

Reihe 20

Rechnerunter-
stützte Verfahren

Nr. 470

Dipl.-Ing. Maik Riedel,
Pinneberg

Ein Beitrag zur wissens- basierten Unterstützung bei der Auswahl technischer Ressourcen

Repräsentation und Auswertung von Prinziplösungen auf Basis multidimensionaler, heterogener, vernetzter Merkmalräume



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg



HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Ein Beitrag zur wissensbasierten Unterstützung bei der Auswahl technischer Ressourcen

– Repräsentation und Auswertung von Prinziplösungen
auf Basis multidimensionaler, heterogener, vernetzter Merkmalräume –

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Maik Riedel
aus Schlema

Hamburg 2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple
Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. habil. Markus Bause
Tag der mündlichen Prüfung: 03.11.2017

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte
Verfahren

Dipl.-Ing. Maik Riedel,
Pinneberg

Nr. 470

Ein Beitrag zur wissens-
basierten Unterstützung
bei der Auswahl
technischer Ressourcen

Repräsentation und Auswertung
von Prinziplösungen auf
Basis multidimensionaler,
heterogener, vernetzter
Merkmalräume



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Riedel, Maik

Ein Beitrag zur wissensbasierten Unterstützung bei der Auswahl technischer Ressourcen

Repräsentation und Auswertung von Prinziplösungen auf Basis multidimensionaler, heterogener, vernetzter Merkmalsräume

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 470. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

244 Seiten, 74 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-18-347020-4, ISSN 0178-9473,

€ 85,00/VDI-Mitgliederpreis € 76,50.

Für die Dokumentation: Wissensbasierte Systeme – Engineering – Anlagenplanung – Technische Ressourcen – Sensoren – Aktoren – Auswahlunterstützung – Merkmale – Wissensrepräsentation – Durchflussmessung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Unterstützung bei der Auswahl technischer Ressourcen – insbesondere der Sensorik und Aktorik automatisierter Prozessanlagen. Grundlage stellt eine ausführliche Betrachtung der Herausforderungen der komplexen Engineeringaufgabe sowie eine Analyse der Defizite heutiger Vorgehensweisen und Möglichkeiten dar. Unter Berücksichtigung aktueller Ansätze und Methoden hinsichtlich der formalen Beschreibung technischer Objekte sowie der Wissensrepräsentation und -verarbeitung erfolgt die Erarbeitung eines Konzepts zur wissensbasierten Auswahlunterstützung. Die in diesem Rahmen entwickelten Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge ermöglichen und unterstützen die Akquise, Pflege und Verwaltung, Analyse und Darstellung, Verarbeitung und Nutzung, Integration sowie die Wiederverwendung des notwendigen Expertenwissens bei der Auswahl technischer Ressourcen. Mittels verschiedener Anwendungsfälle aus der industriellen Praxis werden schließlich Anwendbarkeit und Vorteilhaftigkeit evaluiert.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-347020-4

Geleitwort der Herausgeber

Die Automatisierungstechnik ist ein komplexes und vielfältiges wissenschaftliches Gebiet. Am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wird zum einen die Entwicklung neuer automatisierungstechnischer Methoden vorangetrieben, zum anderen wird die Automatisierung komplexer Produktionsprozesse bearbeitet. Die reale Umsetzung im Rahmen technischer Prozesse, insbesondere industrieller Produktionsprozesse, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg.

Im Engineering automatisierter Anlagen ist die Auswahl geeigneter Sensoren und Aktoren eine komplexe Aufgabe: einerseits steht eine Vielzahl möglicher Funktionsprinzipien und eine unübersehbare Zahl möglicherweise geeigneter Geräte zur Verfügung, andererseits schränken die physikalischen Bedingungen am Mess- bzw. Stellort die Auswahl ein. Das Expertenwissen über diese Zusammenhänge lässt sich schwer formalisieren.

Herr Dr. Riedel hat im Rahmen seiner Dissertation eine Beschreibungsform erarbeitet, mit der sich diese Zusammenhänge vollständig modellieren lassen, und einen Auswertungsalgorithmus entwickelt, der prüft, welche Funktionsprinzipien für eine gegebene Anforderung im entstehenden multidimensionalen Lösungsraum realisierbar sind. Exemplarisch hat er dies zunächst auf Durchflussmessverfahren angewandt, für die im VDI/VDE-GMA-Fachausschuss 2.40 in jahrelanger Arbeit die Auswirkungen von über 30 Einflussgrößen auf 15 Messprinzipien quantitativ erarbeitet worden waren. Es ist Herrn Dr. Riedel gelungen, diese mit seinem Ansatz abzubilden und somit ein Software-Werkzeug zur Unterstützung der Auswahl geeigneter Durchflussmessverfahren zu erstellen. Die Universalität seines Ansatzes hat er durch Anwendung auf andere Mess- und Stellaufgaben nachgewiesen.

Die Herausgeber danken dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung dieser Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg in der Zeit von April 2012 bis September 2015.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Alexander Fay für die Möglichkeit der Mitarbeit an seinem Lehrstuhl sowie für die methodische und fachliche Begleitung meiner Arbeit als Doktorvater. Seine Anregungen, Forderung und Förderung, die notwendige Geduld und das über viele Jahre entgegengebrachte Vertrauen waren wesentlich für das Gelingen dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Epple danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Professor Dr. rer. nat. habil. Markus Bause möchte ich meinen Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes aussprechen.

Ich bedanke mich herzlich bei den Industrievertretern sowie den Mitgliedern und Partnern der Fachgremien und Ausschüsse mit denen ich insbesondere im Rahmen des GMA FA 2.40, GMA FA 4.14 und GMA FA 4.17 eine vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit genießen durfte. Besonders möchte ich hierbei Herrn Dr. rer. nat. Armin Brucker hervorheben. Seine Offenheit, sein Engagement sowie seine uneingeschränkte Unterstützung haben unsere Zusammenarbeit fachlich und menschlich sehr bereichert.

Ein ganz großer Dank geht an alle Kollegen und Mitarbeiter der Professur für Automatisierungstechnik. Bei aller Professionalität und Produktivität und trotz zeitweise hohen Belastungen blieben in diesem wundervollen Team immer die Menschen im Mittelpunkt und die Hilfsbereitschaft und der Spaß bei der Arbeit nie auf der Strecke. Daran werde ich mich stets dankbar erinnern und dies hat nicht zuletzt dafür gesorgt, dass aus vielen Kollegen letztlich wertvolle Freunde geworden sind. Hervorheben möchte ich mit großer Dankbarkeit an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Esteban Arroyo, Herrn Dr.-Ing. Frank Schumacher, Herrn Jan Ladiges, Herrn André Scholz, Herrn Ireneus Wior und insbesondere Herrn Dr.-Ing. Sebastian Schröck. Mit ihren vielen wertvollen Tipps und Anregungen, den langen (spätabendlichen) Diskussionen, den hilfreichen Kritiken, Reviews und Korrekturen und vor allem ihren Ermunterungen, auch weit über die eigentliche Zeit an der Universität hinaus, haben sie maßgeblich zur Vollendung und zur Qualität der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie. Mit ihrer immerwährenden Zuversicht und dem grenzenlosen Rückhalt in all den Jahren haben sie das persönliche Umfeld geschaffen, welches mir die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht hat – auch wenn sie in dieser Zeit oft auf mich verzichten mussten.

Meiner Frau Annika danke ich für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr Verständnis. Ihre Liebe und ihr unerschütterlicher Glaube an mich gaben mir die notwendige Kraft, die Mühen und Entbehrungen der letzten Jahre zu meistern.

Pinneberg, November 2017

Maik Riedel

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	IX
GLOSSAR.....	XI
KURZFASSUNG.....	XIV
ABSTRACT	XV
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 HINTERGRUND UND MOTIVATION	1
1.2 ZIELSETZUNG UND AUFBAU	3
2 AUSWAHL TECHNISCHER RESSOURCEN IM ANLAGENLEBENSZYKLUS	5
2.1 PLT-ENGINEERING ALS BEITRAG DER AUTOMATISIERUNGSTECHNIK IN DER ANLAGENPLANUNG	5
2.2 AUSWAHL TECHNISCHER RESSOURCEN IM RAHMEN DES PLT-ENGINEERINGS	9
2.3 SENSORIK UND AKTORIK – TECHNISCHE RESSOURCEN DER FELDEBENE	12
2.4 CHARAKTERISTIK UND HERAUSFORDERUNGEN DER ENGINEERINGAUFGABE	13
3 STATUS QUO UND HANDLUNGSBEDARF.....	16
3.1 WISSENSAKQUISE	16
3.2 WISSENSVERARBEITUNG.....	17
3.2.1 MANUELLE AUSWAHL	18
3.2.2 VDI 2644-RICHTLINIENSOFTWARE.....	19
3.2.3 PROPRIETÄRE DATENBANKBASIERTE AUSWAHL DURCH KONFIGURATOREN	20
3.2.4 ANSÄTZE AUS FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	21
3.2.5 BEWERTUNG DER MÖGLICHKEITEN ZUR WISSENSVERARBEITUNG	28
3.3 BEURTEILUNG DES STATUS QUO.....	31
4 GRUNDLAGEN UND ANFORDERUNGEN FÜR DIE KONZEPTENTWICKLUNG 33	
4.1 ECKPFEILER EINES LÖSUNGSANSATZES.....	33
4.1.1 PRINZIPLÖSUNGEN	33
4.1.2 EXPERTEN-KONSENSWISSEN.....	39
4.1.3 WISSENSBASIERTE RECHNERUNTERSTÜTZUNG	40
4.1.4 FAZIT.....	41
4.2 BESONDERHEITEN UND RESULTIERENDE HERAUSFORDERUNGEN	42
4.3 ABLEITUNG KONKRETER ANFORDERUNGEN.....	44
4.3.1 ABBILDUNG UND VERARBEITUNG DES WISSENS	45
4.3.2 NUTZUNG UND SCHNITTSTELLE ZUM MENSCHEN.....	47
4.3.3 INTEGRATION UND SCHNITTSTELLE ZUR SYSTEM-/MASCHINENUMGEBUNG	48
4.3.4 ZUSAMMENFASSUNG	49
5 BESCHREIBUNG TECHNISCHER OBJEKTE DURCH MERKMALE	50
5.1 GRUNDLAGEN UND BEGRIFFSBESTIMMUNG	50
5.2 MERKMAL- UND KLASSIFIKATIONSSYSTEME	51
5.3 DAS MERKMAL ALS INFORMATIONSTRÄGER.....	53
5.3.1 MERKMALKONTEXT.....	53
5.3.2 MERKMALBESCHREIBUNG	55
5.3.3 MERKMALAUSSAGEN	56
5.4 INFORMATIONSTRUKTUREN AUF BASIS VON MERKMALEN	58
5.4.1 MERKMALLEISTE	58
5.4.2 MERKMALNETZ	59
5.5 BEWERTUNG	61

