Datenbankstruktur aus einer Ontologie abgeleitet ist. Der Nutzer interagiert mit dem System über eine Benutzeroberfläche, welche über einen Webbrowser angezeigt wird. Die Benutzeroberfläche gliedert sich in eine Datenanzeige und eine Suchoberfläche. Über die Datenanzeige können Informationen sowohl angezeigt als auch angelegt bzw. editiert werden. Bei der Anlage von Information wird diese als Datenbankinhalt abgespeichert, einem Datentyp der Datenbankstruktur zugeordnet und über die in der Datenbankstruktur abgebildeten Attribute und Relationen vernetzt. Sämtliche Informationen in der Datenbank werden indiziert und so der Suchmaschine zugänglich gemacht (siehe Abbildung 27).

²⁶⁶ Chakrabarty et al. 2009.

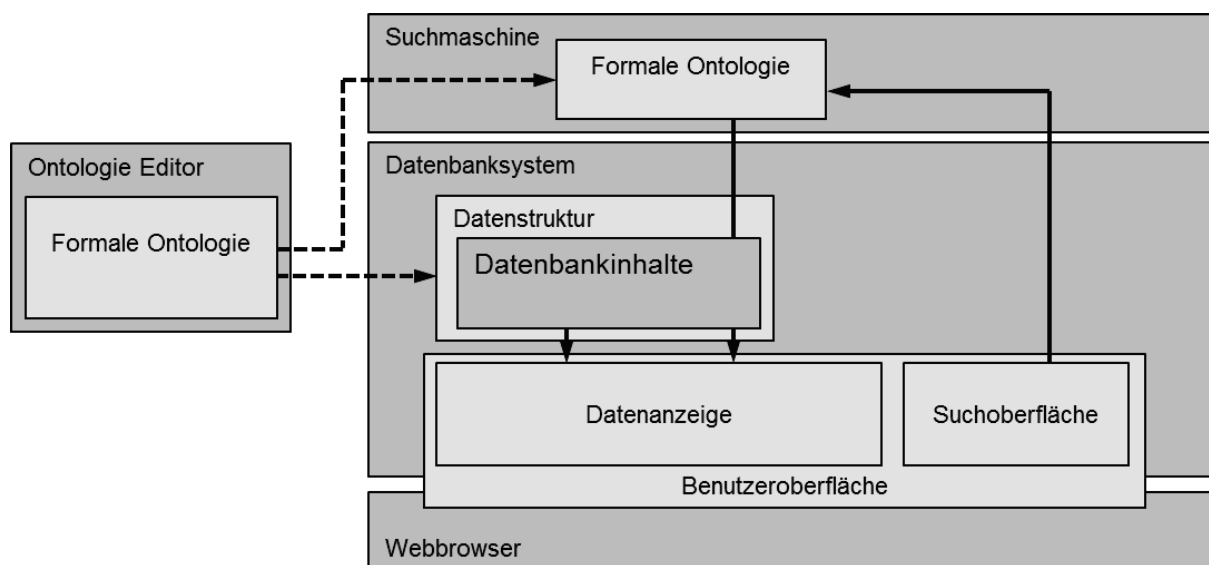


Abbildung 27 Ontologiebasiertes Wissensdatenbanksystem

Der Zugriff auf die Informationen erfolgt durch die Benutzeroberfläche, entweder direkt über die Datenanzeige oder über die Suchoberfläche. Durch Letztere kann ein Nutzer Suchanfragen an das System richten. Er sucht dabei nach Begriffen mit bestimmten Attributen und Relationen aus der Ontologie. Die Suchanfrage des Nutzers wird an die ontologiebasierte Suchmaschine weitergeleitet. Die Suchanfragen werden in besonderen Anfragesprachen formuliert. Im Zuge des Semantic Web wird dazu häufig die Anfragesprache SPARQL verwendet.²⁶⁷ Die Suchanfrage liefert die Datenbankinhalte als Ergebnis, welche mit dem gesuchten Begriff verknüpft sind und gleichzeitig den Einschränkungen durch Attribute und Relationen entsprechen. Dabei werden sowohl Attribute und Relationen berücksichtigt, welche manuell angelegt wurden, als auch solche, die auf Basis der in der Ontologie definierten logischen Regeln automatisch abgeleitet werden. Durch Anfragemodifikation aufgrund des in der Ontologie abgebildeten Wissens kann die Suchanfrage erweitert und so das Suchergebnis verbessert werden.²⁶⁸ Fortgeschrittene Suchoberflächen erlauben dem Nutzer, das Suchergebnis über die Einschränkungen von Relationen und Attributen weiter zu präzisieren.

Ontologiebasierte Wissensdatenbanksysteme bestehen also in der Regel aus mehreren Softwaremodulen. Diese interagieren mit der Ontologie, zum Teil einmalig bei der Erstellung der Datenbankstruktur, zum Teil kontinuierlich während der Bearbeitung von Anfragen durch einen Benutzer.

²⁶⁷ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S. 204.

²⁶⁸ Vgl. Mönch 2003.

2.4.4 Domänenspezifische Ontologieprojekte und -anwendungen

Im World Wide Web findet man domänenspezifische Ontologien zu den verschiedensten Bereichen und Themen wie Biologie²⁶⁹, Medizin²⁷⁰, Forschung²⁷¹, Transportwesen²⁷², Ingenieurwissenschaften²⁷³, Wirtschaftswissenschaften²⁷⁴, Kunst & Architektur²⁷⁵, Sport²⁷⁶, Personendaten²⁷⁷, Zeit²⁷⁸. Derartige Ontologien sind das Ergebnis kleinerer Ontologieprojekte und dienen oft mehr als Best-Practice-Beispiel für die Vermittlung der verwendeten Ontologiesprache.

Eine der am weitesten verbreiteten Ontologien ist die Wein-Ontologie²⁷⁹, welche vielfach in Veröffentlichungen zum Thema Ontologien und Ontologieentwicklung aufgegriffen und so ständig weiter entwickelt wurde.²⁸⁰ Daraus ist eine webbasierte Anwendung, der „Wine Agent“, entstanden, welche Weinempfehlungen zu Gerichten und weiterführende Informationen zu Weinen und Rebsorten bereitstellt.²⁸¹

Im Bereich der Medizin wurden seit den 1990er Jahren umfassende internationale Projekte durchgeführt, mit dem Ziel, das Verständnis um medizinische Begriffe weltweit zu vereinheitlichen und explizit zu machen. Einen Überblick dazu liefern Stevens et. al.²⁸² Sie ziehen außerdem ein Fazit zu vorliegenden Forschungsergebnissen und dem Stand der Wissensabbildung mit Ontologien im Bereich Biologie und Medizin.

Im Bereich der Ingenieurwissenschaften erarbeitet Borst mit der PhysSys-Ontologie einen Ansatz zur Wiederverwendung einer Ontologie zur Modellierung, Simulation und Gestaltung physikalischer Systeme.²⁸³ Die Ontologie ist modular aufgebaut und besteht sowohl aus generischen (z. B. die Mereologie-Ontologie) als auch aus domänenspezifischen Teilontologien (z. B. die Technische-Komponenten-Ontologie).

²⁶⁹ Vgl. z.B. Protege Ontologies Library .

²⁷⁰ Vgl. z.B. Open Galen .

²⁷¹ Vgl. z.B. Sure/Stojanovic 2001.

²⁷² Z.B. US Navy Ships Ontology Ontology .

²⁷³ Vgl. z.B. Gruber/Olsen 1994.

²⁷⁴ Vgl. z.B. Enterprise - Towards a framework for enterprise modelling and integration .

²⁷⁵ Vgl. z.B. Art & Architecture Thesaurus Online .

²⁷⁶ Z.B. Baseball Ontology .

²⁷⁷ Z.B. Person Ontology .

²⁷⁸ Z.B. Time.daml .

²⁷⁹ Z.B. Wine Ontology .

²⁸⁰ Vgl. Brachman et al. 1991; McGuinness et al. 1994; Noy/McGuinness 2001.

²⁸¹ Wine Agent 1.0 .

²⁸² Vgl. Stevens et al. 2007.

²⁸³ Vgl. Borst 1997.

Auch im Bereich der Produktentwicklung werden Möglichkeiten zur Unterstützung durch Ontologien seit den 1990er Jahren erforscht. Die YMIR-Ontologie von Alberts/Dicker stellt einen der frühen ontologiebasierten Ansätze in der Produktentwicklung dar. Sie definiert eine Taxonomie zentraler Begriffe verschiedener Ingenieurdisziplinen. Diese hat zum Ziel, mangelnder Eindeutigkeit bei der Interpretation von Wissen oder Daten, die von unterschiedlichen Quellen stammen, entgegenzuwirken.²⁸⁴

Eine Vielzahl von Ontologien im Bereich der Produktentwicklung dient der Abbildung von Entwicklungsprozessmodellen. Sim/Duffy explizieren eine konsistente und kohärente Beschreibung allgemeingültiger Design-Aktivitäten in einer Ontologie als Basis für die Entwicklung eines effizienten Entwicklungsunterstützungssystems.²⁸⁵ Ahmed/Storga vereinigen existierende Ansätze, die empirisch erzeugte integrierte Produktentwicklungstaxonomie (engl. Engineering design integrated taxonomy - EDIT)²⁸⁶ und die theoriebasierte Designontologie (engl.- design ontology DO)²⁸⁷ in einer zusammengeführten „Ontology für die Produktentwicklung“ (engl. – merged ontology for engineering design – MOED) als mögliche Basis für Softwareanwendungen.²⁸⁸ Die „Process specification language“ – Ontology (PSL) von Gunendran dient als Schlüsselement für prozessbasierte Kommunikation und Informationsaustausch, um den hohen und vielfältigen Informationsbedarf bei der Entscheidungsfindung in der Produktentwicklung zu unterstützen.²⁸⁹ Eine Anwendungsmöglichkeit derartiger Ontologien zeigen Kim/Kim auf. Sie nutzen eine ontologiebasierte Darstellung generischer Produktentwicklungsaktivitäten in ihrer Software „DesignScape“, um die verschiedenen Stadien eines Produktentwurfes mit den Aktivitäten zu verknüpfen und so den Verlauf einer Produktgestaltung abzubilden und anzuzeigen.²⁹⁰ Aufbauend auf einer formalen Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses nutzen Anderl et al. Ontologien um Unsicherheiten in der Produktentwicklung formal abzubilden. Diese werden dann mit kritischen Größen verknüpft und explizit auf beteiligte Elemente bezogen. So können negative Auswirkungen auf die Produktqualität mit Hilfe von Software früher erkannt und leichter vermieden werden.²⁹¹

²⁸⁴ Vgl. Alberts/Dicker 1994.

²⁸⁵ Vgl. Sim/Duffy 2003.

²⁸⁶ Vgl. Ahmed 2005.

²⁸⁷ Vgl. Storga et al. 2005.

²⁸⁸ Vgl. Ahmed/Storga 2009.

²⁸⁹ Vgl. Gunendran et al. 2007.

²⁹⁰ Vgl. Kim/Kim 2007.

²⁹¹ Vgl. Anderl et al. 2010.

Ein weiteres Anwendungsgebiet von Ontologien ist die Abbildung von Produkten, Produkthanforderungen und Produktfunktionen. Kitamura/Mizoguchi entwickeln eine Ontologie, um die Systematisierung von funktionalem Wissen zu unterstützen. Sie zeigen, dass auf diese Weise die Konsistenz von funktionalen Modellen in interdisziplinären Projekten verbessert werden kann. Außerdem kommen sie zu dem Ergebnis, dass neben der allgemein dominierenden formal-orientierten Ontologieforschung in der Informatik ebenso die inhaltspezifische Erforschung von Ontologien wichtig für die Forschungsdomäne ist.²⁹² Nanda et al. stellen Produktfamilien anhand einer Ontologie dar und unterstützen dadurch die Wiederverwendung von Komponenten in verschiedenen Produkten einer Familie und das Auffinden von sprachlichen und parametrischen Gestaltungsinformationen über die verschiedenen Phasen des Gestaltungsprozesses hinweg.²⁹³ Darlington/Culley entwickeln eine Anforderungsontologie für die Produktentwicklung, um eine einheitliche Verwendung von Begriffen und dadurch eine klarere Kommunikation von Anforderungen zu erreichen. Basierend auf ihren Projekterfahrungen unterstreichen sie, dass die Entwicklung von Ontologien zur Unterstützung der Problemlösung in der realen Produktentwicklung sehr aufwändig ist und großen Ressourceneinsatzes bedarf.²⁹⁴

Der Ansatz zum ontologiebasierten Anforderungsmanagement bei der Audi AG stellt ein weiteres Beispiel zur ontologiebasierten Anforderungsmodellierung mit industrieller Anwendung dar. Hier wurde ein ontologiebasiertes System eingeführt, das verschiedene Sichtweisen und Begriffe in Form vorhandener Thesauri, Vollformlexika und Fachbegriffsdefinitionen in dem ontologiebasierten System zusammengeführt, ohne dass diese einheitlich vorgeschrieben werden. Auf diese Art unterstützt das System die projekt- und abteilungsübergreifende Identifikation ähnlicher Anforderungen. Der Fokus liegt dabei auf der dynamischen Definition von Beziehungen zwischen Instanzen mit Hilfe von Regeln. Ziel ist zunächst eine Verbesserung der Qualität von Anforderungstexten und langfristig besteht die Vision, eine stärkere Formalisierung bis hin zur automatischen Generierung von Lastenheften und Testfalldefinitionen zu erreichen.²⁹⁵ Ebenso werden Ontologien genutzt, um Wissen aus existierenden Produktmodellierungsmethoden zu ziehen oder in diese zu transferieren. Ein Beispiel dafür ist der Ansatz zur Verknüpfung des Design-Structure-Matrix-Ansatzes mit Ontologien von Kohn et al.²⁹⁶

²⁹² Vgl. Kitamura/Mizoguchi 2004.

²⁹³ Vgl. Nanda et al. 2007.

²⁹⁴ Vgl. Darlington/Culley 2008.

²⁹⁵ Vgl. Syldatke/Zeyn 2008.

²⁹⁶ Vgl. Kohn et al. 2011.

Neben Ontologieprojekten, welche die Abbildung eines einheitlichen Verständnisses zur Unterstützung der Kommunikation zwischen Personen als Hauptziel haben, gibt es auch einige, welche Ontologien speziell für die Implementierung in ontologiebasierten Datenbanksystemen entwickeln.

Lindemann/Ponn stellen zwei mögliche Ontologieanwendungen im Bereich der Produktentwicklung vor. In der ersten wurde ein ontologiebasierter Ansatz genutzt, um die Funktionsstruktur von Produkten abzubilden. In der zweiten wurde ein ontologiebasiertes System zur Erfassung von Fehlern in Produktentstehungsprozessen aufgebaut. Sie stellen in beiden Fallstudien fest, dass der Aufbau der Ontologien der logischen Abfolge entspricht, in der die einzelnen Elemente nach dem Verständnis der beteiligten Entwickler abgehandelt werden. Ein derartiger Aufbau erleichtert einem Experten die Navigation durch die Ontologie bei der Suche nach Informationen. Eine Ontologie kann sogar auf diese Weise wertvolle zusätzliche Suchbegriffe liefern.²⁹⁷

Im Rahmen des KOWIEN-Projektes wird eine Kompetenzontologie auf Basis des eigens entwickelten Vorgehensmodells erstellt.²⁹⁸ Ausgangspunkt für die Ontologieentwicklung ist eine vorhandene Datenbank mit Mitarbeiterkompetenzen, die jedoch nicht mit einheitlichem Vokabular erfasst sind. Ziel der Ontologieentwicklung ist nicht, Wissen direkt in einem ontologiebasierten System bereitzustellen, sondern Wissensträger innerhalb einer Organisation zu identifizieren und organisationsweit verfügbar bereitzustellen. Die Ontologie wird mit dem Ontologieeditor OntoEdit in der Ontologiesprache F-Logic erstellt.

Brandt et al. implementieren ein ontologiebasiertes Prozessdaten Warenhaus (engl. „Process Data Warehouse“). Dieses bietet eine flexible Datenbankstruktur, semantische Suche, integrierte Anzeige externer Informationen und teilautomatisiertes Erfassen von Erfahrungswissen während der Durchführung von Entwicklungsprojekten. Mit Rücksicht auf den hohen Implementierungsaufwand umfangreicher heavyweight Ontologien²⁹⁹ nutzen sie nur eingeschränkt die volle Ausdrucksstärke der gewählten Ontologiesprache.³⁰⁰

Der Ansatz von Rezgui untersucht die Möglichkeiten von ontologiegestützten Wissensmanagement und Informationsbereitstellung vor dem spezifischen Hintergrund des angewandten Bauingenieurwesens. Zusammen mit mehreren Firmen der Baubranche nutzt er eine Ontologie zur Bereitstellung von Projektdoku-

²⁹⁷ Vgl. Lindemann/Ponn 2006.

²⁹⁸ Siehe Apke/Dittmann 2003b, S. 22ff.

²⁹⁹ Siehe Abschnitt 2.3.4.

³⁰⁰ Brandt et al. 2008.

menten in der Datenbank „eCognos“. Als zentrale Erfolgsfaktoren für Softwaresysteme zur Unterstützung des Wissensmanagements vor dem Hintergrund der Problematik räumlich verteilter Bauprojekte nennt er Anpassbarkeit, Modellbasiertheit, Webzugriff, Berücksichtigung von geistigem Eigentum und die intuitive Handhabung.³⁰¹

Der größte Anteil der hier aufgezählten Ontologien wird zur Abbildung und eindeutigen Beschreibung von mentalen Modellen genutzt. Die explizite Beschreibung eines mentalen Modells dient in einem ersten Ansatz meist zunächst der Unterstützung der Kommunikation zwischen Personen auf Basis eindeutig definierter Begriffe, um Missverständnisse zu vermeiden und unterstützt damit eine Personalisierungsstrategie des Wissensaustausches. Eine Implementierung der entwickelten Ontologien in ein Softwaresystem wird oft als langfristige Zielsetzung in Aussicht gestellt, ist aber meist nicht Gegenstand der Forschungsarbeiten. Andere derartige Ontologien werden ausschließlich mit dem Ziel erstellt, Thesauri, Glossare und Klassifizierungsschemata abzubilden und im Intranet eines Unternehmens oder im Internet verfügbar zu machen.

Ontologien zur Softwareimplementierung im Sinne einer Kodifizierungsstrategie beim Wissensaustausch werden im Regelfall zur Unterstützung des Zugriffs auf vorhandene Dokumente oder im Rahmen spezialisierter Expertensysteme für spezifische Anwendungen genutzt. Eine Ausnahme davon stellt der Ansatz des KOWIEN-Projektes dar bei dem eine Ontologie verwendet wird, um Wissen indirekt in Form von Wissen über Wissensträger allgemein bereitzustellen. Dieser Ansatz stellt eine Mischung aus Kodifizierungs- und Personalisierungsstrategie dar.

2.4.5 Zwischenfazit

Ontologien sind formale, sprachlich gefasste Modelle eines gemeinsamen Verständnisses. Ausgedrückt in formalen Ontologiesprachen sind sie maschinenlesbar. Sie können zur Abbildung intersubjektiver Mentalmodelle genutzt werden, die das Fundament für die Produktentstehung darstellen.³⁰² Vor diesem Hintergrund können Ontologien im Bereich des Wissensmanagements für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Neben der einfachen Unterstützung der Kommunikation zwischen Personen ermöglichen sie auch, Wissen als vernetzte Daten und Information in ontologiebasierten Wissensdatenbanken abzubilden und können somit den rechnergestützten Wissensaustausch maßgeblich unterstützen. Darüber hinaus

³⁰¹ Rezgui 2006.

³⁰² Vgl. Meboldt 2008, S.203.

können Softwaresysteme durch Inferenz auf Basis in Ontologien definierter logischer Regeln aus vernetzter Information weitere Fakten ableiten.

Die Abbildung von Wissen in Ontologien bringt verschiedene Einschränkungen mit sich, wie beispielsweise eine eingeschränkte Anpassbarkeit der Ontologie oder die Beschränkung auf die Abbildung von binären Relationen. Einige Fragestellungen von grundsätzlicher Bedeutung bleiben dabei bisher weitgehend ungelöst. In Ontologien können Fakten nur eindeutig abgebildet werden. Der Kontext von Fakten kann nicht vollständig in der Ontologie abgebildet werden. Fakten mit eingeschränkter oder gar unklarer Gültigkeit können nicht als solche abgebildet werden. Inwieweit und unter welchen Randbedingungen beispielsweise ein Werkstoff für ein System geeignet ist, kann nicht vollständig in einer Ontologie erfasst werden und führt somit ggf. zu falschen Schlussfolgerungen. Diese Problematik wird als Universalienproblem bezeichnet.³⁰³ Ebenso entspricht die strikte und eindeutige Trennung von Konzept und Instanzebene nicht dem menschlichen Verständnis, das nämlich nicht strikt zwischen abstrakten und konkreten Objekten trennt. Diese werden vielmehr in der „Wissensuppe“ des menschlichen Verstandes vermischt.³⁰⁴

Es existiert eine unüberschaubare Anzahl an formalen Ontologiesprachen. Es scheint, dass der Aufwand, der zur Analyse des Erfolges der verschiedenen Ontologieprojekte betrieben wurde, sehr gering ist im Verhältnis zu dem großen Aufwand, der in die Entwicklung neuer Ontologiesprachen investiert wurde.³⁰⁵

Dazu bringen die verschiedenen Ontologiesprachen aufgrund ihres Aufbaus einige Restriktionen hinsichtlich Möglichkeiten, Fakten auszudrücken, mit sich. Sie fallen je nach gewählter Ontologiesprache unterschiedlich aus. Ein Beispiel dafür ist die Symmetrie oder Transitivität von Relationen, welche nur von einigen Ontologiesprachen unterstützt wird. Die spezifischen Eigenschaften der Ontologiesprache beeinflussen maßgeblich die spätere Ontologie. Die Ontologiesprache muss auf Basis der gewünschten Funktionalität ausgewählt werden, und die Ontologieentwicklung muss diese Restriktionen von Beginn an berücksichtigen.³⁰⁶

Für die Entwicklung von Ontologien gibt es verschiedene Ansätze, welche sich auf abstraktem Level ähneln und auf den gleichen Phasen bzw. Aktivitäten basieren. Zum Teil ist das Vorgehen innerhalb der einzelnen Phasen/Aktivitäten nicht eindeutig und vollständig erklärt. Die vielfach genannte Abhängigkeit von gewählter Ontologiesprache und der Ontologiemodellierung wird z. B. nicht genauer erläutert,

³⁰³ Vgl. Stuckenschmidt 2009, S. 9f.

³⁰⁴ Vgl. Sowa 2000.

³⁰⁵ Vgl. Brewster/O'Hara 2007.

³⁰⁶ Vgl. Fernández-López/Gómez-Pérez 2002a.

konkrete Hinweise dazu fehlen. Einige Ansätze gehen spezifisch auf die Ontologieentwicklung für Anwendungen im Rahmen der Produktentwicklung ein und bieten somit eine potentielle Ausgangsbasis für die folgende Arbeit.

Im Bereich der Produktentwicklung gibt es verschiedene Beispiele für Ontologieanwendungen. Diese bilden meist mentale Modelle zu Produkten und Prozessen explizit ab, um die interpersonelle Kommunikation zu unterstützen, und werden nicht für eine Implementierung in einem Softwaresystem entwickelt.

3 Zielsetzung

Dem schleppenden Einsatz von Ingenieurkeramik als Konstruktionswerkstoff stehen umfangreiche Forschungsergebnisse zu ingenieurkeramischen Werkstoffen aus der Domäne der Werkstoffwissenschaften und mittlerweile auch der Konstruktionswissenschaften sowie einige erfolgreiche industrielle Anwendungsbeispiele gegenüber. Eine mangelnde Verfügbarkeit von Wissen zu Ingenieurkeramiken kann also nicht an der Quantität vorhandener Ergebnisse festgemacht werden, sondern vielmehr an der Art und Weise, wie diese verfügbar sind. Den Konstrukteuren in Unternehmen, als potentielle Anwender dieses Wissens, ist es ohne spezifisches Vorwissen nicht möglich, sich auf Basis der Forschungsergebnisse vorhandenes Wissen anzueignen und auf ihre Problemstellungen anzuwenden. Problem ist nicht eine gegebenenfalls mangelnde Existenz von Wissen, sondern primär das Scheitern des Wissensaustausches.

Wissen wird immer auf Basis gemeinsamen Verständnisses ausgetauscht. Beim direkten Wissensaustausch zwischen Personen kann das gemeinsame Verständnis, das die Grundlage für die Kommunikation darstellt, durch direktes Feedback sichergestellt werden. Indirekter Wissensaustausch über Medien bietet den Vorteil der räumlichen und zeitlichen Entkopplung des Wissensaustausches und der beliebigen Multiplizierbarkeit. Jedoch kann das notwendige gemeinsame Verständnis nicht ohne Weiteres sichergestellt werden. Dieser Umstand kann das oben beschriebene Scheitern des Wissensaustausches im Bereich Keramik erklären. Der Werkstoffwissenschaftler mit seinem Wissen in Form von Ergebnisberichten und Veröffentlichungen hat durch seine Ausbildung, seine jahrelange Erfahrung mit Keramik, jedoch nur wenig oder kein Wissen um Produktgestaltung und er besitzt ein völlig anderes Verständnis als der Konstrukteur, der Fachmann für einen bestimmten abgegrenzten technischen Bereich ist und dort nach neuen Gestaltungslösungen sucht.

Wissen in der Produktentwicklung und insbesondere Gestaltungswissen liegt hauptsächlich nur in den Köpfen der Mitarbeiter und zudem nur verteilt vor und ist daher schwer explizit zu erfassen. Ein Teil des Wissens kann überhaupt nicht explizit abgebildet werden.³⁰⁷ Gemäß den Begrifflichkeiten von Abschnitt 2.2.3 kann Wissen als vernetzte Information, Information wiederum als Daten mit Bedeutung verstanden werden. Erst die genaue Kenntnis des Kontexts einer Information erlaubt es, sie vor

³⁰⁷ Vgl. Abschnitt 2.2.4

dem Hintergrund einer Problemstellung zu bewerten und daraus eine Handlung abzuleiten. So gesehen ist die Information zusammen mit ihrem Kontext mit Wissen gleichzusetzen.

In Ontologien können ebendiese Netzstrukturen aus Daten, Bedeutung und Kontextinformation abgebildet werden. In einer Ontologie ist es prinzipiell möglich, das geforderte gemeinsame Verständnis explizit festzuhalten. Daher scheinen Ontologien geeignet, um verteiltes interdisziplinäres Wissen in der Produktentwicklung explizit abzubilden. Weiterhin können Ontologien durch formale Ontologiebeschreibungssprachen für Computer lesbar gemacht werden. Damit kann ein in einer Ontologie definiertes gemeinsames Verständnis mit einer Datenbank verknüpft werden und erlaubt so den Wissensaustausch zwischen Mensch und Maschine. Durch ein derartiges System scheint es denkbar, die Vorteile des Wissensaustausches in der direkten Kommunikation zwischen Personen, mit denen des rechnergestützten Wissensaustauschs vereinen zu können.

Für die Bereitstellung von keramikspezifischem Gestaltungswissen über ein ontologisch explizit formuliertes gemeinsames Verständnis in einem Datenbanksystem soll im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein geeigneter Ontologieentwicklungsprozess definiert werden, was tiefgehendes Grundlagenwissen zu Ontologien und zu ontologiebasierten Softwaresystemen erfordert. Existierende Ontologieentwicklungsansätze im Bereich der Produktentwicklung bestehen meist aus allgemeinen und wenig konkreten Handlungsvorschlägen in Form sequentieller Entwicklungsschritte. Dies wird den Anforderungen an eine in der Produktentwicklung angesiedelte Ontologieentwicklung nur unzureichend gerecht und verfehlt das Ziel, komplexes interdisziplinäres Gestaltungswissen abzubilden, das verteilt und teilweise implizit vorliegt. Bisherige Ontologieentwicklungsprojekte im Bereich der Produktentwicklung werden fast ausschließlich zur Abbildung von mentalen Modellen verwendet, ohne den zweiten Schritt der Implementierung in einer Datenbank zur Wissensbereitstellung zu machen. Darüber hinaus vermisst man konkrete Handlungsempfehlungen, die gerade für potentielle Ontologieentwickler mit geringer Vorkenntnis im Bereich Informatik erforderlich scheinen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Definition und die Umsetzung eines Ansatzes zur Entwicklung einer Ontologie, die ein gemeinsames Verständnis zu interdisziplinärem, verteiltem und teilweise implizitem Gestaltungswissen in der Produktentwicklung abbildet und die dieses Wissen über ein Softwaresystem bereitstellt.

Der Ansatz zur Ontologieentwicklung muss darüber hinaus

- einen vollständigen Ansatz zur Ontologieentwicklung von der ersten Spezifikation bis zum Abschluss der Implementierung darstellen,

- auf dem Stand der Forschung zu Ontologien und Ontologieentwicklungsansätzen aufbauen,
- konkrete Handlungsanweisung, -vorschläge und -empfehlungen für jeden Aspekt der Ontologieentwicklung enthalten, um insbesondere auch Ontologieentwickler mit geringer Vorkenntnis im Bereich Informatik zu unterstützen,
- dem aktuellen Stand der Produktentwicklungsprozessforschung gerecht werden und adaptiv an unterschiedlich Randbedingungen angepasst werden können,
- die Besonderheiten von Gestaltungswissen in der Produktentwicklung berücksichtigen, das nämlich interdisziplinär, verteilt und teilweise implizit vorliegt,
- die Anwendung existierender formaler Ontologiesprachen und Softwareprogramme adressieren,
- nur einen statischen Wissenstand bereitstellen, ohne die Dynamik zu berücksichtigen, die sich stetig wandelndem Wissen in der Produktentwicklung zugrunde liegt.

In der vorliegenden Arbeit wurde dieser Ansatz für die Entwicklung einer Ontologie für den Sonderforschungsbereich 483 umgesetzt, mit dem Ziel der Bereitstellung des keramikspezifischen Gestaltungswissens aus dem Sonderforschungsbereich in einem Keramik-Konstruktionsinformationssystem. Dieses soll Konstrukteuren ohne besonderes keramikspezifisches Vorwissen ermöglichen, Ingenieurkeramik als Konstruktionswerkstoff einzusetzen.

Auf Basis dieser Anwendung des Ansatzes sollen folgende Fragestellungen vor dem Hintergrund der beschriebenen Zielsetzung beantwortet werden:

- Welche Besonderheiten sind bei der Ontologieentwicklung zur Abbildung eines gemeinsamen Verständnisses zu interdisziplinärem Gestaltungswissen zu beachten?
- Inwieweit kann Gestaltungswissen in Form eines gemeinsamen Verständnisses in einer formalen Ontologien abgebildet werden?
- Inwieweit kann ein derartiges, in einer formalen Ontologie abgebildetes, gemeinsames Verständnis für die Bereitstellung von Gestaltungswissen genutzt werden?

Die Beantwortung dieser Fragestellungen erfolgt im Rahmen einer abschließenden Zusammenfassung und Bewertung des gemachten Ansatzes und darüber hinaus der Potentiale von Ontologien zur rechnerbasierten Wissensbereitstellung in der Produktentwicklung.

4 Ansatz zur Ontologieentwicklung

Im folgenden Abschnitt wird der Ansatz zur Ontologieentwicklung für die Bereitstellung von interdisziplinärem Produktentwicklungswissen vorgestellt.

Der Ansatz adressiert eine aus dem Bereich der Ingenieurkeramiken motivierte in Kapitel 2.1.3 ausführlich beschriebene Problemstellung. Zielsetzung dieses Ansatzes ist das in einem interdisziplinären (Forschungs-)Projekt erarbeitete Wissen zu erfassen, ein geteiltes Verständnismodell daraus abzuleiten und in einer Ontologie abzubilden. Diese Ontologie wird in ein Informationssystem implementiert, welches das Produktentwicklungswissen in Form problemrelevanter Information für die späteren Nutzer bereitstellt. Dabei werden die besonderen, durch die Eigenschaften von Produktentwicklungswissen³⁰⁸ bedingten Gegebenheiten und Randbedingungen sowie die Kriterien für Ontologien nach Gruber aus Kapitel 2.4. berücksichtigt.

Der Stand der Forschung im Bereich der Ontologieentwicklung zeigt, dass sich der grundlegende Ablauf der existierenden Ansätze ähnelt. Verschiedene jüngere Ansätze zur Ontologieentwicklung im Bereich der Produktentwicklung bauen auf einem Querschnitt des Standes der Technik auf und zeigen daher ein großes Maß an Überdeckung. Nur wenige davon zielen auf die Wissensbereitstellung zur Unterstützung interdisziplinärer Produktentwicklungsprozesse ab. Insbesondere tun dies die beiden Ansätze nach Apke/Dietmann und Welp et al.³⁰⁹. Sie entwickeln dazu Vorgehensweisen, die sehr ähnlich sind. Die Randbedingungen und Anwendungen weichen jedoch von denen dieser Arbeit ab. Diese Ansätze können daher nur als Ausgangspunkt für den hier vorgestellten Ansatz dienen, der den Gegebenheiten von Wissen und der Unterstützung von Wissensaustausch in der Produktentwicklung vor dem Hintergrund des Sonderforschungsbereiches 483 gerecht werden soll und deshalb besonderen Umständen und Randbedingungen Rechnung zu tragen hat:

- Die zu entwickelnde Ontologie soll die Bereitstellung interdisziplinären Wissens unterstützen. Das Wissen, welches ontologiebasiert bereitgestellt werden soll, liegt zum Teil nicht in expliziter Form vor und ist auf mehrere Personen verteilt. Diese Personen sind jeweils Wissensträger/Spezialisten verschiedener Domänen mit verschiedenen Forschungshintergründen, -aufgaben und -erfahrungen. Ihr Wissen basiert daher jeweils auf unterschiedlichen und oftmals disziplinspezi-

³⁰⁸ Vgl. Kapitel 2.2.

³⁰⁹ Siehe Abschnitt 2.4.

fischen Denkmustern.³¹⁰ Diese Aspekte müssen insbesondere in der Wissensakquise und Konzeptualisierung berücksichtigt werden.

- Spätere Nutzer des ontologiebasierten Informationssystems sind bezüglich der in der Ontologie abgebildeten Wissensdomänen keine Experten. In der Ontologieentwicklung muss daher auf die Identifikation und Integration entsprechender Anknüpfungspunkte eingegangen werden.
- Der Ansatz soll konkrete Hinweise geben, wie im Ingenieurbereich weitverbreitete Verständnismodellelemente in einer Ontologie im Hinblick auf die spätere Repräsentation und Bereitstellung von Wissen abbildbar sind.
- Der Ansatz soll auf dem existierenden Stand der Technik im Bereich der Ontologiesprachen und deren Implementierungsmöglichkeiten aufbauen. Er adressiert daher ausschließlich die Anwendung existierender Ontologiebeschreibungssprachen und verfügbarer Softwaresysteme und hat nicht den Anspruch, diese durch Programmierarbeiten um grundlegende Funktionalitäten zu erweitern.

Ebenso sollen aktuelle Erkenntnisse aus der Entwicklungsprozessforschung in den Ansatz einfließen, nämlich:

- Ein Ontologieentwicklungsprozess wird von einer Vielzahl von Faktoren in der Ausgangssituation, der Zielsetzung und des Entwicklungsteams beeinflusst, die darüber hinaus von Projekt zu Projekt variieren. Wie jeder Produktentwicklungsprozess ist daher auch jeder Ontologieentwicklungsprozess einzigartig und individuell. Ein solcher Prozess kann nicht in streng abgegrenzte sequentielle Schritte gegliedert, sondern nur in einem flexiblen Rahmenwerk abgebildet werden, welches ein problemorientiertes Vorgehen erlaubt.³¹¹
- Für einen erfolgreichen Entwicklungsprozess ist eine abschließende Evaluation nicht ausreichend. Die Ziele eines Entwicklungsprojektes sind nicht statisch, sondern werden im Rahmen des Entwicklungsprozesses stetig konkretisiert und angepasst. In einem Entwicklungsprozess ist es unabdingbar, *„die Ergebnisse und den Prozessverlauf kontinuierlich an den Zielvorgaben zu messen und im Sinne eines Controllings rechtzeitig Maßnahmen zu definieren, um den Produktentstehungsprozess erfolgreich auszuführen.“*³¹² Daher ist ein kontinuierlicher Abgleich zwischen den im Zielsystem beschriebenen Entwicklungszielen und dem erreichten Ist-Zustand des Projektes in Form einer kontinuierlichen Validie-

³¹⁰ Vgl. Albers et al. 2010c.

³¹¹ Vgl. Albers/Braun 2011b.