6	AUSWAHL UND ENTSCHEIDUNG MIT HILFE VON WISSEN (IM ENGINEERING)	63
6.1	EINORDNUNG	63
6.2	WISSENSBASIERTE SYSTEME ZUR ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG UND AUSWAHL	64
6.3	ABBILDUNG UND REPRÄSENTATION VON WISSEN	66
6.3.1	ÜBERBLICK UND SYSTEMATIK	66
6.3.2	LOGIK	67
6.3.3	SEMANTISCHE NETZE UND ONTOLOGIEN	68
6.3.4	FRAMES UND DER OBJEKTORIENTIERTE ANSATZ	69
6.3.5	REGELBASIERTE METHODEN	70
6.3.6	CONSTRAINTS	72
6.4	BEWERTUNG DER REPRÄSENTATIONSANSÄTZE	73
7	KONZEPT ZUR REPRÄSENTATION UND AUSWERTUNG VERNETZTER MERKMALRÄUME	79
7.1	ÜBERBLICK	79
7.2	VORAUSSETZUNGEN, FESTLEGUNGEN UND ANNAHMEN	82
7.2.1	SKALENNIVEAU-ÜBERGREIFENDE BETRACHTUNG	82
7.2.2	AUSSAGEZIELE	85
7.2.3	RELATIONEN	88
7.2.4	EINE HIERARCHIE VON MENGEN	92
7.2.5	PROBLEM- UND LÖSUNGSRaum	93
7.3	MODELLIERUNG	94
7.3.1	RAHMENMODELL	95
7.3.2	METAEBENE	97
7.3.3	KLASSENEBENE	99
7.3.4	INSTANZENEBENE	101
7.4	ANALYSE	104
7.4.1	KONSISTENZPRÜFUNG UND -SICHERUNG	105
7.4.2	OPTIMIERUNG	106
7.5	VERARBEITUNG	108
7.5.1	ÜBERBLICK	109
7.5.2	VERARBEITUNGSSCHRITTE	112
7.6	METHODIK	136
7.7	INTEGRATION	140
8	IMPLEMENTIERUNG	146
8.1	ÜBERBLICK	146
8.2	WISSENSEDITOR	147
8.3	WERKZEUG ZUR AUSWAHLUNTERSTÜTZUNG	150
9	EVALUATION	156
9.1	ANWENDUNGSFALL „DURCHFLOßMESSUNG“	156
9.1.1	HINTERGRUND UND AUSGANGSSITUATION	156
9.1.2	DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNIS	157
9.2	ANWENDUNGSFALL „ANTRIEBE“	165
9.2.1	HINTERGRUND UND AUSGANGSSITUATION	165
9.2.2	DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNIS	166
9.3	ANWENDUNGSFALL „STELLGERÄTE“	168
9.3.1	HINTERGRUND UND AUSGANGSSITUATION	168
9.3.2	DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNIS	168
9.4	AUSWERTUNG	169

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	172
10.1 ZUSAMMENFASSUNG	172
10.2 AUSBLICK	175
ANHANG A PHASEN DES ANLAGEN-ENGINEERINGS.....	178
ANHANG B BEISPIELHAFTE TAXONOMIEN DER SENSORIK UND AKTORIK....	179
B.1. SENSORIK	179
B.2. AKTORIK	179
ANHANG C DOKUMENTE IM PLT-ENGINEERING: R&I-FLIEßBILD.....	180
ANHANG D DOKUMENTE IM PLT-ENGINEERING: PLT-STELLENBLATT	181
ANHANG E CHARAKTERISTIK VERSCHIEDENER QUELLEN ZUR WISSENSAKUISE	182
ANHANG F WISSENSQUELLEN UND HILFSMITTEL ZUR AUSWAHLUNTERSTÜTZUNG.....	183
ANHANG G BEISPIELHAFTE ANWENDERSCHNITTSTELLEN VON (ONLINE-) PRODUKTKONFIGURATOREN.....	184
ANHANG H ALGORITHMEN IM RAHMEN DER WISSENSVERARBEITUNG.....	185
H.1. BILDUNG IMPLIZITER UNTERRÄUME IN EXTENSIONALEN RELATIONEN	185
H.2. VERARBEITUNG EXTENSIONALER RELATIONEN IM RAHMEN DER BILDUNG EINES RESULTIERENDEN GESAMTLÖSUNGSRAUMS (VERARBEITUNGSSCHRITT 2)	186
H.3. VERARBEITUNG FUNKTIONALER RELATIONEN IM RAHMEN DER BILDUNG EINES RESULTIERENDEN GESAMTLÖSUNGSRAUMS (VERARBEITUNGSSCHRITT 2)	187
H.4. FILTERUNG DER EINZELLÖSUNGSRÄUME DURCH FIXIERUNG VON AUSPRÄGUNGEN DER PROBLEMRAUMSPEZIFIKATION	188
ANHANG I RELATIONSTYPSPEZIFISCHE (BE)DEUTUNG DER WIRKUNGSRICHTUNG.....	189
ANHANG J FORMALISIERUNG DER MODELLEBENEN (XML)	190
J.1. KLASSENEBENE (AUSSCHNITT).....	190
J.2. INSTANZENEBENE (AUSSCHNITT).....	191
ANHANG K AUFBAU DES FORMALISIERUNGSSCHEMAS (XSD).....	192
K.1. KLASSENEBENE (AUSSCHNITT).....	192
K.2. INSTANZENEBENE (AUSSCHNITT).....	193
ANHANG L AUSZUG AUS DER WISSENSGRUNDLAGE ZUM ANWENDUNGSFALL „DURCHFLUSSMESSUNG“	194
ANHANG M DEFINITION UND SPEZIFIKATION DER WISSENSELEMENTE FÜR DEN ANWENDUNGSFALL „DURCHFLUSSMESSUNG“	195
M.1. PZL DER FUNKTION „DURCHFLUSSMESSUNG“ IN DER PZL-BIBLIOTHEK	195
M.2. SPEZIFIZIERUNG DER MERKMALATTRIBUTE IN MERKMALLEXIKON UND PZL-BIBLIOTHEK	196
ANHANG N VERMINDERUNG DES ZULÄSSIGEN PROZESSDRUCKS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER PROZESSTEMPERATUR.....	196

ANHANG O VISUALISIERTE INSTANZENMODELLE VON PZL DER FUNKTION „DURCHFLUSSMESSUNG“	198
O.1. PZL „CORIOLIS-(MASSE-)DURCHFLUSSMESSUNG“	198
O.2. PZL „WIRBELZÄHLER“	199
O.3. PZL „MAGNETISCH INDUKTIVE DURCHFLUSSMESSUNG“ (ALTERNATIVE MODELLIERUNG)	200
ANHANG P BEISPIELHAFTE PE-SPEZIFIKATION FÜR DIE FUNKTION „DURCHFLUSSMESSUNG“	201
ANHANG Q WISSENSGRUNDLAGE DES ANWENDUNGSFALLES „ANTRIEBE“ ..	202
ANHANG R DEFINITION UND SPEZIFIKATION DER WISSENSELEMENTE FÜR DEN ANWENDUNGSFALL „STELLGERÄTE“	203
R.1. PZL DER FUNKTION „STELLGERÄTE“ IN DER PZL-BIBLIOTHEK	203
R.2. SPEZIFIZIERUNG DER MERKMALATTRIBUTE IN MERKMALLEXIKON UND PZL-BIBLIOTHEK	204
LITERATURVERZEICHNIS	205
LITERATUR	205
NORMEN, RICHTLINIEN UND EMPFEHLUNGEN	221
VERÖFFENTLICHUNGEN DES AUTORS	225
STUDENTISCHE ARBEITEN	225
REFERENZIERTER INTERNETQUELLEN	226
REFERENZIERTER SOFTWARE	228

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AML	Automation Markup Language
AK	Arbeitskreis
AT	Automatisierungstechnik
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange
CAD	Computer Aided Design
CSP	Constraint Solving Problem
FA	Fachausschuss
FAT	Factory Acceptance Test
GMA	Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik
HART	Highway Addressable Remote Transducer
HMI	Human Machine Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Standardization Organization
KI	Künstliche Intelligenz
LOP	List Of Properties
LORP	List Of Relevant Properties
ML	Merkmalleiste
MMI	Machine Machine Interface
NAMUR	Normenausschuss Mess- und Regeltechnik
OO	Objektorientierter Ansatz
OWL	Web Ontology Language
PE	Planungselement
PDF	Portable Document Format
PLM	Product Lifecycle Management
PLS	Prozessleitsystem
PLT	Prozessleittechnik
PROLIST	Project Group Lists Of Properties
PZL	Prinziplösung
RDF	Ressource Description Framework
R&I-Fließbild	Rohr- und Instrumentierungsfließbild
SAT	Site Acceptance Test

SIT	Site Integration Test
SN	Semantische Netze
STEP	Standard For The Exchange Of Product Model Data
TR	Technische Ressource
URI	Uniform Ressource Identifier
VDI/VDE	Verein Deutscher Ingenieure/Elektroingenieure
WBS	Wissensbasiertes System
XML	Extensible Markup Language
XLS	Excel Spreadsheet
XSD	Extensible Schema Definition

Formelzeichen

A	Ausprägungsmenge
A_{Anf}	Anforderungsausprägung
A_{Zus}	Zusicherungsausprägung
D	Definitionsmenge
DN	Nenndurchmesser
E	Ergebnismenge
G	Grundwertemenge
$P(A)$	Potenzmenge (einer Ausprägungsmenge)
PN	Nennndruck
R	Relation, Relationsmenge
R_e	Extensionale Relation
R_f	Funktionale Relation
$f(x)$	Funktion von x
T_D	Turn-Down(-Ratio)
\bar{v}	Strömungsgeschwindigkeit
\dot{V}	Volumenstrom
Y	Messunsicherheit
*	„don't care“-Operator

Glossar

Sofern nicht spezifisch definiert oder referenziert, sind die Erläuterungen der Begriffe auf die ihnen in vorliegender Arbeit zugeordnete Bedeutung bezogen und beschränkt.

Domäne

Eine Domäne ist ein „[...] abgrenzbares Aufgabengebiet, in dem eine Aufgabenstellung mit deren domänenspezifischen Anforderungen bearbeitet wird.“ [MÜH12]. Die Domäne beschreibt damit einen Interessens- oder Betrachtungsbereich [SCH00]. Weder eine scharfe Abgrenzung und definitorische Bestimmung einzelner Domänen noch eine Unterscheidung zwischen Domänen und Sub-Domänen sind Ziel und Inhalt vorliegender Arbeit. Die bewusst allgemeine Begriffsdeutung lässt zu, dass der Begriff aus dem Aspekt der Wissensrepräsentation und -verarbeitung heraus als ein spezifischer Wissens- und/oder Problembereich verstanden werden kann.

Engineering

Das Engineering ist die systematische Anwendung von Wissen zur Konzeption, Erschaffung und Verbesserung von Anlagen [VDI/VDE 3695-1]. In einem engen Begriffsverständnis konzentriert sich das Engineering dabei auf die Planungsphase im Anlagenbau [TAU13], während Engineering in einem weiten Begriffsverständnis prinzipiell auch alle anderen Ingenieurstätigkeiten im Lebenszyklus von Anlagen (u. a. auch in Phasen wie dem Betrieb und der Demontage) umfasst [FAY09], [TAU13]. Da über die Planungsphase hinausgehende Engineeringtätigkeiten im Rahmen vorliegender Arbeit nicht betrachtet werden, wird von dem engen Verständnis ausgehend der Begriff Engineering synonym zum Begriff der Planung verstanden und verwendet.

Engineeringprozess/-Workflow

In Bezug auf die hier verwendete Begriffsdeutung des *Engineering* bezeichnet der Engineeringprozess den Ablauf und Prozess der gesamten Engineeringtätigkeiten im Rahmen der Anlagenplanung. Dieser Prozess ist vor allem durch die Erhebung, Verteilung und Nutzung vielfältiger Informationen zwischen unterschiedlichsten Prozesssteilnehmern geprägt. Ein als synonym verstandener und genutzter Begriff ist der des *Engineering-Workflow*.

Feldgerät

Feldgeräte subsumieren die zur untersten Ebene der Automatisierungstechnik, der Feldebene, zugeordneten Geräte zur Prozess- oder Maschinenbeeinflussung. Hauptsächlich verkörpern Feldgeräte damit die gerätetechnischen sensorischen und aktorischen Funktionsträger der Automatisierungstechnik der Anlage [BIR01], mit zumeist unmittelbarem Kontakt zum Prozess.

Funktion

Funktionen beschreiben den zweckgebundenen Sinn eines Objekts oder Systems [EPP08], [GAA10] und damit die Aufgabe, die ihm in seiner Umgebung zugeordnet ist [EPP08]. Sie erklären das „Wozu?“ und „Warum?“, ggf. auf verschiedenen Abstraktionsstufen [HUB76] und beschreiben das Objekt bzw. System damit lösungsneutral, ohne das „Wie?“ zu beantworten. Davon ausgehend, werden Funktionen in der vorliegenden Arbeit als abstrakte, funktionale Aufgabenstellungen betrachtet, die sich nicht zwangsläufig am rein technischen Zweck orientieren müssen.

Lösungsraum

Der Lösungsraum ist die räumliche Repräsentation der, auf Basis von Merkmalen und ihren Ausprägungen, spezifizierten Anforderungen und Zusicherungen einer Prinziplösung in Form eines Merkmalraums.

LORP

Die LORP (list of relevant properties) beschreibt die Menge der hinsichtlich einer spezifischen Funktion und der Beurteilung derer Prinziplösungen relevanten Merkmale. Die LORP bestimmt grundsätzlich Art und Anzahl der zu betrachtenden Dimensionen der beteiligten Merkmalräume (Problemraum, Lösungsraum) und bildet die semantische Basis für den Vergleich zwischen Problem- und Lösungsraum, und damit für die Eignungsbewertung der Prinziplösungen der betroffenen Funktion.

Merkmal

Merkmale sind klassifizierbare Eigenschaften zu beschreibender Objekte [MER11], die zur Identifizierung [WÄL12] und Unterscheidung [DIN 4002-2], [WÄL12] bzw. Klassenbildung [MER11], [HAD14] dieser Objekte dienen.

Merkmalste (ML)

Merkmalste (auch LOP: List of Properties) sind zweckgebundene Gruppierungen mehrerer Merkmale zur Beschreibung einer Klasse (gleichartiger) Objekte [DIN 4002-2]. Merkmalste dienen der Optimierung an der Schnittstelle zwischen Herstellern und Kunden im Beschaffungsprozess und werden mittlerweile auch für andere Anwendungsgebiete und Lebenszyklusphasen, wie die Instandhaltung oder Parametrierung [GE014], genutzt. In *eCI@ss* beschreiben Merkmalste beispielsweise Produktklassen auf der untersten Abstraktionsebene. In einer Merkmalste zusammengefasste Merkmale bilden somit die abstrahierte Beschreibung einer Klasse bzw. eines Typs technischer Ressourcen und können für alle zu dieser Klasse gehörenden konkreten technischen Ressourcen zur Beschreibung verwendet werden.

Merkmalraum

Ein Merkmalraum ist die räumliche Repräsentation einer spezifischen Menge im Verbund betrachteter Merkmale und derer Ausprägungen. Die Dimensionen des Raums werden dabei von der Anzahl sowie der Art (z. B. Skalierung, Definitionsbereich) der beteiligten Merkmale bestimmt.

Planungselement (PE)

Das Planungselement stellt einen abstrakten Platzhalter innerhalb der Anlagenplanung dar. Es kann bei verfahrenstechnischen Anlagen beispielsweise eine PLT-Stelle (z. B. in Planungsdokumenten wie dem R&I-Fließbild oder dem PLT-Stellenblatt) darstellen und u. a. für die Spezifikation einer sensorischen oder aktorischen Funktionalität bzw. Aufgabenstellung genutzt werden. Das Planungselement verkörpert mit seiner Spezifikation geplante Eigenschaften (z. B. zu tolerierende Bedingungen der zukünftigen Einsatzumgebung und/oder spezifische Anforderungen), welche in einer späteren Realisierung zumeist durch technische Ressourcen gewährleistet werden sollen.

Prinziplösung (PZL)

Eine Prinziplösung ist eine durch Eigenschaften charakterisierte und semantisch eindeutig definierte, abstrakte Lösung(svariante). Als Lösung (beispielsweise in Form eines Handlungs- oder Umsetzungsprinzips) bietet sie damit grundsätzlich das Potential eine zugehörige Funktion zu erfüllen und bildet mit anderen Prinziplösungen zusammen die mögliche Lösungsmenge der Funktion. Die Prinziplösung stellt keine konkrete technische Umsetzung dar, kann jedoch auch als Verkörperung einer Gruppe, als Sammelbegriff oder Klasse, mehrerer konkreter technischer Umsetzungen interpretiert werden.

Problemraum

Der Problemraum ist die räumliche Repräsentation der, auf Basis von Merkmalen und ihren Ausprägungen, spezifizierten Anforderungen und Zusicherungen eines Planungselements in Form eines Merkmalraums.

Spezifikation

Unter Spezifikation ist das zielgerichtete Aufstellen und Präzisieren von Anforderungen in strukturierter Form an ein System [SCH99], ein Produkt oder einen Prozess zu verstehen. Gleichwohl wird das meist formalisierte Ergebnis dieses Vorgangs ebenfalls als Spezifikation bezeichnet, beispielsweise in Form eines Lastenheftes oder einer Merkmalleiste [BrWo07].

Technische Ressource (TR)

Der Begriff technische Ressource subsumiert konkrete technische Produkte in Form beispielsweise von Komponenten und Geräten.

Kurzfassung

Im Engineering verfahrenstechnischer Anlagen treffen steigende Anlagen- und Gerätekomplexität, kombiniert mit einer stark wachsenden Anzahl technischer Lösungsmöglichkeiten, auf einen ständig zunehmenden Kosten- und Zeitdruck vor dem Hintergrund einer anspruchsvollen, globalen Wettbewerbssituation. Diese Problematik gilt insbesondere für die im Engineering der notwendigen Automatisierungstechnik einbezogene Aufgabenstellung der Auswahl geeigneter technischer Ressourcen in der Feldebene. Diese Auswahl stellt aufgrund der Häufigkeit ihrer Durchführung, aufgrund der Bedeutung der technischen Ressourcen für die Wirtschaftlichkeit und Qualität des Anlagenbetriebs und wegen des mit der Auswahl verbundenen Fehlriskos einen bedeutenden Kostenfaktor und -hebel für das Engineering und die gesamte Anlagenplanung dar. Gleichwohl ist die Auswahl, unter Berücksichtigung vielfältiger, spezifischer Bedingungen und Anforderungen des Einsatzortes sowie des Anwenders, eine sehr komplexe und dementsprechend wissensintensive Aufgabenstellung. In Anbetracht dieser Herausforderung verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, die Auswahl technischer Ressourcen durch den Einsatz auf Wissen basierender Methoden und Werkzeuge zu unterstützen und damit im Sinne der „Automatisierung der Automatisierung“ einen Beitrag zur Effizienzsteigerung des Engineerings zu leisten.