³¹² Albers/Braun 2011a.

ung erforderlich. Für einen erfolgreichen Entwicklungsprozess ist eine Evaluation nur zu dessen Abschluss nicht ausreichend.

Der hier vorgestellte Ansatz besteht so aus mehreren aufeinander aufbauenden Aktivitäten, welche nicht streng konsekutiv durchlaufen werden müssen, sondern einen Ablauf entsprechend der Bedürfnisse des Anwenders und der Besonderheiten des Ontologieentwicklungsprozesses erlauben. Wie in Abbildung 28 dargestellt, sind diese Aktivitäten inhaltlich entsprechend dem Stand der Forschung in „Spezifikation“, „Wissensakquise“, „Konzeptualisierung“, „Formalisierung“ und „Integration“ aufgeteilt.

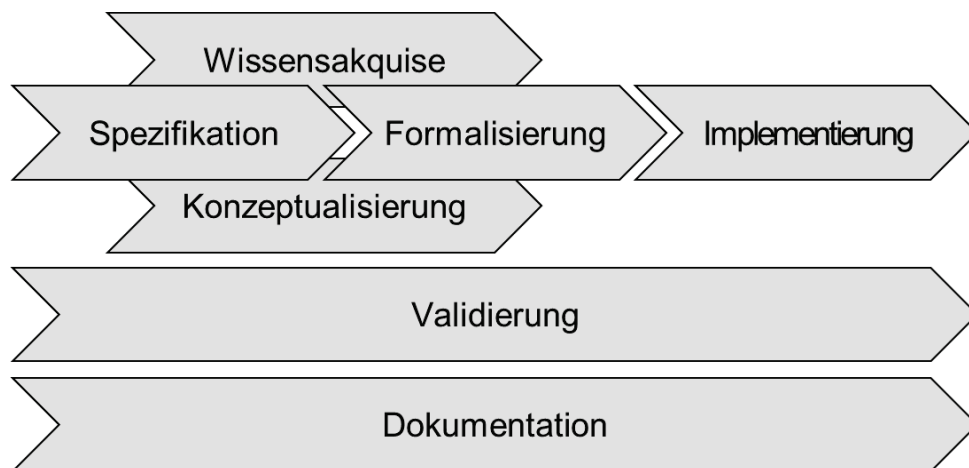


Abbildung 28 Aktivitäten des Ontologieentwicklungsprozesses³¹³

Trotz der prinzipiell beliebigen Abfolge der Ontologieentwicklungsaktivitäten liegt diesen dennoch eine grundlegende logische Reihenfolge zugrunde. Die Aktivitäten Wissensakquise und Konzeptualisierung sind eng verknüpft und werden erfahrungsgemäß begleitend zur Spezifikation und auch zur Formalisierung immer wieder iterativ durchlaufen.

Alle Ontologieentwicklungsaktivitäten werden von Dokumentations- und ebenso von Validierungsaktivitäten begleitet, um eine kontinuierliche Validierung der Ergebnisse der einzelnen Aktivitäten sicherzustellen. Darin ist auch die abschließende Validierung der Aktivität „Integration“ enthalten, welche einer Evaluation des ontologiebasierten Informationssystems im Hinblick auf die Zielsetzung beinhaltet. Daher ist eine gesonderte abschließende Aktivität „Evaluation“, wie sie typischerweise in den Ontologieentwicklungsprozessen des Stands der Technik enthalten ist, nicht gesondert aufgeführt. Eine kontinuierliche Pflege des Systems, wie in einigen bestehenden Ansätzen erörtert, ist nicht Teil des hier vorgestellten Ansatzes.

³¹³ Vgl. Albers et al. 2011a.

In den folgenden Teilabschnitten werden die Aktivitäten erläutert und konkrete Handlungsanweisungen gegeben, wie die Teilergebnisse der Aktivitäten erreicht werden und wie (inwieweit) die Ergebnisse validiert werden können.

4.1 Spezifikation

Ein Ontologieentwicklungsprozess beginnt mit der Aktivität „Spezifikation“ Die Spezifikation dient zunächst der expliziten Definition eines initialen Zielsystems³¹⁴ für die Ontologieentwicklung. Dabei ist zu beachten, dass zu Beginn einige der Ziele lediglich indirekt in Form einer gewünschten Funktionalität des ontologiebasierten Informationssystems vorliegen, ohne dass diese zu diesem Zeitpunkt direkt auf Anforderungen und Eigenschaften der zu entwickelnden Ontologie bezogen werden kann. Die in der anfänglichen Ontologiespezifikation festgelegten Ziele sollen aber nicht nur direkt die Ontologie selbst, sondern auch das spätere ontologiebasierte Informationssystem beschreiben. Kernaspekte sind das Abgrenzen und Festlegen der abzubildenden Wissensdomäne³¹⁵ und des Anwendungsgebietes der Ontologie sowie den damit verbundenen Anforderungen³¹⁶.

Bedingt durch die Zielsetzung, interdisziplinäres Wissen abzubilden, sind alle beteiligten Domänen festzuhalten sowie deren Anknüpfungspunkte und Überschneidungsbereiche zu identifizieren. Dabei werden nicht nur die Inhalte der Wissensdomänen berücksichtigt, deren spezielles und tiefergehendes Wissen durch die Ontologie bereitgestellt werden soll, sondern es muss ebenso der Wissensstand derjenigen Personengruppen umrissen werden, welche mit der Ontologie interagieren, insbesondere der späteren Benutzer des ontologiebasierten Informationssystems. Die dazu erforderlichen Anknüpfungspunkte müssen definiert werden.

Für die Eingrenzung des Anwendungsgebietes der Ontologie bietet sich die Einteilung nach Kitamura (vgl. Kap.2.3.4) an. Eine eindeutige Zuordnung zu einem bestimmten Anwendungsgebiet erweist sich erfahrungsgemäß als schwierig. Die Identifikation mehrerer Anwendungsgebiete weist auf unterschiedliche Anwendungsszenarien mit gegebenenfalls unterschiedlichen Anforderungen hin, welche im weiteren Entwicklungsprozess beachtet werden müssen.

Grundsätzlich können entsprechend der Interaktionsmöglichkeiten mit dem System drei Anwendungsszenarien unterschieden werden, in denen die interagierende Person jeweils eine andere Rolle erfüllt:

³¹⁴ Vgl. Oerding 2009 S. 21.

³¹⁵ Vgl. Welp et al. 2007.

³¹⁶ Vgl. Stollberg 2002 S. 26.

- „Ontologie- und Informationssystem erstellen und modifizieren“ durch einen Gestalter,
- „Wissen einpflegen“ durch einen Wissensträger und
- „Wissen abrufen“ durch den Systemnutzer.

Sofern es sich nicht um eine Ontologieentwicklung für ein spezialisiertes Expertensystem, also für den Wissensaustausch zwischen Wissensträgern innerhalb einer Wissensdomäne handelt, ist davon auszugehen, dass die unterschiedlichen Interaktionsrollen unterschiedlichen Personengruppen mit unterschiedlichem Wissen zuzuordnen sind. Insbesondere bei Ontologien zur Unterstützung des Wissensaustauschs in der Produktentwicklung sind Ontologiegestalter, Wissensträger und Ontologienutzer nicht dieselben Personen und haben unterschiedliches Hintergrundwissen. Dieser Umstand muss im Verlauf der Ontologieentwicklung berücksichtigt werden, und der Aufbau und Umfang der Ontologie muss allen beteiligten Personengruppen gerecht werden.

Eine bewährte Methode zur Unterstützung der Ontologiespezifikation ist die Formulierung von Kompetenzfragen.³¹⁷ Diese stellen eine Sammlung von Fragestellungen aus den Sichten der adressierten Personengruppen dar, deren Antwort durch das zu entwickelnde ontologiebasierte System bereitgestellt werden soll. Auf diese Weise lässt sich die gewünschte Funktionalität der Ontologie beschreiben. Die Kompetenzfragen können dann zum einen genutzt werden, um zu Beginn der Ontologieentwicklung die Wissensdomäne der Ontologie abzugrenzen und diese auf die Ontologieanwendung zu beziehen. Im weiteren Verlauf können die Kompetenzfragen zum anderen immer wieder genutzt werden, um den Stand der Ontologieentwicklung mit der gewünschten Funktionalität abzugleichen.

Ebenfalls Teil der Spezifikation ist die Festlegung der verwendeten Ontologiesprache und des Softwaresystems, in das die Ontologie integriert wird. Bedingt durch die unterschiedlichen Eigenschaften und Möglichkeiten der vorhandenen Ontologiesprachen ist es sinnvoll, diese erst im weiteren Verlauf der Ontologieentwicklung festzulegen. Erst nachdem der Inhalt und die grundlegende Struktur der Ontologie weiter konkretisiert sind, kann auf Basis der daraus resultierenden Anforderungen eine geeignete Ontologiesprache ausgewählt werden. Die Wahl des Softwaresystems zur Integration richtet sich dann meist nach den Kompatibilitätsmöglichkeiten der gewählten Ontologiesprache und des Ontologieeditors und der Form, in der die mit der Ontologie verknüpften Informationen bereitgestellt werden sollen. Dazu sollte auch festgelegt werden, inwiefern die Möglichkeit der Modifikation der Ontologie

³¹⁷ Gruninger/Fox 1994.

nach der Implementierung erforderlich ist. Die Möglichkeit dazu ist gegebenenfalls bei der Wahl von Ontologiesprache, -editor und Softwareanwendung sicherzustellen. Müssen die Inhalte des Systems nur in Teilbereichen der Wissensdomäne erweiterbar sein, so ist dies an den entsprechenden Stellen des Ontologieschemas vorzusehen. Der einfachste Fall der Modifikation der Ontologie stellt das Hinzufügen von weiteren Instanzen dar, was in der Regel mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich ist.

Zu Beginn des Ontologieentwicklungsprozesses können die verschiedenen Teilaspekte der Spezifikation nur grob und ansatzweise geklärt werden. Daher wird eine anfänglich definierte erste Spezifikation im Verlauf des Ontologieentwicklungsprozesses auf Basis der Erkenntnisse der weiteren Aktivitäten stetig hinterfragt, erweitert und angepasst. Mit dem Fortschreiten des Prozesses wird zum einen die Richtigkeit und Vollständigkeit der oben genannten Aspekte der Spezifikation stets erneut sichergestellt. Zum anderen wird dann sowohl die Konsistenz der unterschiedlichen Aspekte untereinander, zum Beispiel die Widerspruchsfreiheit der verschiedenen Kompetenzfragen, als auch die Einigkeit aller Beteiligten über die Vollständigkeit und Richtigkeit der identifizierten Wissensinhalte und Anwendungsszenarien stets erneut überprüft werden. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der weiteren Aktivitäten ihrerseits wiederum stetig mit den in der Spezifikation festgelegten Zielen und Randbedingungen abgeglichen. Somit bildet die Spezifikation die Basis für die kontinuierliche Validierung des weiteren Ontologieentwicklungsprozesses.

4.2 Wissensakquise

Die Wissensakquise umfasst sämtliche Aktivitäten, welche das Wissen der in der Spezifikation identifizierten Wissensdomäne für den weiteren Ontologieentwicklungsprozess explizit erfassen und verfügbar machen.

Der Wissensakquise wird in vielen Ontologieentwicklungsansätzen wenig Bedeutung beigemessen. In den meisten Ansätzen ist sie keine eigenständige Aktivität und wird zu Spezifikation oder zur Konzeptualisierung hinzugezählt. Das Wissen wird dabei als schon verfügbar angesehen. Hinweise bezüglich einer methodischen Unterstützung der Wissensakquise sind daher in der Literatur wenig vorhanden. Lediglich Welp stellt fest, dass die Wissensakquise ein wichtiger Aspekt bei der Neuentwicklung von Ontologien im Bereich der Produktentwicklung ist. Er nennt

beispielhaft einige grundlegende Methoden: Text- und Data-Mining, Experteninterviews und die direkte Einbeziehung von Experten.³¹⁸

Die Analyse von Wissen in der Produktentwicklung³¹⁹ hat gezeigt, dass interdisziplinäres Wissen einerseits hochgradig vernetzt und komplex ist, auf der anderen Seite aber verteilt auf verschiedene Wissensträger und nur teilweise explizit vorliegt, meist nur gebunden an verschiedene Personen - die jeweiligen Domänenspezialisten. Insbesondere Metawissen³²⁰ ist selten explizit formuliert und für Neulinge in einer Wissensdomäne oft schwer greifbar. Gerade dieses ist jedoch erforderlich, um Personen dazu zu befähigen, vorhandene Fakten und Informationen zu interpretieren und sich so Wissen anzueignen. Solches Wissen muss jedoch auch in einem System zur Unterstützung des Wissensaustausches erfasst werden und Eingang in die zu entwickelnde Ontologie finden.³²¹

Derartiges Wissen kann nicht einfach in Form einer Dokumentensammlung zusammengetragen werden. Gerade die für die Produktentwicklung so wichtigen Gestaltungshinweise liegen meist nicht in expliziter Form vor, sondern nur in Form ihrer Resultate – in Entwürfen und Prototypen. Der Weg zu den erzielten Resultaten ist nur in den Köpfen der einzelnen Domänenspezialisten vorhanden. Deren Wissen muss erfasst und in den übergeordneten Kontext der Ontologie eingeordnet werden. Im Hinblick auf die Bereitstellung des Wissens in einem Informationssystem sind seine Gültigkeit und seine Übertragbarkeit auf neue Problemstellungen zu eruieren. Das Wissen um die Übertragbarkeit von Gestaltungswissen muss also als zumindest teilweise sozial konstruiert bezeichnet werden.³²² Gerade Gestaltungswissen ist in der Regel das Ergebnis mehrerer Aspekte verschiedener Wissensdomänen, welches vor dem Hintergrund einer spezifischen Aufgabenstellung generiert wurde. Inwieweit dieses Wissen auf weitere Problemstellungen übertragbar ist, ist nicht von vorneherein eindeutig klar, sondern vielmehr erst vor dem Hintergrund der verschiedenen Wissensdomänen festzulegen. Diese Abschätzung der Übertragbarkeit des Wissens kann oft nur durch die Einbeziehung der unterschiedlichen Sichten der Spezialisten aus den beteiligten Wissensdomänen erfolgen.

Bei der Wissensakquise von Produktentwicklungswissen ist daher eine methodische Unterstützung sinnvoll. Bekannte Methoden zur Erfassung von großen Informations-

³¹⁸ Vgl. Welp et al. 2007.

³¹⁹ Siehe Abschnitt 2.2.

³²⁰ Siehe Abschnitt 2.2.9

³²¹ Vgl. Apke/Dittmann 2003b.

³²² Vgl. Geiger 2005.

und Datenmengen, z. B. Data- oder Textmining³²³, können dabei nur soweit unterstützen, wie Wissen explizit in Form von Dokumenten verfügbar ist. Methoden für die Erhebung von nicht explizitem Wissen stammen vorwiegend aus dem Bereich der Kognitionspsychologie und lassen sich in Interviewtechniken, indirekte Techniken und Beobachtungstechniken einteilen.³²⁴ Bei Interviewtechniken wird der Domänenspezialist direkt zu Wissensinhalten befragt. Bei indirekten Techniken werden dagegen neutrale Fragen gestellt, um gezielt unbewusstes und implizites Wissen zu erfassen. Bei Beobachtungstechniken findet keine direkte Interaktion mit dem Experten statt. Vielmehr wird versucht, auf das Wissen eines Experten zu schließen, indem er bei der Wissensanwendung beobachtet wird.

Besonders Interviewtechniken scheinen zur Wissensakquise mit Domänenspezialisten geeignet. Dabei lassen sich je nach Situation verschiedene Interviewtechniken einsetzen.

Das unstrukturierte Interview erlaubt es, einen grundlegenden Überblick über das Wissen eines Experten und die wichtigsten Begriffe der entsprechenden Wissensdomäne zu erhalten. Im Kontext der Ontologieentwicklung können dabei die in der Spezifikation definierten Kompetenzfragen einen Einstieg und einen groben Rahmen darstellen. Ebenso kann die Analyse einer vorhandenen Gestaltungslösung als roter Faden für die Analyse von Gestaltungswissen in einem unstrukturierten Interview dienen.

Das strukturierte Interview ist durch die gezielte Fragestellung des Interviewers gekennzeichnet. Damit können Zusammenhänge erfasst und Problemlösungstechniken analysiert werden. Einen interessanten Ansatz zur Unterstützung strukturierter Interviews stellt die Laddering-Technik dar.³²⁵ Diese stammt ursprünglich aus der Psychologie und wurde im Bereich des Wissensmanagements erfolgreich als Methode der Wissensakquise adaptiert. Sie beinhaltet die gezielte strukturierte Nachfrage bis ins Detail, um Sachverhalte und Zusammenhänge zu durchdringen, die nicht explizit vorliegen. Dabei steigt der Interviewer zusammen mit dem interviewten Experten die sogenannte „Kognitive Leiter“ empor und erarbeitet sich so tiefgehendes und nicht explizit vorhandenes Detailwissen. Eine Vorgehensweise zur Durchführung eines strukturierten Interviews anhand der Laddering-Technik findet sich im Anhang.³²⁶

³²³ Vgl. Weiss 2005, Heyer et al. 2006.

³²⁴ Vgl. Karbach/Linster 1990.

³²⁵ Rugg/McGeorge 1995.

³²⁶ Siehe Anhang 9.1, S. 172. Zusammenfassung nach Rugg/McGeorge 1995.

In einem fokussierten Interview werden einzelne Begriffe und Zusammenhänge eindeutig definiert und abgegrenzt. Bei der Akquise von interdisziplinärem und verteiltem Wissen ist dabei die Befragung von mehreren Experten verschiedener Disziplinen sinnvoll, um die verschiedenen Sichten auf Begriffe und Zusammenhänge zu erfassen. Die gezielte Analyse eines Prototypen oder Entwurfes, der Ursachen der finalen Gestalt bis hin zu den Anwendungsrandbedingungen, den Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe und deren Herstellprozessen zusammen mit Domänenspezialisten verschiedener Bereiche ist eine wertvolle Quelle für Gestaltungswissen. In Interviews mit den Experten kann ebenso die Übertragbarkeit der angewandten Lösungswege diskutiert und das Gestaltungswissen so generalisiert werden. Dazu ist nicht nur die Betrachtung erfolgreicher Lösungswege interessant, sondern ebenso die Ursachen und Zusammenhänge für gescheiterte Lösungsvorschläge.

Neben diesen grundlegenden Techniken der Wissensakquise gibt es auch spezialisierte Methoden, wie z. B. die „Expert knowledge elicitation method“. Diese beschreibt ausführlich ein Vorgehen zum Erfassen von verteiltem und nicht expliziertem Wissen in formalen Modellen. Die Methode kann verwendet werden, um sowohl qualitativ als auch quantitativ die wechselseitigen Beziehungen von Aktivitäten in Produktentwicklungsprojekten abzubilden. Zielsetzung ist dabei, einen eng eingegrenzten Wissensbereich tiefgehend und eindeutig zu beschreiben. In einer beispielhaften Anwendung wird sie genutzt, um ein Wissensmodell zu erstellen, das sehr detailliert die sieben wechselseitigen Beziehungen zwischen vier Phasen eines Produktentwicklungsprozesses abbildet. Die Methodeninhalte gehen dabei über die reine Wissensakquise hinaus.³²⁷ Die „Expert knowledge elicitation method“ scheint daher besonders geeignet, tiefgehendes Expertenwissen für Experten zu erfassen, aber weniger brauchbar, um interdisziplinäres Wissen allgemein anwendbar abzubilden.

Die Ergebnisse der Wissensakquise bilden den Ausgangspunkt für die Konzeptualisierung. Sie können in unterschiedlicher Form vorliegen, in Form relevanter Daten und Texte oder in Form von Interview-Transskripten, welche dann genutzt werden können, um mit Methoden der Datenaufbereitung (z. B. Textmining) weiter kondensiert zu werden. Es können auch schon während der Wissensakquise Strukturen wie Begriffshierarchien oder Abhängigkeitsgraphen generiert werden, um die Inhalte einzuordnen. Ebenso ist es erforderlich, dass die Wissensakquise in mehreren konsekutiven Schritten erfolgt. Erste Teilergebnisse werden zunächst

³²⁷ Ford/Sterman 1998.

analysiert und strukturiert und dienen dann als Ausgangspunkt für weitere Wissensakquiseaktivitäten. An dieser Stelle lassen sich die Aktivitäten „Wissensakquise“ und „Konzeptualisierung“ nicht eindeutig trennen, sondern gehen vielmehr fließend ineinander über und sind von intensiver wechselseitiger Iteration geprägt.

Aufgrund der vielen Aspekte des Wissensbegriffes und seiner unscharfen Abgrenzung muss festgestellt werden, dass bei der Wissensakquise nicht alle Arten von Wissen gleichermaßen in einem ontologiebasierten System erfasst und bereitgestellt werden können. Insbesondere *tazites Wissen*³²⁸ kann nicht explizit ausgedrückt werden und ist damit nicht über ein rechnerbasiertes System bereitstellbar. So sind zum Beispiel natürliche Begabungen und bis zu einem gewissen Grad auch persönliche Erfahrungen eines Domänenspezialisten zwar im Rahmen der Wissensakquiseaktivitäten feststellbar, aber sie können nicht oder nur eingeschränkt Eingang in die Ontologie finden und ausgetauscht werden. Darüber hinaus erweisen sich Domänenspezialisten als nahezu unerschöpfliche Quellen für umfassendes und profundes Spezialwissen in ihrer Disziplin. Aber all dieses Wissen möglichst zu erfassen, ist als Zielsetzung weder für eine effiziente Wissensakquise noch für eine effektive spätere Wissensbereitstellung sinnvoll. Vielmehr muss schon während der Wissensakquise stets zwischen bewahrungswürdigen und nicht bewahrungswürdigen Wissensbestandteilen selektiert werden. Dabei gilt die Leitregel, dass *„nur was in der Zukunft für Dritte nutzbar sein könnte, es auch verdient, bewahrt zu werden. Alles andere raubt dem zukünftigen Nachfrager nur Zeit und Vertrauen in die Qualität des Dokumentationssystems.“*³²⁹

Daher muss im Sinne der kontinuierlichen Validierung neben ihrer Richtigkeit nicht die Vollständigkeit der Wissensbasis, sondern vielmehr ihr adäquater Umfang überprüft werden. Dazu können auch die in der Spezifikation definierten Kompetenzfragen genutzt werden, um sicherzustellen, dass alle grundlegenden Wissensbereiche in der Wissensakquise behandelt wurden. Gerade das Vorhandensein der erforderlichen Anknüpfungspunkte für den späteren Wissensempfänger an seine Wissensbasis darf beim Erfassen des hochspezialisierten domänenspezifischen Wissens der Domänenspezialisten nicht vernachlässigt werden.

Um aber die Konsistenz und die Lückenlosigkeit der Ergebnisse der Wissensakquise sicherzustellen, kann nur auf die einverständliche Meinung der beteiligten Domänenspezialisten zurückgegriffen werden. Dazu müssen die Eingaben der

³²⁸ Vgl. Abschnitt 2.2.4.

³²⁹ Vgl. Probst/Romhardt 1997, S. 17f.

verschiedenen Domänenspezialisten zu denselben Sachverhalten abgeglichen werden. Hier können Diskussionen mit aktiver Teilnahme der Domänenspezialisten die Eindeutigkeit und Klarheit von relevanten Begriffen und Zusammenhängen entscheidend verbessern.

4.3 Konzeptualisierung

In der Konzeptualisierung werden die Ergebnisse der Wissensakquise aufbereitet und strukturiert. Das Ziel der Konzeptualisierung ist, die Definition aller relevanten Begriffe der in der Ontologie abgebildeten Wissensdomänen und deren Beziehungen zueinander eindeutig abzubilden. Das Ergebnis ist eine Netzstruktur der relevanten Begriffe der Wissensdomäne, verknüpft über deren Beziehungen untereinander.

Zu Beginn der Konzeptualisierung ist es sinnvoll, zuerst solche Begriffe zu identifizieren, die für die Wissensdomänen die größte Relevanz besitzen, und von diesen ausgehend dann die Netzstruktur weiter aufzubauen. Diese Herangehensweise wird in den meisten Ontologieentwicklungsmethoden empfohlen.³³⁰ Da sie nicht nach Top-Down-Prinzip auf höchster Abstraktionsebene ansetzt, wird sie mitunter auch als „Middle-out“-Ansatz bezeichnet. Dazu werden zunächst die wesentlichen Elemente der Ergebnisse der Wissensakquise mit den verschiedenen Wissensträgern identifiziert und in einer einheitlichen Darstellung abgebildet. Das Ergebnis eines jeden Interviews wird auf für die Ontologieentwicklung relevante Aussagen und Inhalte reduziert und deren Beziehungen zueinander werden in graphischer Form festgehalten. Danach werden die Ergebnisse der verschiedenen Wissensquellen verglichen und aufeinander abgestimmt, um sie schließlich zu verknüpfen und so eine einheitliche strukturierte Wissensbasis in explizierter Form zu erhalten. Dabei werden auch systematisch fehlende und unklare Anknüpfungspunkte verschiedener Inhalte erkannt und damit als weitere erforderliche Wissensakquiseaktivitäten identifiziert. Ein effizientes Vorgehen in der Ontologieentwicklung erfordert aus diesem Grund einen stetigen iterativen Wechsel zwischen Wissensakquise und Konzeptualisierung. Beide müssen immer parallel zueinander durchgeführt werden. Die Konzeptualisierung sollte dagegen immer bewusst getrennt von der Formalisierung durchgeführt werden, um dem Ontologiekriterium „minimaler Implementierungseinfluss“ gerecht zu werden.³³¹ Die Strukturierung der Wissensinhalte sollte zuerst noch unabhängig von der Ontologiebeschreibungssprache und den eventuellen Einschränkungen der späteren Datenbankimplementierung erfolgen.

³³⁰ Vgl. Uschold/King 1995; Gruninger/Fox 1995; Fernandez et al. 1997; Sure/Studer 2002; Apke/Dittmann 2003b.

³³¹ Siehe Ontologiekriterium Nr.4 nach Gruber, Abschnitt 2.4.

Beim Konzeptualisieren ist eine Wissensbasis in wenige ähnliche Elemente zu unterteilen und nicht in eine große Menge unterschiedlicher Elemente. Dies stellt im Allgemeinen eine große Herausforderung dar.³³² Übertragen auf die Konzeptualisierung der Wissensbasis in der Ontologieentwicklung für die Bereitstellung von Gestaltungswissen bedeutet das, dass die Vielzahl an verschiedenen relevanten Elementen wie technische Systeme, Prozesse, Methoden oder Werkstoffen sowie deren Beziehungen und Eigenschaften in möglichst wenigen Konzepten, Relationen und Attributen abzubilden sind. Dem gegenüber steht die Zielsetzung, die Komplexität und die mehrdimensionalen Beziehungen, die für Wissen in der Produktentwicklung charakteristisch sind, adäquat abzubilden, um die Wissensbereitstellung für Dritte richtig und vollständig zu gewährleisten. Die Erfahrungen aus dem hier vorgestellten Ontologieentwicklungsprojekt zeigen jedoch, dass die maximale Anzahl an Konzepten für ein Projekt von vergleichbarem Umfang unter allen Umständen zu begrenzen ist, damit eine spätere Implementierung in ein auf dem aktuellen Stand der Technik basierendes Softwaresystem überhaupt beherrschbar ist.³³³

Vorbereitend für die Aufbereitung der Wissensakquiseergebnisse können die „Begriffs-Sortier-Technik“³³⁴ oder wiederum die „Laddering-Technik“³³⁵ zur direkten Identifikation von Begriffshierarchien schon in den Interviews mit den Experten angewendet werden, wie es in der CommonKADS-Methode vorgeschlagen wird.³³⁶ Für die nachträgliche Aufbereitung kann darüber hinaus Textmining bei der Analyse transkribierter Interviews genutzt werden, um relevante Begriffe automatisiert zu identifizieren.³³⁷

Für die Dokumentation der Konzeptualisierung sind einfache semantische Modelle, wie zum Beispiel Taxonomien und Thesauri grundlegend geeignet. Diese sind zwar von geringerer Ausdrucksmächtigkeit, aber in der Regel einfacher zu erstellen und zu modifizieren als Ontologien, was für die iterative Arbeitsweise in der Konzeptualisierung vorteilhaft ist. Da Ontologien die Fähigkeiten dieser Modelle abdecken³³⁸, lassen sie sich in der späteren Formalisierung leicht in die Ontologie integrieren. Eine klassische Vorgehensweise zur Dokumentation der Konzeptualisierung ist die

³³² Vgl. Schreiber et al. 2000, S. 86.

³³³ Siehe Abschnitt 5.6.

³³⁴ Vgl. Schreiber et al. 2000, S.187ff.

³³⁵ vgl. Abschnitt 4.2.

³³⁶ Die CommonKADS-Methode stellt eine spezialisierte und umfassende UML-basierte Methode für Wissensmodellierung im Software-Engineering dar.

³³⁷ Vgl. Weiss 2005/ Heyer et al. 2006.

³³⁸ Vgl. Ullrich et al. 2003.

Sammlung aller Konzepte, Instanzen und Eigenschaften in getrennten tabellenförmigen Glossaren zusammen mit der bildlichen Darstellung von Konzepthierarchien.³³⁹ Eine Strukturierung der relevanten Elemente der Ontologie in derartigen verteilten Darstellungen erschwert aber sowohl die Diskussion der Teilergebnisse während der Konzeptualisierung und den damit verbundenen iterativen Wissensakquiseaktivitäten als auch deren Weiterverwendung in der Ontologieformalisierung.

Concept Mapping ist eine alternative Methode, um Wissen und Verständnis in der Konzeptualisierung explizit und strukturiert darzustellen. Diese Methode wurde ursprünglich in den 70ern entwickelt³⁴⁰ und dank vielfachen, erfolgreichen Einsatzes seitdem ständig erweitert und verbessert. Die Basiseinheiten einer Conceptmap sind Sinneinheiten, die sogenannten Propositionen. Diese bestehen aus zwei Begriffen als Knoten und deren semantische Beziehung als Kanten. Die Propositionen sind ihrerseits wieder durch semantische Beziehungen verbunden und bilden so ein Netzwerk (siehe Abbildung 29).

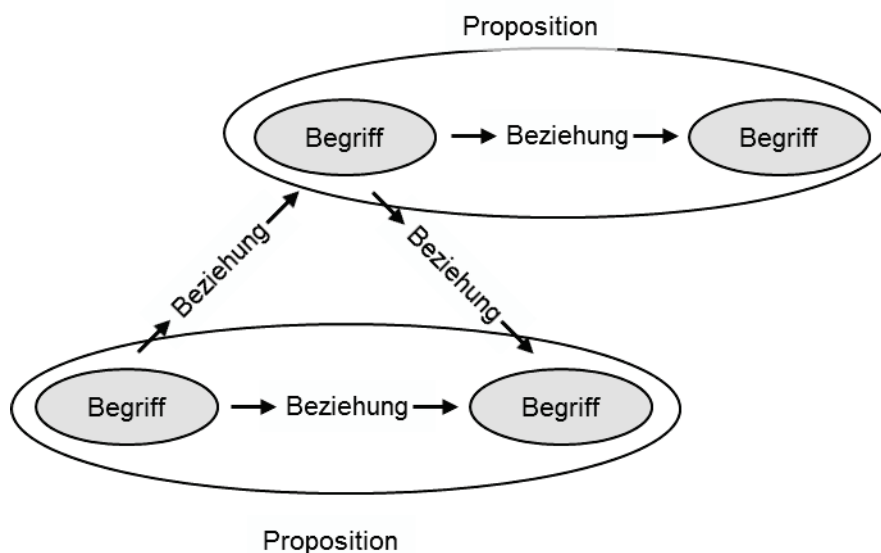


Abbildung 29 Elemente einer Conceptmap³⁴¹

Die Erstellung und der Umgang mit Conceptmaps erfolgt weitgehend intuitiv. Sie sind geeignet, beliebige Wissensstrukturen umfassend und einheitlich abzubilden und kontinuierlich weiterzuentwickeln.³⁴² Mittlerweile gibt es eine Vielfalt an Mapping-Techniken, die die Veranschaulichung komplexer Sachverhalte und Strategien

³³⁹ Vgl. Gómez-Pérez et al. 1996.

³⁴⁰ Vgl. Novak/Musonda 1991.

³⁴¹ Eigene Darstellung nach Novak/Musonda 1991.

³⁴² Sims-Knight et al. 2004.

unterstützen. Concept Mapping steht heute als Gattungsbezeichnung für graphische Techniken zur Darstellung von Wissensstrukturen.³⁴³

Conceptmaps bieten den Vorteil, dass die Zusammenhänge zwischen Inhalten einfach visualisiert und somit leicht nachvollziehbar gemacht werden können. So können auch die Ergebnisse der Wissensakquise mit verschiedenen Wissensträgern zusammengeführt werden. Die Inhalte verschiedener Wissensträger werden zunächst einzeln in einer Conceptmap abgebildet und strukturiert. Die so erstellten Conceptmaps können dann dadurch zueinander in Beziehung gesetzt werden, dass Begriffe identifiziert werden, welche gleichermaßen in mehreren Conceptmaps vorkommen. Die Relationen dieser Begriffe stellen Verbindungen zwischen den Inhalten der verschiedenen Conceptmaps dar und verknüpfen diese untereinander (siehe Abbildung 30). Neben gleichartigen Begriffen lassen sich ebenso gezielt Synonyme und Antonyme sowie Hyperonyme und Hyponyme über verschiedene Conceptmaps hinweg identifizieren.

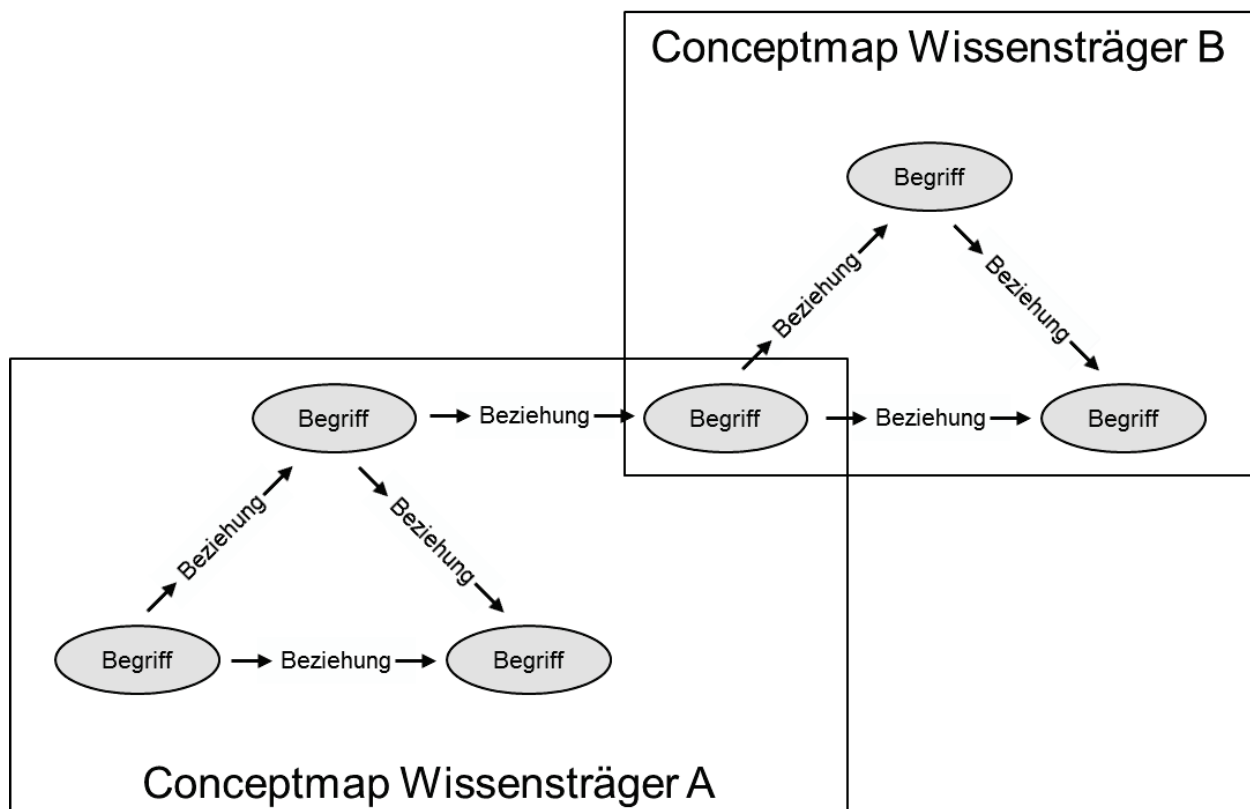


Abbildung 30 Verknüpfung von Conceptmaps unterschiedlicher Wissensträger

Auf diese Art und Weise lassen sich auch solche Inhalte identifizieren, welche die Schnittstellen zwischen den beteiligten Teildomänen darstellen und von zentraler

³⁴³ Vgl. Mandl/Frank 2000, S. 6ff.