Nach einer Einordnung der Aufgabenstellung in das Engineering verfahrenstechnischer Anlagen und einer Analyse der mit ihr verbundenen grundsätzlichen Herausforderungen, werden verfügbare Möglichkeiten zur Akquise des benötigten (Experten-)Wissens sowie Ansätze und praktizierte Vorgehensweisen zu dessen Verarbeitung untersucht. Basierend sowohl auf den Herausforderungen und Rahmenbedingungen der Aufgabenstellung als auch auf den Defiziten des Status Quo in Praxis und Forschung wird anschließend ein Anforderungskatalog für die Konzept- und Werkzeugentwicklung erarbeitet. Unter Berücksichtigung aktueller, existierender Ansätze und Methoden hinsichtlich der formalen Beschreibung technischer Objekte sowie der Wissensrepräsentation und -verarbeitung erfolgt die Entwicklung eines Konzepts zur wissensbasierten Auswahlunterstützung. Dafür wird zunächst ein theoretisches Fundament, bestehend aus Voraussetzungen, Festlegungen und Annahmen definiert. Auf diesen Grundlagen wird ein Modell für die geeignete Abbildung des benötigten Wissens entwickelt, welches sich auf die drei Abstraktionsebenen der Meta-, Klassen- und Instanzenebene erstreckt und sowohl anwendungsfallspezifische als auch anwendungsfallunabhängige Wissensanteile repräsentiert. Zudem werden Mechanismen für die geeignete Verarbeitung des repräsentierten Wissens sowie eine Methodik für die Konzeptanwendung beschrieben. Ergänzt wird dies durch einen Ansatz zur Integration in den durchgängigen Engineeringprozess unter Nutzung etablierter Ansätze zur Beschreibung von Anlagenstrukturinformationen und Semantik. Für die Umsetzung und den praktischen Einsatz des Konzepts werden zwei funktionell kooperierende Softwarewerkzeuge implementiert: ein Wissenseditor für das konzept- und methodenkonforme Erstellen einer konsistenten Wissensbasis auf Grundlage des Wissensmodells sowie ein Werkzeug zur Auswahlunterstützung, welches die im Editor erstellten Wissensinhalte nutzt und die Wissensverarbeitung im Zusammenhang mit jeweils problemfallspezifischen Informationen durchführt. Das erstellte Konzept wird abschließend unter Verwendung der erstellten Softwarewerkzeuge anhand von verschiedenen Anwendungsfällen aus dem Bereich von Sensorik und Aktorik evaluiert. Die Erkenntnisse aus der Evaluation werden genutzt, um die anwendungsfallübergreifende Anwendbarkeit und, durch den Vergleich mit den aufgestellten Anforderungen, die Vorteilhaftigkeit von Konzept und Werkzeugen zu belegen.

Abstract

In process plant engineering, rising complexity of plants and devices, accompanied by an increasing number of potential technical solutions, meets rising cost and time pressure in the context of a demanding, globally competitive environment. This difficulty applies in particular to the selection of suitable technical resources in the field level as a task of automation engineering. The selection of technical resources is an important cost factor for engineering and for the entire planning process because of its frequent occurrence, the relevance of technical resources for the efficiency and quality of the plant operation, and the high impact of wrong decisions. In consideration of the various specific conditions and requirements of the operating site and the operator, the selection is a very complex and knowledge-intensive task. Considering these challenges, this thesis aims to support the selection of technical resources by knowledge-based methods and tools, and thereby to contribute to an improvement of engineering efficiency in accordance with the idea of “automation of automation”.

After classification of the task within process plant engineering and an analysis of task-related challenges, available opportunities to gather required (expert) knowledge are identified, and different approaches to process and apply this knowledge are analysed. Based on the constraints and the challenges of the engineering task, including the existing shortcomings of the status quo in practice and research, a catalogue of requirements for concept and tool development is compiled. Considering state of the art approaches and methods concerning the formal description of technical objects, knowledge representation and knowledge processing, a concept for knowledge-based selection support is developed. For this purpose, a theoretical basis is first defined, comprising prerequisites, definitions and assumptions. On this basis, a model for a suitable representation of the required knowledge is developed. This model comprises three levels of abstraction, encompassing meta, class and instance level, and represents both application-independent and application-specific knowledge. Furthermore, mechanisms for an adequate inference of the represented knowledge and a method for concept application are defined. The concept is completed by an approach for the integration into the continuous engineering workflow. This approach utilizes established methods for plant description and for semantics. For the realisation and practical use, two functionally cooperating software tools are implemented: a knowledge editor for a concept- and method-compliant generation of a knowledge base in accordance with the knowledge model. Furthermore a selection support tool that uses the edited knowledge and conducts knowledge processing by including case-specific information. Finally, the established concept is evaluated based on different cases of application in the domains of actuators and sensors, utilizing the implemented software tools. Moreover, the evaluation results are used to confirm the applicability across the cases of application and to prove the advantages of the concept and tools by benchmarking against the predefined requirements.

für
Helmut Riedel
(1937-2005)

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die verfahrenstechnische Industrie stellt einen der bedeutendsten und umfassendsten Industriezweige weltweit dar. Kaum ein Produkt steht in seiner Herstellung nicht direkt oder indirekt mit dieser Industrie in Verbindung. Verfahrenstechnische Anlagen bilden die produzierenden, verarbeitenden oder verteilenden Arbeitseinheiten u. a. in den Bereichen Chemie und Petrochemie, Pharmazie und Biotechnologie, Nahrungs- und Genussmittel, Papier und Zellstoff, Rohstoffgewinnung, Energie sowie Wasser und Abwasser. Der Bau verfahrenstechnischer Anlagen dient damit dem Aufbau und der Aufrechterhaltung der menschlichen Grundversorgung und schafft als Grundlage hochentwickelter Industrieproduktionen die Voraussetzungen für wirtschaftlichen Fortschritt und Wohlstand [STR06].

Aufgrund der Komplexität moderner verfahrenstechnischer Anlagen, und den an sie gestellten Anforderungen, ist ihr Betrieb ohne Automatisierung heute nicht mehr denkbar. Nur mit Hilfe einer geeigneten Prozessautomatisierung können die Ziele Qualität, Wirtschaftlichkeit, Umweltschutz und betriebstechnische Sicherheit verfolgt, in gewünschtem Maße erreicht und abgesichert werden. Die Prozessautomatisierung ist damit eine Querschnittstechnologie, die von allen verfahrenstechnischen Industrien benötigt wird. Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) berechnete ein Wachstum des Weltmarktes für Prozessautomatisierung von 113 Mrd. auf 175 Mrd. Euro zwischen 2008 und 2013 und geht von einem weiteren Wachstum im mittleren einstelligen prozentualen Bereich in den nächsten Jahren bis auf ein Volumen von ca. 225 Mrd. Euro im Jahr 2019 aus. Globale und wachstumsstarke Branchen werden auch zukünftig überproportional in Prozessautomatisierung investieren, gerade wenn die genannten Automatisierungsziele wettbewerbs- oder existenzentscheidend werden [HÜSE15].

Beim Bau verfahrenstechnischer Anlagen kommt dem Engineering bzw. der Planung¹ eine besondere und wesentliche Rolle zu. Die Engineeringkosten nehmen einen Anteil von ca. 15–30 % der Investitionskosten der gesamten Anlage ein, wobei der Anteil weiter steigt [GUHA07], [WEB14]. Vor allem die frühen Planungstätigkeiten im Engineeringprozess tragen mit ihren Ergebnissen entscheidend zur erfolgreichen Abwicklung eines Anlagenprojektes bei [MÜH12]. Da in dieser Phase des Anlagenlebenszyklus der Grundstein gelegt wird, um nachfolgende Investitionsentscheidungen begründet herbeizuführen [WEB14], besteht hier das größte Fehlerauswirkungspotential und damit die größte Hebelwirkung hinsichtlich der Risiken und Kosten, sowohl bei der Errichtung als auch im späteren Betrieb der Anlage (vgl. [STR08], [DIB108]).

Bezogen auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Teil der Prozessautomatisierung ist eine der tragenden Aufgabenstellungen des prozessleitetechnischen Engineerings (kurz: PLT-Engineering) die Auswahl technischer Ressourcen. Der Begriff der technischen Ressource (TR) subsumiert dabei, als einer der zentralen Begriffe der vorliegenden Arbeit, konkrete technische Produkte, beispielsweise in Form von Komponenten und Geräten. Insbesondere die sensorischen und aktorischen Funktionsträger der Automatisierungstechnik [BIR01] in der Feldebene ermöglichen die Erfassung und die Beeinflussung des verfahrenstechnischen Prozesses und damit seine Automatisierung. Die Leistungsfähigkeit der hierfür ausgewählten TR bestimmt die Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses (vgl. [SCH08B]) sowie die Qualität der entstehenden Produkte [BRUM92]. Die TR der Feldebene

¹ Da über die Planungsphase hinausgehende Engineeringtätigkeiten im Rahmen vorliegender Arbeit nicht betrachtet werden, wird ausgehend von einem engen Begriffsverständnis des Engineerings [TAU13] der Begriff im Folgenden synonym zum Begriff der Planung verstanden und verwendet.

stellen den dominierenden Kostenanteil im Investitionsvolumen der Automatisierungstechnik dar [BRU08B], [BFK+10]. Aufgrund ihrer großen Bedeutung in der Feldebene, sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht, ist die richtige Auswahl geeigneter TR entscheidend für das erfolgreiche Planen und Betreiben verfahrenstechnischer Anlagen. So resultieren Fehlentscheidungen² beispielsweise in Fehlbestellungen, Projektverzögerungen, suboptimalem Anlagenbetrieb, Anlagenausfall oder gar Unfällen. In jedem Fall aber führen sie zu ungewollten Problemen und meist deutlich höheren Projektkosten (vgl. [LAG09], [KIE15], [DIN EN 60534-7]). Die möglichst umfassende Berücksichtigung technologischer und wirtschaftlicher sowie potentiell sämtlicher lebenszyklusrelevanter Aspekte macht jedoch gerade die Auswahl von TR zu einer hochkomplexen Aufgabenstellung mit einem enormen Bedarf an Fachwissen und Erfahrung [SCH12B]. Erschwerenderweise muss sie heute in einem Kontext ständig wachsenden Wissens und kürzer werdender Produktinnovationszyklen und der daraus resultierenden Vervielfachung der Lösungsmöglichkeiten geleistet werden. Da die Auswahl der TR, dem Umfang mittlerer und größerer Anlagen entsprechend (vgl. [BRU08B], [BRSC15]), tausendfach mit jeweils verschiedensten Spezifikationen durchgeführt werden muss, ist der damit verbundene Arbeitsaufwand entsprechend hoch.

Insgesamt befinden sich der verfahrenstechnische Anlagenbau und insbesondere das dafür notwendige Engineering in einem gravierenden Dilemma. Steigende Anforderungen und Komplexität müssen bei gleichbleibender oder gar verbesserter Qualität, in immer kürzerer Zeit, unter Aufwendung immer geringerer Investitionskosten bewältigt werden, um wettbewerbsfähig zu bleiben (vgl. [TAU13], [DKD14]). Eine Lösung für dieses Dilemma liegt in der Effizienzsteigerung des Engineerings [DRA08], [FAY09]. Da der kritische Pfad der Anlagenplanung über die Automatisierung führt [SCH03], nimmt die Effizienzsteigerung im Engineering der Automatisierung folglich eine Schlüsselrolle auf dem Weg zur Zielerreichung ein. Um diese Effizienzsteigerung zu erreichen, müssen Routineaufgaben automatisiert [ZIN06], [SCH08E] und damit nicht wertschöpfende Zeitanteile reduziert sowie andererseits wertschöpfende Tätigkeiten unterstützt werden [FAY05]. Der gleiche Effekt einer Steigerung der Qualität bei Verringerung des Aufwandes, den die Automatisierung im Anlagenbetrieb bewirkt, soll somit auf das Engineering übertragen werden. Dieser Gedanke ist auch als „Automatisierung der Automatisierung“ [SSE09] bekannt geworden. Es gilt deshalb, geeignete Konzepte, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln um das Engineering dahingehend zu unterstützen.

Berücksichtigt man die Bedeutung der automatisierungstechnischen Ressourcen in der Feldebene, die mit ihrer Auswahl verbundenen Herausforderungen sowie die Tragweite entsprechender Entscheidungen, kann gefolgert werden: die Unterstützung dieser Engineeringtätigkeit leistet einen großen Beitrag zur Effizienzsteigerung des Anlagen-Engineerings. Der Bedarf nach einer solchen Unterstützung ist ebenso aktuell wie die Suche nach einer geeigneten Herangehensweise an die damit verbundenen Herausforderungen, wie u. a. [EGB09], [SGG10B], [SCH12B], [GEI13], [ERB13] aufzeigen. Der für Engineeringaufgaben typische wissensintensive Charakter legt nahe, dass für die Auswahl von TR notwendiges Wissen gesammelt, verwaltet und automatisiert genutzt werden muss. Auf diese Weise kann aus bereits vorhandenem Engineeringwissen neues Wissen für die Entscheidungsunterstützung abgeleitet werden. Auf Wissensrepräsentation und -verarbeitung basierende Methoden und Ansätze sowie die Möglichkeiten softwarebasierter Unterstützung bieten das Potential für die notwendige Wertschöpfung auf informationeller Ebene.

² Die [NA 35] identifiziert mit „technische Realisierung festlegen“ und „Geräte festlegen“ zwei der sieben Planungstätigkeiten mit der höchsten Fehlerwahrscheinlichkeit im Engineeringprozess.

Abbildung 1-1 fasst die angesprochenen Themenbereiche in einem schematischen Überblick zusammen und gibt eine Orientierung für die Einordnung des thematischen Schwerpunktes der vorliegenden Arbeit.

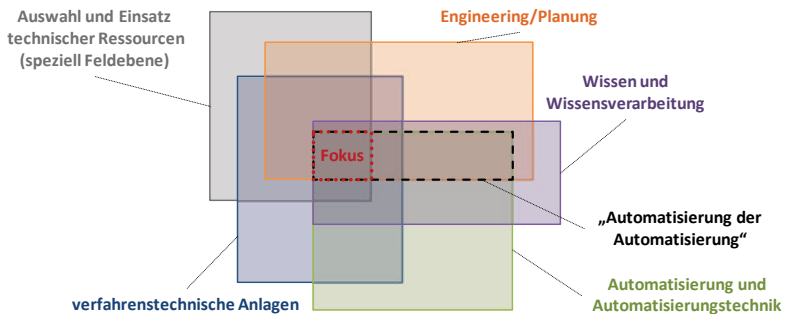


Abbildung 1-1: Themenbereiche und Fokus der vorliegenden Arbeit

1.2 Zielsetzung und Aufbau

Gesamtziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer auf Wissen basierenden Unterstützung bei der Auswahl von TR, wobei der Fokus auf den TR der Feldebene im Engineering der Automatisierungstechnik verfahrenstechnischer Anlagen liegt. Um dies zu erreichen, sind mehrere aufeinander aufbauende Teilaspekte zu bearbeiten:

- Ein Status Quo derzeitiger Möglichkeiten in Form von Vorgehensweisen, Ansätzen und Werkzeugen, den Planungsprozess hinsichtlich der Auswahl von TR zu unterstützen, muss erarbeitet werden.
- Aus den Defiziten des Status Quo ist ein Handlungs- und Verbesserungsbedarf abzuleiten. Die gewonnenen Erkenntnisse müssen in die Erstellung eines Anforderungskataloges für eine Weiterentwicklung einfließen.
- Ansätze und Methoden, auf dem aktuellen Stand von Forschung und Technik, sind hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für die anforderungsgerechte Erstellung eines Konzepts zu untersuchen.
- Erstellung eines Konzepts zur geeigneten Wissensrepräsentation und -verarbeitung für die Unterstützung bei der Auswahl von TR. Dazu sind sowohl ein geeignetes **Beschreibungsmittel** als auch eine **Methodik** sowie umsetzende **Werkzeuge** zu entwickeln.
- Abschließend müssen die Ergebnisse im Rahmen einer praktischen Evaluation anhand der aufgestellten Anforderungen bewertet und eingeordnet werden.

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit gliedert sich wie folgt:

Im Anschluss an diese Einleitung werden in **Kapitel 2** die Grundlagen des Planungsprozesses verfahrenstechnischer Anlagen dargestellt und eine thematische Einordnung der Arbeit in diesen Prozess ermöglicht. Dazu werden vor allem die Rolle des PLT-Engineerings und die darin stattfindende Aufgabe der Auswahl von TR erläutert. Das Kapitel schließt mit einer näheren Betrachtung der grundsätzlichen Herausforderungen dieser Engineeringaufgabe ab.

Als Grundlage für die Ableitung eines Handlungsbedarfes, steht die Darstellung des Status Quo der Auswahl von TR im Vordergrund von **Kapitel 3**. Neben der Beleuchtung der Rahmenbedingungen und Möglichkeiten für die Akquise des benötigten Wissens werden verschiedene, bereits existierende Ansätze zu dessen Verarbeitung diskutiert und bewertet.

Abschließend werden die sich ergebenden Konsequenzen für die praktische Durchführung der Engineeringaufgabe aufgeführt und eine Beurteilung des Status Quo vorgenommen.

Im ersten Teil von **Kapitel 4** werden aus den grundsätzlichen Herausforderungen und Rahmenbedingungen für die Engineeringaufgabe der Auswahl von TR sowie den Defiziten des Status Quo ein Grundkonzept entworfen und die sich wiederum speziell daraus ergebenden Besonderheiten und Herausforderungen erörtert. Schließlich erfolgt die Ableitung konkreter Anforderungen an ein zu entwickelndes Konzept.

Die folgenden beiden Kapitel bilden einen notwendigen fachlichen Exkurs zur Untersuchung von Ansätzen, Modellen und Methoden aus dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich ihrer Eignung für die anforderungsgerechte Erstellung des benötigten Konzepts. **Kapitel 5** widmet sich der Beschreibung der Eigenschaften technischer Objekte sowie der Charakteristik und Eignung von Merkmalen als dafür verwendbare strukturierte Informationsträger. **Kapitel 6** legt den Aufbau und die Bedeutung wissensbasierter Systeme zur Entscheidungsunterstützung und Auswahl dar. Im Weiteren werden zudem verschiedene Ansätze zur Wissensrepräsentation beschrieben und hinsichtlich der Verwendungsfähigkeit für die Konzepterstellung im Rahmen dieser Arbeit bewertet.

Den methodischen Kern der vorliegenden Arbeit bildet **Kapitel 7**. In diesem wird ein Konzept zur Repräsentation und Auswertung multidimensionaler, heterogener und vernetzter Merkmalräume vorgestellt. Im Rahmen einer Betrachtung theoretischer Voraussetzungen, Festlegungen und Annahmen werden die notwendigen Randbedingungen formuliert. Darauf basierend folgen im Weiteren die Entwicklung eines zusammengesetzten Modells zur Wissensrepräsentation und die Beschreibung von Analysemöglichkeiten sowie Verarbeitungsmechanismen des abgebildeten Wissens. Abschließend werden sowohl eine Vorgehensweise für die praktische Konzeptanwendung als auch eine Möglichkeit zur Integration des Konzepts in einen durchgängigen Engineeringprozess vorgestellt.

Kapitel 8 stellt die softwarebasierte Implementierung des im vorhergehenden Kapitel entwickelten theoretischen Konzepts dar und beschreibt die Funktionalität und das Zusammenwirken der entwickelten Softwarewerkzeuge.

In **Kapitel 9** wird die praktische Anwendung von Konzept und zugehöriger Methodik sowie der implementierten Werkzeuge anhand verschiedener Anwendungsfälle evaluiert. Die resultierenden Ergebnisse und gewonnenen Erfahrungen werden diskutiert und auf Basis der definierten Anforderungen ausgewertet.

Die wesentlichen Inhalte und Erkenntnisse dieser Arbeit werden in **Kapitel 10** zusammengefasst. Darüber hinausgehende wissenschaftliche Fragestellungen im Kontext der behandelten Thematik sowie der Blick auf zukünftige Entwicklungspotentiale schließen die vorliegende Arbeit ab.

2 Auswahl technischer Ressourcen im Anlagenlebenszyklus

Spezifikation und Auswahl technischer Ressourcen (TR) sind zwei stark verwobene Engineering-tätigkeiten. Unter Spezifikation ist das zielgerichtete Aufstellen und Präzisieren von Anforderungen in strukturierter Form an ein System [SCH99], ein Produkt oder einen Prozess zu verstehen. Gleichwohl wird das meist formalisierte Ergebnis dieses Vorgangs ebenfalls als Spezifikation bezeichnet, beispielsweise in Form eines Lastenheftes oder einer Merkmaleleiste [BRW07]. Die Informationen einer erstellten Spezifikation für TR können für eine zielgerichtete Auswahl aus verfügbaren Lösungen genutzt werden. Die erfolgreiche Auswahl geeigneter Lösungen bringt meist neue Beschreibungsinformationen mit sich und reichert die vorhandene Spezifikation wiederum an [GEO14B]. Die Tätigkeiten Spezifikation und Auswahl bzw. deren Ergebnisse stehen damit in wechselseitiger Beziehung und werden oft iterativ durchgeführt. Die vorliegende Arbeit fokussiert auf den Aspekt der Auswahl von TR. Eine hinreichende Spezifikation der TR ist dazu notwendig, wird in diesem Zusammenhang jedoch als vorausgesetzt angesehen und nicht weiter explizit thematisiert. Ziel des folgenden Kapitels ist die Einordnung der Engineeringaufgabe „Auswahl technischer Ressourcen“ in den Kontext des PLT-Engineerings im Rahmen des Anlagenlebenszyklus verfahrenstechnischer Anlagen. Darüber hinaus werden die Rahmenbedingungen und Herausforderungen bei der Bewältigung dieser Aufgabenstellung aufgezeigt.