Bedeutung für eine Ontologieentwicklung zur Abbildung von interdisziplinärem Wissen sind.

Für die Konzeptualisierung von Gestaltungswissen ist es sinnvoll, auf in den Ingenieurwissenschaften gängige Verständnismodelle zurückzugreifen. In der Produktentwicklung sind gemeinsame mentale Modelle die essentielle Voraussetzung für Anwendung und Austausch von Wissen.³⁴⁴ Um diese mentalen Modelle zu kommunizieren, werden sie in formalisierten Verständnismodellen explizit ausgedrückt. Dazu gehören zum einen einfache hierarchische Strukturen für die Beschreibung unterschiedlicher Zusammenhänge wie zum Beispiel Produktstrukturen oder Werkstoffklassierungen, zum anderen aber auch umfangreiche Modelle zum Abbilden komplexer Verständniszusammenhänge wie zum Beispiel Entwicklungsprozessmodelle. Derartige Modelle bilden ein bestehendes gemeinsames Verständnis ab und sollten daher in der Konzeptualisierung nach Möglichkeit genutzt werden. Anhand solcher Verständnismodelle können verschiedenste Inhalte einheitlich und für beliebige Nutzer leicht verständlich abgebildet werden. So können beispielsweise beliebige Zusammenhänge zwischen Funktion und Gestalt eines technischen Systems in einer Conceptmap und in der späteren Ontologie einheitlich durch den Contact&Channel-Ansatzes (C&C²-A)³⁴⁵ eindeutig beschrieben werden, und zwar unabhängig von der originären Wissensdomäne. Die Verwendung existierender Verständnismodelle erleichtert sowohl die Konzeptualisierung als auch den späteren Zugang zu dem ontologiebasierten Wissenssystem und ist daher immer anzustreben.

Bei der Validierung der Konzeptualisierungsaktivität wird das vollständige und korrekte Erfassen aller relevanten Begriffe der Ontologie, ihrer Bedeutung und ihrer Zusammenhänge untereinander sichergestellt. Es gilt, die Inkonsistenzen der Inhalte sowie unklare und unvollständige Bedeutungen und Beziehungen zu identifizieren. Dazu ist ein kontinuierlicher Abgleich mit den Ergebnissen der Wissensakquise erforderlich. Sollten Defizite auf Basis der bisherigen Ergebnisse der Wissensakquise nicht zu vervollständigen sein, stellt dies Ansatzpunkte für weitere Wissensakquiseaktivitäten dar. Die Validierung der Konzeptualisierung ist daher Auslöser für erneute Wissensakquiseaktivitäten. Ebenso erleichtert die explizite und strukturierte Dokumentation der Konzeptualisierung die eindeutige Bestimmung weiterer Wissensbedarfe und deren Kommunikation an die Wissensträger. So kann danach weiteres Wissen einfacher und zielgerichteter akquiriert werden.

³⁴⁴ Vgl. Meboldt 2008 ,S. 203.

³⁴⁵ Vgl. Albers/Matthiesen 2002, Matthiesen 2002, Matthiesen/Ruckpaul 2012; Albers/Sadowski 2013.

Die Konsistenz der Inhalte der verschiedenen Wissensquellen wird durch den Abgleich und das Verknüpfen der Konzeptualisierungen der einzelnen Inhalte erreicht. Insbesondere die korrekte Konzeptualisierung von Begriffen und Beziehungen, welche auf Basis mehrerer Wissensquellen erzeugt wurden und daher die Inhalte der verschiedenen Quellen verknüpfen, ist durch die Validierung sicherzustellen. Hier bieten sich Expertenworkshops an, in denen die Eindeutigkeit der Bedeutung dieser zentralen Begriffe, ihre Beziehungen zu anderen Begriffen und ihre Wiedergabe in der Konzeptualisierung diskutiert und sichergestellt werden. Als Diskussionsgrundlage ist eine einfache Visualisierung zum Beispiel in einer Conceptmap für alle Beteiligten leicht verständlich und von Vorteil.

Ebenso erlaubt die strukturierte Dokumentation der Wissensinhalte in der Konzeptualisierung den Abgleich mit dem in der Spezifikation geforderten Umfang. So kann eine umfassende Conceptmap als Ergebnis der Konzeptualisierung transparent und nachvollziehbar mit Kompetenzfragen verglichen und so auf Vollständigkeit hin überprüft werden.

4.4 Formalisierung

In der Aktivität „Formalisierung“ werden die Ergebnisse der Konzeptualisierung in die gewählte formale Ontologiesprache überführt und somit rechnerlesbar gemacht.

„Während die vorangegangenen Aktivitäten [der Ontologieentwicklung] und ihre Ergebnisse ausschließlich durch die Wissensdomäne und die Domänenspezialisten bestimmt werden, wird die Ontologieformalisierung zusätzlich dazu in hohem Maße von der späteren Ontologieanwendung beeinflusst und ist mit großem Aufwand verbunden.“³⁴⁶ Ebenso stellen der Aufbau und die Eigenschaften der gewählten formalen Ontologiesprache und die damit verbundenen Modellierungsmöglichkeiten wichtige Einflussquellen dar. Während die Darstellung des Wissens in der Konzeptualisierung allein an den Bedürfnissen der Wissensinhalte und den Wissensträgern ausgerichtet war, muss diese nun in die vorgegebene Syntax der formalen Ontologiesprache übersetzt werden. Die Herausforderung bei der Ontologieformalisierung ist es nun, zwischen diesen drei Einflussquellen richtig abzuwägen (siehe Abbildung 31).

³⁴⁶ Eigene Übersetzung nach Gómez-Pérez 1999: *“While the precedent activities and their results are solely restricted by the knowledge domain and the domain specialists, the formalization is additionally strongly influenced by the ontology application and it also consists of effort”.*

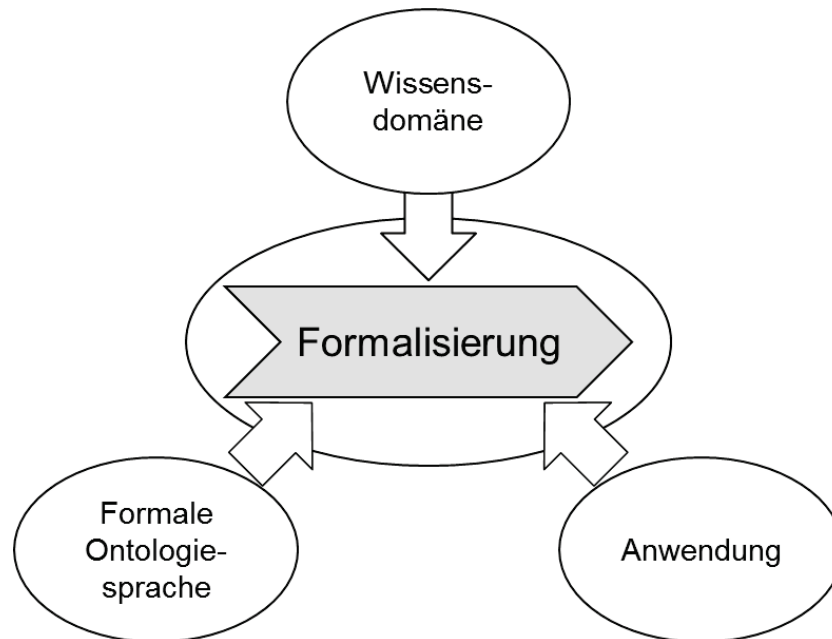


Abbildung 31 Grundlegende Einflüsse auf die Ontologieformalisierung

Die Ontologieformalisierung wird daher oft als der „aufwändigste und schwierigste Schritt bei der Erstellung einer Ontologie“ eingeschätzt.³⁴⁷

Ein Datenbanksystem für die Anwendung der Ontologie kann je nach Software verschiedenste Restriktionen für die Ontologieentwicklung beinhalten, die es in der Formalisierung zu beachten gilt. Diese reichen von der Begrenzung von Dateigrößen für Instanzen und der maximalen Anzahl möglicher Konzepte und Relationen über die Einschränkung möglicher Datentypen bis hin zu Einschränkungen bei der Art und Weise wie Anfragen an die Ontologie in dem Datenbanksystem ausgewertet und ausgegeben werden können. Die spätere Implementierung wird folglich auf die Ontologieformalisierung maßgeblichen Einfluss haben, der unbedingt frühzeitig festzustellen und zu berücksichtigen ist. Das konkrete Vorgehen hängt unmittelbar von der gewählten Software ab, sodass es unmöglich ist, hier weitere allgemeingültige Handlungsanweisungen zu geben.

Im Gegensatz dazu sind die Einschränkungen durch Modellierungsmöglichkeiten bei den verschiedenen formalen Ontologiesprachen und so auch deren Handhabung während der Formalisierung vergleichbar. Entsprechend finden sich in existierenden Forschungsarbeiten Vorschläge und Empfehlungen zur Darstellung von mentalen Modellen durch formale Ontologiesprachen. Dennoch erheben nur einzelne den Anspruch auf universale Einsetzbarkeit.³⁴⁸ In den meisten Fällen werden spezifische Formalisierungsvorschläge erarbeitet, welche dann einen Kompromiss der

³⁴⁷ Stuckenschmidt 2009, S. 172.

³⁴⁸ Z.B. Noy/McGuinness 2001.

Restriktionen aller der drei oben genannten Einflussquellen sind.³⁴⁹ Derartige Ansätze sind aber nur bedingt und teilweise auf die Formalisierung von Gestaltungswissen für die Produktentwicklung übertragbar. Bedingt durch die Besonderheiten formaler Ontologiesprachen sind jedoch insbesondere für Ontologieentwickler, die mangelnde Grundkenntnisse in der Informatik haben, einige grundlegende Hinweise sehr hilfreich und ersparen unnötige Iterationen und Aufwand. Die folgenden Abschnitte beinhalten daher solche Hinweise sowie einige spezifische Vorschläge für die Abbildung von Ingenieurwissen in Ontologien.

Abgrenzung von Konzepten und Instanzen

Eine Schwierigkeit in jeder Ontologieentwicklung ist die Unterscheidung von Konzepten und Instanzen. Konzepte sowie deren Eigenschaften und Beziehungen untereinander bilden das Ontologieschema. Die Instanzen enthalten Informationen und werden über das Ontologieschema verknüpft werden. So steht das Konzept „Kupplung“ im Rahmen dieser Arbeit als Überbegriff für alle nass- und trockenlaufenden Fahrzeugkupplungen in unterschiedlichen Gestaltungsvarianten, die alle beispielsweise dadurch gekennzeichnet sind, dass sie ein dezidiertes Kupplungsverhalten aufweisen und aus ähnlichen Komponenten, z. B. Belag, Belagträger, Kupplungsfeder etc., aufgebaut sind. Grundsätzlich entspricht diese Trennung dem Verständnis, dass Wissen aus Informationsinhalt und vernetzender Kontextinformation besteht.³⁵⁰ Dennoch gilt die Entscheidung, ob Begriffe in Klassen übergehen, zu Klassen zusammengefasst, als Attribut oder als Instanz abgebildet werden, als besondere Schwierigkeit der Ontologieentwicklung.³⁵¹ Die Hauptursache dafür scheint zu sein, dass diese Differenzierung im menschlichen Verstand je nach Situation dynamisch verändert wird, in einer formalen Ontologie jedoch eindeutig und statisch definiert sein muss. Inwiefern zum Beispiel der Begriff „Kupplung“ als konkretes Objekt mit genau beschriebenen Eigenschaften und Beziehungen zu anderen Begriffen oder als Oberbegriff für eine Menge verschiedener gleichartiger Objekte mit gleichen charakteristischen Merkmalen zu verstehen ist, das wird im menschlichen Verstand je nach Situation angepasst. Der Mensch abstrahiert oder konkretisiert die Bedeutung des Begriffes in seiner Vorstellung und fokussiert so auf den situativ relevanten Kontext. In einer Ontologie dagegen muss die Trennung von Kontext und Information während der Formalisierung einmalig festgelegt werden.

³⁴⁹ Z.B. der Vorschlag zur Verwendung von OWL-Design Patterns Mustern für die Abbildung von Wissen in der Biomedizin nach Stevens et al. 2007.

³⁵⁰ siehe Abschnitt 2.2.3.

³⁵¹ Vgl. Noy/McGuinness 2001.

Beide werden von da an getrennt in TBox und ABox gespeichert und behandelt.³⁵² Darüber hinaus wird empfohlen, dass alle Unterkonzepte bzw. alle Instanzen eines Konzeptes dasselbe Maß an Allgemeingültigkeit besitzen.³⁵³ Es besteht also offenbar ein grundsätzlicher konzeptioneller Unterschied zwischen der Art und Weise, wie Wissen in einem Softwaresystem abgebildet wird und wie Wissen durch Experten ausgedrückt wird.³⁵⁴ In dem Ontologieschema müssen daher alle möglichen relevanten Kontextbeziehungen und -informationen auf verschiedenen Abstraktionsebenen antizipiert und distinguiert werden, die erforderlich sind, um das Ableiten von Wissen aus den Informationen, die in einer Instanz enthaltenen sind, zu erlauben. Gestaltungswissen beinhaltet Lösungsstrategien, das Abwägen zwischen widersprüchlichen Zielen und die Fähigkeit zur Abstraktion. Dieser Aspekt ist nur unter sehr hohem Aufwand in einem softwaregestützten System abzubilden.³⁵⁵ Die Trennung zwischen Konzept und Instanz ist a priori nicht immer eindeutig festzulegen. Der Mangel an eindeutigen Lösungswegen lässt eine eindeutige Vorgehensweise nicht zu, und so ist das Vorgehen in der Formalisierung immer iterativ.³⁵⁶

Verwendung standardisierter Bezeichnungen

Eine Standardisierung der Bezeichnungen in der Ontologie ist, sofern möglich, immer umzusetzen.³⁵⁷ Im Sinne einer stringenten Modellierung sollte der Numerus von Konzeptbezeichnungen konsequent entweder ausschließlich im Singular oder ausschließlich im Plural gehalten sein. Die Bezeichnungen von Attributen sollten immer zusätzlich den Namen des Bezugskonzeptes enthalten. Den Bezeichnungen von Relationen sollten gleichermaßen die Bezeichnungen des Ausgangskonzeptes und des Zielkonzeptes hinzugefügt werden, so ist eine Relationsbezeichnung in der Form von Subjekt-Prädikat-Objekt zu empfehlen. Diese Zusätze in den Bezeichnungen lassen leichter auf die genaue Bedeutung des Ontologieelements schließen, was für eine iterative Ontologieentwicklung mit mehreren beteiligten Personen unerlässlich ist. So lassen sich später in einer Attributliste die Maximaldrehzahl „Motormaximaldrehzahl“ und „Kupplungmaximaldrehzahl“ leicht unterscheiden, was ohne das Einhalten dieser Namensregeln nicht möglich ist.

³⁵² siehe Abschnitt 2.3.2.

³⁵³ Noy/McGuinness 2001: „All the siblings in the hierarchy (except for the ones at the root) must be at the same level of generality.“

³⁵⁴ Vgl. Hayward et al. 1987.

³⁵⁵ Vgl. Cowan 2001.

³⁵⁶ Noy/McGuinness 2001.

³⁵⁷ Arpírez Vega et al. 1998 nach Gomez Perez 1999.

Definition von Relationen und Attributen

Relationen und Attribute sollten immer auf dem höchstmöglichen Level in der Konzept-Hierarchie definiert werden.³⁵⁸ Auf diese Weise wird eine unnötige mehrfache Definition von Attributen und Relationen mit derselben Bedeutung vermieden. Die Eigenschaft „Maximaldrehzahl“ zum Beispiel wird also nicht jeweils für das Konzept „nasslaufende Kupplungen“ und das Konzept „trockenlaufende Kupplung“ gesondert definiert, sondern nur einmal für das übergeordnete Konzept „Kupplung“, wodurch die beiden zuvor genannten untergeordneten Konzepte dieses Attribut automatisch vererbt bekommen. Zwar ist durch eine konsequente Verwendung von standardisierten Bezeichnungen eine Mehrfachverwendung derselben Bezeichnung ausgeschlossen und damit auch daraus resultierende Konflikte hinsichtlich der Konsistenz und der Logik, aber die Nichtbeachtung dieser Empfehlung hat eine unnötige Erhöhung der Anzahl an Elementen im Ontologieschema zur Folge, was mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist.

Formalisierung von Begriffshierarchien

In den Ingenieurwissenschaften werden häufig Hierarchien zur Strukturierung von Inhalten verwendet. Beispiele sind Klassierungen mit mehreren Hierarchieebenen, Funktions- und Produktstrukturen oder Organigramme. Die Bedeutung der hierarchischen Beziehung variiert je nach Einsatzfall: In einer Klassierungshierarchie steht sie für eine Subsumptionsbeziehung, in einer Produktstruktur für eine Zugehörigkeit. In formalen Ontologiesprachen ist die hierarchische Beziehung zwischen Konzepten untereinander und zu Instanzen fest durch Subsumption belegt. Dadurch wird einerseits erheblicher Aufwand bei der Modellierung gespart – Eigenschaften werden auf Unterkonzepte vererbt und müssen so nicht jedes Mal erneut definiert werden. Auf der anderen Seite hat das jedoch zur Folge, dass nicht alle in einer Konzeptualisierung definierten Hierarchien auf dieselbe Art und Weise definiert werden können. Hierarchien, welche eine andere hierarchische Beziehung als die Subsumption darstellen, wie etwa Produktstrukturen, müssen durch Relationen abgebildet werden. Hierarchien, welche die Subsumption beinhalten, können direkt in der Konzepthierarchie abgebildet werden (siehe Abbildung 32).

³⁵⁸ Noy/McGuinness 2001.

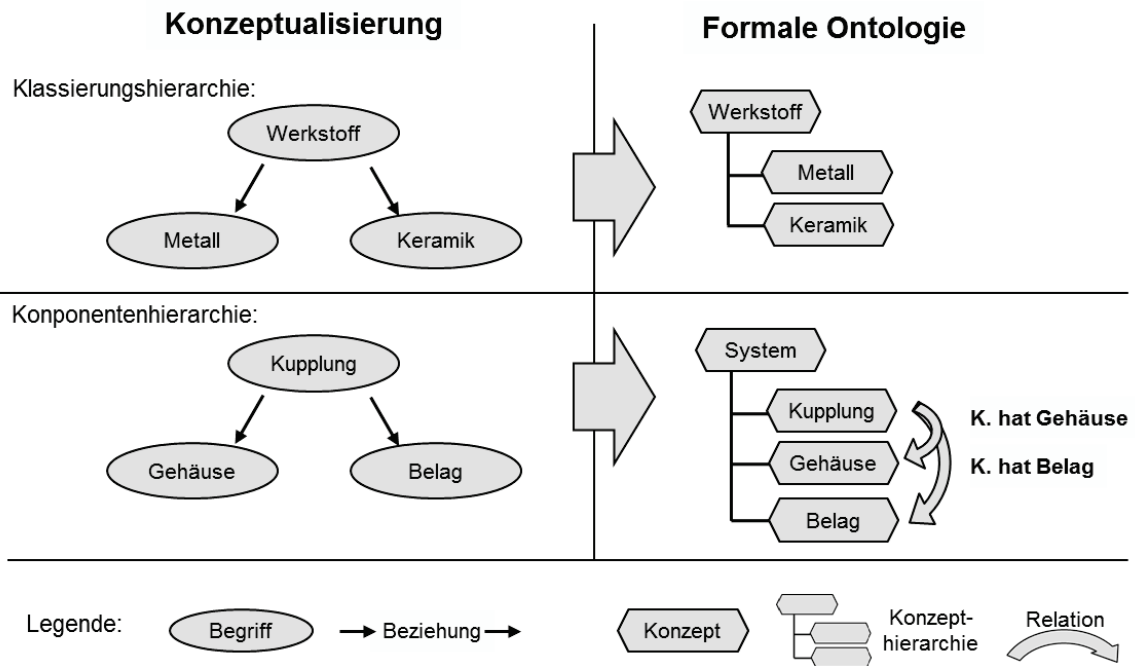


Abbildung 32 Formalisierungsbeispiele von Hierarchien

Formalisierung mehrwertiger Relationen

Komplexe Zusammenhänge werden als das Zusammenspiel mehrerer Elemente verstanden. Ein Friktionsverhalten zum Beispiel ist das Resultat von mindestens zwei Reibpartnern, was einer dreiwertigen Relation entspricht: Reibpartner A zusammen mit Reibpartner B hat ein Reibwertverhalten C zur Folge. Die Abbildung weiterer beeinflussender Elemente, beispielsweise Schmierstoffeinflüsse, erfordern höherwertige Relationen. Bekannte formale Ontologiesprachen unterstützen nur die Abbildung von zweiwertigen Relationen. Diese Einschränkung kann umgangen werden, indem man mehrwertige Relationen schrittweise über zweiwertige Relationen und zusätzliche Zwischenkonzepte modelliert. Die Reibpartner bilden dann zunächst ein Friktionssystem, welches ein bestimmtes Friktionsverhalten zur Folge hat. Dies bedeutet eine Änderung der Konzeptualisierung, und es gilt wiederum abzuwägen, ob die relevanten Zusammenhänge anhand existierender mentaler Modelle abgebildet werden können (siehe Abbildung 33). In diesem Beispiel bietet sich die Verwendung des Contact&Channel-Ansatzes (C&C²-A)³⁵⁹ an, welcher ein strukturiertes Modell für die Zusammenhänge zwischen Wirkflächen, Wirkflächenpaaren und daraus resultierenden Effekten und Funktionen bereitstellt.

³⁵⁹ Albers/Matthiesen 2002; Albers/Sadowski 2013.

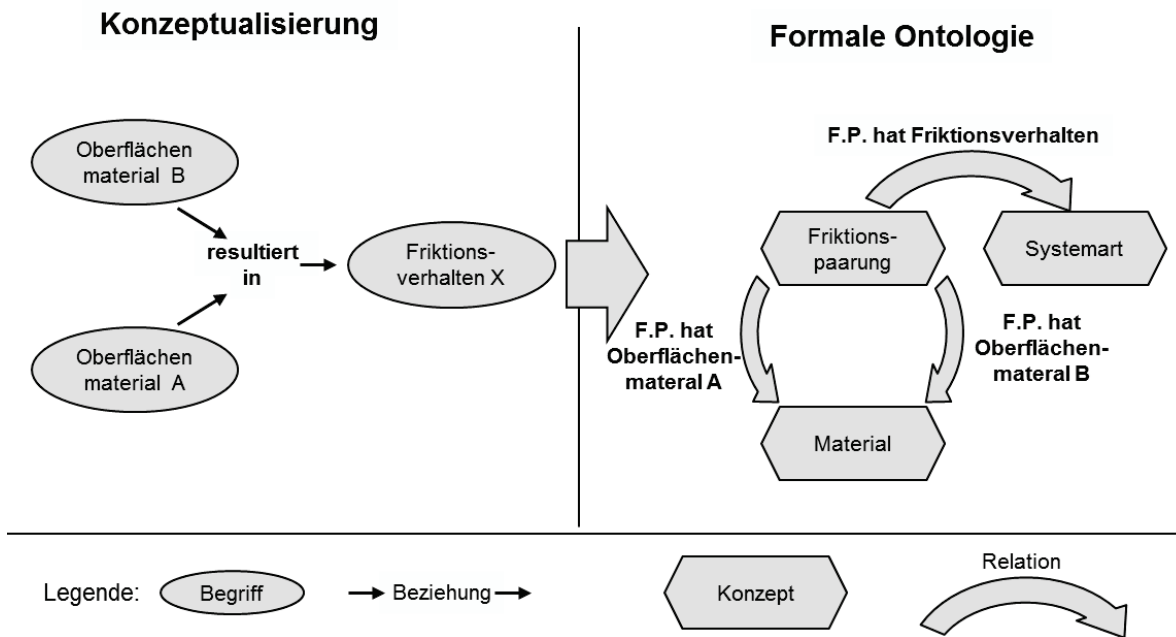


Abbildung 33 Formalisierung mehrwertiger Relationen

Die Kehrseite einer derartigen Modellierung ist eine zusätzliche Anzahl an Konzepten und umso mehr noch an Instanzen, da jede Kombination von Elementen in einer eigenen Instanz festgehalten wird. Die Folge ist erhöhter Aufwand in der weiteren Ontologieentwicklung.

Ontologieeditoren bieten auf vielfältige Arten Unterstützung bei der Formalisierung. Graphisch unterstützte Eingabe- und Editierungsmöglichkeiten ermöglichen eine einfache Ontologieformalisierung, ohne im Quellcode der Ontologie selber arbeiten zu müssen. Gerade im Hinblick auf die Vielzahl an Ontologielelementen und die damit verbundene Unübersichtlichkeit erleichtern verschiedene Listenansichten der Ontologielelemente und graphischen Darstellung der Ontologie als ganzes, wie z.B. die Konzepthierarchie (1) und der Klasseneditor (2) in Protégé (siehe Abbildung 34), die iterative Anpassung der Ontologie.

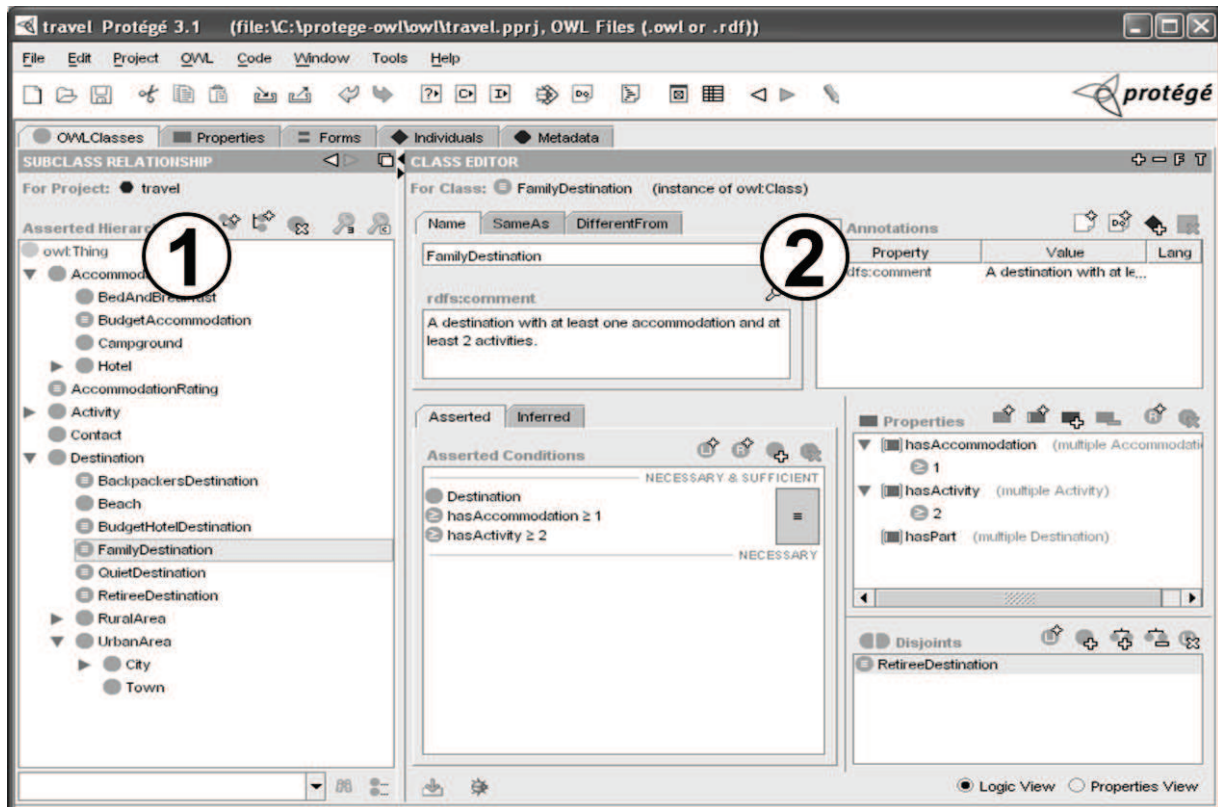


Abbildung 34 Benutzeroberfläche des Ontologieeditors Protégé³⁶⁰

Auch die Validierung der Formalisierungsaktivitäten wird durch Softwareunterstützung erleichtert. Die formal korrekte Verwendung der Syntax der formalen Ontologiesprache ist Grundvoraussetzung für die weitere Implementierung. In Ontologieeditoren mit graphischer Benutzeroberfläche wird der Ontologiequellcode meist im Hintergrund erstellt und aktualisiert. Textbasierte Ontologieeditoren bieten in der Regel die Möglichkeit einer automatisierten Überprüfung der Syntax ähnlich der Rechtschreibüberprüfungs- und Korrekturfunktion in Textverarbeitungsprogrammen. Formale Fehler werden in beiden Fällen zuverlässig vermieden. Dazu kann die logische Konsistenz der Ontologie über Debugging-Funktionen sichergestellt werden, so dass z.B. Zielkonzepte in Relationsdefinitionen auch vorhanden sind und dass in Regeln definierte Bedingungen tatsächlich erfüllbar sind und Schlussfolgerungen nicht zu Widersprüchen in der Ontologie oder unlösbaren Zirkelbeziehungen führen.

Neben der durch Software unterstützten Validierung sollte die formale Ontologie auch mit der Konzeptualisierung hinsichtlich Vollständigkeit und inhaltlicher Übereinstimmung abgeglichen werden. Insbesondere bei eventuellen durch die Restriktionen der formalen Ontologiesprache bedingten Änderungen in der

³⁶⁰ Protégé .

Strukturierung ist auch die Konzeptualisierung iterativ anzupassen und gegebenenfalls mit den Domänenspezialisten abzustimmen.

4.5 Implementierung

In der Implementierung wird die Ontologie auf das Datenbanksystem übertragen und dessen Struktur und Benutzeroberfläche angepasst. Ebenso werden die Informationsinhalte als Instanzen mit der Ontologie verknüpft und ggf. zusätzliche ontologiebasierte Suchfunktionen bereitgestellt.

Das Datenbanksystem stellt die Benutzerschnittstelle für die Wissensbereitstellung dar. Insbesondere beim Bereitstellen von Wissen ist es wichtig, dass die Benutzeroberfläche so gestaltet ist, dass sie eine möglichst niedrige Nutzungsbarriere darstellt. Erfahrungen zeigen, dass Softwaresysteme im Bereich Wissensmanagement nicht erfolgreich genutzt werden, wenn der Aufwand zur Nutzung eines Systems als zu hoch eingeschätzt wird.³⁶¹ Wikis und Wiki-ähnliche Systeme haben eine niedrige Nutzungsbarriere durch ihre einfache, intuitive Bedienbarkeit und die Browser-basierte Zugriffsmöglichkeit ohne einen lokalen Softwareclient auf dem Computer des Nutzers.³⁶² Es existieren verschiedene solcher Systeme, welche als Basis für die Implementierung einer Ontologie geeignet erscheinen. Neben der Möglichkeit, semantische Information zu hinterlegen, kann auf einer Wikiseite eines solchen Systems zusätzlich noch Information in nahezu beliebiger Form angezeigt werden. Gerade für die Bereitstellung von Gestaltungswissen sind neben Text auch Graphiken, Zeichnungen und Diagramme wichtige Medien. Ontologiebasierte Wikis sind daher für die Bereitstellung von Wissen in der Produktentwicklung gut geeignet.

Grundsätzlich kann die Ontologieimplementierung entweder nach dem Bottom-Up und dem Top-Down-Prinzip erfolgen. Beim Vorgehen nach Bottom-Up-Prinzip werden vorhandene Daten eines Softwaresystems nachträglich mit der semantischen Information der Ontologie versehen. Die bekanntesten Beispiele für solche ontologiebasierten Datenbanksysteme sind semantische Wikis wie Semantic Mediawiki³⁶³ oder Ontowiki³⁶⁴. Der Aufbau des Datenbanksystems ist dabei grundsätzlich unabhängig von der Ontologie. Das Ontologieschema wird durch die Systemnutzer dezentral, verteilt auf die vorhandenen Informationsinstanzen, implementiert (siehe Abbildung 35).

³⁶¹ Vgl. Albers et al. 2010b.

³⁶² Vergleiche Abschnitt 2.2.2.

³⁶³ Vgl. Auer et al. 2006.

³⁶⁴ Vgl. Krötzsch 2010.

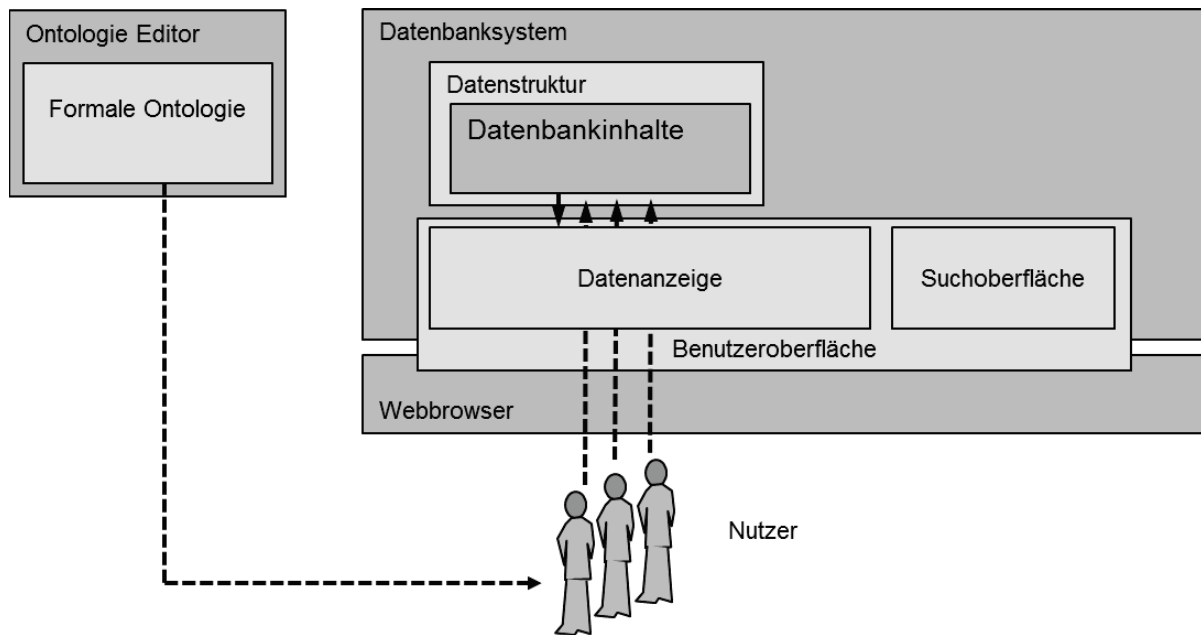


Abbildung 35 Ontologieimplementierung nach dem Bottom-Up-Prinzip

Dadurch ist eine Ontologieimplementierung mit vergleichsweise wenig Aufwand verbunden und das System ist grundsätzlich flexibel und leicht erweiterbar. Der Nutzer hat vonseiten der Software großen Freiraum bei der Benennung und Zuweisung von Konzepten, Attributen und Relationen. Daher kann es vorkommen, dass Datenbankinhalte nicht oder nur unvollständig mit semantischer Information annotiert werden, oder aber, dass Nutzer bewusst oder unbewusst das Ontologieschema erweitern. Rechtschreibfehler führen (unbeabsichtigt) zu neuen Konzeptbezeichnungen. Andererseits kann ein Nutzer leicht ein neues Konzept definieren, wenn ihm nach seinem subjektiven Verständnis das in der Ontologie vorhandene Vokabular unzureichend scheint. Dies widerspricht jedoch dem Anspruch, dass eine Ontologie ein gemeinsames Verständnis abbildet. Es besteht zudem ständig die Gefahr von Redundanzen, Inkonsistenzen und anderen Fehlern in der Ontologie.³⁶⁵ So sind die vorteilhaften Eigenschaften derartiger Systeme auch gleichzeitig Ursache für ihre Nachteile. Für die Bereitstellung von interdisziplinärem Gestaltungswissen ist der Bottom-Up-Implementierungsansatz daher nur bedingt geeignet.

Bei der Vorgehensweise nach dem Top-Down-Prinzip wird die Struktur des Datenbanksystems aus der Ontologie abgeleitet. Das heißt, dass in der Datenbank für jedes Konzept ein neuer Datentyp mit seinen Attributen und Relationen als Eigenschaften erstellt wird. Informationen werden dann auf Basis der erzeugten Systemstruktur als neue Daten gespeichert und über die aus der Ontologie

³⁶⁵ Vgl. Sauter 2012, S. 68f.

abgeleiteten Datenfelder mit semantischer Information versehen. Dabei sind die Auswahlmöglichkeiten der Nutzer auf die implementierten Ontologieelemente beschränkt. Das im Ontologieentwicklungsprozess vereinbarte gemeinsame Verständnis bleibt dadurch unverändert und Fehler in der Ontologie werden vermieden.