2.1 PLT-Engineering als Beitrag der Automatisierungstechnik in der Anlagenplanung

In verfahrenstechnischen Produktionsanlagen (auch: *Prozessanlagen*) werden Ausgangsstoffe (Edukte) in einem oder mehreren Prozessschritten in Produkte umgewandelt. Bei den Produkten handelt es sich um vertriebsfähige Endprodukte oder Zwischenprodukte, welche in anschließenden Prozessen weiterverarbeitet werden [HEL03]. Eine Auswahl möglicher Einsatzgebiete und Produkttypen verfahrenstechnischer Anlagen wurde bereits in Abschnitt 1.1 aufgeführt.

Wie Anlagen im Allgemeinen unterliegen auch verfahrenstechnische Produktionsanlagen im Speziellen einem Lebenszyklus [WEB14]. Abbildung 2-1 verdeutlicht die dabei auftretenden Hauptphasen, die bei Bedarf weiter dekomponiert werden können. Weitere Übersichten und detaillierte Beschreibungen der Lebenszyklusinhalte finden sich u. a. in [SAKA00], [WEB08].

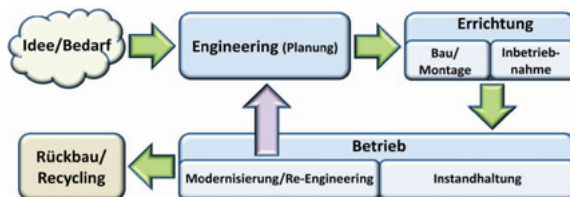


Abbildung 2-1: Hauptphasen des Anlagenlebenszyklus

Ausgehend von einer Idee oder dem Bedarf für ein bestimmtes Produkt, beginnt die Phase des Anlagen-Engineerings bzw. der -planung, deren Ziel und Ergebnis die errichtbare Anlage ist und auf die im weiteren Verlauf dieses Abschnittes näher eingegangen wird. Die Errichtung einer Anlage kann grob in zwei Unterphasen eingeteilt werden. Bau und Montage umfassen alle zur Errichtung der Anlage (inklusive zugehöriger Gebäude) notwendigen Arbeiten, ausgehend von den gelieferten Anlagenkomponenten und Baumaterialien. Die Inbetriebnahme umfasst die

Überführung der Anlage aus dem Ruhezustand in den Dauerbetriebszustand [SAKA00]. Sie beinhaltet dabei weitreichende Tests (z. B. FAT, SAT, SIT) und Funktionsprüfungen (z. B. Cold/Hot Commissioning) sowie Schulung der Anlagenbediener und Abnahme bzw. Übergabe. Die Übergänge zur Bau- und Montagephase sind in der Praxis fließend. Mit dem Betrieb der Anlage schließt sich die Hauptphase an, die den eigentlichen Zweck der Anlage darstellt – die spezifikationsgerechte Herstellung bzw. Bereitstellung eines oder mehrerer Produkte. Während des Betriebs sind Maßnahmen wie Instandhaltung und Inspektion ständige Begleiter, um die Einhaltung der notwendigen Prozessparameter sowie Sicherheit, Umweltschutz, gesetzliche Vorschriften und andere Rahmenbedingungen zu gewährleisten. Werden Modifikationen der Anlage notwendig, so spricht man meist von Re-Engineering und Modernisierung. Häufigster Grund für die Anlagenmodernisierung ist die Prozessoptimierung bzw. Steigerung der Anlagenperformance oder veränderte gesetzliche umwelt- oder sicherheitstechnische Auflagen [STR13]. Im Rahmen des Modernisierungsumfangs (z. B. Anlagenteil) setzt dann ein erneuter Zyklus ein, der mit einer entsprechenden Engineeringphase beginnt und mit dem (modernisierten) Betrieb endet. Die Rückbau-/Recyclingphase bezeichnet im Allgemeinen die letzte Lebenszyklusphase und ihr Erreichen ist meist im nicht-wirtschaftlichen Weiterbetrieb der Anlage oder in politischen bzw. gesetzlichen Vorgaben begründet. Auf den Rückbau der Anlage folgt der Verkauf, die Verschrottung oder ggf. der Wiedereinsatz einzelner Komponenten an anderer Stelle (*Retooling*) [DÖB10].

Das Engineering ist eine zentrale und im Lebenszyklus einer Anlage häufig wiederkehrende Phase, sowohl beim Neuanlagenbau als auch im Rahmen der Anlagenmodernisierung, wie Abbildung 2-1 zeigt. Die Planungsabläufe einer Anlage sind dabei komplex. Die dafür verantwortlichen Charakteristika und Faktoren sind als Kontext der Anlagenplanung wichtig für die Einordnung und das Verständnis der Inhalte der vorliegenden Arbeit. Sie werden daher im Folgenden dargestellt:

- Anlagenplanung ist stark interdisziplinär und arbeitsteilig [DRA08]. Zahlreiche Gewerke müssen für ihre jeweiligen Einzelziele und für das Erreichen des Gesamtziels koordiniert zusammenarbeiten [VDI/VDE 3695-5]. Beispielhaft werden hier die typischen Gewerke Chemie, Verfahrenstechnik, Elektrotechnik, Mechanik, Automatisierungstechnik, Rohrleitungsbau und Bautechnik genannt. Führender Fachbereich im Projekt ist das Gewerk, welches den zu realisierenden technischen Prozess entwirft und dimensioniert. Bei verfahrenstechnischen Anlagen ist dies die Verfahrenstechnik. Alle anderen Gewerke sind dem führenden Gewerk nachgeordnet und verwenden dessen Planungsunterlagen, um auf dieser Basis die gewerkespezifischen Planungen durchzuführen [FAY09].
- Verfahrenstechnische Anlagen sind im Gegensatz zu ihren Produkten in der Regel Unikate [WEB08]. Sie werden einzeln beauftragt und im Projektrahmen geplant und realisiert [WEB08], [FAY09]. Eine 1:1-Kopie der Ergebnisse vorangegangener Projekte ist damit prinzipiell ausgeschlossen. Entsprechend hoch ist der Anteil und Bedarf an neuen, problemspezifischen Lösungen im Engineering, um der Diversität solcher Anlagen gerecht zu werden.
- Der Anlagenplanungsprozess findet unter den ggf. divergierenden Interessen der beteiligten Stakeholder (z. B. Systemintegrator, Betreiber, Planer, Hersteller/Lieferant) statt und wird daher unter teilweise sehr unterschiedlichen wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekten betrachtet und durchgeführt. Die Komplexität der Projekt-Zusammenarbeit wird durch die zunehmend globalisierte Arbeitsteilung und Unterbeauftragung weiterer Teilnehmer bzw. Outsourcing (vgl. [RÖP04], [LRZ06], [WEB08], [BSW+09]) noch verstärkt. Es bilden sich

tendenziell immer größere und stärker verteilte inter- und intraorganisationale Netzwerke zur Abwicklung des Planungsprozesses [BFK+10].

- Unter dem wachsenden Termin- und Kostendruck [DRA08], [WWM+11] hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten die Tendenz zum *Simultaneous-Engineering* entwickelt und verstärkt. Durch die zunehmende Überlappung von Planungsphasen sollen in erster Linie Projektierungszeiten verkürzt und damit Engineeringkosten gesenkt werden [HER10], [HAB12]. Dies bedeutet zwangsläufig, dass teilweise auf Basis unvollständiger Informationen geplant und beim Eintreffen ergänzender oder korrigierender Informationen diese Planung iterativ überarbeitet werden muss [FAY09], [BRSC15].
- Grundsätzlich ist ein steigender Aufwand für die Einhaltung und Erfüllung geänderter Gesetze und Richtlinien und strenger Auflagen hinsichtlich Projektdurchführung, Sicherheits- und Umweltbestimmungen [BER01], [GGK+09[@]], [LGH11] und hinsichtlich der Qualität der Dokumentation [TAU05], [WEB08] zu beobachten. Pharma- und Lebensmittelherstellung sind davon besonders stark betroffen [WEB14]. Das effektive „Behördenengineering“ steigt in seiner Bedeutung, da Genehmigungsverfahren oftmals den kritischen Pfad bzw. „bottleneck“ im Anlagenprojekt darstellen. Zunehmend wird auch die Einhaltung multi- und internationaler Regularien für nationale Projekte obligatorisch [BFK+10].
- Neben den in Abbildung 2-2 explizit dargestellten Planungsphasen, in denen die fachliche Planungsarbeit im Fokus steht, prägen zahlreiche Querschnittsaufgaben und begleitende Prozesse die Anlagenplanung. Hier wären z. B. Qualitäts-, Änderungs-, Projekt-, Asset-, Risikomanagement sowie Dokumentation, Revisionierung, Controlling und technische Materialwirtschaft zu nennen (vgl. [PAS 1059], [WEB08]).

Bei der Ablaufmodellierung der Engineering-Phase gibt es, im Gegensatz zu den Hauptphasen des Anlagenlebenszyklus (Abbildung 2-1), unterschiedliche Modelle und Ansätze, die sich im Detail oder bezüglich der Terminologie durchaus unterscheiden. Dabei wird deutlich, dass Struktur und Umfang der Anlagenplanung von verschiedenen Faktoren abhängig sind, wie beispielsweise:

- Branche/Domäne (ggf. besondere Auflagen und Validierungspflichten hinsichtlich Reinheit, Umwelt (z. B. Bundes-Immissionsschutzgesetz [BER01]), Sicherheit)
- Unternehmensgröße des Anlagenbauers
- Anlagengröße
- Prozesscharakter (z. B. kontinuierliche und diskontinuierliche Prozessfahrweisen)
- Planungsszenario (Neuanlage, Anlagenumbau, Anlagenerweiterung, Rückbau, Revitalisierung)

Zudem kann der Planungsvorgang aus den verschiedenen Blickwinkeln der beteiligten Projektpartner betrachtet werden. [BER01] und [WEB14] geben hierzu einen Überblick.

Grundsätzliche Beschreibungs- und Vorgehensmodelle zur gesamten Anlagenplanung finden sich u. a. in [PAS 1059], [VDI 5200], [BER01] und [HEL03]. Eine sehr ausführliche Betrachtung der Phasen und Dokumentation im Lebensweg von Prozessanlagen bietet das Normenwerk [DIN 28000] mit seinen Teilen [DIN 28000-1] und [DIN 28000-2]. Das *Process Plant Engineering Activity Modell* der PI-STEP-Initiative [ISO 10303] gibt in seinem Vorgehensmodell ebenfalls einen gewerkeübergreifenden Überblick der Hauptaktivitäten und Datenflüsse über die Lebensdauer einer Anlage [ASS97]. [SCH08E] stellt in seinem Planungsablauf eine kompakte Schnittmenge verschiedener Ansätze dar, deren Granularität für die Einordnung im Kontext dieser Arbeit ausreicht. Abbildung 2-2 zeigt dies im oberen Bildbereich.