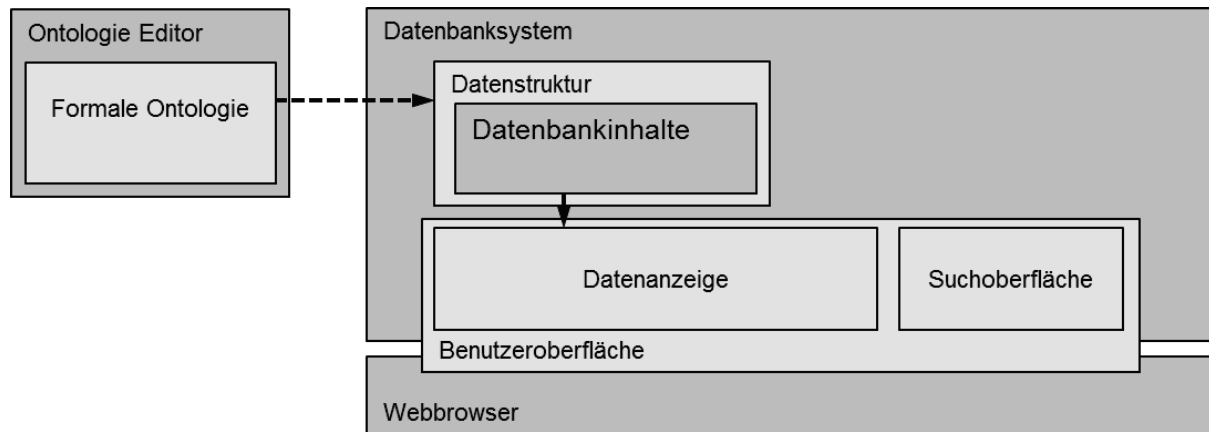


Abbildung 36 Ontologieimplementierung nach dem Top-Down-Prinzip

Die Implementierung eines solchen ontologiebasierten Datenbanksystems ist jedoch mit erheblichem Mehraufwand verbunden, der durch Softwaremodule verringert werden kann, die das Erzeugen der Datenbankstruktur auf Basis der Ontologie automatisieren. Im Gegensatz zu Anwendungen nach dem Bottom-Up-Prinzip können Nutzer aber erst mit dem System interagieren, wenn das Ontologieschema vollständig implementiert ist. Eine Flexibilität des Systems ist aufgrund der statischen Datenbankstrukturen nur bedingt gegeben. Sobald in einer Datenbank einmal Daten zu einem Datentyp bestehen, können diese nicht mehr modifiziert oder gelöscht werden. Iterationen und nachträgliche Änderungen der Datenbankstruktur sind daher mit sehr großem Aufwand verbunden. Mitunter muss die Datenbank von Grund auf neu aufgesetzt werden. Aus diesem Grund ist bei der Implementierung nach Top-Down-Prinzip eine hohe Qualität der formalisierten Ontologie erforderlich. Für die Bereitstellung von interdisziplinärem Gestaltungswissen über eine Ontologie muss ein gemeinsames Verständnis zugrunde liegen, deshalb scheinen Datenbanksysteme nach dem Top-Down-Prinzip besser geeignet.

Es können prinzipiell alle Datenbanksysteme genutzt werden, die Netzstrukturen abbilden können. Besonders geeignet für die Bereitstellung von Wissen für die Produktentwicklung sind solche, welche die einfache und intuitive Anzeige und

Modifikationen der gespeicherten Informationen ähnlich einer Wiki erlauben, wie z. B. Semantic Wiki for SharePoint.³⁶⁶

Hinsichtlich der Wissensbereitstellung ebenso wichtig wie das korrekte Abbilden des Wissens sind Zugriffsmöglichkeiten und Suchfunktionen zu dem in Datenbank enthaltenen Wissen.

Bei der Verwendung einer ontologiebasierten Wiki ist grundlegend die Möglichkeit der explorativen Suche gegeben. Die semantischen Daten zu einer Instanz werden auf der zugehörigen Wikiseite angezeigt, wobei Relationen als Link zu weiteren Inhalten dargestellt sind. Damit kann ein Nutzer auf Basis seines Verständnisses und seines Wissensbedarfes explorativ durch die vernetzten Informationen navigieren. Explorative Suche nach Wissen ist besonders dann geeignet, wenn ein Nutzer nur eine unscharfe Vorstellung von seinem Wissensbedarf bzw. seiner Problemstellung hat.³⁶⁷ Ein derartiges Vorgehen ist jedoch gerade bei umfangreichen Wissensspeichern mit sehr großem Aufwand verbunden und wird mitunter als ineffizient empfunden. Auch in Kombination mit einer einfachen Volltextsuche muss sich ein Nutzer oft lange durch verschiedene Inhalte durcharbeiten, bis er auf das für ihn relevante Wissen zugreifen kann.³⁶⁸

Ontologiebasierte Suchfunktionen bieten verschiedene Möglichkeiten für eine spezifischere und effizientere Suche. Zum einen kann einem Nutzer anhand von graphischen Darstellungen durch die Ontologie navigieren und erhält so einen besseren Überblick über die Inhalte des Systems. Oder aber der Nutzer erhält die Möglichkeit, semantische Suchanfragen an das System zu richten. Je nach Softwareumsetzung kann er dabei Suchanfragen frei formulieren oder er erhält durch entsprechende Auswahlmenüs die Möglichkeit, seine Problemstellung anhand in der Ontologie existierender Begriffe und deren Eigenschaften zu spezifizieren. Dazu ist eine Suchmaschine erforderlich, in der die Ontologie gesondert implementiert ist, anhand derer die semantischen Suchanfragen dann ausgewertet und die Ergebnisse an die Benutzeroberfläche zurückgeliefert werden. Eine solche Suchmaschine ist in der Lage, die in der Ontologie definierten Regeln auszuwerten und die resultierenden Schlussfolgerungen zur Verfügung zu stellen. Suchmaschinen können sowohl Teil des Datenbankmanagementsystems sein, als auch ein gesondertes Softwaremodul darstellen, welches als Webservice mit der Datenbank interagiert.

³⁶⁶ CRG Information Systems 2010.

³⁶⁷ Vgl. Fuchs-Kittowski et al. 2004, S. 3.

³⁶⁸ Albers et al. 2012a.

Mit der Implementierung der Ontologie in die Datenbank und in die Suchmaschine ist eine große Einschränkung hinsichtlich der Möglichkeiten iterativen Vorgehens verbunden. Änderungen an der Ontologie sind in der Regel mit großem Aufwand verbunden und müssen mitunter an verschiedenen Stellen in der Softwarestruktur durchgeführt werden. Es ist daher zu empfehlen, die Ontologie zunächst testweise in einer vorläufigen Datenbank zu implementieren und probeweise mit nur wenigen Instanzen zu versehen, wie in Abschnitt 5.5 beschrieben. Auf Basis der so gewonnenen Erfahrungen kann die formale Ontologie dann ggf. mit geringem Aufwand vor der finalen Implementierung angepasst werden.

Bei der Validierung der Implementierung wird die Tauglichkeit des ontologiebasierten Datenbanksystems für Bereitstellung von Wissen unter den in der Spezifikation definierten Randbedingungen bzw. Anforderungen des Einsatzbereichs ermittelt und sichergestellt. Diese Validierung entspricht daher von ihrer Zielsetzung dem in den meisten Ontologieentwicklungsansätzen als Evaluation bezeichneten Schritt.³⁶⁹ Abgesehen von einer Beschreibung der Zielsetzung sind die Ausführungen zur Evaluation in der Literatur meist sehr kurz gehalten und bieten wenig methodische Unterstützung.

Da der Wissensstand oder der Wissenszuwachs eines Nutzers nicht messbar ist³⁷⁰, muss die Validierung des Systems mittelbar erfolgen. Hierfür sind aufwändige und zeitintensive Vergleichsstudien denkbar und prinzipiell erforderlich, welche das Verhalten von Personen bei der Bearbeitung von Problemstellungen mit und ohne Unterstützung des ontologiebasierten Systems analysieren und so auf die Qualität der Wissensbereitstellung rückschließen lassen. Ein solcher Aufwand ist im Rahmen eines Ontologieentwicklungsprojekts in der Regel nicht zu leisten, weshalb von einer derartigen Bewertung des Systems hinsichtlich der Tauglichkeit seiner Wissensbereitstellung in den existierenden Ansätzen abgesehen wird.

Nichtsdestotrotz ist es unerlässlich, die Qualität des Systems zu prüfen und sicherzustellen. Die Funktionalität des Softwaresystems kann zumeist mit Hilfe von in die Software integrierten Analyse- und Debuggingprogrammen erreicht werden. Dazu ist die Vollständigkeit der Inhalte sowie Konsistenz und Korrektheit des implementierten Ontologieschemas zu analysieren. Hier können zunächst die in der Spezifikation definierten Kompetenzfragen herangezogen werden, um sicherzustellen, dass die erforderlichen Inhalte im System vorhanden sind und entsprechend der Suchanfragen an der richtigen Stelle vom System zurückgeliefert werden. Für die

³⁶⁹ siehe Abschnitt 2.4.

³⁷⁰ siehe Abschnitt 2.2.2.

weitere Analyse des Systems können die Domänenspezialisten und auch die Ontologieentwickler überprüfen, ob die für ihr Verständnis relevanten Inhalte und Zusammenhänge richtig im System abgebildet sind, und ob die implementierten Suchfunktionen auf Basis ihres Verständnisses die für sie relevanten Informationen zu Problemstellungen zurückliefern. Auf diese Weise wird auch die Funktionalität des Systems bei der Benutzerinteraktion überprüft.

Darüber hinaus können die subjektiven Eindrücke einiger zuvor nicht beteiligter Testbenutzer wertvolle Einblicke und Verbesserungsvorschläge liefern, wenn sie eine eigene Problemstellung unter Zuhilfenahme des ontologiebasierten Systems bearbeiten. Das ist insbesondere interessant, weil diese im Gegensatz zu den das Ontologieentwicklungsprojekt begleitenden Domänenspezialisten und Ontologieentwicklern unvoreingenommen mit dem System interagieren. Eine objektive Bewertung der Tauglichkeit des ontologiebasierten Datenbanksystems im Sinne einer Validierung ist damit aber nicht zu erreichen.

4.6 Anwendungen des Ansatzes

Es wird ein Prozess zur Entwicklung von Ontologien für Wissenssysteme in der Produktentwicklung vorgestellt, welcher auf der iterativen Durchführung der Aktivitäten Spezifikation, Wissensakquise, Konzeptualisierung, Formalisierung und Implementierung basiert und von kontinuierlicher Validierung und Dokumentation begleitet ist. Für die eng verknüpften Aktivitäten Wissensakquise und Konzeptualisierung werden Methoden und Handlungsempfehlungen im Umgang mit verteiltem, interdisziplinärem und teilweise implizitem Gestaltungswissen beschrieben. Für die Formalisierung werden Vorschläge zur Abbildung von Ingenieurwissen in formalen Ontologiesprachen erörtert. Für die Ontologieimplementierung sind Wikisysteme geeignet, die eine Verknüpfung mit einer Ontologie zulassen. Die Implementierung zusätzlicher ontologiebasierter Suchfunktionen erlaubt einen problemspezifischen Zugriff auf die Datenbankinhalte und gewährleistet so die Bereitstellung von Wissen.

Der Ansatz bezieht sich vornehmlich auf das ontologiebasierte Konstruktionsinformationssystem (K-KIS) im Teilprojekt A8 -„Ontologiebasierte Entwicklungsumgebung für hochbeanspruchte Systeme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ im Rahmen des Sonderforschungsbereiches „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ (SFB 483). Die Anwendung des Ansatzes in diesem Projekt wird in Abschnitt 5 ausführlich beschrieben.

Parallel dazu wurde dieser Ansatz in weiteren kleineren Ontologieentwicklungsprojekten innerhalb des IPEK angewendet:

Ki2-Ontologie

Inhalt war die Entwicklung eines ontologiebasierten Informationssystems im Bereich der Elektromobilität für das Projekt Ki2.³⁷¹ Ziel des Projektes war die Entwicklung eines innovativen Elektrofahrzeuges durch studentische Teamarbeit unter Begleitung von acht wissenschaftlichen Mitarbeitern des IPEK. In dem Projekt sollte der jeweils aktuelle Stand aus den Forschungsdomänen Elektrotechnik, insbesondere elektrische Antriebs- und Speichertechnik, Fahrzeugtechnik und Regelungstechnik Eingang finden, um so Erfahrungen im Zukunftsfeld Elektro- & Individualmobilität zu sammeln.

Die kurze Dauer der studentischen Teilprojekte hatte eine hohe personelle Fluktuation zur Folge. Mit fortschreitender Projektdauer und wachsenden Kenntnisstand im Projekt wurde der Wissenstransfer auf neue Mitarbeiter immer aufwändiger. Für eine schnelle Einarbeitung in die Thematik wurden daher in einem ontologiebasierten MS SharePoint© Datenbanksystem aktuelle Veröffentlichungen im Bereich der Elektromobilität und Batterietechnik gesammelt und zur Verfügung gestellt. Die Konzeptualisierung der Ontologie wurde auf Basis mehrerer Workshops der Projektbeteiligten erstellt. Durch diese konnten die Veröffentlichungen mit semantischer Information versehen und vernetzt werden. Eine ontologiebasierte Suche erlaubte den problemorientierten Zugriff auf relevante Forschungsarbeiten. Dieses System bildete so einen Baustein für den Austausch von interdisziplinärem Wissen in dem Entwicklungsprojekt.

Mikro-Design-Ontologie

Im Sonderforschungsprojekt „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ (SFB 499) wurden Gestaltungsmuster und –regeln für mikro-urgeformte technische Systeme entwickelt, um die Projektergebnisse im Sinne eines Forschungstransfers verfügbar zu machen. Ein wichtiges Element dieser Wissensbereitstellung stellte der Musteransatz für die Produktentwicklung dar, der Gestaltungswissen in Elemente zerlegte, diese in einem strukturierten Modell explizit erfasste und miteinander verknüpfte.³⁷² Die Ergebnisse der Arbeiten wurden ursprünglich in dem SFB-internen Informationssystem Micro Book of Knowledge (MyBok), das auf einer DokuWiki³⁷³ basierte, bereitgestellt. Der Zugriff auf Wissen in dem MyBok erfolgte durch eine Standard-Freitextsuche oder exploratives Durchsuchen der Wikiseiten, was sich als

³⁷¹ Vgl. Albers/Braun 2010; <http://www.ipek.kit.edu/108.php>.

³⁷² Deigendesch 2009.

³⁷³ Dokuwiki.org .

unverhältnismäßig zeitaufwändig herausstellte. Um den Zugriff auf dieses Wissen zu verbessern, wurde die Mikro-Design-Ontologie entwickelt, welche den Musteransatz, Gestaltungsregeln und mikrospezifische Aspekte in einem gemeinsamen Modell formal abbildet. Diese wurde nach dem Top-Down-Prinzip in einem semantischen Wikisystem implementiert. Die realisierten semantischen Suchmöglichkeiten erlaubten einen direkten Zugriff auf problemspezifische Gestaltungsmuster, Gestaltungsregeln und damit verbundenes Wissen zu mikro-urgeformten Bauteilen und deren Herstellprozessen. Durch die Formalisierung des Musteransatzes nach dem Top-Down-Prinzip konnte im Gegensatz zu der ursprünglichen Umsetzung in MyBok nach dem Bottom-Up-Prinzip außerdem die Vernetzung der Muster untereinander und mit Kontextinformation deutlich verbessert werden, was auch eine explorative Suche in dem System erleichterte.³⁷⁴

iPeM-Ontologie

Das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM wurde am IPEK entwickelt und stellt einen Ansatz zur Planung und Steuerung von Entwicklungsprozessen dar. Eine wichtige Rolle eines solchen Modells ist die Strukturierung des Wissensaustausches im Produktentwicklungsprozess. Dazu liefert ein Prozessmodell das einheitliche Verständnis als Kommunikations- und Handlungsgrundlage der beteiligten Personen. Um auch den softwaregestützten Wissensaustausch durch das Produktentstehungsmodell zu unterstützen, ist eine Formalisierung des Modells erforderlich. Eine große Herausforderung stellt dabei die große Anzahl an Elementen im Produktentstehungsmodell und deren viele potentiell relevanten Beziehungen untereinander dar.³⁷⁵ Als ein Ansatz zur Formalisierung der für einen softwaregestützten Wissensaustausch relevanten Elemente des iPeM wurde eine formale iPeM-Ontologie entwickelt. Diese erlaubte die Dokumentation und Vernetzung von Aktivitäten, Zielen, Objekten und Ressourcen von Produktentstehungsprozessen entsprechend dem iPeM-Verständnismodell.

Die iPeM-Ontologie wurde für die Anwendung in einem Industrieprojekt, begleitend zu der Lehrveranstaltung Integrierte Produktentwicklung³⁷⁶, in einem MS-SharePoint-System implementiert und so in die bestehende Softwareumgebung integriert³⁷⁷. Auf diese Weise dokumentierten die studentischen Teams projektbegleitend Aktivitäten, Ziele, Objekte und Ressourcen ihrer Projektarbeit in MS SharePoint©. Über die Ontologie konnten diesen einfach Metadaten hinzugefügt

³⁷⁴ Vgl. Albers et al. 2012a.

³⁷⁵ Vgl. Albers/Braun 2012.

³⁷⁶ Vgl. Albers/Burkardt 1998.

³⁷⁷ Vgl. Albers et al. 2009.

werden. Die Auswertung dieser Metadaten über die Ontologie erlaubte eine Analyse der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Aktivitäten, Zielen, Objekten und Ressourcen und dadurch auch Rückschlüsse auf erfolgreiche und weniger erfolgreiche Vorgehensweisen und Abläufe in der Produktentwicklung.³⁷⁸

Anhand der oben beschriebenen Ontologieentwicklungsprojekte wurde der Ontologieentwicklungsprozess angewendet. So konnten existierende Methoden und Vorgehensweisen in der Wissensakquise, Konzeptualisierung und Formalisierung auf ihre Eignung im Umfeld der Produktentwicklung hin analysiert und angepasst werden. Darüber hinaus konnten bei der Implementierung der Softwaresysteme wertvolle Erfahrungen hinsichtlich durch Softwareanwendungen bedingte Restriktionen auf die Ontologieformalisierung gesammelt werden. Diese wurden dazu genutzt, den Ontologieentwicklungsprozess weiter anzupassen und zu verbessern.

³⁷⁸ Vgl. Albers et al. 2012c.

5 Entwicklung des K-KIS

Im folgenden Kapitel wird die Anwendung des im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Ansatzes zur Ontologieentwicklung für das Teilprojekt A8 „Ontologiebasierte Entwicklungsumgebung für hochbeanspruchte Systeme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ innerhalb des Sonderforschungsbereiches 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ im Zeitraum der abschließenden Förderphase 2009-2012 483 dargelegt. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel in grau hinterlegten Informationskästen einige zentrale Hinweise zu grundlegenden Vorgehensweisen und notwendigen Voraussetzungen zur erfolgreichen Umsetzung von Ontologieentwicklungsprojekten gegeben. Sie basieren auf den Erkenntnissen aus der Entwicklung des K-KIS und ebenso aus den beschriebenen kleineren Ontologieentwicklungsprojekten³⁷⁹. Die Hinweise richten sich vornehmlich an Ingenieure, die unter vergleichbaren Randbedingungen, also in Forschungseinrichtungen oder kleinen oder mittleren Unternehmen, ein ontologiebasiertes System zum expliziten Abbilden und Bereitstellen von Wissen entwickeln und implementieren wollen.

Im Rahmen dieses Sonderforschungsbereichs wurde am KIT (ehemals Universität Karlsruhe TH) über vier Förderphasen zwischen 1999 und 2012 von einem interdisziplinären Team aus den Bereichen Produktentwicklung, Simulation, Produktion und Materialwissenschaften der Einsatz von kommerziell erhältlichen Ingenieurkeramiken in Gleit- und Friktionssystemen untersucht, deren keramikspezifische Eigenschaften grundsätzlich für die hohen Anforderungen des Friktionskontakts erfolgversprechend scheinen. Besondere Herausforderungen sind in diesen Bereichen immer höhere Anforderungen hinsichtlich Energieeinträgen und Lebensdauer bei gleichzeitig zunehmenden Restriktionen bezüglich des Einsatzes potentiell umwelt- und gesundheitsschädlicher Werkstoffe. Die hohe Härte und Verschleißfestigkeit keramischer Werkstoffe bieten großes Potential im Bereich tribotechnischer Systeme,³⁸⁰ ebenso die hohe Thermoschockbeständigkeit einiger Keramiken. Einsatz fanden monolithische und multiphasige Ingenieurkeramiken in Selbstpaarung und Paarung mit metallischen Werkstoffen.

Die Zielsetzung des Sonderforschungsbereich 483 umfasste die grundlagenorientierte Erforschung der notwendigen Werkstoffcharakterisierungs-,

³⁷⁹ Vg. Abschnitt. 4.6.

³⁸⁰ Gläser/Lori 1993.

Werkstoffentwicklungs-, Anforderungsermittlungs-, Konzipierungs-, Gestaltungs-, Dimensionierungs- und Validierungsmethoden und -prozesse für komplexe technische Systeme in metallisch-keramischer Hybridbauweise unter wesentlicher Verwendung ingenieurkeramischer Werkstoffe und die Nutzbarmachung des Anwendungspotentials für zukünftige innovative Maschinen und Anlagen.

Die einzelnen Forschungsarbeiten des SFB 483 waren an verbindenden Demonstratorsystemen ausgerichtet, um Fokussierung und Relevanz der wissenschaftlichen Arbeiten in den einzelnen Teilprojekten zu sichern und um die wechselseitige Beeinflussung und Abhängigkeiten der verschiedenen Entwicklungsaktivitäten zu untersuchen. In der letzten Förderphase waren diese eine nasslaufende Lamellenkupplung, eine trockenlaufende Fahrzeugkupplung, eine Hochdruckpumpe für direkteinspritzende Ottomotoren und Walzwerkzeuge für Umformtechnik. Entsprechend war der SFB in die Projektgruppen (trocken- und nasslaufende) Friktionssysteme, Gleitsysteme und Walzensysteme gegliedert. Motiviert durch verschiedene Teilproblemstellung bei der Entwicklung der Demonstratorsysteme wurden innerhalb der Projektgruppen jeweils mehrere Teilprojekte bearbeitet in den Forschungsbereichen Produktentwicklung („Systementwicklung und Konstruktion“), Werkstoffwissenschaften („Werkstoff- und Randschichtenentwicklung“), Fertigungs- und Produktionstechnik („Qualitätssicherung“) sowie Modellierung („Charakterisierung und Modellierung“) und in einem Transferbereich (siehe Abbildung 37).

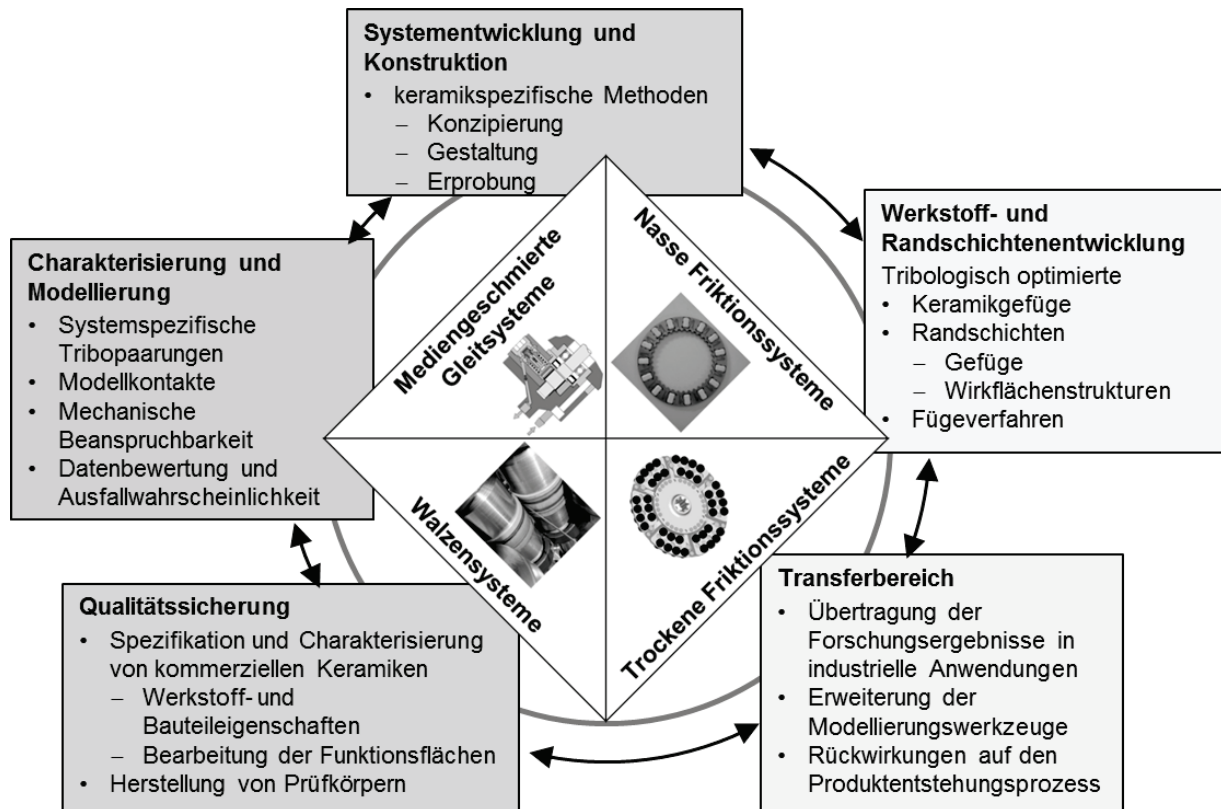


Abbildung 37 Aufbau des Sonderforschungsbereiches 483³⁸¹

Die Werkstoff- und Systementwicklung selber spielten dabei eine untergeordnete Rolle. Durch die Generalisierung der Forschungsergebnisse sollten die entwickelten Konstruktionsmethoden, Entwurfswerkzeuge, Werkstoff-, Wirkflächen- und Modellierungskonzepte verfügbar und auf andere Anwendungen übertragbar gemacht werden.

Insgesamt umfasste der SFB 16 Teilprojekte mit 34 Forschern an 10 Instituten. Die gesamten Förderinvestitionen über 12 Jahre von insgesamt ca. 24 Mio. € bzw. 200 Mannjahre hatten 50 Design-Vorschläge, 400 wissenschaftliche Veröffentlichungen mit insgesamt ca. 50000 Seiten als materielles Ergebnis. Das immaterielle Ergebnis in Form des Wissenszuwachses der beteiligten Forscher und Studierenden war nicht messbar, übertraf dieses aber mit Sicherheit um ein Vielfaches.

Zur nachhaltigen Bereitstellung des erforschten Wissens nahm das Teilprojekt A8 eine zentrale Position ein. Ziel des Teilprojektes A8 war es, die Möglichkeiten der Bereitstellung des im SFB generierten Wissens durch Ontologien zu erforschen und prototypisch ein ontologiebasiertes Keramik-Konstruktionsinformationssystem (K-

³⁸¹ Eigene Darstellung nach Antrag auf Finanzierung der 4. Förderphase des Sonderforschungsbereich 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ 2008.

KIS) umzusetzen. Dazu sollte es auf dem Stand der Forschung zu Ontologien in der Informatik aufbauen und diesen auf den Bereich der Wissensbereitstellung in der Produktentwicklung transferieren. Der K-KIS-Prototyp sollte auf Basis existierender Softwarelösungen umgesetzt werden.

5.1 Spezifikation des K-KIS

Zielsetzung der Ontologieentwicklung war es, das in den einzelnen Teilprojekten des Sonderforschungsbereiches gewonnene Wissen wurde, abzubilden und dabei insbesondere keramikspezifisches Gestaltungswissen problemspezifisch für Produktentwickler und Konstrukteure in der Wirtschaft bereitzustellen. Im Fokus der Ontologieentwicklung lag das Erfassen und Bereitstellen des Wissenstandes zum Ende der letzten Förderphase des Sonderforschungsbereiches SFB483. Darüber hinaus war eine dynamische Anpassungsmöglichkeit des ontologiebasierten Systems denkbar und wünschenswert, um dem dynamischen Charakter von Wissen in der Produktentwicklung gerecht zu werden. Solche Erweiterungen sollten jedoch erst Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein und lagen nicht im Fokus der hier vorgestellten Ontologieentwicklung. Die Erfahrungen aus dem Projekt deuteten auch auf die Schwierigkeit der Abbildung von dynamischem Wissen durch ontologiebasierte Wissenssysteme hin.

Diese Zielsetzung wurde anhand der Klassifizierung der Ontologierollen nach Kitamura³⁸² weiter konkretisiert:

- Abbilden des gemeinsamen Begriffsverständnisses des Projektteams des Sonderforschungsbereiches 483 in einer für spätere Nutzer nachvollziehbaren Form.
- Konzeptionelles Datenschema für die Datenbankimplementierung des K-KIS, um auch vorhandene Dokumente aus dem Sonderforschungsbereich 483 sowie deren Bedeutung zu erfassen und bereitzustellen.
- Erfassen und Abbilden von bisher implizit in den Mitarbeitern des SFB 483 vorhandenem Wissen.
- Kommunikationsunterstützung für den rechnergestützten Wissensaustausch entsprechend einer Kodifizierungsstrategie.
- Basis für die Systematisierung des Wissens des Sonderforschungsbereichs 483 in rechnerlesbarer Form.

³⁸² Siehe Abschnitt 2.3.4.

- Darstellung eines „kontrollierten Vokabulars“ für Objekt-bezogenes Wissen, um so lexikalische Eindeutigkeit in Modellen und Verschlagwortungen sicherzustellen.

Entsprechend der Vorgabe wurden zu Beginn des Projektes bestehende Softwarelösungen analysiert. Um Kompatibilitätsproblemen bei der Software vorzubeugen, wurden nur solche Lösungen gesucht, welche alle benötigten Softwareelemente, vom Ontologieeditor, über Datenbanksystem und Benutzeroberfläche bis hin zur Suchmaschine, als Paket umfassen. Trotz der schier unüberschaubaren Anzahl an Einzellösungen³⁸³ für verschiedene Softwareelemente konnte lediglich das Angebot der Firma Ontoprise³⁸⁴ als entsprechend dieser Vorgaben geeignet identifiziert werden.

Darin wurde die Ontologie in der formalen Ontologiesprache F-Logic mit der Hilfe von dem Ontologieeditor Ontostudio© modelliert und in einer Microsoft SharePoint©-Umgebung implementiert, welche auf der relationalen Datenbank MySQL basiert. Entsprechend der vorgefertigten Softwarelösung wurde die Ontologie in eine eigene Website als eine sogenannte Metaontologie importiert. Danach wurde daraus die Datenstruktur für die K-KIS-Anwendung in MS SharePoint© abgeleitet. Mithilfe der Applikation Semantic-Wiki for SharePoint© wurden die Inhalte einer MS-SharePoint© Datenbank in Form von Wikiseiten angezeigt und editierbar gemacht. Die Benutzeroberfläche der späteren Wissensbereitstellung war so weitgehend identisch mit der einer semantischen Wiki und erlaubte eine intuitive Nutzung und der Webbrowser-basierte Zugriff ermöglichte eine spätere Einbindung in jede beliebige existierende Entwicklungsumgebung. In MS SharePoint war weiterhin die Definition unterschiedlicher Benutzerprofile mit unterschiedlichen Zugriffs- und Änderungsberechtigungen vorgesehen. Dadurch konnte die Entstehung von inhaltlichen Fehlern durch fehlerhafte Nutzung eingeschränkt werden.

Für die Ontologieentwicklung muss der konkrete Nutzen des späteren ontologiebasierten Systems, idealerweise in Form von Nutzungsszenarien für verschiedene potentielle Nutzer, definiert und klar abgegrenzt werden.

Für den K-KIS ließen sich die folgenden drei Benutzerprofile anhand ihrer unterschiedlichen Interaktionsmöglichkeiten identifizieren:

- Der Ontologieentwickler entwickelt und implementiert die Ontologie in der Datenbank, gestaltet die ontologiebasierte Suche und pflegt Inhalte in die

³⁸³ Siehe Abschnitt 2.4.2.

³⁸⁴ Mittlerweile Fa. Semafora.

Datenbank ein. Er hat daher volle Zugriffs- und Änderungsrechte auf alle Softwaremodule. Personen, die diesem Profil zugeordnet sind, sind in erster Linie die Mitarbeiter des Teilprojektes A8.

- Der Wissensträger steht für die Mitglieder des Sonderforschungsbereiches, die als Domänenspezialisten ihr Wissen aus den jeweiligen Teilprojekten in die Ontologieentwicklung einbringen. Sie sollen im Verlauf des Ontologieentwicklungsprozesses überprüfen, inwieweit ihre domänenspezifischen Inhalte korrekt im K-KIS bereitgestellt werden und gegebenenfalls Inhalte einpflegen und modifizieren. Dazu erhalten sie Berechtigung, Ontologieinstanzen, also die Wikiseiten in SharePoint®, zu erzeugen und zu modifizieren, jedoch keinen Zugriff auf die Datenbankstruktur selber.
- Der K-KIS-Nutzer wendet sich mit einem Wissensbedarf basierend auf einer gestalterischen Problemstellung bezüglich des Einsatzes von Keramik in tribologischen Systemen an das K-KIS. Dieses soll ihm entsprechend der von ihm spezifizierten Problemstellung relevante Information und deren Kontext zurückliefern und ihm so ermöglichen, sich auf Basis des eigenen Verständnisses das notwendige Wissen anzueignen. Dementsprechend erhält er nur Lese-Zugriff auf die Datenbankinhalte in Form der Wikiseiten und auf die ontologiebasierte Suche.

Über die Ontologie sollte das erforschte Gestaltungswissen zum Einsatz von Keramik in technischen Systemen und alles zugehörige Kontextwissen aus dem SFB 483, welches erforderlich ist, um das Gestaltungswissen verstehen und anwenden zu können, erfasst werden. Dazu gehörte prinzipiell Wissen aus allen beteiligten Teilprojekten, allen Projektgruppen und allen Projektbereichen. Insbesondere der Hintergrund und die Zusammenhänge der Forschungsergebnisse lagen nur begrenzt in dokumentierter Form vor, sondern lediglich implizit gebunden an die Projektbeteiligten. Ziel war es also, teilweise implizites interdisziplinäres Wissen aus den Forschungsdomänen Produktentwicklung, Werkstoffwissenschaften und Produktionstechnik zu erfassen und bereitzustellen.

Die Ontologie musste dazu auch an das Verständnis potentieller Nutzer des K-KIS anknüpfen. Diese besaßen kein fundiertes Vorwissen im Bereich von Ingenieurkeramiken in tribologischen Systemen. Vielmehr wurde davon ausgegangen, dass es sich um Personen mit Ingenieurausbildung handelte. Fachliches Vertiefungswissen in diesem Personenkreis konnte nicht mit Sicherheit vorausgesetzt werden. Es war jedoch anzunehmen, dass grundlegende Kenntnisse zur Gestaltung tribologischer Systeme vorhanden waren.

Anhand der gewünschten Funktionalität des K-KIS konnte eine erste Eingrenzung der Ontologieinhalte in Form von Kompetenzfragen erfolgen. Dazu wurde ein erster Satz an möglichen Fragestellungen erarbeitet, mit denen sich ein potentieller

späterer K-KIS-Nutzer an das System wenden könnte, um mögliche Gestaltungsprobleme zu lösen. Ein Auszug aus diesen Kompetenzfragen ist im Anhang aufgeführt.³⁸⁵ Diese Kompetenzfragen wurden im Verlauf der weiteren Ontologieentwicklung, vor allem der Wissensakquise, weiter konkretisiert und ergänzt.

5.2 Wissensakquise im SFB 483

Um dem großen Umfang des Sonderforschungsbereiches und des dort erforschten Wissens gerecht zu werden, erfolgte der Ontologieentwicklungsprozess gestaffelt. Es wurde zunächst mit Wissensakquise in der Projektgruppe Friktionssysteme begonnen. Dann wurden diese Zwischenergebnisse im Sinne eines iterativen Vorgehens mit den Inhalten der weiteren Projektbereiche erweitert. Parallel dazu wurden die Konzeptualisierungs-, Formalisierungs- und Implementierungsaktivitäten weiterverfolgt, um Erfahrung mit der gewählten Ontologiesprache und der Softwareumsetzung zu sammeln und die Zielsetzung und Vorgehensweise des Ontologieentwicklungsprojekts gegebenenfalls anzupassen.