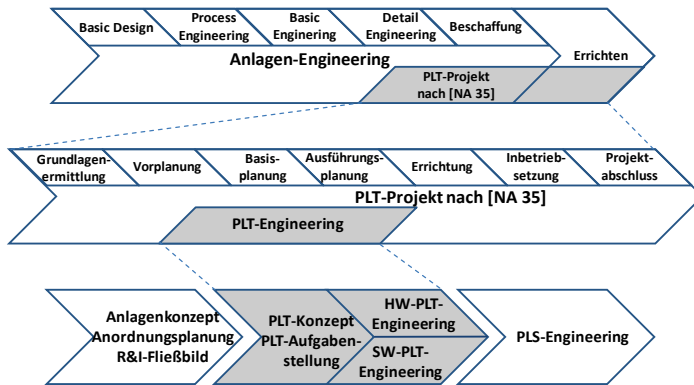


Abbildung 2-2: PLT-Engineering im Rahmen des Anlagen-Engineerings (nach [SCH08E])

Die in Abbildung 2-2 dargestellten Phasen des Anlagen-Engineerings werden in Anhang A kompakt erläutert. Einzig die Beschaffungsphase wird dort nicht näher betrachtet. Für den spezifischen Bereich des PLT-Engineerings wird diese Phase in Abschnitt 2.2 aufgegriffen und detaillierter ausgeführt. Die im Verlauf des Anlagen-Engineerings entstehenden Dokumente und Planungsartefakte werden kontinuierlich weiterentwickelt [WEB14] und konkretisiert. Neben Änderungen der Dokumente durch iterative Arbeitsschritte im Planungsprozess steigt ihre Informationsdichte beständig an. Auf eine umfassendere Aufführung der Planungsdokumente des gesamten Anlagen-Engineerings wird an dieser Stelle verzichtet. Übersichten und tiefergehende Beschreibungen finden sich u. a. in [SAKA00] und [WEB08]. Die für die Auswahl und Spezifikation von TR im Rahmen des PLT-Engineerings relevanten Dokumente werden in Abschnitt 2.2 aufgeführt und näher betrachtet.

Die Automatisierungstechnik als nachgeordnetes Gewerk kann innerhalb der verfahrenstechnischen Anlagenplanung erst mit der Projektarbeit beginnen, wenn die anderen Fachdisziplinen ihre Arbeit so weit vorangetrieben haben, dass die Spezifikationen für die Automatisierung vorliegen. Sie liegt damit in der Regel auf dem kritischen Pfad in der Gesamtprojektierung [SCH03]. Eine der Hauptaufgaben der Automatisierungstechnik ist die Durchführung des PLT-Engineerings zur Planung und Realisierung der leittechnischen Komponenten und ihres beabsichtigten Zusammenwirkens.

Ein vielzitiertes Phasenmodell [MÜH12] wird durch [NA 35] beschrieben. Es entstand in Anlehnung an die industrielle Praxis und gibt vor allem den Blickwinkel aus der Sicht der Anlagenprojektierer und -betreiber wieder. Das Modell beschreibt prinzipiell Ablauf und Durchführung eines leittechnischen Projekts, in dessen Rahmen das PLT-Engineering und darüber hinaus auch das Engineering des Leitsystems stattfinden. Abbildung 2-2 lokalisiert das PLT-Projekt schematisch im Phasenmodell des Anlagen-Engineerings. Der exakte Anfang der Projektierung der Prozessleitechnik ist u. a. projekt- und unternehmensspezifisch, kann bereits auf Dokumenten aus der Phase des Basic Engineerings beruhen, beginnt jedoch spätestens mit dem Detail Engineering des Anlagenbaus [BAR11]. Die in Abbildung 2-2 erkennbaren Phasentrennungen sind sowohl im Anlagen-Engineering als auch im PLT-Projekt real nicht so streng vorhanden. Die sequentielle Darstellung ist immer noch stark verbreitet, jedoch vielmehr der besseren Darstellbarkeit geschuldet, als der exakten Beschreibung praktisch stattfindender

Abläufe. [FRI02] und [KAB+02] weisen auf die Einschränkungen des Phasenmodells hinsichtlich der Abbildung iterativer, paralleler Planungsvorgänge hin.

2.2 Auswahl technischer Ressourcen im Rahmen des PLT-Engineerings

Das PLT-Engineering ist Teil des leittechnischen Projektes, in dessen Rahmen Lösungen für alle Aufgaben der Prozessleittechnik einer Anlage entwickelt werden. Der Standardprojektstrukturplan des [NA 35] unterteilt ein PLT-Projekt in sieben Phasen (→ Abbildung 2-2), die sich jeweils wiederum in mehrere Teilphasen dividieren lassen. Das [NA 55] ergänzt die Beschreibung des PLT-Engineerings hinsichtlich einer schematischen Modellierung der wichtigsten Schnittstellen im PLT-Datenfluss. In Anlehnung an die Planungsstruktur des [NA 35] wird im Folgenden die Einordnung und Beschreibung der für die Vorbereitung und die Durchführung der Auswahl von TR notwendigen Arbeitsschritte und Dokumente vorgenommen. Abbildung 2-3 zeigt dazu die hier relevanten Phasen des PLT-Projekts und die im Fokus stehende jeweilige Hauptaufgabenstellung. Zusätzlich werden die für die jeweilige Aufgabenstellung wichtigsten Planungsdokumente aufgeführt. Die Planungsdokumente müssen am Anfang der betroffenen Phasen jeweils zur Verfügung stehen, werden aber auch entlang des Planungsprozesses zum Teil neu geschaffen oder modifiziert (z. B. konkretisiert oder angereichert).

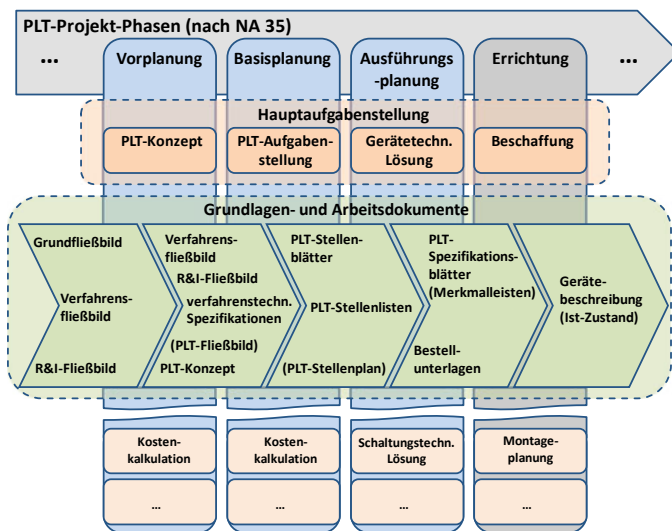


Abbildung 2-3: Spezifikation- und Auswahl von TR im Rahmen des PLT-Projekts

Vorplanung: Aufgabe der Vorplanung ist es, ein tragfähiges PLT-Konzept auf den Ergebnissen der Grundlagenermittlung zu erstellen. Das PLT-Konzept orientiert sich dabei an den Vorgaben und Randbedingungen des Anlagenkonzepts [NA 62] und beantwortet leit- und sicherheitstechnische Fragestellungen nach z. B. Produktqualität, Fahrweisen, Sicherheit und Verfügbarkeit, Bedienung und Anzeige, Ausführungen der Leitwarte und Kommunikationstechniken im Feld [BAR11]. Die Arbeit am PLT-Konzept bedingt vorhandene und gut funktionierende Informationsschnittstellen zu anderen Gewerken – insbesondere der Verfahrenstechnik.

Grundlagendokumente sind vor allem Fließbilder wie Grund-, Verfahrens- und R&I-Fließbild. Arbeits- und Ergebnisdokumente sind hauptsächlich ein erstes Lasten-/Pflichtenheft PLT [NA 35]

und das PLT-Konzept, welches neben dem prozessleittechnischem Grundkonzept u. a. das Alarm- und Verriegelungskonzept und das Grundkonzept Energieversorgung enthält [PAS 1059].

Fließbilder dienen als Grundsatzdokumente der Verständigung der an Entwicklung, Planung, Montage und Betrieb der Anlage Beteiligten [BiHo09]. Die Darstellungen innerhalb der Fließbilder sind standardisiert und in Richtlinien und Normen wie [DIN 28000-3], [DIN 28000-4], [DIN EN ISO 10628], [IEC 62424] festgelegt. Das *Grundfließbild* ist nur eine einfache Form der Verfahrens-/Prozessdarstellung und gibt den Verfahrensablauf symbolisch durch eine geordnete und verbundene Menge von Blöcken wieder [SAKA00]. Das *Verfahrensfließbild* dient zur schematischen, detaillierten, quantitativen Darstellung des Produktionsverfahrens und wird aus dem Grundfließbild weiterentwickelt [SAKA00]. Das *R&I-Fließbild* weist neben den Anlagenkomponenten und Apparaten auch die PLT-Funktionen aus [SCH08E] und ist das umfassendste Fließbild der Anlagen in allen konstruktiven Details [SAKA00]. Als zentrales Dokument für das Engineering des AT-Systems entsteht das R&I-Fließbild an der Schnittstelle zwischen Verfahrens- und Automatisierungstechnik [HSF+13] und wird teilweise sogar als wichtigste Dokumentation der Anlage aus verfahrenstechnischer Sicht betrachtet [AHS09]. Anhang C zeigt ein solches Dokument beispielhaft.

Basisplanung: Ergebnis der Basisplanung ist die umsetzungsneutrale Definition der „ausschreibbaren Anlage“ [NA 35], [BAR11]. Dazu muss die PLT-Aufgabenstellung erarbeitet und festgelegt werden. In enger Zusammenarbeit zwischen der Verfahrenstechnik und der Automatisierungstechnik werden dabei u. a. zu bearbeitende (z. B. Messen oder Regeln) technische/physikalische Größen, Methoden und Ziele (z. B. Regelung, Sicherung) der Verarbeitung dieser Größen, Ausgabe- und Bedienungsorte sowie verfahrensgerechte Mess- und Stellorte festgelegt [STR04]. Umfassend beinhaltet die Basisplanung damit das Erarbeiten aller PLT-relevanten Angaben und Funktionen sowie das Zuweisen von möglichst umsetzungsneutralen Lösungen für jede individuelle PLT-Funktion [PAS 1059]. Zusätzlich werden, vor allem zur belastbaren Kalkulation der Umsetzungskosten und Aufwände, Ausrüstungsmengengerüste zusammengestellt. Die Ergebnisse der Basisplanung bilden die Grundlage für die praktische Umsetzung und Spezifikation des Konzepts in der späteren Ausführungsplanung.