Als erster Schritt der Wissensakquise wurde das vorhandene explizite Wissen erfasst: Ein wesentlicher Baustein dafür waren über 400 Publikationen aus den Arbeiten der einzelnen Teilprojekte, die während der gesamten Förderphase verfasst wurden. Darüber hinaus dienten sie den Ontologieentwicklern als mögliche Vorbereitung für weitere Wissensakquiseaktivitäten.

Um das implizit im SFB vorhandene Wissen zu erfassen, wurden durch die Ontologieentwickler teilstrukturierte Interviews mit den Bearbeitern der Teilprojekte durchgeführt. Ein Gerüst an strukturierten Fragen zu den gestaltungsrelevanten Inhalten wurde durch bedarfsabhängige Diskussion zu Begriffsbedeutungen und Detail- und Hintergrundwissen ergänzt. Die Dauer der Interviews betrug zwischen eineinhalb und zwei Stunden. Das vorhandene explizite Wissen zu den jeweiligen Teilprojekten diente als mögliche Vorbereitung für den Interviewer, der sich dadurch relevante Kernbegriffe und ein erstes Grundverständnis der Projektinhalte erarbeiten konnte. So wurde zu Beginn des Interviews schneller ein gemeinsames Verständnis als Grundlage für den folgenden Wissensaustausch gefunden, was den Einstieg erleichterte.

Zur gezielten Akquise von Gestaltungswissen wurde der Fokus der Interviews auf den Einfluss gelegt, den die Forschungsergebnisse des jeweiligen Teilprojektes auf die Gestalt der Demonstratorsysteme haben. Um das den Demonstratorsystemen zugrundeliegende Gestaltungswissen zu erfassen und für die spätere Bereitstellung

³⁸⁵ siehe Anhang 9.1, S.173.

zu verallgemeinern, mussten die Zusammenhänge zwischen der finalen Gestalt und den zugrunde liegenden Randbedingungen, Annahmen und Erkenntnisse nachvollzogen werden. Dazu wurde, soweit möglich, ein strukturiertes Nachfragen entsprechend der Laddering Technik angewendet. Ausgehend von den allgemeinen Fragestellungen der Kompetenzfragen wurden tiefere Begründungen und Zusammenhänge durch immer detailliertere Fragestellungen immer weiter ergründet und analysiert. Es zeigte sich, dass dafür insbesondere die Analyse und Diskussion verworfener Gestaltungslösungen hilfreich ist. Dadurch ließ sich klären, warum ein Demonstrator die finale Gestalt erhalten hatte und nicht eine andere.

Ein Beispiel dafür zeigen einige Entwürfe aus der evolutionären Weiterentwicklung der trockenlaufenden Keramikcupplung über mehrere Förderphasen des Sonderforschungsbereiches hinweg (siehe Abbildung 38). Bei der einfachen Substitution des organischen Kupplungsbelages durch einen vollkeramischen Ring (A) ist spontanes Versagen durch lokale Spannungsüberhöhung zu erwarten. Dieses erfolgte im Beispiel in der Tat schon während der Montage. Um dies zu vermeiden, wurde der Kupplungsbelag in einem ersten Entwurf (B) in eine Vielzahl einzelner Keramikpellets segmentiert. Im Entwurf (C) wurde darüber hinaus der negative Einfluss der geringen Elastizität keramischer Bauteile durch eine definierte elastische Gestaltung der Aufhängung der Pellets realisiert. Der finale Entwurf (D) stellt für die Fertigung optimierte Lösung dar. Er vereint die erfolgreichen Gestaltungsmaßnahmen der vorangegangenen Entwürfe und erlaubt durch die Realisierung einer Einzelanfederung der Pellets die Verwendung unbearbeiteter keramischer Bauteile. Für die strukturierte Analyse der gestaltungsrelevanten Zusammenhänge wurde diese Evolution rückwärts durchlaufen.

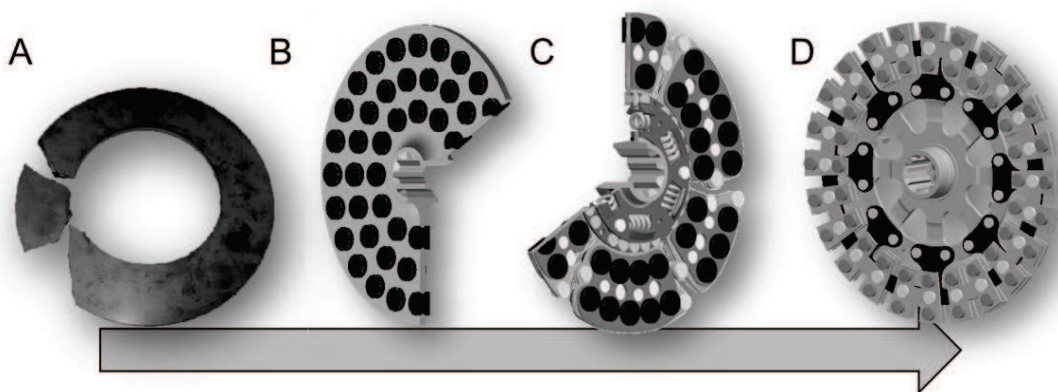


Abbildung 38 Evolution der Gestaltungsentwürfe des Demonstrators Trockenlaufende Fahrzeugkupplung

Neben der oben beschriebenen strukturierten Analyse relevanter Begriffe und Zusammenhänge waren auch immer wieder unstrukturierte Diskussionen zur Klärung von Begriffsbedeutungen Gegenstand des Interviews. Bei den Interviews mit

verschiedenen Teilprojektbearbeitern zeigten sich dabei unscharfe und unterschiedliche Begriffsverständnisse, vor allem hinsichtlich des Abstraktionsgrades.

Für die spätere Formalisierung müssen die Bedeutungen und der gewählte Abstraktionsgrad von Begriffen eindeutig geklärt und definiert werden. Mehrdeutige Begriffe können in einem ontologiebasierten System nicht abgebildet werden.

Zum Beispiel war die Bedeutung des Begriffes Friktionssystem je nach Teilprojekt und Forschungsdomäne unterschiedlich. In der Werkstoffkunde wurden der Friktionskontakt sowie dessen eindeutige und nachvollziehbare Einflussgrößen und Verhalten unter idealisierten Bedingungen beschrieben. Produktentwickler hingegen sahen die Gesamtheit aller Friktionskontakte eines betrachteten Friktionssystems unter realen Randbedingungen in dem Wissen, dass die Einflüsse auf jeden einzelnen Friktionskontakt nicht genau bekannt waren. Es wurden von beiden Fachgruppen zwar dieselben Begriffe und dieselben Zusammenhänge betrachtet, jedoch jeweils auf unterschiedlichem Abstraktionsniveau. Dieser Unterschied war den SFB-Mitarbeitern wohl bekannt und stellte für die Zusammenarbeit im Projekt eine Herausforderung dar, die aber in der direkten Kommunikation beherrschbar war. Hinsichtlich der Ontologieentwicklung erschwerte sie jedoch das Abbilden eines gemeinsamen Verständnisses, da Konzepte eine eindeutig festgelegte Bedeutung und ein damit verbundenes Abstraktionsniveau haben müssen.

Bevor Begriffe Eingang in eine Ontologie finden, muss ihre Bedeutung eindeutig geklärt und vereinbart werden.

Die Interviews zeigen, dass das Kontextwissen zu Gestaltungslösungen immer Detailwissen ist und auf einer Vielzahl von Zusammenhängen beruht. Dieses Wissen beruht zudem immer auf einer Vielzahl für das jeweilige Projekt getroffenen Annahmen und Restriktionen. Die finale Gestaltungslösung des Demonstrators für die trockenlaufende Keramikcupplung stellt nur unter vielen explizit und auch implizit gewählten Restriktion, wie beispielsweise der Verwendung einer stoffschlüssigen Verbindung der keramischen Bauteile mit dem Restsystem, eine optimale Lösung dar. Mögliche Fragestellungen potentieller Nutzer des Systems, zu diesem Zeitpunkt repräsentiert durch die Kompetenzfragen, waren dagegen von allgemeinerer Natur. Denn ohne detailliertes Wissen sind auch keine detaillierten Problemstellungen vorhanden. Um das spezifische Wissen aus dem SFB allgemeingültig bereitzustellen, musste es verallgemeinert werden. Das hieß, alle notwendigen Restriktionen, Annahmen und Zusammenhänge mussten erfasst und bereitgestellt werden, damit ein Nutzer die Anwendbarkeit des Wissens in einem erneuten Einsatzfall richtig einschätzen könnte.

Das Ergebnis der Interviews bestand in einer Tonaufnahme des Interviews, welche anschließend transkribiert wurde. Während der Interviews wurden meist verschiedene Notizen und Skizzen zu Gestaltungslösungen und auch zu Zusammenhängen angefertigt. Wenn diese oft auch nur eine einfache Form aufwiesen, waren sie doch unerlässlich, um die Interviewinhalte später nachvollziehen zu können. Die Nachbereitung der Interviews erwies sich als zeitaufwändig und betrug ungefähr das Fünffache der Interviewdauer. Darüber hinaus war ein großer Teil des Ergebnisses der Wissensakquise nur in impliziter Form im Kopf der Ontologieentwickler vorhanden. In Iteration mit der Konzeptualisierung wurde die Korrektheit und Vollständigkeit hinsichtlich der inhaltlichen Abgrenzung der Wissensdomäne der Akquiseergebnisse überprüft und durch weitere Wissensakquiseaktivitäten sichergestellt. Im Falle fehlender oder unklarer Inhalte und Zusammenhänge wurden erneute Interviews mit denselben Wissensträgern notwendig. In diesen erleichterten dann die Ergebnisse der Konzeptualisierung die zielgerichtete Akquise benötigten Wissens. Ergab die Konzeptualisierung, dass Inhalte verschiedener Interviews sich überschneiden aber unvereinbar waren, wie z. B. im Beispiel der oben genannten Bedeutung des Begriffs Friktionssystem, so wurde dies in Workshops mit den beteiligten Domänenspezialisten diskutiert. Das Ziel dabei war, den kleinsten gemeinsamen Nenner der Beteiligten zu finden, der erforderlich ist, um das Gestaltungswissen bereitzustellen.

5.3 Konzeptualisierung der K-KIS-Ontologie

Für die Konzeptualisierung wurden die Tonaufnahmen der Interviewmitschnitte zunächst transkribiert. Ein Interview von einer Dauer von maximal zwei Stunden resultierte dabei in einem Transskript von bis zu vierzig Seiten. Um dieses Wissen aus den Interviews zu strukturieren, wurde es jeweils in einer Conceptmap abgebildet. Entsprechend dem „Middle-out“-Ansatz wurden relevante Begriffe aus den Transskripten und dem gesammelten Material extrahiert und die Zusammenhänge Stück für Stück aufgebaut.

Die Verwendung einfacher Textmining-Methoden konnte zwar bei der ersten Identifikation relevanter Begriffe aus den Transskripttexten unterstützen, der Gesamtaufwand ließ sich dadurch jedoch nur geringfügig reduzieren, bestand er doch in der Identifikation und Strukturierung der Zusammenhänge. Dies war nur manuell und in den meisten Fällen nicht durch Dritte, sondern nur durch den Interview-Führenden selbst möglich, da nur dieser den Zusammenhang zwischen gesprochenem Wort, parallel erstellten Skizzen und Darstellungen sowie schon vorher vorhandenen expliziten Inhalten herstellen konnte. Nur er verfügte über das implizite während des Interviews gesammelte Wissen.

In den Conceptmaps zeigte sich auch, dass vorhandene mentale Ingenieurmodelle als Kommunikationsgrundlage in den Interviews genutzt wurden. Abbildung 39 zeigt einen Ausschnitt aus der Conceptmap, die auf Basis des Interviews mit dem Teilprojektbearbeiter des TP A1 „Keramische Komponenten im trockenlaufenden Kupplungssystem“ erstellt wurde. Der Ausschnitt zeigt die Produktstruktur einer Automobilkupplung als Teil des Erklärungsmodells für das Wissen aus dem Teilprojekt.

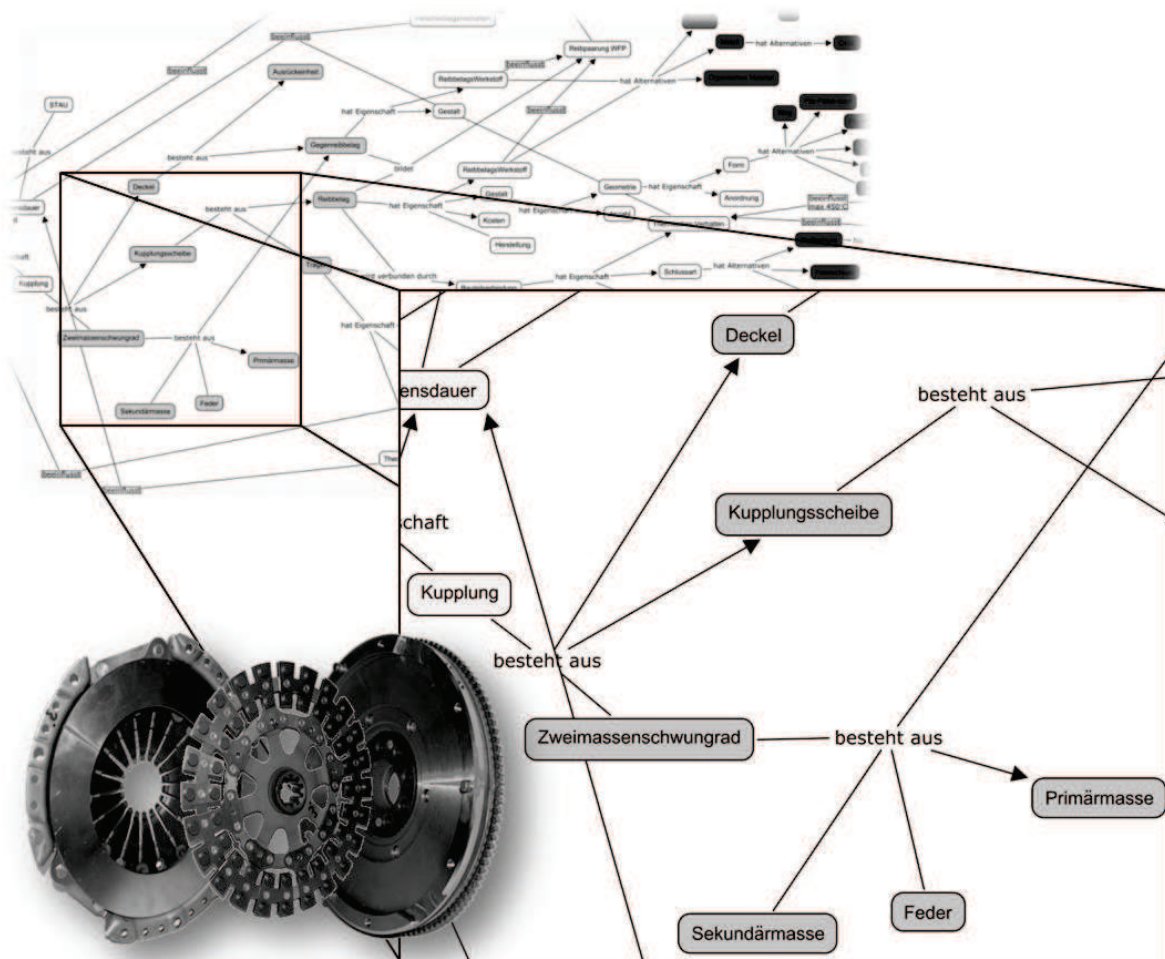


Abbildung 39 Ausschnitt aus einer Conceptmap auf Basis des Interviews mit dem Teilprojektbearbeiter des TP A1 „Keramische Komponenten im trockenlaufenden Kupplungssystem“

Entsprechend des Umfangs der Interviews und der resultierenden Transskripte ergab ein einzelnes Interview eine Conceptmap von bis zu 150 Begriffen und 300 Beziehungen zwischen den Begriffen. Wurde ein erneutes Interview mit einem Domänenspezialisten durchgeführt, wurde die existierende Conceptmap in der Regel vor allem korrigiert und verdichtet und nur an einigen wenigen Stellen erweitert, sodass die Anzahl an Elementen in der Conceptmap dann nur noch geringfügig anstieg.

Ein iteratives Vorgehen zwischen Wissensakquise und Konzeptualisierung ist für die Ontologieentwicklung unerlässlich.

Anhand der Strukturierung und der Darstellung des Wissens in den Conceptmaps wurden die Ergebnisse der Wissensakquise miteinander verknüpft. Da jedes Teilprojekt einen eigenen Forschungsschwerpunkt hatte, lagen die Überschneidungsbereiche in den meisten Fällen im Bereich des Allgemeinwissens, auf dem die Forschungsinhalte aufbauen. Die Abbildung dieses Wissens in der Ontologie war daher sowohl für die Wissensbereitstellung für domänenfremde Nutzer als auch für die Verknüpfung der spezifischen Forschungsergebnisse und Gestaltungshinweise erforderlich. In den verschiedenen Teilprojekten wurde es mit den gleichen Verständnismodellen, jedoch meist unter der Verwendung unterschiedlicher Begriffe erklärt. Für die Verknüpfung des Wissens über die Conceptmaps wurde daher vor allem nach Synonymen in den Conceptmaps gesucht (siehe Abbildung 40). Inwiefern auf diese Weise gefundene Begriffe tatsächlich synonym verwendet wurden oder eine leicht abweichende Bedeutung oder einen anderen Kontext haben, wurde ggf. durch iterative Wissensakquiseaktivitäten verifiziert.

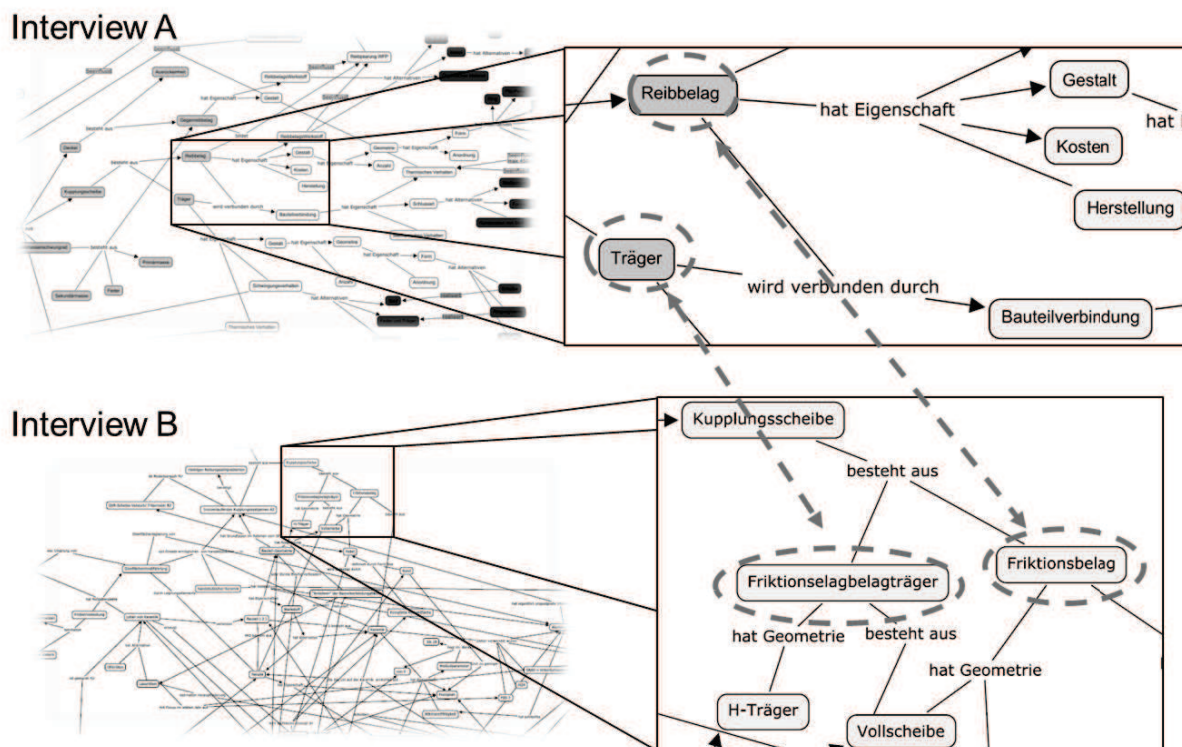


Abbildung 40 Verknüpfung von Conceptmaps verschiedener Interviews über Synonyme Bezeichnungen

Der Bezug zwischen dem Wissen im Sonderforschungsbereich 483 und allgemeinem Ingenieurwissen war kompliziert und umfangreich. Jedoch lag das Wissen bezüglich keramiktgerechter Gestaltung nahezu immer im Detail. Um dieses detaillierte Wissen

bereitzustellen und auf neue Anwendungsfälle zu übertragen, musste der detaillierte Kontext in der Ontologie erfasst und explizit abgebildet werden. Um das Gestaltungswissen auf detaillierter Ebene in der Ontologie abzubilden, war so eine sehr umfangreiche Ontologie erforderlich. Entsprechend der Vorgehensweise in Abschnitt 4 wurden daher zunächst Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Formalisierung anhand einer Ontologie mit begrenztem Umfang analysiert.

5.4 Formalisierung der K-KIS-Ontologie

Für die Formalisierung der Ontologie in F-Logic wurde der Editor Ontostudio© genutzt. Die graphische Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 41) mit den Ansichten und Bearbeitungsmöglichkeiten der Ontologieelemente in der Gesamtliste (1) und der objektorientierten Auflistung (2) und einer graphischen Visualisierung (3) der Ontologie erleichterte die Erstellung und Modifikation umfangreicher Ontologien.

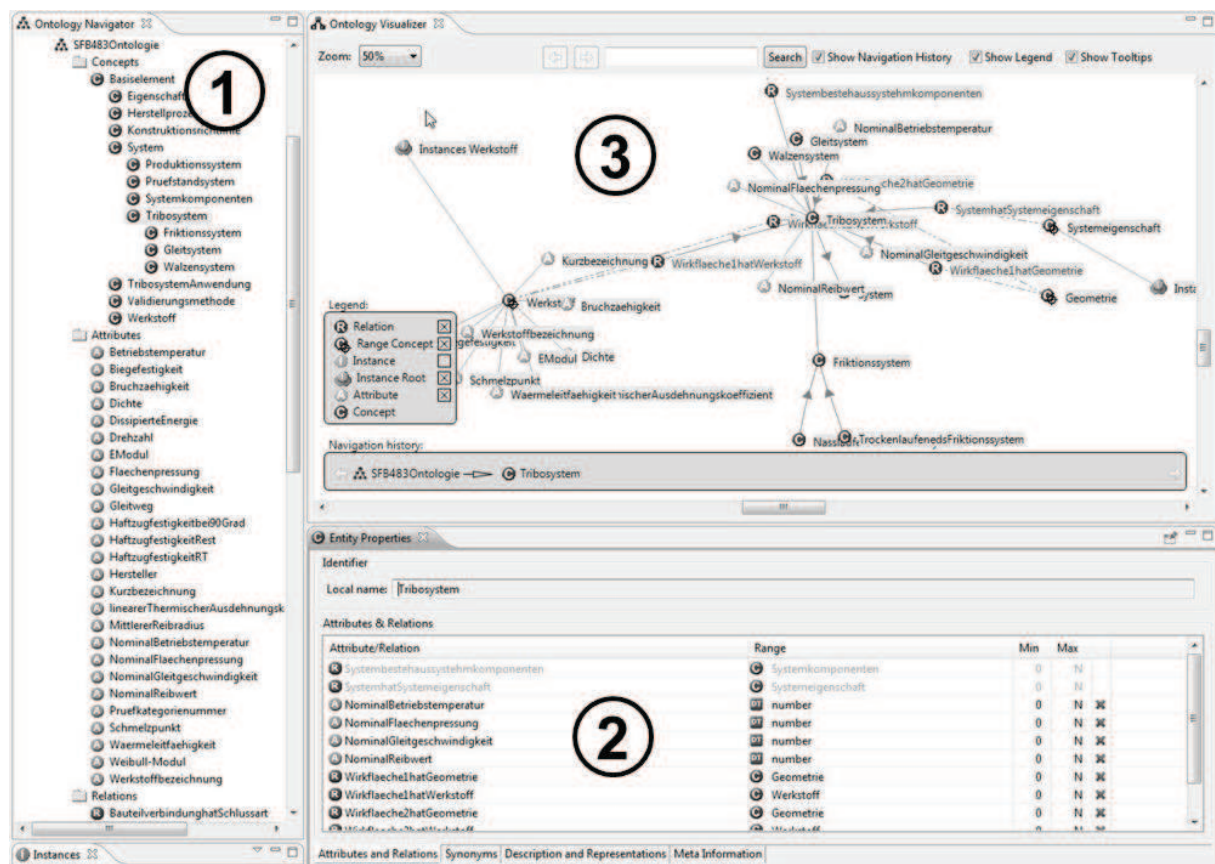


Abbildung 41 Benutzeroberflächen des Ontologieeditors Ontostudio©

Die Struktur der Konzeptualisierung konnte in der Regel nicht unverändert in der formalen Ontologiesprache abgebildet werden. So waren Begriffe und Zusammenhänge in einer Conceptmap nicht automatisch als Konzepte und Relationen in F-Logic abbildbar, sondern wurden je nach Bedarf in anderen Elementen dargestellt. Der Begriff „Kosten“ in Abbildung 40 (Interview A) konnte zum Beispiel genauso gut als Attribut in der F-Logic abgebildet werden. Die flexible Anpassung der Bedeutung

und des Abstraktionsgrades von Begriffen je nach Problemstellung, wie sie ein Mensch bei der Kommunikation intuitiv verwendet, war in einer formalen Ontologie nicht abbildbar. Durch die nun eindeutige Beschreibung der Konzepte, Attribute und Relationen wurde der Abstraktionsgrad dieser Elemente eindeutig festgelegt. Das bedeutete entweder eine deutliche Einschränkung der Aussagekraft der Ontologie oder aber einen riesigen Aufwand bei der weiteren Ontologieentwicklung. Offensichtlich wurde dabei, dass „*es nicht die eine richtige und optimale Ontologie für eine Domäne gibt*“.³⁸⁶ Wie die Begriffe und Beziehungen in der formalen Ontologiesprache abgebildet wurden, war auch von der Formalisierungssprache und der späteren Anwendung abhängig und wurde von den Ontologieentwicklern festgelegt.

Das Abwägen verschiedener Lösungsmöglichkeiten erforderte fundierte Kenntnisse bezüglich des abzubildenden Wissens, der verwendeten Formalisierungssprache und der späteren Softwareanwendung. Da den Domänenspezialisten in der Regel die Kenntnisse zu den letzten beiden Aspekten fehlten, konnte die formalisierte Ontologie nur bedingt mit ihnen diskutiert werden. Trotz vielfältiger softwaretechnischer Unterstützung blieb die Ontologieformalisierung also sehr schwierig und umfangreich.

Zur Abschätzung der Einflüsse der Softwareanwendung auf die Ontologie wurden durch die Implementierung einfacher Testontologien in der späteren Softwareanwendung Semantic-Wiki for SharePoint© und durch intensive Rücksprache mit dem Softwareanbieter Erfahrungen gesammelt. Hier zeigte sich, dass sich signifikante Einschränkungen ergaben. Für die Softwareimplementierung der Ontologie war es erforderlich, dass diese genau ein Basiskonzept aufwies, welchem dann in der Datenbank Eigenschaften zugewiesen wurden, so zum Beispiel, dass es über eine semantische Wikiseite angezeigt werden sollte. Das Basiskonzept vererbte diese Eigenschaften dann auf die anderen hierarchisch untergeordneten Konzepte. In der Softwareanwendung wurden bestimmte Datentypen-Bezeichnungen wie „Person“ oder „Dokument“ bereits verwendet. Die Verwendung dieser Begriffe als Konzeptbezeichnungen konnte zu Konflikten in der späteren Implementierung führen. Gleichlautende Bezeichnungen in verschiedenen Kategorien sind daher zu vermeiden. Die fertige formale Ontologie wurde aus dem Ontologieeditor exportiert und in der Softwareanwendung für die automatische Erstellung der Datenbankstruktur genutzt. Sobald erste Datensätze in der Softwareanwendung angelegt wurden, konnte die Datenbankstruktur nicht mehr verändert werden. Das

³⁸⁶ Noy/McGuinness 2001 „...there is no single correct ontology for any domain.“

hieß, dass ab diesem Zeitpunkt jegliche Änderung an der Ontologie eine vollständig neue Implementierung der Softwareanwendung zur Folge hat. Auf Nachfrage empfahl der Softwareanbieter daher, auch bei großen Ontologieentwicklungsprojekten eine Zahl von ca. 60 Konzepten in der formalen Ontologie nicht zu überschreiten. Ein iteratives Vorgehen, wie es für die Ontologieentwicklung zur Bereitstellung von Wissen erforderlich ist, war mit der Implementierung also nicht mehr möglich. Diese Einschränkung stand in direktem Widerspruch zu den Anforderungen der Wissensbereitstellung in einer Ontologie.

Detailliertes Gestaltungswissen direkt in einer formalen Ontologie abzubilden war also möglich, aber sehr aufwändig und hatte sehr umfangreiche Ontologien zur Folge. Eine Implementierung einer derartigen Ontologie durch existierende Anwendungssoftware schien auf Basis des Stands der Technik und auch des Standes der Forschung der Softwareentwicklung nicht möglich.

Um den Aufwand für die spätere Implementierung in ein Datenbanksystem in einem akzeptablen Rahmen zu halten, ist die Anzahl der Ontologieelemente zu begrenzen. Eine Anzahl von ca. 60 Konzepten ist dabei möglichst nicht zu überschreiten. Kann der gewünschte Nutzen des ontologiebasierten Systems nicht durch eine entsprechende Ontologie abgebildet werden, so ist dieser, falls möglich, einzuschränken oder das Ontologieentwicklungsprojekt grundsätzlich in Frage zu stellen.

Als Alternative für das K-KIS im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 483 wurde daher ein anderer Weg gewählt, welcher auf Basis dieser Erkenntnisse den zur Verfügung stehenden Ressourcen und Randbedingungen angemessen war, nämlich durch die Beschränkung auf das explizite Wissen. Das existierende explizite Wissen, in Form der vorhandenen Berichte und Veröffentlichungen sollte nun durch die zu entwickelnde Ontologie verfügbar gemacht werden. Indem diese als Wissensschema diente, konnten die Veröffentlichungen anhand ihrer Inhalte in den keramikspezifischen Kontext gesetzt werden. Als relevante Konzepte der Ontologie dienten dabei die strukturierenden Begriffe der Wissensdomäne und deren grundlegende Beziehungen, wie sie in den SFB-Anträgen aufgeführt waren. Hinzu kamen die Konzepte „Konstruktionsregel“ und „Veröffentlichungen“. Im späteren K-KIS enthielten die Instanzen der Ontologiekonzepte lediglich grundlegende Informationen und verwiesen auf relevante Veröffentlichungen, auf deren Basis sich ein Nutzer das bezogene Wissen erarbeiten konnte. Die Ontologie diente so mehr als Metadaten-schema und Zugriffsmöglichkeit auf Wissen, als dass das Gestaltungswissen selbst direkt in der Ontologie modelliert war.

Die Beziehungen der Konzepte wurden auf der Grundlage der Interviewergebnisse weiter ergänzt. Zusätzlich dazu wurden parallel Attribute der Konzepte notiert, sofern sie bei der Analyse und in den Interviews und den damit verbundenen Diskussionen auftauchen. Die Formalisierung der Ontologie in F-Logic erfolgte entsprechend der Empfehlungen in Abschnitt 4.4. Im Weiteren wurde die Ontologie in mehreren Iterationen weiter angepasst, um den inhaltlichen Anforderungen gerecht zu werden. Auf Basis der Analyse der Veröffentlichungsinhalte wurden die Konzepte und ihre Beziehungen auf Vollständigkeit überprüft und durch vielfache Diskussionen mit den zuvor interviewten Projektarbeitern aus den verschiedenen Disziplinen weiter korrigiert und verfeinert. Insbesondere die Relevanz verschiedener Konzepte und der Detaillierungsgrad waren von Interesse. Bei der Entscheidung über die Integration weiterer Konzepte, Attribute und Relationen stand dabei immer die Frage im Vordergrund, wie sie die problemspezifische Bereitstellung der Veröffentlichungen verbessern. Die fertige formale Ontologie definierte in den Konzepten die für die Wissensdomäne relevanten Elemente, deren inhaltliche Struktur über die Attribute und ihren Kontext über die Relationen. Für das K-KIS hatte die Konzeptionshierarchie der Ontologie daher den folgenden Aufbau, wie in Abbildung 42 dargestellt (nur die ersten drei Hierarchieebenen). Die vollständige formale Ontologie für das K-KIS umfasste 276 Zeilen, und sie ist im Anhang beigefügt.³⁸⁷

³⁸⁷ Siehe Anhang 176, S. 176.

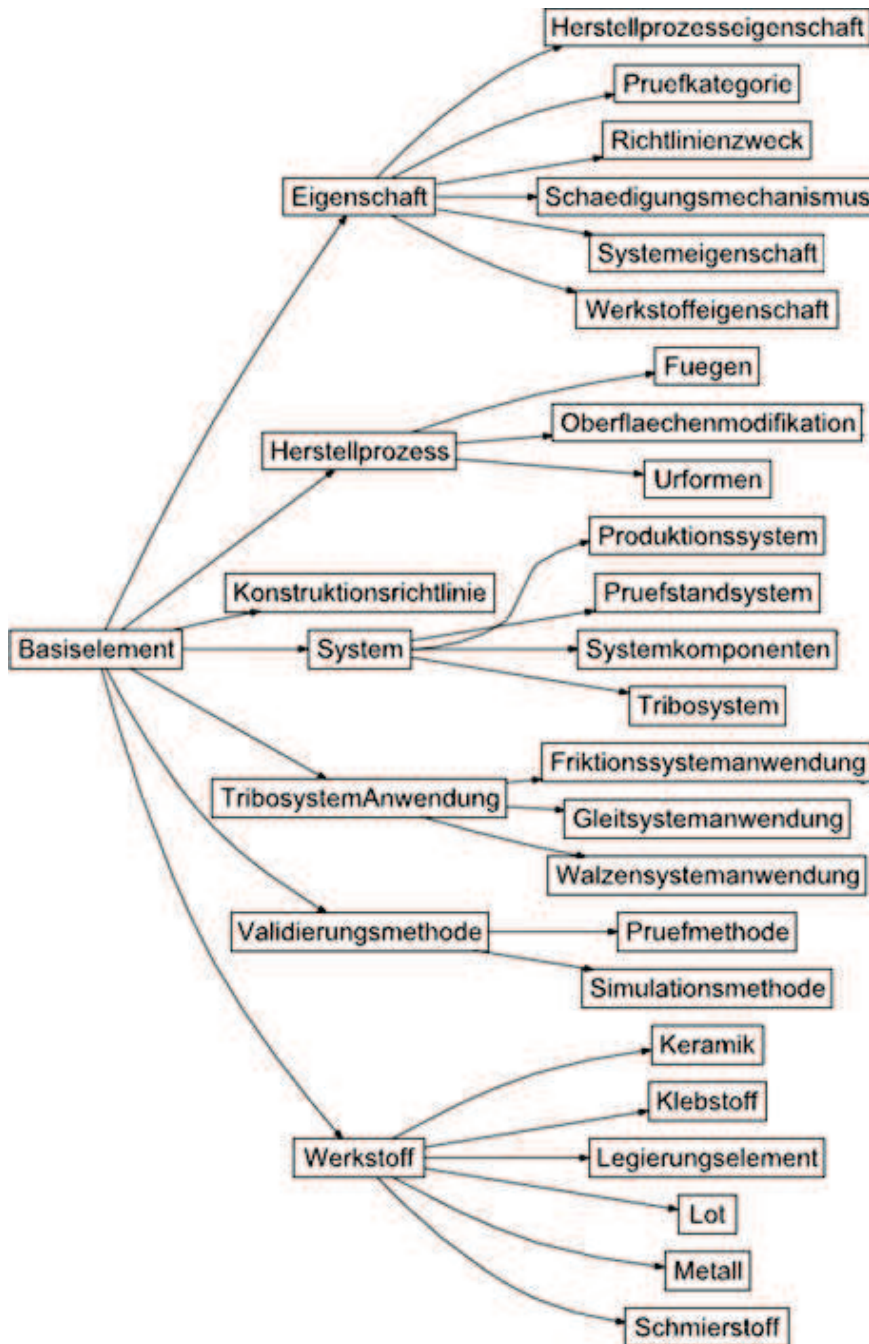


Abbildung 42 Schematische Darstellung der Konzepthierarchie der keramikspezifischen Ontologie

Vereinfachte Darstellungen der Ontologie wie in Abbildung 42 dienen auch dem Abgleich der formalen Ontologie mit der Konzeptualisierung und der Wissensakquisition. Anders als der Quelltext der Ontologie in der Formalisierungssprache F-Logic war eine derartige Darstellung leicht verständlich und konnte als Grundlage für die Diskussion der Ontologieinhalte mit den Teilprojektbearbeitern verwendet werden. Dadurch konnten die Vollständigkeit und die inhaltliche Konsistenz der Ontologie überprüft werden. Die formale Konsistenz der Ontologie konnte softwareunterstützt durch die „Validate“-Funktion des Ontologieeditors sichergestellt werden. Die korrekte Formulierung der Ontologie in der F-Logic-Syntax wurde ebenso durch die

Verwendung des Ontologieeditors sichergestellt. Durch die graphische Benutzeroberfläche war es sogar möglich, eine Ontologie in einer Formalisierungssprache zu modellieren, ohne deren genaue Syntax zu kennen. Ebenso konnten schon im Ontologieeditor Instanzen definiert werden und testweise Queries (Anfragen) durchgeführt werden, um die Funktionalität der Ontologie bei der ontologiebasierten Suche im K-KIS zu simulieren. Die Queries orientierten sich an den Kompetenzfragen aus der Spezifikation und unterstützten so auch die inhaltliche Validierung der Ontologie. Die tatsächliche Funktionalität der Ontologie in der Softwareanwendung konnte jedoch erst bei der Implementierung überprüft und sichergestellt werden.

5.5 Implementierung des K-KIS

Die in Ontostudio erstellte formale Ontologie wurde als eine oxml-Textdatei³⁸⁸ exportiert und über den vorgesehenen Ontologie-Uploader in das SharePoint-System hochgeladen. Dort wurde sie in Form einer Metaontologie abgebildet. Aus dieser wurden zunächst für den MS SharePoint© -Server und daraus für die gewählten MS SharePoint© Webseitensammlungen Datentypen, hier als Inhaltstypen (englisch: „Content Types“) bezeichnet, auf Basis der Konzepte definiert und die zugehörigen Inhaltstypen-Eigenschaften aus den Attributen und Relationen abgeleitet, sodass die Keramik-spezifische Ontologie in der SharePoint-Umgebung abgebildet werden konnte (siehe Abbildung 43).

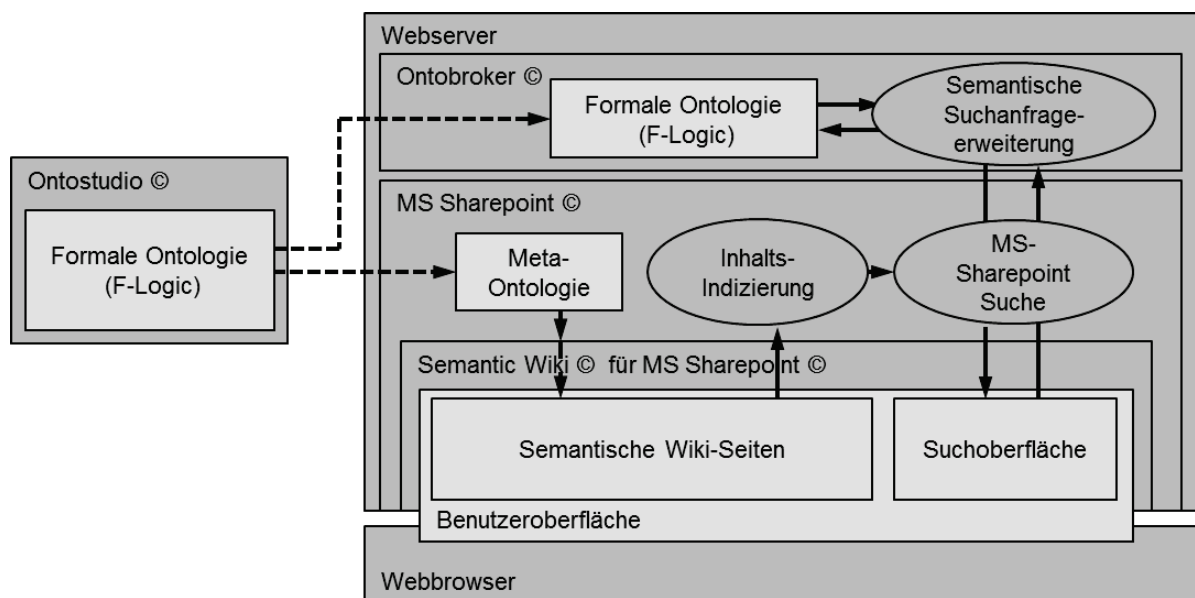


Abbildung 43 Ontologieimplementierung und Softwarestruktur des K-KIS

³⁸⁸ OXML ist ein Format, in dem Ontologien in Textdateien abgespeichert werden. Die Bezeichnung ist angelehnt an die Extensible Markup Language XML zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten.

Für das K-KIS wurde schließlich eine Webseitensammlung mit dem Addon Semantic Wiki für MS Sharepoint© bereitgestellt. In dieser Webseitensammlung wurde für jedes Konzept eine eigene Wikiseitenvorlage programmiert. Diese Vorlage definierte die visuelle Darstellung der Instanzen im Webbrowser als Wikiseite. In der Vorlage (siehe Abbildung 44) werden also die Anordnung der Informationsinhalte (1), der zugehörigen Attributs- und Relationsangaben entsprechend der Ontologie (2) festgelegt. In den Vorlagen konnten unterschiedliche Layouts für Anzeige- und Bearbeitungsmodus der Instanzen definiert werden. So konnten beispielsweise für eine Instanz Attributwerte zugewiesen werden, die nur für die ontologiebasierte Suche genutzt wurden, nicht aber für den späteren Nutzer sichtbar waren.

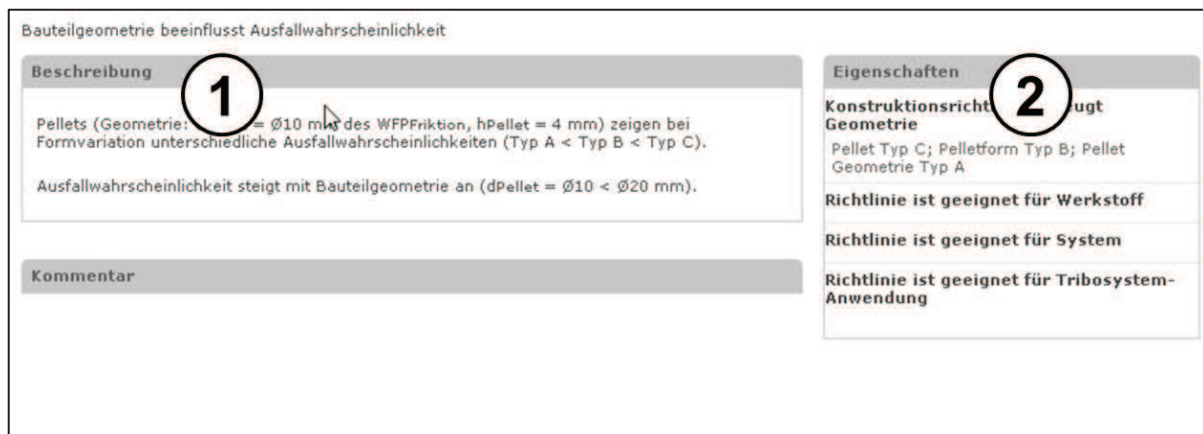


Abbildung 44 Anzeigemodus einer semantischen Wikiseite des K-KIS

Sobald die Seitenvorlagen definiert waren, konnten Informationsinstanzen erzeugt werden. Jede Veröffentlichung wurde als eigene Wikiseite erzeugt. Diese enthielt gemäß der Vorlage eine Kurzfassung des Inhalts, einen Link auf die Veröffentlichung als PDF-Datei und Verknüpfungen zu Inhaltsinstanzen der Ontologie. Diese Inhaltsinstanzen enthielten Konstruktionsregeln, Fertigungsverfahren, Werkstoffe etc. Sie erhielten eine kurze Beschreibung und waren mit denjenigen entsprechenden Veröffentlichungen verknüpft, in denen sie Erwähnung fanden. Ebenso wurden die Inhaltsinstanzen entsprechend der in der Ontologie vorgesehenen Relationen untereinander verknüpft. Dazu war die Kenntnis der Interviews bzw. ein Sichten der Veröffentlichungen erforderlich.

Für die Implementierung eines ontologiebasierten Systems sind fundierte Kenntnisse bezüglich aller beteiligten Softwarekomponenten und der verwendeten Programmiersprachen erforderlich. Diese müssen entweder in der Organisation vorhanden sein oder langfristig projektbegleitend hinzugekauft werden. Ohne die entsprechende Softwarekompetenz ist ein immer erforderliches gezieltes Debugging zur Sicherstellung der Funktionalität des Systems nahezu unmöglich.

Die Seitenvorlagen unterstützen den Ontologieentwickler beim Erzeugen der Ontologieinstanzen dadurch, dass für Relationen und Attribute über die entsprechenden Felder und Auswahldialoge im Bearbeitungsmodus der semantischen Wikiseiten nur zulässige Werte zugewiesen werden können (siehe Abbildung 45). Das Erzeugen inkonsistenter Zusammenhänge war bei der Implementierung dadurch nicht möglich. Nachteilig dabei war jedoch, dass - bedingt durch die Auswahldialoge - zwei Instanzen zunächst getrennt erzeugt werden mussten und erst danach eine Relation zwischen ihnen zugewiesen werden können. Dies machte das Erzeugen von vernetzter Information aufwändiger als in einfachen Wikiseiten, bei denen Verlinkungen auch auf noch nicht vorhandene Seiten definiert werden können.

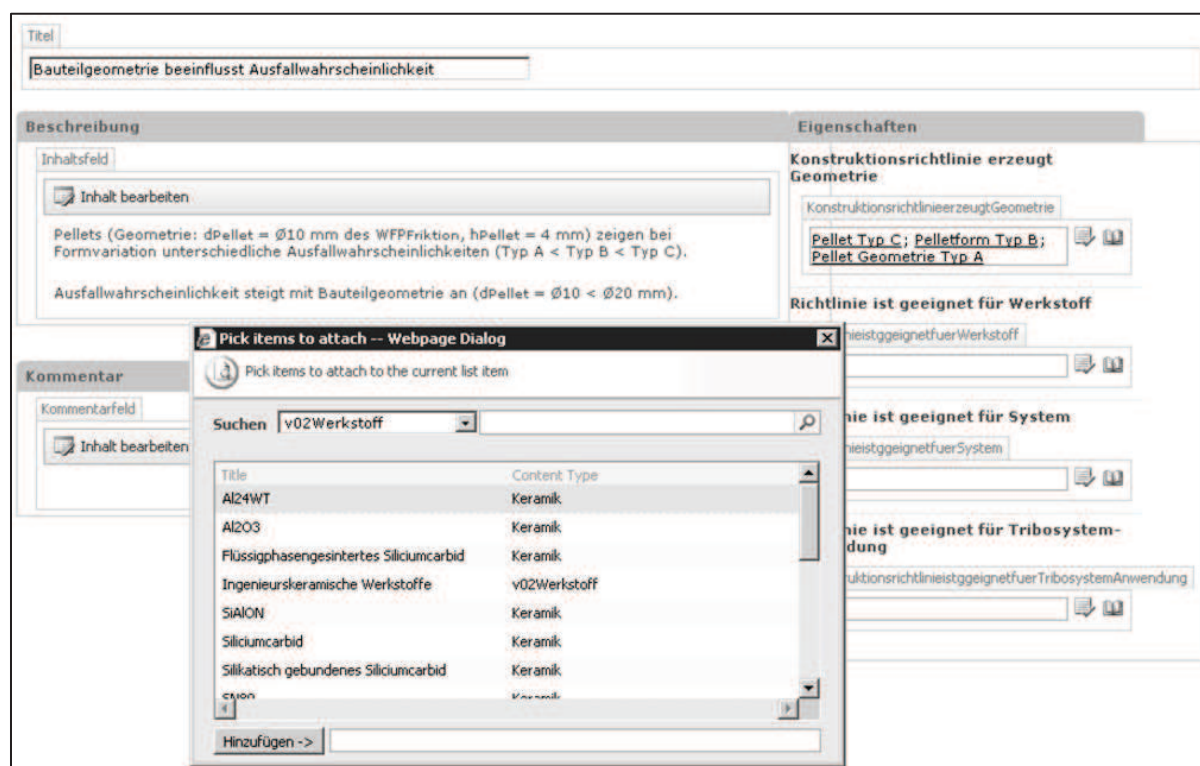


Abbildung 45 Bearbeitungsmodus einer semantischen Wikiseite des K-KIS mit geöffnetem Auswahldialog für die Zuweisung eines Relationswertes

Bei der Instanzierung der ontologiebasierten Datenbank wurde auch die Vollständigkeit der Ontologie geprüft und ihre Fähigkeit, die Veröffentlichungen und Konstruktionsregeln mit ihrem Kontext abzubilden. An den Punkten, an denen das nicht ausreichend möglich war, musste das Ontologieschema in iterativen Schleifen angepasst werden. Dabei hatte die Softwarestruktur tiefgreifende Einschränkungen für den Ontologieentwicklungsprozess zur Folge. Während das Ergänzen von weiteren Konzepten, Attributen und Relationen durch eine entsprechende Modifikation in dem Ontologieeditor, einem Update der Metaontologie und dem Anpassen bzw. Ergänzen der benötigten Wikiseitenvorlagen verhältnismäßig einfach erreicht werden konnte, war das Ändern oder Löschen von Ontologieelementen sehr zeitaufwändig und fehleranfällig. Hierzu mussten manuell alle zugehörigen Instanzen

gelöscht werden und an allen Stellen in der Softwarearchitektur die entsprechenden Einträge manuell gelöscht bzw. angepasst werden. Daher war es besonders wichtig, zu Beginn der Ontologie-Implementierung eine möglichst ausgereifte Ontologie zu haben, um den weiteren Änderungsbedarf möglichst gering zu halten. Um dies zu erreichen, wurden, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, schon zu einem frühen Zeitpunkt des Ontologieentwicklungsprojekts - sobald eine erste einfache und unvollständige Version der K-KIS-Ontologie existierte - eine erste Testimplementierung mit Beispielinstanzen³⁸⁹ durchgeführt, um auf der einen Seite die Funktionalität der Softwarestruktur und auf der anderen Seite der entsprechend der besonderen Anforderungen der Softwareplattform und der gewünschten Funktionalität korrekte Aufbau der Ontologie zu überprüfen. So konnten frühzeitig Konzeptbezeichnungen abgeändert werden, die in Semantic-Wiki for SharePoint© unzulässig waren, weil sie entweder schon belegt waren oder aus zu langen Zeichenketten bestanden. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde immer wieder der jeweils aktuelle Stand der K-KIS-Ontologie testweise implementiert. Fehler in der Ontologieanwendung konnten so leichter auf die jeweils letzten Änderungen an der Ontologie zurückgeführt werden. Die Erfahrungen aus weiteren Ontologieentwicklungsprojekten³⁹⁰ zeigten, dass dieser Zusatzaufwand geringer war als eine Fehlersuche und Änderung einer bereits fertig implementierten Ontologie.

Eine frühzeitige testweise Implementierung früher Versionen der späteren Ontologie mit einigen wenigen Testinstanzen ist mit verhältnismäßig geringem Aufwand verbunden, erhöht die Reife der Ontologie und erleichtert die finale Implementierung.

Für die K-KIS-Ontologie wurden alle Veröffentlichungen als Instanzen erzeugt und können mit mindestens einer Inhaltsinstanz verknüpft werden, sodass eine für die Wissensbereitstellung minimal erforderliche semantische Vernetzung gegeben war. Die Richtigkeit der Wikiseiteninhalte und deren Verknüpfung anhand der Ontologie wurden ausschnittsweise durch die Teilprojektbearbeiter überprüft.

Als Letztes wurde die ontologiebasierte Suche implementiert, die es dem späteren Nutzer erlaubte, auf Basis der Ontologie auf die Instanzen zuzugreifen. Dazu wurde der Suchservice SemanticMiner© als eigene Webanwendung auf dem Datenbank-

³⁸⁹ Unter Beispielinstanzen werden hier Instanzen verstanden, deren Relations- und Attributwerte nur soweit angegeben werden, um formale und funktionale Korrektheit einer Ontologie in einer Softwareanwendung zu analysieren, ohne Anspruch auf inhaltliche Korrektheit und ohne dass die Ergebnisse der Wissensakquise bei ihrer Generierung berücksichtigt werden müssen.

³⁹⁰ Siehe Abschnitt 4.6.

server implementiert, und die Ontologie wurde auch dorthin hochgeladen. Für die Benutzeroberfläche in MS Sharepoint© wurden Suchseiten erstellt, und auf dieser wurden entsprechend der K-KIS-Ontologie sogenannte Suchwebparts³⁹¹ konfiguriert, die mit dem Suchservice kommunizierten. Im K-KIS wurden zwei verschiedenen Suchseiten mit zwei Arten der ontologiebasierten Suche bereitgestellt: semantische Freitextsuche und semantische Kategoriensuche. Ein Nutzer stellte über die Suchwebparts auf den Suchseiten eine semantische Suchanfrage an das System.

Bei der ontologiebasierten Freitextsuche (siehe Abbildung 46) konnte der Nutzer in ein Suchfeld (1) einen beliebigen Suchbegriff eingeben. Während des Eintippens des Begriffes erhielt der Nutzer Suchbegriffvorschläge aus der Ontologie im Sinne einer Autokorrektur und -vervollständigung, welche er auswählen konnte aber nicht musste. Die Ergebnisse seiner Suchanfrage wurden als Liste von Links auf die entsprechenden Ontologieinstanzen (3) angezeigt. Die Ergebnisliste konnte nun durch die Auswahl semantischer Zusatzinformationen in Form von Attributs- und Relationswerten durch den Multi-Kategorien-Filter (4) entsprechend der Problemstellung und des Verständnisses des Nutzers weiter eingeschränkt werden.

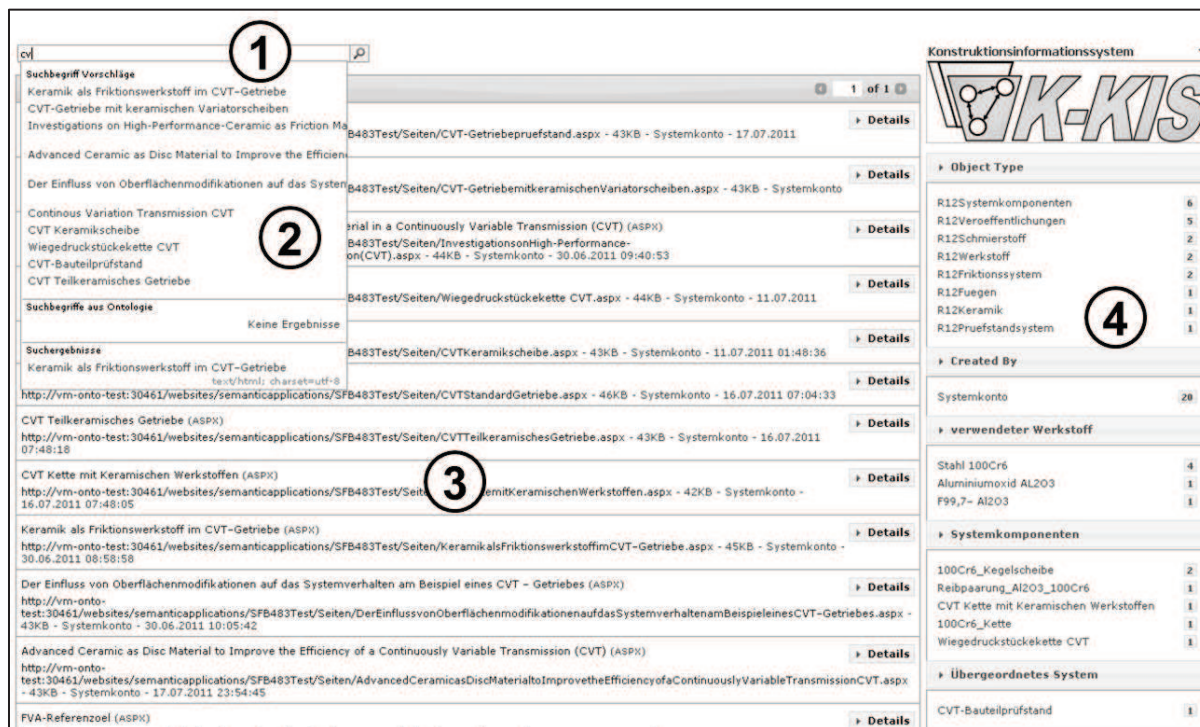


Abbildung 46 Semantische Freitextsuche im K-KIS

Gab der Nutzer zum Beispiel als Suchwort „Löten“ an, so bekam er basierend auf der Ontologie Suchbegriffvorschläge wie „Lötverbindung, Aktivlot oder Keramiklöten“

³⁹¹ Webparts dienen der Anzeige und der Manipulation von Inhalten auf einer Webseite.

angeboten und hatte die Möglichkeit zu spezifizieren, ob er nach Informationen zu Gestaltungshinweisen für Lötverbindungen suchte, nach geeigneten Lötprozessen oder nach Werkstoffen, Keramiken oder Loten, welche für Lötverbindungen geeignet waren. Des Weiteren konnte er einschränken, für welche Arten von Friktionssystem er Informationen suchte, welche Werkstoffe er verwenden wollte und welche Fertigungsverfahren ihm zur Verfügung standen. Basierend auf seinem eigenen Verständnis wurde er auf diese Art auch zu Informationen aus anderen Disziplinen geführt, welche mit seiner Problemstellung verknüpft waren, ohne dass er die domänenspezifischen Schlagwörter kennen musste. So hatte der Nutzer die Möglichkeit, direkt auf problemspezifische interdisziplinäre Informationen zuzugreifen, ohne sich durch eine Vielzahl möglicher Ergebnisse durcharbeiten zu müssen. Zusätzlich konnte er noch den Verknüpfungen auf den Wikiseiten selber folgen, um bei Bedarf weitere Information zu erhalten.

Die Kategoriensuche war prinzipiell identisch aufgebaut. Hier gab ein Nutzer jedoch keinen freien Suchbegriff ein, sondern wählte ein Konzept aus der dargestellten Konzepthierarchie der Ontologie und erhielt alle zugehörigen Instanzen entsprechend der von ihm angegebenen semantischen Einschränkungen im Multikategorienfilter.

Bei beiden Sucharten wurde eine um die semantische Information aus den Webparts erweiterte Suchanfrage erstellt, an den Suchservice gesendet und dort entsprechend der Ontologie ausgewertet (siehe Abbildung 43). Auf Basis dieser Auswertung gab die standardmäßig vorhandene MS-Sharepointsuche, die regelmäßig alle Datenbankinhalte und deren Attributs- und Relationswerte scannt, genau die Datenbankeinträge an das Ergebnislisten-Webpart zurück, die entsprechend der Auswertung der semantischen Anfrage entsprachen. Mit der ontologiebasierten Auswertung der Anfragen durch den Webservice wurden auch solche Zusammenhänge erfasst, die nicht direkt durch einen Autor angegeben worden waren, sondern nur durch die Ontologie logisch abgeleitet werden konnten. So wurden dabei beispielsweise die Transitivität oder die Inversivität von Relationen berücksichtigt. Das heißt, dass die Software im Sinne von Inferenz auf Basis der Ontologie Schlüsse ziehen konnte. Durch den Suchservice konnten prinzipiell auch in der Ontologie definierte spezifische Regeln³⁹² ausgewertet werden. Die Kommunikation zwischen dem Suchservice und MS-Sharepoint© fand jedoch nicht direkt anhand der in der Ontologie festgelegten Bezeichnungen statt, sondern auf Basis der in MS-

³⁹² Siehe Abschnitt 2.3.2.

Sharepoint© bei der Implementierung der Ontologie erstellten URIs.³⁹³ Diese wurde in MS-Sharepoint© beim Erzeugen eines Objektes in der Datenbank automatisch generiert und diesem zugewiesen und entsprach nicht den Begriffen in der Ontologie. Für die Verwendung spezifischer Regeldefinitionen im semantischen Suchservice bedeutete das, dass nachdem die Implementierung der Ontologie in MS-Sharepoint© beendet war, die Bezeichnungen aus der Ontologie in der Regeldefinition manuell durch die zugehörige URI ersetzt werden mussten. Da dies mit sehr großem Aufwand verbunden war, wurde von der Definition spezifischer Regeln für die K-KIS-Ontologie abgesehen.

Eine abschließende Evaluation des K-KIS-Prototyps erfolgte durch die Ontologieentwickler und teilweise auch die Domänenspezialisten anhand der in der Spezifikation definierten Kompetenzfragen. Dabei zeigte sich, dass die ontologiebasierte Suche zu den Kernbegriffen der Kompetenzfragen Ergebnisse lieferten. Diese führten dann direkt zu Veröffentlichungen, welche Informationen beinhalteten, ein Erarbeiten des erforderlichen Wissens ermöglichten oder zumindest erleichterten. Durch die semantische Unterstützung der Suche auf Basis der Ontologie wurde die Anzahl der Suchergebnisse zu einer Anfrage deutlich eingeschränkt und ermöglichte so einen zielgerichteten Zugriff auf relevante Informationen. Das verbesserte die Effektivität eines Wissensaustausches entsprechend der Kodifizierungsstrategie.

Eine tatsächliche endgültige Validierung des Wissensbereitstellungssystems wäre - bedingt durch die Schwierigkeit der Bewertung eines Wissensaustausches³⁹⁴ - nur durch umfangreiche Vergleichsstudien möglich gewesen. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung des Projektes wurde eine derartige Validierung des K-KIS-Prototyps nicht durchgeführt.

5.6 Fazit der Ontologieentwicklung für das K-KIS

Die Ontologieentwicklung für das K-KIS im Rahmen des Teilprojektes A8 des Sonderforschungsbereiches 483 hat gezeigt, dass interdisziplinäres keramikspezifisches Gestaltungswissen durch eine Ontologie erfasst und über ein ontologiebasiertes System bereitgestellt werden kann. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Anforderungen an eine Ontologie zur Bereitstellung von detailliertem Gestaltungswissen nicht mit den Anforderungen für die Implementierung in ein dem Stand der Technik entsprechendes Datenbanksystem vereinbar waren.

³⁹³ Eine URI (Uniform Resource Identifier) ist eine Zeichenfolge, die zur Identifikation einer Ressource im World Wide Web genutzt wird.

³⁹⁴ Siehe Abschnitt 2.2.2.

Das im SFB erforschte Gestaltungswissen ist sowohl Disziplinen-übergreifend als auch sehr spezifisch und tiefgehend. Für die Bereitstellung des Wissens an Nutzer ohne spezifisches Vorwissen muss die Ontologie auch an allgemeines Ingenieurwissen anknüpfen. Das Erfassen und Strukturieren dieses sowohl sehr breiten als auch sehr detaillierten Wissens hatte ein umfangreiches und kompliziertes Wissensmodell zur Folge. Die verschiedenen, während der Ontologieentwicklung durchgeführten, Formalisierungsaktivitäten zeigten, dass auch detailliertes und kompliziertes Gestaltungswissen in einer Ontologie in der formalen Ontologiesprache F-Logic abbildbar ist. Nicht zuletzt, weil in einer formalen Ontologiesprache nahezu beliebige andere mentale Verständnismodelle abgebildet werden können. Eine Ontologie, die breites und detailliertes Wissen gleichermaßen umfasst und verbindet, ist jedoch sehr umfangreich. Es muss auch angemerkt werden, dass die in einer Ontologie zwingend eindeutigen Definitionen von Konzepten nicht den flexibel verwendeten Bedeutungen von Begriffen entsprechen, wie sie Wissensexperten bei der Kommunikation einsetzen.³⁹⁵ Die eingeschränkte Syntax von F-Logic machte zudem bei komplizierten Zusammenhängen umständliche Umgehungsmodellierungen mit zusätzlichen Konzeptdefinitionen erforderlich. Dies trug weiter zu der Notwendigkeit eines großen erforderlichen Umfangs einer Ontologie zur Formalisierung von keramikspezifischem Gestaltungswissen bei.

Die Ontologieimplementierung in ein dem Stand der Technik entsprechendes ontologiebasiertes Datenbanksystem brachte dagegen massive Einschränkungen mit sich: 150 Begriffe aus nur einem Interview mit einem Domänenspezialist aus einem Teilprojekt von insgesamt sechzehn standen maximal 60 Konzepten entsprechend einer Empfehlung der Fachleute des kommerziellen Softwareanbieters für die Implementierung in ein Datenbanksystem gegenüber. Diese Einschränkung war hauptsächlich durch den komplexen Implementierungsprozess in mehreren Schritten und an mehreren Stellen im Datenbanksystem und statischen Aufbau aktueller Datenbanksoftware bedingt. Die vielen Einflussfaktoren auf einen Ontologieentwicklungsprozess aus der am SFB beteiligten Wissensdomänen, der formalen Ontologiesprache F-Logic und der Ontologieanwendung im K-KIS waren durch einen Ontologieentwickler nur schwer vorhersehbar. Gerade bei der Formalisierung gab es keine eindeutig richtige Lösung.³⁹⁶ Die Ontologieentwicklung musste daher iterativ erfolgen. Genau dies war aber ab dem Zeitpunkt der Ontologieimplementierung so gut wie unmöglich. Da der Ontologie danach lediglich neue Elemente hinzugefügt nicht aber vorhandene editiert werden können: Daten in MS Sharepoint© werden

³⁹⁵ Vgl. Hayward et al. 1987.

³⁹⁶ Vgl. Noy/McGuinness 2001.

immer in mehreren Ebenen der Software erzeugt, deshalb ist ein Ändern oder Löschen vorhandener Daten mit großem Aufwand verbunden. Zudem waren durch die spezielle Softwarelösung aus mehreren Modulen vielfache manuelle Änderungen an nahezu allen Softwarekomponenten erforderlich. Durch die vielen beteiligten Softwarekomponenten konnten dabei entstehende Fehler auch bei fundierter softwaretechnischer Kenntnis nur sehr schwer lokalisiert werden, wie es sich trotz Unterstützung durch die Fachleute des Softwareanbieters bei der Ontologieimplementierung des K-KIS zeigte. Nach Angaben des Softwareherstellers sei daher in den meisten Fällen bei notwendigen Änderungen ein komplettes Neuaufsetzen des Datenbanksystems sinnvoller und effizienter.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde für die Bereitstellung des Wissens aus dem Sonderforschungsbereich 483 daher ein Ontologieschema bestehend aus einigen wenigen Konzepten entwickelt, welche die Abbildung der relevanten Kontextverknüpfungen erlaubte. Dieses Schema bildete die Grundlage für das ontologiebasierte K-KIS, welches das erforschte Wissen in Form von existierenden Veröffentlichungen bereitstellt. Die Besonderheit des K-KIS besteht darin, dass es den Nutzer in die Lage versetzt, basierend auf seiner spezifischen Problemstellung auf die für ihn relevanten existierenden Informationen aus den verschiedenen Disziplinen zuzugreifen und sich so keramikspezifisches Wissen anzueignen. Bezüglich der Wissensrepräsentation und -bereitstellung verbindet das System die einfache Bedienung eines Wikisystems mit der kontextbezogenen Informationsbereitstellung von ontologiebasierten Informationssystemen. Die webbasierte Oberfläche erlaubt eine intuitive Bedienung und eine einfache Einbindung in existierende Softwarestrukturen. Das Konstruktionsinformationssystem K-KIS leistet somit einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Bereitstellung des während des Sonderforschungsbereichs 483 gewonnenen Wissens.

Produktentwicklungswissen, das sich stetig verändert und wandelt, kann nur sehr eingeschränkt und nur unter hohem Aufwand in einem ontologiebasierten System, das dem aktuellen Stand der Technik entspricht, abgebildet werden. Von der Abbildung von hochdynamischem Wissen in einem derartigen ontologiebasierten System ist generell abzusehen.

Die durch die Softwarestruktur bedingte Starrheit eines ontologiebasierten Systems erfordert nicht nur einen sehr eingeschränkten Ontologieumfang, sondern sie schränkt im selben Maße eine dynamische Weiterentwicklung des in dem System abgebildeten Wissens ein. Zwar können Wissensfragmente in Form der Ontologieinstanzen, dargestellt durch die Wikiseiten, beliebig hinzugefügt oder gelöscht werden. Die zugrunde gelegte Struktur des Wissens, d. h. die Art der Inhalte und deren

mögliche Eigenschaften und Zusammenhänge, ist jedoch in dem Ontologieschema festgehalten, welches nur unter sehr hohem Aufwand und keinesfalls stetig angepasst werden kann.

Die im Stand der Forschung vielfach bezeugte Eignung von Ontologien zum expliziten Abbilden und Bereitstellen von Wissen durch rechnerbasierte Systeme und die daraus auf prinzipieller Ebene abgeleiteten Potentiale für die wirtschaftliche Anwendung in Unternehmen³⁹⁷ müssen vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus diesem Projekt deutlich eingeschränkt werden.

³⁹⁷ Siehe Abschnitt 2.3.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Motiviert durch die Problematik der mangelnden Verfügbarkeit von Wissen zum Einsatz von Ingenieurkeramik als Konstruktionswerkstoff hatte diese Arbeit die Zielsetzung, einen Ansatz zur Ontologieentwicklung für die Bereitstellung von keramikspezifischem Gestaltungswissen zu erstellen.

Der dargelegte Ansatz baute auf dem Stand der Technik im Bereich Ontologien und Ontologieentwicklung auf und wurde an die besonderen Charakteristika von Gestaltungswissen in der Produktentwicklung entsprechend des aktuellen Stands der Entwicklungsprozessforschung angepasst.

Der Ansatz wurde bei der Entwicklung im Rahmen des Teilprojektes A8 „Ontologiebasierte Entwicklungsumgebung für hochbeanspruchte Systeme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ des Sonderforschungsbereiches 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ angewendet. Es sollte das Wissen, welches innerhalb des SFB483 erzeugt worden war, in einer Ontologie, die ein explizites gemeinsames Verständnis der SFB-Mitglieder darstellt, abgebildet werden und über das ontologiebasierte Keramik-Konstruktionsinformationssystem K-KIS bereitgestellt werden. Aus der Anwendung konnten wesentliche Rückschlüsse auf die in der Zielsetzung aufgeworfenen Fragestellungen gezogen werden.

Ontologien sind prinzipiell geeignet, Wissen explizit in Form eines gemeinsamen Verständnisses als Basis für einen Wissensaustausch abzubilden. Der Aufbau einer Ontologie als Netzwerk aus Begriffen, deren Bedeutungen und Kontextinformationen ähnelt der Struktur von Wissen. In Bezug auf interdisziplinäres Gestaltungswissen muss diese prinzipielle Eignung auf Basis der Erfahrungen während der K-KIS-Entwicklung jedoch eingeschränkt werden: *„Gestaltungswissen liegt immer im Detail“*³⁹⁸, Gestaltungswissen muss notwendig „tief“, ins Einzelne gehend sein. Andererseits hat es hier interdisziplinären Charakter, ist also zudem „breit“. Daher sind die Zusammenhänge zwischen den relevanten Inhalten oft sehr umfangreich und komplex zu beschreiben. Das Wissen liegt meist verteilt vor und kann nur iterativ erfasst werden. Je nach Domäne werden ähnliche und identische Begriffe mit teilweise abweichender Bedeutung verwendet. Konstrukteure variieren daher auch sowohl den Abstraktionsgrad als auch die Bedeutung von Begriffen bei der

³⁹⁸ Zitat Albert Albers.

Kommunikation je nach Situation und Problemstellung. Nur so schaffen sie es, den Spagat zwischen Gestaltänderungen im Detail und deren Auswirkung auf das technische Gesamtsystem zu beherrschen.³⁹⁹ In formalisierten Ontologien dagegen müssen die Bedeutung und der Abstraktionsgrad der enthaltenen Ontologieelemente eindeutig definiert und beschrieben werden. Bei der Formalisierung von derartigem Wissen müssen daher zusätzliche Konzepte erstellt werden, um die verschiedenen Bedeutungen und Abstraktionsgrade zu erfassen. Dazu kommt noch, dass existierende mentale Modelle mitunter nur durch Umwege und Zusatzaufwand in Ontologien formalisierbar sind. Das Abbilden von interdisziplinärem Gestaltungswissen in einer formalen Ontologie als ein gemeinsames Verständnis ist daher möglich, aber es ist mit großem Aufwand verbunden und resultiert in Ontologien mit einer überhöhten Anzahl an Konzepten und Relationen. Die größte Herausforderung scheint deshalb das Abwägen zwischen der Klarheit der Ontologie und der minimalen ontologischen Verpflichtung.⁴⁰⁰

Der Stand der Technik im Bereich der Software erweist sich als größte Einschränkung für die Bereitstellung von Gestaltungswissen in einem ontologiebasierten Datenbanksystem. Bedingt durch den modularen Aufbau existierender Softwarelösungen wird die Ontologie bei der Implementierung an mehreren Stellen in der Softwarestruktur automatisiert weiterverarbeitet. Später notwendige Änderungen der Ontologie im Sinne der geforderten iterativen Vorgehensweise bei Ontologieentwicklung können nur durch ein vollständiges Neuaufsetzen des Datenbanksystems erreicht werden. Die Vielzahl dafür durchzuführender manueller Operationen in der Datenbankstruktur ist zusätzlich zeitaufwändig und zudem fehlerträchtig. Aufgrund der Intransparenz des Systems mit vielen beteiligten Softwarekomponenten erfordert das Finden und Beheben von Fehlern im Datenbanksystem fundierte Kenntnisse in der Informatik und den verwendeten Programmiersprachen. Ohne diese hat die Implementierung eines ontologiebasierten Systems zur Bereitstellung von Gestaltungswissen auf Basis eines gemeinsamen Verständnisses keine nachhaltigen Erfolgsaussichten. Eine grundsätzliche Begrenzung des Umfangs der Ontologie auf ungefähr 60 Konzepte ist laut Softwareanbieter die einzige Möglichkeit, um Ontologieimplementierungsprojekte nicht am Aufwand scheitern zu lassen. Dies widerspricht den im vorherigen Absatz erläuterten Anforderungen, die sich aus der Komplexität der Materie ergeben. Zusammen mit der Tatsache, dass mit der Softwareimplementierung weitere kleinere Einschränkungen mit der Struktur und der

³⁹⁹ „Ein guter Konstrukteur hat das Ganze im Blick und weiß, wie sein Bauteil im ganzen System wirkt und vor allem, was eine Änderung im Kleinen im Großen bewirkt.“ - Zitat eines Industrievertreters in acatech 2012.

⁴⁰⁰ Siehe Ontologiekriterien 1. und 5. nach Gruber 1995 – siehe Abschnitt 2.4.

Wahl der Konzeptbezeichnungen verbunden sind, muss festgestellt werden, dass die Forderung eines minimalen Implementierungseinflusses⁴⁰¹ für interdisziplinäres Gestaltungswissen durch aktuell verfügbare Software nicht erfüllbar scheint. Ebenso ist die Forderung nach Anpassbarkeit der Ontologie auch nach der Implementierung nur bedingt erfüllt.⁴⁰² Die stetige Dynamik, der Wissen in der Produktentwicklung unterliegt, ist deshalb in derartigen Systemen nur sehr begrenzt abbildbar.

Abschließend kann festgestellt werden, dass Ontologien durchaus bei der Bereitstellung von interdisziplinärem Gestaltungswissen unterstützen können. Ontologien, die ein umfassendes und tiefgehendes Verständnis formal abbilden, sind jedoch grundsätzlich andere als solche, die für eine Datenbankimplementierung geeignet sind.

Erstgenannte Ontologien können einen wichtigen Beitrag zu Kommunikation und Wissensaustausch in Projekten mit Personen verschiedener Domänen liefern, wenn sie von Beginn an Teil der Projektinhalte sind. So können ein gemeinsames Verständnis und dessen Abbildung in der Ontologie parallel und wechselseitig entwickelt werden. Dies wird zu eindeutig definierten Begriffen und Zusammenhängen beitragen und zur Verbesserung des Wissensaustauschs. Eine interessante Fragestellung ist dann, inwieweit diese Erfahrung in der Praxis tatsächlich erfüllt wird.

In Datenbanken implementierte Ontologien können nur einen deutlich beschränkten Wissensumfang abbilden und dienen in erster Linie zur verbesserten Bereitstellung von explizit vorhandenem Wissen. In der Produktentwicklung bieten sie gegenüber rein auf Social Software basierten Ansätzen in der Produktentwicklung⁴⁰³ durch sichergestellte Konsistenz der Begriffe und die Verwendung von Inferenz-fähigen Suchmaschinen einige Vorteile. Herausforderungen stellen dabei die an den Suchfunktionen auszurichtenden Ontologien und die Verwendung von in der Ontologie definierten Regeln dar.

Sobald Softwareansätze entwickelt werden, die eine iterative Implementierung und dynamische Anpassung der Ontologie innerhalb eines laufenden Datenbanksystems erlauben, muss die Möglichkeit der Bereitstellung von Gestaltungswissen in einem Datenbanksystem über eine Ontologie, die ein gemeinsames Verständnis abbildet, neu bewertet werden.

⁴⁰¹ Siehe Ontologiekriterium 4 nach Gruber 1995 - siehe Abschnitt 2.4.

⁴⁰² Siehe Ontologiekriterium 3 nach Gruber 1995 - siehe Abschnitt 2.4.

⁴⁰³ Vgl. Sauter 2012, S. 201.

7 Literaturverzeichnis

acatech 2012

acatech: *Faszination Konstruktion – Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel*. Springer, 2012

Ahmed et al. 1999

Ahmed, S.; Blessing, L. und Wallace, K.: *The relationships between data, information and knowledge based on a preliminary study of engineering designers*. ASME Design Theory and Methodology Conference, DETC99, Las Vegas, 1999

Ahmed 2005

Ahmed, S.: *Encouraging Reuse of Design Knowledge: A Method to Index Knowledge*. Design Studies, vol. 26, S. 565-592, 2005

Ahmed et al. 2005

Ahmed, S.; Hacker, P. und Wallace, K.: *The role of knowledge and experience in engineering design*. International Conference on Engineering Design ICED 05, MELBOURNE,, 2005

Ahmed / Storga 2009

Ahmed, S.; Storga, M.: *Merged ontology for engineering design: Contrasting empirical and theoretical approaches to develop engineering ontologies*. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing AIEDAM, vol. 23, S. 391-407, 2009

Albers 2003

Albers: *Produktentwicklung- Heute und Morgen*. Konstruktion, 2003

Albers / Burkardt 1998

Albers, A.; Burkardt, N.: *Experience with the new education model "Integrated Product Development" at the University of Karlsruhe*. 4th International Symposium on Product Development in Engineering Education'98, Lohmar, 1998

Albers et al. 2001

Albers, A.; Arslan, A. und Herbst, D.: *Keramik für den Einsatz in Bremsen und Kupplungen*. Automobiltechnische Zeitschrift, vol. 103, S. 414-419, 2001

Albers / Matthiesen 2002

Albers, A.; Matthiesen, S.: *Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme*. Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, vol. 54, 2002

Albers et al. 2004

Albers, A.; Arslan, A. und FISITA World Automotive Congress, B., Spain, 23 - 27 May . Book of Abstracts p. 166. Paper No. FF324, full paper 15 pages on Conference CD: *Increasing the Performance of Motor Vehicle Clutches by the Use of Ceramics and the Resulting Effects on System Design*. 2004

Albers et al. 2005

Albers, A.; Burkardt, N.; Hauser, S. und Marz, J.: *Knowledge-based design environment for primary shaped micro parts*. 2005

Albers et al. 2007

Albers, A.; Deigendesch., T.; Drammer, M.; Ellmer, C.; Meboldt, M. und Sauter, C.: *Wikis as a Cooperation and Communication Platform within Product Development*. ICED, International Conference on Engineering Design, Paris, 28.-31. August, 2007

Albers / Meboldt 2007

Albers, A.; Meboldt, M.: *IPEMM – Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving*. 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 2007

Albers et al. 2009

Albers, A.; Sauter, C. und Maier, T.: *Knowledge Management in Research and Education for Product Development*. 5. Konferenz Professionelles Wissensmanagement, Solothurn, Schweiz, 2009

Albers / Braun 2010

Albers, A.; Braun, A.: *Function-based Contact and Channel Modelling in the Development of an Innovative Car*. 12TH INTERNATIONAL DEPENDENCY AND STRUCTURE MODELLING CONFERENCE, DSM'10, Cambridge, UK 22.07. - 23.07., 2010

Albers et al. 2010a

Albers, A.; Lohmeyer, Q. und Schmalenbach, H.: *Integration of Validation Activities in Ontology Development Processes*. Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010, Ancona, Italien, 12. - 16. April, 2010a

Albers 2010

Albers, A.: *Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences*. Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010, Ancona, Italien, 12. - 16. April, 2010

Albers et al. 2010b

Albers, A.; Ebel, B. und Sauter, C.: *Combining Process Model and Semantic Wiki*. 11th International Design Conference DESIGN2010, Dubrovnik, 17.-20. Mai, 2010b

Albers et al. 2010c

Albers, A.; Ebel, B. und Alink, T.: *Erfolgsfaktoren der Interdisziplinarität. Ein Bericht*. In Wissenschaft im Kontext. Inter- und Transdisziplinarität in Theorie und Praxis. , Berlin; Trafo Wissenschaftsverlag, 2010c

Albers / Braun 2011a

Albers, A.; Braun, A.: *Der Prozess der Produktentstehung*. In Handbuch Leichtbau, F. Henning and E. Moeller, Eds. S. 5-30, Hanser Verlag, 2011a

Albers / Braun 2011b

Albers, A.; Braun, A.: *A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes*. International Journal of Product Development, vol. 15, S. 6-25, 2011b

Albers et al. 2011a

Albers, A.; Schmalenbach, H. und Lohmeyer, Q.: *Ontology development for knowledge representation*. International Journal of Product Development, vol. 14, S. 53-71, 2011a

Albers et al. 2011b

Albers, A.; Sadowski, E. und Marxen, L.: *A new Perspective on Product Engineering Overcoming Sequential Process Models*. In The Future of Design Methodology, H. Birkhofer, Ed. S. 199-210, London, UK; Springer, 2011b

Albers et al. 2012a

Albers, A.; Turki, T. und Schmalenbach, H.: *Improving Acces to micro-specific Knowledge with Ontologies*. TMCE International Symposium on Tools Methods of Competitive Engineering, Karlsruhe, Germany, May 7-11, 2012a

Albers et al. 2012b

Albers, A.; Walch, M. und Lohmeyer, Q.: *Zielsystemorientiertes Variantenmanagement einbaufertiger Systembaugruppen*. In 23. Symposium Design for X, DfX 2012, Bamberg 2012b

Albers et al. 2012c

Albers, A.; Braun, A. und Schmalenbach, H.: *An ontology-representation of the integrated product engineering model*. 14th International dependency and structure modelling conference, Kyoto, Japan, September 13.-14. 2012, 2012c

Albers / Braun 2012

Albers, A.; Braun, A.: *Towards Handling Complexity – Testing the iPeM Process Modelling Approach*. In Proceedings of TMCE 2012, May 7-11, 2012, Karlsruhe, Germany 2012

Albers / Sadowski 2013

Albers, A.; Sadowski, E.: *The Contact and Channel Approach (C&C²-A) – relating a system's physical structure to its functionality*. IWMT 2013, Bangalore, India Springer, 2013

Alberts / Dicker 1994

Alberts, L. K.; Dicker, F.: *INTEGRATING STANDARDS AND SYNTHESIS KNOWLEDGE USING THE YMIR ONTOLOGY*. in Artificial Intelligence in Design '94 pp. 517-534: Kluwer Academic, 1994

Alink 2010

Alink, T.: *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*. Karlsruhe, 2010

The American Ceramic Society **2012**

The American Ceramic Society: <http://ceramics.org>, Letzter Zugriff: 22.7.2012, 2012

Anderl et al. 2010

Anderl, R.; Mecke, K.; Sprenger, A. und Weitzmann, O.: *ontology-based system for supporting the control of uncertainty in the product lifecycle*. Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010, Ancona, Italien, 2010

Angele / Lausen 2009

Angele, J.; Lausen, G.: *Ontologies in F-logic*. In Handbook on Ontologies, S. Staab and R. Studer, Eds. S. 29-50, Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

Antoniou / Harmelen 2009

Antoniou, G.; Harmelen, F. v.: *Web Ontology Language: OWL*. In Handbook on Ontologies, S. Staab and R. Studer, Eds. S. 67-92, Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

Antrag auf Finanzierung der 4. Förderphase des Sonderforschungsbereich 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ 2008

Antrag auf Finanzierung der 4. Förderphase des Sonderforschungsbereich 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“. Karlsruhe, 2008

Apke / Dittmann 2003a

Apke, S.; Dittmann, L.: *Analyse von Vorgehensmodellen aus dem Software, Knowledge und Ontologies Engineering*. vol. 1/2003Essen: Universität Duisburg-Essen Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, 2003a

Apke / Dittmann 2003b

Apke, S.; Dittmann, L.: *Generisches Vorgehensmodell KOWIEN*. vol. 4/2003Essen: Universität Duisburg-Essen Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, 2003b

Apke et al. 2004

Apke, S.; Bäumgen, C.; Bremer, A. und Dittmann, L.: *Anforderungsspezifikation für die Entwicklung einer Kompetenz-Ontologie für die Deutsche Montan Technologie GmbH*. vol. 2/2004Essen: Universität Duisburg-Essen Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, 2004

Arpírez Vega et al. 1998

Arpírez Vega, J. C.; Gómez-Pérez, A.; Tello, A. L. und Pinto, H. S. A. N. P.: *(ONTO)²Agent: An ontology-based WWW broker to select ontologies*. Workshop on applications of Ontologies and PSMs, Brighton, England, 1998

Arslan-Hürst 2005

Arslan-Hürst, A.: *Integration ingenieurkeramischer Werkstoffe in das funktionsrelevante Wirkflächenpaar einer Kupplung = Integration of engineering-ceramic materials into the function relevant working surface pair of a clutch*. Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), Forschungsberichte / IPEK ; 16, 2005

Art & Architecture Thesaurus Online

Art & Architecture Thesaurus Online:
<http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/about.html>,
 Zugriff: 16.09.2012, Letzter

Auer et al. 2006

Auer, S.; Dietzold, S. und Riechert, T.: *OntoWiki – A Tool for Social, Semantic Collaboration*. 2006

Back 2001

Back, A.: *E-Learning und Wissensmanagement zusammenführen*. In Handbuch E-Learning: Expertenwissen aus Wissenschaft und Praxis, H. A. and W. K., Eds., Köln; Deutscher Wirtschaftsdienst Verlag, 2001

Baseball Ontology

Baseball Ontology: <http://www.daml.org/2001/08/baseball/baseball-ont>, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

Be Informed Studio

Be Informed Studio:
<http://www.beinformed.com/BeInformed/website/en/EN/Studio?init=true#>,
 Letzter Zugriff: 20.04.2013,

Blacha 2009

Blacha, M.: *Grundlagen zur Berechnung und Gestaltung von Querpressverbänden mit Naben aus monolithischer Keramik*. Universität Stuttgart, Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, 2009

Blumauer / Fundneider 2006

Blumauer, A.; Fundneider, T.: *Semantische Technologien in integrierten Wissensmanagement-Systemen*. In *Semantic Web : Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft*, T. Pellegrini and A. Blumauer, Eds. S. Online-Ressource, Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

Bode 1984

Bode, K. H.: *Konstruktionsatlas*. Hoppenstedt, 1984

Borst 1997

Borst, W. N.: *CONSTRUCTION OF ENGINEERING ONTOLOGIES FOR KNOWLEDGE SHARING AND REUSE*. SIKS- Dutch Graduate School for Information and Knowledge Systems, 1997

Brachman et al. 1983

Brachman, R.; Fikes, R. und Levesque, H.: *Krypton: A Functional Approach to Knowledge Representation*. IEEE Computer vol. 16, S. 67-73, 1983

Brachman et al. 1991

Brachman, R. J.; McGuinness, D. L.; Patel-Schneider, P. F.; Resnick, L. A. und Borgida, A.: *Living with CLASSIC: When and How to Use a KL-ONE-Like Language*. In *Principles of Semantic Networks: Explorations in the*

representation of knowledge J. Sowa, Ed. S. 401--456, San Mateo, California; Morgan-Kaufmann, 1991

Brandt et al. 2008

Brandt, S. C.; Morbach, J.; Miatidis, M.; Theißen, M.; Jarke, M. und Marquardt, W.: *An ontology-based approach to knowledge management in design processes*. Computers & Chemical Engineering, vol. 32, 10.1016/j.compchemeng.2007.04.013 S. 320-342, 2008

Brevier 2003

Brevier technische Keramik. Aufl. 4. Aufl.Lauf; Fahner, 2003

Brewster / O'Hara 2007

Brewster, C.; O'Hara, K.: *Knowledge representation with ontologies: Present challenges--Future possibilities*. International Journal of Human-Computer Studies, vol. 65, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2007.04.003> S. 563--568, 2007

Briggs 2011

Briggs, J.: *Engineering Ceramics in Europe and the USA: A Market and Strategic Study to the Year 2016*. 2011

Broens / de Vries 2003

Broens, R. C.; de Vries, M. J.: *Classifying technological knowledge for presentation to mechanical engineering designers*. Design Studies, vol. 24, S. 457-471, 2003

Bullinger 2009

Bullinger, A. C.: *Innovation and Ontologies : Structuring the Early Stages of Innovation Management*. Wiesbaden; Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009

Bullinger et al. 1997

Bullinger, H.-J.; Wörner, K. und Prieto, J.: *Wissensmanagement heute*. Stuttgart; Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation IAO 1997

Chakrabarty et al. 2009

Chakrabarty, S.; Chougule, R. und Lesperance, R. M.: *Ontology-guided knowledge retrieval in an automobile assembly environment*. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, vol. 44, S. 1237-1249, 2009

Chimæra

Chimæra: <http://protege.stanford.edu/index.html>, Letzter Zugriff: 02.09.2012,

Connolly et al. 2001

Connolly, D.; Harmelen, F. v.; Horrocks, I.; McGuinness, D. L.; Patel-Schneider, P. F. und Stein, L. A.: *DAML+OIL (March 2001) Reference Description*: <http://www.w3.org/TR/daml+oil-reference>, Letzter Zugriff: 25.08.2012, 2001

Cowan 2001

Cowan, R.: *Expert systems: aspects of and limitations to the codifiability of knowledge*. Research Policy, vol. 30, [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00156-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00156-1) S. 1355-1372, 2001

CRG Information Systems 2010

CRG Information Systems: *SemanticWiki for SharePoint* <http://www.crg-is.de/EN/products/Pages/SemanticWikiforSharePoint.aspx>, Letzter Zugriff: 19.12, 2010

d'Aquin / Noy 2012

d'Aquin, M.; Noy, N. F.: *Where to publish and find ontologies? A survey of ontology libraries*. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, vol. 11, S. 96-111, 2012

Darlington / Culley 2008

Darlington, M. J.; Culley, S. J.: *Investigating ontology development for engineering design support*. Advanced Engineering Informatics, vol. 22, 10.1016/j.aei.2007.04.001 S. 112-134, 2008

Davenport / Prusak 1998

Davenport, T. H.; Prusak, L.: *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. Cambridge, MA; Harvard Business School Press, 1998

Decker et al. 2005

Decker, B.; Rech, J.; Ras, E.; Klein, B. und Hoecht, C.: *Self-organized Reuse of Software Engineering Knowledge supported by Semantic Wikis. Proceedings of the Workshop on Semantic Web Enabled Software Engineering (SWESE)*, . Galway, Ireland, , November, 2005

Deigendesch 2009

Deigendesch, T.: *Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel*. Karlsruher Institut für Technologie IPEK Insitut für Produktentwicklung, 2009

Deutsche Keramische Gesellschaft 2012

Deutsche Keramische Gesellschaft: www.dkg.de, Letzter Zugriff: 22.7.2012, 2012

Dier / Lautenbacher 1994

Dier, M.; Lautenbacher, S.: *Groupware*. München; Computerwoche Verlag, 1994

Ding / Fensel 2001

Ding, Y.; Fensel, D.: *Ontology Library Systems: The key to successful Ontology Re-use*. In The first Semantic Web Working Symposium SWWS, Stanford University, California, USA, pp. 93--112 2001

Ding et al. 2009

Ding, Y.; D.Fensel; Klein, M.; Omelayenko, B. und Schulten, E.: *The Role of Ontologies in eCommerce* In Handbook on Ontologies, S. Staab and R. Studer, Eds. S. 593-615, Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

Dokuwiki.org

Dokuwiki.org: <http://www.dokuwiki.org/dokuwiki>, Letzter Zugriff: 10.11.2008,

Domingue

Domingue, J.: *WebOnto*: <http://projects.kmi.open.ac.uk/webonto/>, Letzter Zugriff: 03.09.2012,

Dumbill 2000

Dumbill, E.: *Berners-Lee and the Semantic Web Vision*: <http://www.xml.com/pub/a/2000/12/xml2000/timbl.html>, Letzter Zugriff: 26.06.2012, 2000

Ehrlenspiel 2003

Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Aufl. 2., überarb. Aufl. München; Hanser, 2003

Ehrlenspiel 2009

Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Aufl. 4., aktualisierte Aufl. München; Hanser, 2009

Enterprise - Towards a framework for enterprise modelling and integration

Enterprise - Towards a framework for enterprise modelling and integration
<http://www.aiai.ed.ac.uk/project/enterprise/>, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

European Ceramics Society 2012

European Ceramics Society: <http://www.ecers.org>, Letzter Zugriff: 22.7.2012, 2012

Fensel 2000

Fensel, D.: *Ontologies: Silver Bullet for Knowledge Management and Electronic Commerce*. Berlin; Springer-Verlag, 2000

Fensel et al. 2003

Fensel, D.; Hendler, J.; Liebermann, H. und Wahlster, W.: *Spinning the semantic web : bringing the World Wide Web to its full potential*. Cambridge, Mass. [u.a.]; MIT Press, 2003

Fenves / Sriram 2005

Fenves, S. J.; Sriram, R. D.: *Information Exchange: Practices and Standards*. ASME Journal of Computation and Information Science in Engineering, vol. 5, S. 238-246, 2005

Fernández-López / Gómez-Pérez 2002a

Fernández-López, M.; Gómez-Pérez, A.: *Overview and analysis of methodologies for building ontologies*. The Knowledge Engineering Review, vol. 17, S. 129-156, 2002a

Fernández-López / Gómez-Pérez 2002b

Fernández-López, M.; Gómez-Pérez, A.: *Overview and analysis of methodologies for building ontologies*. The Knowledge Engineering Review, vol. 17, 2002b

Fernandez et al. 1997

Fernandez, M.; Gómez-Pérez, A. und Juristo, N.: *METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering*. AAI Technical Report, S. 97-106, 1997

Ford / Sterman 1998

Ford, D. N.; Sterman, J.: *Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models*. System Dynamics Review, vol. 14, S. 309-340, 1998

Fuchs-Kittowski et al. 2004

Fuchs-Kittowski, F.; Faust, D.; Loroff, C. und Reuter, P.: *WiKo – Eine integrierte Wissens- und Kooperations-Plattform*. Mensch & Computer: Allgegenwärtige Interaktion, S. S. 231-240, 2004

Geiger 2005

Geiger, D.: *Wissen und Narration. Der Kern des Wissensmanagements*. FU Berlin, Dissertation, 2005

Genesereth / Fikes 1992

Genesereth, M. R.; Fikes, R. E.: *Knowledge Interchange Format Version 3.0 Reference Manual*. in Logic. vol. 92: Computer Science Department Stanford University, 1992

Gläser / Lori 1993

Gläser, H.; Lori, W.: *Grundlagen des Konstruierens mit Keramik*. in VDI Berichte. vol. 1036, V. D. Ingenieure, Ed., 1993

Göbler 1992

Göbler, T.: *Modellbasierte Wissensakquisition zur rechnergestützten Wissensbereitstellung für den Anwendungsbereich Entwicklung und Konstruktion*. Technische Universität Berlin, Produktionstechnik, 1992

Goldfire

Goldfire: <http://inventionmachine.com/products-and-services/innovation-software/>, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

Gómez-Pérez et al. 1996

Gómez-Pérez, A.; Fernández, M. und Vicente, A. J. d.: *Towards a Method to Conceptualize Domain Ontologies*. Working Notes of the Workshop Ontological Engineering, 1996

Gómez-Pérez 1999

Gómez-Pérez, A.: *Ontological engineering: A state of the ar*. Expert Update, vol. 2, S. 33-43, 1999

Grabowski / Geiger 1997

Grabowski, H.; Geiger, K.: *Neue Wege zur Produktentwicklung*. Berlin; Raabe, 1997

Gruber 1992

Gruber, T. R.: *Ontolingua : a mechanism to support portable ontologies*. Stanford University, Knowledge Systems Laboratory, 1992

Gruber 1993

Gruber, T. R.: *A Translation Approach to Portable Ontology Specifications*. Knowledge Acquisition, vol. 5, S. 199-220., 1993

Gruber / Olsen 1994

Gruber, T. R.; Olsen, G. R.: *An Ontology for Engineering Mathematics*. Fourth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, Gustav Stresemann Institut, Bonn, Germany, Morgan Kaufmann, 1994

Gruber 1995

Gruber, T. R.: *Toward Principles for the Design of Ontologies used for Knowledge Sharing*. International Journal Human-Computer Studies, vol. 43, S. 907-928, 1995

Gruninger / Fox 1994

Gruninger, M.; Fox, M. S.: *The Role of Competency Questions in Enterprise Engineering*. International Federation for Information Processing IFIP Workshop on Benchmarking - Theory and Practice, Trondheim, Norway, 1994

Gruninger / Fox 1995

Gruninger, M.; Fox, M. S.: *Methodology for the design and evaluation of ontologies*. In Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, Montreal, Canada, 1995

Guarino / Giaretta 1995

Guarino, N.; Giaretta, P.: *Ontologies and Knowledge Bases. Towards a Terminological Clarification*. Towards Very Large Knowledge Bases: Knowledge Building and Knowledge Sharing, Amsterdam, IOS Press, 1995

Guarino 2009

Guarino, N.: *The Ontological Level: Revisiting 30 Years of Knowledge Representation*. Lecture notes in computer science, 2009

Gugel / Wötting 1998

Gugel, E.; Wötting, G.: *Materials selection for ceramic components in automobile*. In CIMTEC - World Ceramics Congress and Forum on New Materials, Florence 1998

Gunendran et al. 2007

Gunendran, A. G.; Cutting-Decelle, A. F.; Young, R. I. M. und Bourey, J. P.: *Information Organisation in Design: An Application of formal Ontologies*. International Conference on Engineering Design ICED'07, Cité Des Sciences et De L'industrie, Paris, Frankreich, 28 - 31 August 2007, 2007

Hansen 1996

Hansen, H. R.: *Wirtschaftsinformatik : Grundlagen betrieblicher Informationsverarbeitung*. Aufl. 7., völlig Neubearb. u. stark erw. Aufl. Stuttgart; Lucius & Lucius, 1996

Hansen et al. 1999

Hansen, M. T.; Nohria, N. und Tierney, T.: *What's your strategy for managing knowledge?* Harvard Business Review,, vol. Vol. 77, S. 106–116, 1999

Hayward et al. 1987

Hayward, S. A.; Wielinga, B. J. und Breuker, J. A.: *Structured analysis of knowledge*. International Journal of Man-Machine Studies, vol. 26, [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373\(87\)80083-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373(87)80083-4) S. 487-498, 1987

Heisig 2005

Heisig, P.: *Integration von Wissensmanagement in Geschäftsprozesse*. PTZ "[u.a.]", 2005

Heisig 2007

Heisig, P.: *Professionelles Wissensmanagement in Deutschland - Erfahrungen, Stand und Perspektiven des Wissensmanagements*. 4. Konferenz Professionelles Wissensmanagement - Erfahrungen und Visionen, Potsdam, 2007

Heisig et al. 2010

Heisig, P.; Caldwell, N. H. M.; Grebici, K. und Clarkson, P. J.: *Exploring knowledge and information needs in engineering from the past and for the future e results from a survey*. Design Studies, vol. 31, 10.1016/j.destud.2010.05.001 S. 499-532, 2010

Heyer et al. 2006

Heyer, G.; Quasthoff, U. und Wittig, T.: *Text Mining: Wissensrohstoff Text : Konzepte, Algorithmen, Ergebnisse*. Herdecke; W3L-Verl., 2006

Hütte 1996

Hütte: *Hütte : die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. Aufl. 30., Neubearb. und erw. Aufl. Berlin; Springer, 1996

International Journal of Ceramics and Composites **2012**

International Journal of Ceramics and Composites: <http://ceramics.org/meetings/37th-international-conference-and-expo-on-advanced-ceramics-and-composites>, Letzter Zugriff: 22.7.2012, 2012

Johann Wolfgang Goethe: Sämtliche Werke, Briefe, Tagebücher und Gespräche **1993**

Johann Wolfgang Goethe: Sämtliche Werke, Briefe, Tagebücher und Gespräche Aufl. 1. vol. 13 Frankfurt am Main; Dt. Klassiker Verl., 1993

Journal of Ceramic Science **2012**

Journal of Ceramic Science: <http://www.ceramic-science.com>, Letzter Zugriff: 22.7.2012, 2012

a.k.a. Software

a.k.a. Software: <http://www.a-k-a.com.au/>, Letzter Zugriff: 20.04.2013,

Karbach / Linster 1990

Karbach, W.; Linster, M.: *Wissensakquisition für Expertensysteme : Techniken, Modelle und Softwarewerkzeuge*. München; Hanser, 1990

Kim et al. 2008

Kim, S.; Bracewell, R. und Wallace, K.: *SOME REFLECTIONS ON ONTOLOGIES IN ENGINEERING DOMAIN*. In TMCE, Izmir 2008

Kim / Kim 2007

Kim, S. A.; Kim, Y. S.: *Design process visualizing and review system with architectural concept desing ontology*. International Conference on Engineering Design, ICED'07, Paris, France, 2007

Kitamura / Mizoguchi 2004

Kitamura, Y.; Mizoguchi, R.: *Ontology-based systematization of functional knowledge*. Journal of Engineering Design, vol. 15, 10.1080/09544820410001697163 S. 327-351, 2004/08/01 2004

Kitamura 2006

Kitamura, Y.: *ROLES OF ONTOLOGIES OF ENGINEERING ARTIFACTS FOR DESIGN KNOWLEDGE MODELING*. In International Seminar and Workshop Engineering Design in Integrated Product Development, Grondów, Poland 2006

Klein 1998

Klein, R.: *A Knowledge Level Theory of Design and Engineering* In Globalization of manufacturing in the digital communications era of the 21st century: innovation, agility, and the virtual enterprise, G. Jacucci, G. J. Olling, K. Preiss, and M. Wozny, Eds. S. 271-286., Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 1998

Köck / Willfort 2007

Köck, A. M.; Willfort, R.: *Creativ Knowledge Work for Innovation*. ÖGAI Journal, vol. 26, S. 9-13, 2007

Kogut / Zander 1992

Kogut, B.; Zander, U.: *Knowledge of the Firm, Combinative Capabilities, and the Replication of Technology*. Organization Science, vol. 3, S. 383-397, 1992

Kohn et al. 2011

Kohn, A.; Maurer, M.; Schmidt, H. X. und Lindemann, U.: *USE OF EXISTING ONTOLOGIES AS INPUT FOR STRUCTURAL COMPLEXITY MANAGEMENT*. KEOD - International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development, Paris, France, SciTePress, 2011

Kratzer et al. 2010

Kratzer, M.; Binz, H. und Roth, D.: *Wissensstruktur zur Integration von Konstruktionswissen in agentenbasierte Unterstützungssysteme*. DfX-Symposium, 2010

Kröttsch 2010

Kröttsch, M.: *Semantic MediaWiki*: http://semantic-mediawiki.org/wiki/Semantic_MediaWiki, Letzter Zugriff: 19.12, 2010

Krüger 1999

Krüger, S.: *Ein Beitrag zur praxisgerechten Dimensionierung keramischer Bauteile bei mehrachsigen Beanspruchungen* Technische Universität Clausthal, Dissertation, 1999

Lassila / McGuinness 2001

Lassila, O.; McGuinness, D.: *The Role of Frame-Based Representation on the Semantic Web*. in Technical Report Knowledge Systems Laboratory Stanford, 2001

Lindemann / Ponn 2006

Lindemann, U.; Ponn, J. C.: *Intelligent Search for Product Development Information – an Ontology-based Approach*. 9th International Design Conference DESIGN, Dubrovnik, Croatia, 2006

Machlup 1962

Machlup, F.: *The production and distribution of knowledge in the United States*. Princeton, N.J.; Princeton Univ.Press, 1962

Malik 2001

Malik, F.: *Wissen kann man nicht managen - nur Mitarbeiter*. Welt am Sonntag, Berufswelt, 05.08.2001 S. 2, 2001

Mandl / Frank 2000

Mandl, H.; Frank, F. H.: *Wissen sichtbar machen : Wissensmanagement mit Mapping-Techniken*. Göttingen; Hogrefe, Verl. für Psychologie, 2000

Matthiesen 2002

Matthiesen, S.: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Karlsruhe University, Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Dissertation, 2002

Matthiesen / Ruckpaul 2012

Matthiesen, S.; Ruckpaul, A.: *NEW INSIGHTS ON THE CONTACT&CHANNEL-APPROACH – MODELLING OF SYSTEMS WITH SEVERAL LOGICAL STATES*. In International Design Conference 2012

McBride 2009

McBride, B.: *The Ressource Description Framework (RDF) and its Vocabulary Description Language RDFS*. In Handbook on Ontologies, S. Staab and R. Studer, Eds. S. 51-66, Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

McCormick 1997

McCormick, R.: *Conceptual and Procedural Knowledge*. International Journal of Technology and Design Education, vol. 7, S. 141-159, 1997

McGuinness et al. 1994

McGuinness, D. L.; Abrahams, M. K.; Resnick, L. A.; Patel-Schneider; P.F.; Thomason, R. H.; Cavalli-Sforza, V. und Conati, C.: *Classic Knowledge Representation System Tutorial*: <http://www.bell-labs.com/project/classic/papers/ClassTut/ClassTut.html>, Letzter Zugriff: 10.09.2012, 1994

McGuinness / Harmelen 2004

McGuinness, D. L.; Harmelen, F. v.: *OWL Web Ontology Language Overview* <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-features-20040210/> Letzter Zugriff: 25.08.2012, 2004

McMahon et al. 2004

McMahon, C.; Lowe, A. und Culley, S.: *Knowledge management in engineering design: personalization and codification*. Journal of Engineering Design, vol. 15, 10.1080/09544820410001697154 S. 307-325, 2004

Meboldt 2008

Meboldt, M.: *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. IPEK Institut für Produktentwicklung - Universität Karlsruhe (TH), 2008

Meyer 2005

Meyer, B.: *Der nicht-explizite Wissensbegriff im Wissensmanagement: Schärfung eines vagen Konstruktes*. Institut für Psychologie und Insitut für Wirtschaft, Humboldt Universität zu Berlin, 2005

Meyers großes Taschenlexikon : in 24 Bänden

Meyers großes Taschenlexikon : in 24 Bänden. 10., neu bearb. u. erw. Aufl., Standardausg., Umschlaggestaltung: Glas AG ed, A. Zwahr, Ed.Mannheim: Meyers Lexikonverl.

Mielke 2001

Mielke, R.: *Psychologie des Lernens : eine Einführung*. Stuttgart; Kohlhammer, 2001

Mitariu-Faller 2009

Mitariu-Faller, M.: *Methoden und Prozesse zur Entwicklung von Friktionssystemen mit Ingenieurkeramik am Beispiel einer trockenlaufenden Fahrzeugkupplung*. 2009

Mitra / Wiederhold 2009

Mitra, P.; Wiederhold, G.: *An ontology-composition algebra*. In Handbook on Ontologies, S. Staab and R. Studer, Eds. S. 29-50, Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

Mizoguchi et al. 1995

Mizoguchi, R.; Tijerino, Y. und Ikeda, M.: *Task analysis interview based on task ontology*. Expert Systems with Applications, vol. 9, 10.1016/0957-4174(94)00044-v S. 15-25, 1995

Mönch 2003

Mönch, E.: *SemanticMiner: Ein integratives Ontologie-basiertes Knowledge Retrieval System*. Workshop Ontologie-basiertes Wissensmanagement (WOW2003), Luzern, Schweiz 2.4.-4.4.2003, 2003

Müller 2009

Müller, H. M.: *Arbeitsbuch Linguistik : eine Einführung in die Sprachwissenschaft*. Aufl. 2., überarb. und aktualis. Aufl. Paderborn; Schöningh, 2009

Munz / Fett 1999

Munz, D.; Fett, T.: *Ceramics : mechanical properties, failure behaviour, materials selection*. Berlin; Springer, 1999

Nanda et al. 2007

Nanda, J.; Thevenot, H. J.; Simpson, T. W.; Stone, R. B.; Bohm, M. und Shooter, S. B.: *Product family design knowledge representation, aggregation, reuse, and analysis*. AI EDAM: Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing, vol. 21, S. 173-192, 2007

Neuweg 1999

Neuweg, G. H.: *Könnerschaft und implizites Wissen : zur lehr-lerntheoretischen Bedeutung der Erkenntnis- und Wissenstheorie Michael Polanyis*. Waxmann, Internationale Hochschulschriften ; 311, 1999

Newell 1981

Newell, A.: *The Knowledge Level*. AI MAGAZINE, vol. 2, 1981

Nonaka 1991

Nonaka, I.: *The Knowledge-Creating Company*. Harvard Business Review,, S. 95-103, 1991

Nonaka / Takeuchi 1995

Nonaka, I.; Takeuchi, H.: *The knowledge-creating company*. New York; Oxford University Press, 1995

Nonaka / Takeuchi 1997

Nonaka, I.; Takeuchi, H.: *Die Organisation des Wissens - Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*. Frankfurt; Campus Verlag, 1997

Nonaka / Kanna 1998

Nonaka, I.; Kanna, N.: *The Concept of "Ba": Building a Foundation for Knowledge Creation*. California Management Review, vol. 40, S. 40 - 54, 1998

North et al. 2000

North, K.; Romhardt, K. und Probst, G.: *Wissensgemeinschaften - Keimzellen lebendigen Wissensmanagements*:
<http://www.enbiz.de/wmk/papers/public/Wissensgemeinschaften>, Letzter Zugriff: 12.08.2013, 2000

North 2011

North, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*. Aufl. 5. Auflage. Wiesbaden; Gabler, 2011

Novak 1990

Novak, J. D.: *Concept maps and vee diagrams: Two metacognitive tools for science and mathematics education*. Instructional Science, vol. 19, S. 29-52, 1990

Novak / Musonda 1991

Novak, J. D.; Musonda, D.: *A twelve-year longitudinal study of science concept learning*. American Educational Research Journal, vol. 28, S. 117-153, 1991

Noy / McGuinness 2001

Noy, N. F.; McGuinness, D. L.: *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. in Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05, 2001

Odgen / Richards 1923

Odgen, C. K.; Richards, I. A.: *The Meaning of Meaning: A Study of the Influence of Language upon Thought and of the Science of Symbolism*. Aufl. 10. London; Routledge & Kegan Paul, 1923

Oerding 2009

Oerding, J.: *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentwicklung Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM*. 2009

Ontologie 2012

Ontologie: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ontologie>, Letzter Zugriff: 08.08..2012, 2012

Ontologie (Informatik) 2012

Ontologie (Informatik): [http://de.wikipedia.org/wiki/Ontologie_\(Informatik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Ontologie_(Informatik)), Letzter Zugriff: 08.08..2012, 2012

Open Domain Speech Translation

Open Domain Speech Translation: <http://isl.anthropomatik.kit.edu/english/127.php>, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

Open Galen

Open Galen: <http://www.opengalen.org/index.html>; <http://www.geneontology.org/>, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

OWL 2 2009

OWL 2 Web Ontology Language <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/#ack>, Letzter Zugriff: 25.08.2012, 2009

Patil et al. 1993

Patil, R. S.; Fikes, R. E.; Patel-Schneider, P. F.; McKay, D.; Finin, T.; Gruber, T. R. und Neches, R.: *The DARPA knowledge sharing effort: progress report*. Stanford University. Computer Science Dept. Knowledge Systems Laboratory, 1993

Person Ontology

Person *Ontology:*
<http://orlando.drc.com/semanticweb/daml/ontology/person/person-ont>, Letzter
 Zugriff: 16.09.2012,

Petzow 1996

Petzow, G. H.: *Hochleistungskeramiken : Herstellung, Aufbau, Eigenschaften; Beiträge zum Abschlußkolloquium im Schwerpunktprogramm Keramische Hochleistungswerkstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 17./18. Februar 1994, Stuttgart.* In Forschungsbericht / Deutsche Forschungsgemeinschaft, Weinheim [u.a.], pp. XXXIV, 691 S. 1996

Polanyi 1985

Polanyi, M.: *Implizites Wissen.* Aufl. 1. Aufl. Frankfurt am Main; Suhrkamp, 1985

Probst / Romhardt 1997

Probst, G. J. B.; Romhardt, K.: *Bausteine des Wissensmanagements - ein praxisorientierter Ansatz.* In Handbuch lernende Organisation - Unternehmens- und Mitarbeiterpotentiale erfolgreich erschließen S. 129 - 143, München; Wieselhuber & Partner, 1997

Protégé

Protégé: <http://protege.stanford.edu/index.html>, Letzter Zugriff: 02.09.2012,

Protege Ontologies Library

Protege Ontologies Library: <http://protege.cim3.net/cgi-bin/wiki.pl?ProtegeOntologiesLibrary>, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

Redtenbacher 1859

Redtenbacher, F.: *Principien der Mechanik und des Maschinenbaues.* Mannheim; Verlagsbuchhandlung von Friedrich Bassermann, 1859

Rehäuser 1999

Rehäuser, J.: *Prozeßorientiertes Benchmarking im Informationsmanagement.* Dt. Univ.-Verlag, 1999

Reinmann-Rothmeier / Mandl 2000

Reinmann-Rothmeier, G.; Mandl, H.: *Ein pädagogisch-psychologischer Ansatz zum Wissensmanagement - ein Widerspruch in sich? (Essay).* München: Ludwigs-Maximilians-Universität, Institut für Pädagogische Psychologie und Empirische Pädagogik., 2000

Rezgui 2006

Rezgui, Y.: *Ontology-Centered Knowledge Management Using Information Retrieval Techniques.* Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 20, S. 261-270, 2006

Ropohl 2009

Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie - Eine Systemtheorie der Technik, 3., Überarbeitete Auflage.* Karlsruhe; Universitätsverlag Karlsruhe 2009, 2009

Roth et al. 2010

Stevens, R.; Aranguren, M. E.; Wolstencroft, K.; Sattler, U.; Drummond, N.; Horridge, M. und Rector, A.: *Using OWL to model biological knowledge*. International Journal of Human-Computer Studies, vol. 65, S. 583-594, 2007

Stollberg 2002

Stollberg, M.: *Ontologiebasierte Wissensmodellierung - Verwendung als semantischer Grundbaustein des Semantic Web*. Freie Universität Berlin, Institut für Publizistik und Kommunikationswissenschaft, 2002

Storga et al. 2005

Storga, M.; Andreasen, M. M. und Marjanovic, D.: *Towards a formal design model based on a genetic design model system*. 15th International Conference on Engineering Design ICED 05, Melbourne, Engineers Institution of Engineers, Australia, II National Circuit, Barton, 2005

Stuckenschmidt 2009

Stuckenschmidt, H.: *Ontologien - Konzepte, Technologien und Anwendungen*. Heidelberg; Springer Verlag, 2009

Studer et al. 2001

Studer, R.; Schnurr, H.-P. und Nierlich, A.: *Semantic für die nächste Generation Wissensmanagement. Ein Vortrag gehalten auf der KnowTech 2001*. KnowTech 2001 "Knowledge Engineering & Management", Dresden, Germany, 2001

Sure / Stojanovic 2001

Sure, Y.; Stojanovic, N.: *Inside AIFB - Access to a SEmantic portAL (SEAL)*: <http://ontobroker.semanticweb.org/ontos/aifb.html>, Letzter Zugriff: 12.05.2012, 2001

Sure / Studer 2002

Sure, Y.; Studer, R.: *On-To-Knowledge: Content-Driven Knowledge Management Tools through Evolving Ontologies*. Karlsruhe: Institute AIFB, University of Karlsruhe, 2002

Sure et al. 2002

Sure, Y.; Erdmann, M.; Angele, J.; Staab, S.; Studer, R. und Wenke, D.: *OntoEdit: Collaborative Ontology Development for the Semantic Web*. International Semantic Web Conference, Springer, 2002

Sveiby 1997

Sveiby, K. E.: *The New Organizational Wealth: Managing and Measuring Knowledge-Based Assets*. Pub Group West, 1997

Syldatke / Zeyn 2008

Syldatke, T.; Zeyn, J.: *Ontologien im Anforderungsmanagement*. AUDI AG Peak Solution GmbH, 2008

Szykman / Sriram 2001

Szykman, S.; Sriram, R. D.: *The role of knowledge in next-generation product development systems*. ASME Journal of Computation and Information Science in Engineering, vol. 1, S. 3-11, 2001

ten Berge / van Hezewijk 1999

ten Berge, T.; van Hezewijk, R.: *Procedural and Declarative Knowledge. Theory & Psychology*, vol. 9, S. 20, 1999

Tietz 1994

Tietz, H.-D.: *Technische Keramik : Aufbau, Eigenschaften, Herstellung, Bearbeitung, Prüfung*. Düsseldorf; VDI-Verl., 1994

Time.daml

Time.daml: <http://www.ai.sri.com/daml/ontologies/sri-basic/1-0/Time.daml>,
Letzter Zugriff: 16.09.2012,

TopBraid Composer

TopBraid *Composer*:
http://www.topquadrant.com/products/TB_Composer.html, Letzter Zugriff:
20.04.2013,

Ullrich et al. 2003

Ullrich, M.; Maier, A. und Angele, J.: *Taxonomie, Thesaurus, Topic Map, Ontologie - ein Vergleich*. in *Ontoprise Whitepaper Series* p. 11, Karlsruhe, 2003

Ulrich 1981

Ulrich, H.: *Die Betriebswirtschaft als Anwendungsorientierte Sozialwissenschaft*. In *Die Führung des Betriebes*, M. Geist and R. Köhler, Eds. S. 1-25, Stuttgart; Pöschel, 1981

US Navy Ships Ontology Ontology

US Navy Ships Ontology Ontology:
<http://www.daml.org/2002/03/usnships/ship-ont>, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

Uschold / King 1995

Uschold, M.; King, M.: *Towards a Methodology for Building Ontologies*. "Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing" held in conjunction with International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1995

Uschold / Gruninger 1996

Uschold, M.; Gruninger, M.: *Ontologies: Principles, Methods and Applications*. *Knowledge Engineering Review*, vol. 11, 1996

Vajna et al. 2009

Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K. und Hehenberger, P.: *CAX für Ingenieure*. DOI 10.1007/978-3-540-3-540-3-540-36039-1, 2009

van Heijst et al. 1995

van Heijst, G.; Falasconi, S.; Abu-Hanna, A.; Schreiber, G. und Stefanelli, M.: *A case study in ontology library construction*. *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 7, 10.1016/0933-3657(95)00005-q S. 227-255, 1995

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2008

Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *VDI-Richtlinie 5610: Wissensmanagement im Engineering - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen*. V. D. Ingenieure, Ed. p. 15: Beuth-Verlag, 2008

Vincenti 1990

Vincenti, W. G.: *What engineers know and how they know it : analytical studies from aeronautical history*. Baltimore, Md. [u.a.]; Hopkins, 1990

Wagner 1995

Wagner, M. P.: *Groupware und neues Management*. Braunschweig/Wiesbaden; Vieweg Verlag, 1995

WebODE

WebODE: <http://mayor2.dia.fi.upm.es/oeg/index.php/en/downloads/60-webode>, Letzter Zugriff: 03.09.2012,

Weiss 2005

Weiss, S. M.: *Text mining : predictive methods for analyzing unstructured information; [includes free downloadable software]*. New York, NY; Springer, 2005

Welp et al. 2007

Welp, E. G.; Labenda, P. und Bludau, C.: *Usage of Ontologies and Software Agents for Knowledge-Based Design of Mechatronic Systems*. International Conference On Engineering Design 2007 (ICED 07), Paris, Frankreich, August, 2007

Wengler 1996

Wengler, M. M.: *Methodik für die Qualitätsplanung und -verbesserung in der Keramikindustrie : ein Beitrag zum Qualitätsmanagement bei der Planung neuer und der Optimierung bestehender Prozesse*. VDI-Verl., Fortschrittberichte VDI : Reihe 2, Fertigungstechnik ; 392, 1996

Wikipedia 2012

Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>, Letzter Zugriff: 22.7.2012, 2012

Wine Agent 1.0

Wine Agent 1.0: <http://www.ksl.stanford.edu/people/dlm/webont/wineAgent/>, Letzter Zugriff: 29.08.2012,

Wine Ontology

Wine Ontology: www.w3.org/TR/owl-guide/wine.rdf, Letzter Zugriff: 16.09.2012,

Wolf 2006

Wolf, K.: *Oxidkeramik als Konstruktionswerkstoff*. Mannheim: FRIATEC AG, 2006

Wolf et al. 1999

Wolf, T.; Decker, S. und Abecker, A.: *Unterstützung des Wissensmanagements durch Informations- und Kommunikationstechnologie* 1999

Wooldridge 2002

Wooldridge, M.: *Intelligent agents: The key concepts*. In Proceedings of the 9th ECCAI-ACAI/EASSS 2001, AEMAS 2001, HoloMAS 2001 on Multi-Agent-Systems and Applications II - Selected Revised Papers V. Marík, O. Stepánková, H. Krautwurmova, and M. Luck, Eds. S. 3-43, London, UK; Springer-Verlag, 2002

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2	Charakteristische Häufigkeitsverteilung der Festigkeit bei Bauteilen aus Keramik und aus Metall	10
Abbildung 3	Streuung der Festigkeitswerte eines Bauteils aus Al ₂ O ₃ (99,6%)	11
Abbildung 4	Einflussparameter bei der Herstellung eines keramischen Bauteils	13
Abbildung 5	Einflüsse auf eine keramikgerechte Konstruktion	14
Abbildung 6	Keramikgerechte Gestaltung nach Bode	15
Abbildung 7	Keramikgerechtes Konstruieren nach Gläser/ Lori	15
Abbildung 8	Die Säulen des Wissensmanagements	20
Abbildung 9	Kernaktivitäten des Wissensmanagements	22
Abbildung 10	Bausteine des Wissensmanagements	23
Abbildung 11	Wissensprozess nach Studer.....	24
Abbildung 12	Dimensionen von Groupware.....	26
Abbildung 13	Wissensaustausch durch Kodifizierung und Personalisierung	30
Abbildung 14	Techniken des Wissensmanagement geordnet hinsichtlich Personalisierungs- und Kodifizierungsstrategie.....	31
Abbildung 15	Wissenstreppe nach North.....	33
Abbildung 16	Das Kontinuum von Daten, Informationen und Wissen.....	34
Abbildung 17	Wissenstypen in dimensionaler Darstellung.....	36
Abbildung 18	HANSE-Modell nach Snowden	38
Abbildung 19	SECI-Modell nach Nonaka&Takeuchi.....	39
Abbildung 20	Kommunikationssystem der Linguistik	42
Abbildung 21	Semiotisches Dreieck	51
Abbildung 22	Hauptbestandteile einer Ontologie - Beispiel	53
Abbildung 23	Die Dimensionen des Ontocube-Modells nach Bullinger	61
Abbildung 24	Gegenüberstellung existierender Ontologieentwicklungsansätze nach Stollberg	68
Abbildung 25	Ontologie-Konstruktion nach Apke/Dietmann	68

Abbildung 26	Ontologieentwicklungsprozess nach Welp et al.	69
Abbildung 27	Ontologiebasiertes Wissensdatenbanksystem.....	74
Abbildung 28	Aktivitäten des Ontologieentwicklungsprozesses.....	87
Abbildung 29	Elemente einer Conceptmap.....	97
Abbildung 30	Verknüpfung von Conceptmaps unterschiedlicher Wissensträger	98
Abbildung 31	Grundlegende Einflüsse auf die Ontologieformalisierung	101
Abbildung 32	Formalisierungsbeispiele von Hierarchien	105
Abbildung 33	Formalisierung mehrwertiger Relationen	106
Abbildung 34	Benutzeroberfläche des Ontologieeditors Protégé.....	107
Abbildung 35	Ontologieimplementierung nach dem Bottom-Up-Prinzip	109
Abbildung 36	Ontologieimplementierung nach dem Top-Down-Prinzip	110
Abbildung 37	Aufbau des Sonderforschungsbereiches 483	119
Abbildung 38	Evolution der Gestaltungsentwürfe des Demonstrators Trockenlaufende Fahrzeugkupplung	124
Abbildung 39	Ausschnitt aus einer Conceptmap auf Basis des Interviews mit dem Teilprojektbearbeiter des TP A1 „Keramische Komponenten im trockenlaufenden Kupplungssystem“	127
Abbildung 40	Verknüpfung von Conceptmaps verschiedener Interviews über Synonyme Bezeichnungen.....	128
Abbildung 41	Benutzeroberflächen des Ontologieeditors Ontostudio©	129
Abbildung 42	Schematische Darstellung der Konzepthierarchie der keramikspezifischen Ontologie.....	133
Abbildung 43	Ontologieimplementierung und Softwarestruktur des K-KIS	134
Abbildung 44	Anzeigemodus einer semantischen Wikiseite des K-KIS.....	135
Abbildung 45	Bearbeitungsmodus einer semantischen Wikiseite des K-KIS mit geöffnetem Auswahldialog für die Zuweisung eines Relationswertes	136
Abbildung 46	Semantische Freitextsuche im K-KIS.....	138

9 Anhang

9.1 Laddering-Technik im strukturierten Interview

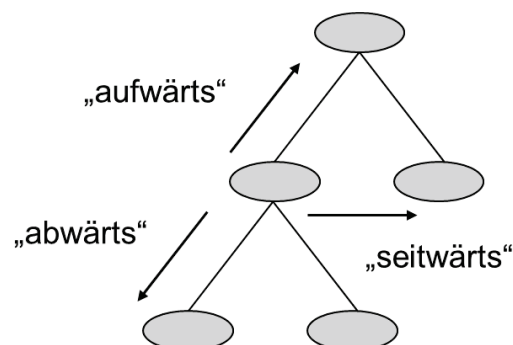
Die Laddering-Technik dient der strukturierten Wissenserhebung in Interviews, bei der der Interviewer ein begrenztes Set an standardisierten Fragen verwendet. Sie basiert auf der Annahme, dass das Wissen der interviewten Person vornehmlich in Form von Hierarchien von Wissenselementen mit Querverbindungen organisiert und kategorisierbar ist. Ergebnis der Laddering-Technik ist entsprechend ein Netz aus Begriffen in einer oder mehreren hierarchischen Anordnungen sowie deren charakteristische Beziehungen.

Vorgehensweise:

Der Interviewer beginnt mit der Wahl eines Startpunktes innerhalb der Wissensdomäne, dem sogenannten Keimelement. Die Position des Keimelements in der resultierenden Netzstruktur ist beliebig. Ausgehend von diesem Keimelement werden die standardisierten Fragen gestellt, um gezielt durch die entstehende Netzstruktur aus Begriffen und der Relationen und Attributen zu navigieren. Die Standardfragen beziehen sich jeweils auf bestimmte Wissensformalisten:

Abfrage von Relationen:

	„ist ein“	„hat Ziel“	„ist Teil von“
aufwärts	Zu welcher Art gehört X?	Was ist das Ziel von X?	Zu welcher Baugruppe gehört X?
abwärts	Welche Unterarten von X gibt es?	Welche Unterziele von X gibt es?	Aus welchen Komponenten besteht X?
seitwärts	Gibt es weitere Beispiele für X?	Gibt es weitere Beispiele für X?	Gibt es weitere Beispiele für X?



Abfrage von Attributen:

Einzel	Was für Eigenschaften hat X?
Unterscheidung	Was ist ein Hauptunterschied zwischen X und Y?
Gemeinsamkeiten	Was haben X und Y gemeinsam?

Die Fragen können je nach Wissensdomäne und je nachdem, welche Arten von Relationen erfasst werden sollen, angepasst werden. Die „aufwärts“- und „abwärts“-Fragen lassen sich jeweils so lange wiederholen, bis die Spitze bzw. der Grund einer Hierarchie erreicht ist. Ist ein derartiger Endpunkt erreicht, können entweder die Hierarchie in die jeweils andere Richtung erschlossen werden, von bestehenden Begriffen „seitwärts“ gefragt werden, um weitere Begriffe innerhalb der Hierarchie zu erfassen, nach anderen Relationen gefragt werden, um weitere hierarchische Strukturen zu erfassen und mit der bestehenden zu verknüpfen, oder existierende Begriffe über die Abfrage von Attributen konkretisiert werden.

Ergebnis:

Das Ergebnis einer Laddering-Sitzung ist ein strukturiertes Netz von Begriffen in verknüpften Hierarchien und kann leicht in einer Conceptmap festgehalten werden.

9.2 Kompetenzfragen (Auszug)

Was will der Nutzer wissen?	Was ist sein Ausgangspunkt?
Allgemein	
Welche monolithischen Ingenieurkeramiken sind erforscht und einsetzbar?	
Welcher Werkstoff ist geeignet/ungeeignet?	Eine Anwendung definiert über Kenngrößen?
Was ist grundlegend zu beachten beim Gestalten mit Keramik?	
Was sind die Eigenschaften eines bestimmten keramischen Werkstoffes?	Werkstoff
Welche Werkstoffe haben eine bestimmte Eigenschaft?	Werkstoffeigenschaft/Systemeigenschaft
Wie gestalte ich mein System mit Keramik?	Ausgangssystem Anwendung Werkstoff
Welche Bauteilverbindung wähle ich?	Ausgangssystem Anwendung Werkstoff
Welche Möglichkeiten der Oberflächenmodifikation von Keramik gibt es?	
Was ist bei der Fertigung zu beachten?	Werkstoff Gestalt Anwendung
Wie bewerte ich die Funktionssicherheit meines keramischen Systems?	System Anwendung Werkstoff
A1	
Wie kann ich nasslaufende Friktionssysteme durch den Einsatz keramischer Werkstoffe beeinflussen?	-/Ausgangssystem

Welches Reibwertverhalten erreiche ich mit einer (teilweise) keramischen nasslaufenden Materialpaarung?	Anwendung
Welches Öl ist für keramisch-metallische Reibpaarung geeignet?	Anwendung
Wie ist das Reibwertverhalten einer keramischen Reibpaarung im nasslaufenden Friktionskontakt?	2 Werkstoffe, Schmierstoff, System, Anwendung
A2	
Welches Reibwertverhalten erreiche ich mit einer (teilweise) keramischen trockenlaufenden Materialpaarung?	2 Werkstoffe, System, Anwendung
Welche Besonderheiten gibt es beim Einsatz von Keramik in trockenlaufenden Friktionssystemen?	Friktionssystem-Grundkenntnisse
Wie integriere ich Keramik in ein trockenlaufendes Friktionssystem?	Ausgangssystem, Anwendung
B2	
Welche Beanspruchbarkeit ist bei keramisch-metallischen Lötverbindungen erreichbar?	Anwendung Bauteilverbindung
Wie sieht der Lötprozess beim Löten von Keramik mit Stahl aus?	Werkstoffpaarung
Welches Lot eignet sich für welche Keramik?	-
Welche geometrischen Restriktionen gibt es bei keramischen Lötverbindungen?	Anwendung Werkstoffe
C1	
Wie kann der Reibwert in Friktionssystemen durch Texturierung beeinflusst werden?	Anwendung System
Was sind die Wirkmechanismen der verschiedenen Texturierungsarten?	-

Was sind Näpfchen?	-
Wie groß ist die Beeinflussbarkeit des Reibverhaltens durch Texturierung?	Anwendung
C4	
Was ist STAU?	Simulationshintergrund
Welche Parameter beeinflussen die Zuverlässigkeit eines keramischen Systems?	Technisches System
Welche Anforderungen stellt STAU an ein FEM-Modell?	FEM-Wissen
Wie ist der Weibullparameter definiert?	Werkstoff-Grundkenntnisse
Wie ermittle ich den Weibullparameter eines Werkstoffes/eines Systems?	Werkstoff-Grundkenntnisse

9.3 Formale K-Kis-Ontologie

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!--
  ontology: "http://www.ipka.uka.de#SFB483Ontologie"
  date: Sun Apr 22 15:41:35 CEST 2012
  created with OntoStudio 2.3.3-B1436
-->
<oxml:ontology
  xmlns="http://www.ipka.uka.de#"
  xmlns:a="http://www.ipka.uka.de#"
  xmlns:orn="http://schema.ontoprise.com/reserved#"
  xmlns:oxml="http://schema.ontoprise.com/oxml/core/2.1#"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://schema.ontoprise.com/oxml/core/2.1# oxml2.1.xsd"
  id="a:SFB483Ontologie">
  <oxml:concept id="a:Pruefstandsystem" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:System"/>
  </oxml:concept>
  <oxml:concept id="a:System" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:Basiselement"/>
  </oxml:concept>
  <oxml:concept id="a:Walzensystemanwendung" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:TribosystemAnwendung"/>
  </oxml:concept>
  <oxml:concept id="a:TribosystemAnwendung" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:Basiselement"/>
  </oxml:concept>
  <oxml:concept id="a:Schaedigungsmechanismus" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:Eigenschaft"/>
  </oxml:concept>
  <oxml:concept id="a:Eigenschaft" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:Basiselement"/>
  </oxml:concept>
  <oxml:concept id="a:Konstruktionsrichtlinie" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:Basiselement"/>
  </oxml:concept>
  <oxml:concept id="a:Basiselement"/>
  <oxml:concept id="a:NLKupplungsanwendung" explicitConcept="false">
    <oxml:subConceptOf concept="a:Friktionssystemanwendung"/>
  </oxml:concept>
```

```
<oxml:concept id="a:Friktionssystemanwendung" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TribosystemAnwendung"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Gleitsystemanwendung" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TribosystemAnwendung"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Fuegen" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Herstellprozess"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Herstellprozess" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Basiselement"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Keramik" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Werkstoff"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Werkstoff" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Basiselement"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Pruefkatgorie" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Eigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Klebstoff" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Werkstoff"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Walzensystem" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Tribosystem"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Tribosystem" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:System"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:KeramikLegierteOberflaeche" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:modifizierteOberflaeche"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:modifizierteOberflaeche" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Oberflaeche"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Loetverbindung" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Bauteilverbindung"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Bauteilverbindung" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Systemkomponenten"/>
```

```
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Systemkomponenten" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:System"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Klebeverbindung" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Bauteilverbindung"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Schlussart" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Systemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Systemeigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Eigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Herstellprozesseigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Eigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Richtlinienzweck" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Eigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Friktionssystemeigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TriboSystemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:TriboSystemeigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Systemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Gleitsystemeigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TriboSystemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Bestaendigkeitseigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TriboSystemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Reibungseigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TriboSystemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Tragbild" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TriboSystemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Walzensystemeigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:TriboSystemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Urformen" explicitConcept="false">
```

```
<oxml:subConceptOf concept="a:Herstellprozess"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Legieren" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Oberflaechenmodifikation"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Oberflaechenmodifikation" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Herstellprozess"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Texturierung" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Oberflaechenmodifikation"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Produktionssystem" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:System"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:NasslaufendesFriktionssystem" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Friktionssystem"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Friktionssystem" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Tribosystem"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:TrockenlaufenedsFriktionssystem" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Friktionssystem"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Gleitsystem" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Tribosystem"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:TLKupplungsaewdnung" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Friktionssystemanwendung"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Pruefmethode" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Validierungsmethode"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Validierungsmethode" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Basiselement"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Simulationsmethode" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Validierungsmethode"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Legierungselement" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Werkstoff"/>
</oxml:concept>
```

```
<oxml:concept id="a:Lot" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Werkstoff"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Metall" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Werkstoff"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Schmierstoff" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Werkstoff"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Kalibergeometrie" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Geometrie"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Geometrie" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Systemeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Bauteilverbindungsgeometrie" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Geometrie"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Werkstoffeigenschaft" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Eigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:KeramikTyp" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Werkstoffeigenschaft"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Oberflaeche" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Geometrie"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:unmodifizierteOberflaeche" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:Oberflaeche"/>
</oxml:concept>
<oxml:concept id="a:Mikrotexturelemente" explicitConcept="false">
  <oxml:subConceptOf concept="a:modifizierteOberflaeche"/>
</oxml:concept>
<oxml:relation id="a:PruefstandsystemerlaubtPruefkategorie" domain="a:Pruefstandsystem"
  range="a:Pruefkategorie" minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:KlebeverbindunghatKlebstoff" domain="a:Klebeverbindung" range="a:Klebstoff"
  minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:LoetverbindunghatLot" domain="a:Loetverbindung" range="a:Lot" minCard="0.0"
  maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:OberflaecheistfolgeausHerstellprozess" domain="a:Oberflaeche" range="a:Herstellprozess"
  minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:KeramikhatKeramikTyp" domain="a:Keramik" range="a:KeramikTyp" minCard="0.0"
  maxCard="**"/>
```

```
<oxml:relation id="a:OberflaechenmodifikationerzeugtOberflaeche" domain="a:Oberflaechenmodifikation"
  range="a:modifizierteOberflaeche" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:inverseRelationOf relation="a:OberflaechenentstehtdurchOberflaechenmodifikation" do-
  main="a:modifizierteOberflaeche" />
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:OberflaechenentstehtdurchOberflaechenmodifikation" domain="a:modifizierteOberflaeche"
  range="a:Oberflaechenmodifikation" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:LegierteOberflaechehatLegierungselement" domain="a:KeramikLegierteOberflaeche"
  range="a:Legierungselement" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:WalzensystemhatKalibergeometrie" domain="a:Walzensystem" range="a:Kalibergeometrie"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Betriebstemperatur" domain="a:TribosystemAnwendung" range="xsd:number"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Biegefestigkeit" domain="a:Werkstoff" range="xsd:integer" minCard="0.0" maxCard="1.0">
  <oxml:documentation language="de">&#34;MPa&#34;</oxml:documentation>
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:Bruchzaehigkeit" domain="a:Werkstoff" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="1.0">
  <oxml:documentation language="de">&#34;MNm(-3/2)&#34;</oxml:documentation>
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:Dichte" domain="a:Werkstoff" range="xsd:number" minCard="0.0" maxCard="*">
  <oxml:documentation language="de">&#34;g/cm&#179;&#34;</oxml:documentation>
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:DissipierteEnergie" domain="a:TribosystemAnwendung" range="xsd:number"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Drehzahl" domain="a:Friktionssystemanwendung" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:EModul" domain="a:Werkstoff" range="xsd:integer" minCard="0.0" maxCard="1.0">
  <oxml:documentation language="de">&#34;GPa&#34;</oxml:documentation>
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:Flaechenpressung" domain="a:TribosystemAnwendung" range="xsd:number"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Gleitgeschwindigkeit" domain="a:TribosystemAnwendung" range="xsd:number"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Gleitweg" domain="a:TribosystemAnwendung" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Haftzugfestigkeitbei90Grad" domain="a:Klebstoff" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:HaftzugfestigkeitRest" domain="a:Klebstoff" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:HaftzugfestigkeitRT" domain="a:Klebstoff" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Hersteller" domain="a:Klebstoff" range="xsd:string" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Kurzbezeichnung" domain="a:Werkstoff" range="xsd:string" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:linearerThermischerAusdehnungskoeffizient" domain="a:Werkstoff" range="xsd:number"
  minCard="0.0" maxCard="1.0" />
```

```
<oxml:relation id="a:MittlererReibradius" domain="a:Friktionssystem" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:NominalBetriebstemperatur" domain="a:Tribosystem" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:NominalFlaechenpressung" domain="a:Tribosystem" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:NominalGleitgeschwindigkeit" domain="a:Tribosystem" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:NominalReibwert" domain="a:Tribosystem" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Pruefkategorienummer" domain="a:Pruefkategorie" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Schmelzpunkt" domain="a:Werkstoff" range="xsd:integer" minCard="0.0" maxCard="1.0">
  <oxml:documentation language="de">&#34;&#176;C&#34;</oxml:documentation>
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:Waermeleitfaehigkeit" domain="a:Werkstoff" range="xsd:number" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:Weibull-Modul" domain="a:Keramik" range="xsd:integer" minCard="0.0" maxCard="1.0">
  <oxml:documentation language="de">&#34;m&#34;</oxml:documentation>
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:Werkstoffbezeichnung" domain="a:Werkstoff" range="xsd:string" minCard="0.0"
  maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:BauteilverbindunghatSchlussart" domain="a:Bauteilverbindung" range="a:Schlussart"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:BauteilverbindunghatWerkstoff1" domain="a:Bauteilverbindung" range="a:Werkstoff"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:BauteilverbindunghatWerkstoff2" domain="a:Bauteilverbindung" range="a:Werkstoff"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:FriktionssystemanwendunghatReibungszahlverlauf" domain="a:Friktionssystemanwendung"
  range="a:Reibungseigenschaft" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:FriktionssystemanwendungnutztFriktionssystem" domain="a:Friktionssystemanwendung"
  range="a:Friktionssystem" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:FuegenerzeugtBauteilverbindung" domain="a:Fuegen" range="a:Bauteilverbindung"
  minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:GeometriebeeinflusstSystemeigenschaft" domain="a:Geometrie" ran-
  ge="a:Systemeigenschaft" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:GleitsystemanwendungnutztGLEitsystem" domain="a:Gleitsystemanwendung"
  range="a:Gleitsystem" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:HerstellprozesshatEigenschaft" domain="a:Herstellprozess" ran-
  ge="a:Herstellprozesseigenschaft" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:KonstruktionsrichtlinieerzeugtGeometrie" domain="a:Konstruktionsrichtlinie"
  range="a:Geometrie" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:KonstruktionsrichtlinieistggeeignetfuerTribosystemAnwendung" do-
  main="a:Konstruktionsrichtlinie" range="a:TribosystemAnwendung" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:NLKAnwendunghatSchmierstoff" domain="a:NLKupplungsanwendung" ran-
  ge="a:Schmierstoff" minCard="0.0" maxCard="*" />
<oxml:relation id="a:PruefstandsystemistggeeignetfuerPruefmethode" domain="a:Pruefstandsystem"
  range="a:Pruefmethode" minCard="0.0" maxCard="*" />
```



```
<oxml:relation id="a:RichtlinieistgeeignetfuerSystem" domain="a:Konstruktionsrichtlinie" range="a:System"
  minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:RichtlinieistgeeignetfuerWerkstoff" domain="a:Konstruktionsrichtlinie" range="a:Werkstoff"
  minCard="0.0" maxCard="**">
  <oxml:inverseRelationOf relation="a:WerkstoffwirdaddressiertinRichtlinie" domain="a:Werkstoff"/>
</oxml:relation>
<oxml:relation id="a:SchaedigungsmechaniosmustrittaufbeiWerkstoff" domain="a:Schaedigungsmechanismus"
  range="a:Werkstoff" minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:Systembestehausystemhkomponenten" domain="a:System" ran-
  ge="a:Systemkomponenten" minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:SystemhatSystemeigenschaft" domain="a:System" range="a:Systemeigenschaft"
  minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:WalzensystemanwendungnutztWalzensystem" domain="a:Walzensystemanwendung"
  range="a:Walzensystem" minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:WerkstoffhatbesondereEigenschaft" domain="a:Werkstoff" range="a:Werkstoffeigenschaft"
  minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:WerkstoffistgeeignetfuerAnwendung" domain="a:Werkstoff" ran-
  ge="a:TribosystemAnwendung" minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:WerkstoffistungeeignetfuerAnwendung" domain="a:Werkstoff" ran-
  ge="a:TribosystemAnwendung" minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:WerkstoffwirdaddressiertinRichtlinie" domain="a:Werkstoff" ran-
  ge="a:Konstruktionsrichtlinie" minCard="0.0" maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:Wirkflaeche1hatGeometrie" domain="a:Tribosystem" range="a:Geometrie" minCard="0.0"
  maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:Wirkflaeche1hatWerkstoff" domain="a:Tribosystem" range="a:Werkstoff" minCard="0.0"
  maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:Wirkflaeche2hatGeometrie" domain="a:Tribosystem" range="a:Geometrie" minCard="0.0"
  maxCard="**"/>
<oxml:relation id="a:Wirkflaeche2hatWerkstoff" domain="a:Tribosystem" range="a:Werkstoff" minCard="0.0"
  maxCard="**"/>
</oxml:ontology>
```


Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Hermann Hannes Schmalenbach
Geburtsdatum: 17.November 1980
Geburtsort: Karlsruhe
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Familienstand: ledig

Bildungsgang

2007 Abschluss: Deutsch-Französisches Doppeldiplom: Diplom-Ingenieur(Universität Karlsruhe (TH)) und Diplôme d'ingénieur (ENSAM)
2003-2005 Studium an der École Nationale Supérieure d'Art et Métier (ENSAM) in Metz und Paris
2001-2007 Studium des Maschinenbaus an der Universität Karlsruhe (TH)
2000-2001 Zivildienst ISB-Karlsruhe (Individuelle Schwerstbehindertenbetreuung)
1991-2000 Markgrafengymnasium Karlsruhe-Durlach (Abschluss: Allgemeine Hochschulreife)
1987 – 1991 Grundschule, Schloßschule Karlsruhe-Durlach

Berufstätigkeit

Seit 2012 SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Produktionstechnologie Getriebe
2007-2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung (IPEK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)