Gearbeitet wird in dieser Phase hauptsächlich auf Grundlage der R&I-Fließbilder, ggf. verfahrenstechnischen Spezifikationen und dem Lasten-/Pflichtenheft PLT. Während der Basisplanung werden u. a. R&I-Fließbilder ergänzt, PLT-Stellenblätter abgeleitet und PLT-Stellenlisten erstellt. Im Ergebnis stehen R&I-Fließbilder mit PLT-relevanter Vollständigkeit, PLT-Stellenblätter und -Stellenlisten, Auflistungen der Hilfsenergien für die PLT, grobe Mengengerüste der prinzipiellen TR und das endgültige Lasten-/Pflichtenheft PLT (vgl. [ASS97], [PAS 1059], [VDI/VDE 3694]) zur Verfügung.

Die technischen Daten jeder PLT-Stelle (Sensoren und Aktoren) werden in einem zugehörigen *PLT-Stellenblatt* in übersichtlicher Form zusammengefasst. Das PLT-Stellenblatt kann Daten zur allgemeinen Kennzeichnung der Stelle, zur Stoffbeschreibung (Bezeichnung, Zusammensetzung, Stoffeigenschaften), zur Spezifikation der TR inklusive Zubehör und zum Einbauort enthalten [WEB08]. Anhang D zeigt ein solches Stellenblatt am Beispiel eines Widerstandsthermometers. *Verfahrenstechnische Spezifikationsblätter* ergänzen im Wesentlichen die PLT-Stellenblätter um weitergehende, umfangreiche verfahrenstechnische Daten [STR02]. *PLT-Stellenlisten* sind geordnete Zusammenstellungen mehrerer oder aller PLT-Stellen mit ihren zugehörigen wesentlichen Informationen (Kennzeichnung, Funktion, R&I-Referenz) [DIN EN 62382].

Ausführungsplanung: Auf Grundlage der vorangegangenen Phasen muss die Ausführungsplanung die erstellten Konzepte (z. B. PLT-Aufgabenstellung) umsetzen und die gerätetechnische Lösung entwerfen bzw. die Hardware-Planung durchführen. Dies bedeutet das Spezifizieren und Auswählen der notwendigen TR und schafft die Basis für weitere Schritte im PLT-Engineering und für das PLS-Engineering [BAR11]. Die wichtigsten Schnittstellen in dieser Phase bestehen zur Elektrotechnik, zum Rohrleitungsbau und ggf. auch schon zu Herstellern und Lieferanten von TR [NA 55].

R&I-Fließbilder und das endgültige Lasten-/Pflichtenheft PLT sind tragende Eingangsdokumente dieser Phase [NA 35]. Zusätzlich werden PLT-Stellenblätter und das PLT-Stellenverzeichnis (auch: PLT-Stellenliste) als Grundlagendokumente genutzt. Die PLT-Stellenpläne ergänzen im Weiteren die PLT-Stellenblätter [SCH08E]. Die aufgeführten Dokumente werden im folgenden Planungsablauf auch als Basis für die Entwicklung der schaltungstechnischen Lösung und die Elektroplanung und deren Dokumente wie (z. B. Funktions-, Stromlauf-, Übersichts- [DIN EN 61082], Verschaltungs- und Anordnungspläne) genutzt [STR02]. Aus Dokumentations-sicht muss das Ergebnis der Ausführungsplanung die Ausleitung der für den Beschaffungsprozess notwendigen Spezifikationen der TR, ggf. der damit zusammenhängenden Bestellunterlagen und der kalkulationsrelevanten, konkretisierten Mengengerüste der Ausrüstung sein [NA 35].

Der *PLT-Stellenplan* stellt die in Hardware und/oder Software realisierten Funktionen einer PLT-Stelle mit grafischen Symbolen dar und zeigt die vorgesehene topologische Anordnung und Verschaltung aller zu einer PLT-Stelle gehörenden TR [DIN EN 62382]. Die *Gerätespezifikation* (auch: *Geräte-Spezifikationsblatt*) kann als Teil des PLT-Stellenblatts auftreten [STR02], ist aber meist ein eigenständiges Dokument zur Formulierung von Anforderungen an die zukünftige TR. Es kann technisch verbindlicher Bestandteil der kaufmännischen Bestellabwicklung sein [STR02] und wird meist als „lebendes Dokument“ verstanden. Als solches stellt es eine Sammlung aller die Anlagenkomponente kennzeichnenden Daten dar [SAKA00] und behält damit auch informative Relevanz für spätere Lebenszyklusphasen wie Errichtung, Montage, Inbetriebnahme und Betrieb.

Errichtung: Obgleich die Phase der Errichtung nicht mehr zum eigentlichen PLT-Engineering gerechnet wird [SCH08E], so ist die hier enthaltene Aufgabe der Beschaffung relevanter und abschließender Teil im Rahmen der Engineeringaufgabe der Auswahl von TR. Die im Zuge des Engineerings erstellten Spezifikationen, d. h. die aus Sicht der späteren Anwender der TR benötigten bzw. gewünschten Eigenschaften, werden an einen oder mehrere geeignete Hersteller/Lieferanten von TR übermittelt. Diese beantworten die Anfrage des Planers mit ein oder mehreren technischen Lösungen bzw. Produktangeboten oder fordern weitere, präzisere Informationen zu den gestellten Anforderungen. Dieser Vorgang kann iterativ ablaufen, solange bis sich aus technischer und kaufmännischer Sicht ein Konsens zwischen beiden Akteuren gebildet hat. Daraufhin folgen Bestellung und später Lieferung der entsprechenden TR [HEE05], [GEO11].

Die Anforderungen des Planers ergeben sich aus den in der vorangegangenen Ausführungsphase aufgestellten bzw. konkretisierten Dokumenten wie PLT-Stellenblätter und PLT-Pflichtenheft bzw. aus den daraus abgeleiteten Spezifikationen und werden in Form entsprechender *Spezifikationsblätter* zumeist aus den vom Planer genutzten CAE-Tools ausgeleitet [HEE05]. Obwohl sich dafür Beschreibungsmittel wie *ecl@ss-Merkmalleisten* mehr und mehr durchsetzen, kann man noch nicht von flächendeckenden Standards bezüglich Inhalt, Struktur und Format sprechen [GEO14B].

2.3 Sensorik und Aktorik – technische Ressourcen der Feldebene

Die unterste Ebene der sogenannten *Automatisierungspyramide* (→ Abbildung 2-4) in unmittelbarer Nähe zum Prozess wird auch als *Feldebene* bezeichnet. Im Ebenenmodell der [IEC 62264] wird darunter analog die Ebene 1 „Prozess- oder Maschinenbeeinflussung und Datenerfassung“ verstanden. Unter den dort im Einsatz befindlichen Feldgeräten subsumiert man im Allgemeinen die sensorischen und aktorischen Funktionsträger der Automatisierungssystemtechnik [BIR01]. Die Aufgabe der Sensoren oder Sensorsysteme ist es Information über den Zustand der Anlage, den Ablauf des Produktionsprozesses und über das Produkt zu beschaffen [GUL99]. Dies dient der Gewährleistung und Optimierung von Prozessführung, Arbeits- und Anlagensicherheit, Anlagen-zustand und -verfügbarkeit sowie Umweltschutz [GGK+09@]. Dafür werden die Prozessgrößen einer Maschine oder Anlage erfasst und in eine weiterverarbeitbare Form transformiert [BIR01]. Zur Aktorik zählen TR, die in die Anlage eingreifen und damit auf den Fortgang des Prozesses einwirken [GUL99]. Dafür werden von den Aktoren bzw. Aktorsystemen Steuerinformationen in entsprechende Stelleingriffe in den technischen Prozess umgesetzt [BIR01].

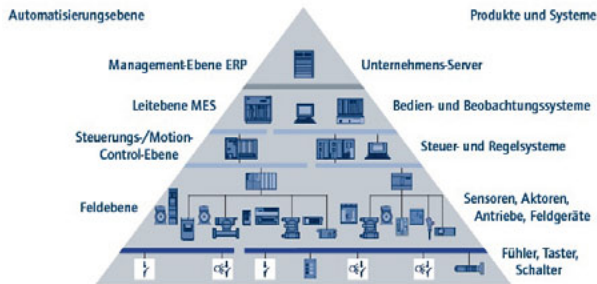


Abbildung 2-4: Ebenen der Automatisierungspyramide [Fri10]

In Literatur und Praxis (z. B. in Hersteller-Produktkatalogen) lassen sich verschiedenste Taxonomien und Klassifizierungssysteme der Feldgeräte finden. So bieten beispielsweise Normen wie [IEC 61987-1] eine Kategorisierung von Messeinrichtungen oder [DIN EN 60534-1] Klassifikationsschemata für Stellventile. Auch Fachliteraturen wie [TROB98], [Sil07] und [WEB14] skizzieren entsprechende Ordnungssysteme für die sensorische und aktorische Ausrüstung der Feldebene.

Als primäres Unterscheidungsmerkmal hat sich bei der Sensorik die grundsätzliche technologische Aufgabe bzw. Funktion des Feldgerätes [BIR01] oder der Anwendungsfall [FAV04] etabliert – die Erfassung bzw. Beeinflussung einer oder mehrerer spezifischer Prozessgrößen. Sensoren in verfahrenstechnischen Anlagen werden demnach häufig in die wichtigsten Messaufgaben Druck, Durchfluss, Temperatur und Füllstand [FEL01], [HEL03] kategorisiert. Darüber hinaus können je nach Anwendungsgebiet jedoch auch Prozessgrößen wie beispielsweise Dichte, Viskosität, pH-Wert, Feuchte [FAV04] für die Erfassung relevant werden. Für die Aktorik lässt sich kein eindeutiges, primäres Klassifikationsmerkmal identifizieren. Hier gibt es verschiedenste Ansätze für Ordnungskriterien [ERB13] und taxonomische Wurzeln. Beispiele dafür liefern [LAN04] und [POEP94] u. a. mit Klassifikationsansätzen nach Hilfsenergieversorgung (z. B. elektrisch, pneumatisch, hydraulisch), nach Automatisierungsgrad des Prozesseingriffes (z. B. Handbedienung, Automatik-betrieb) und Einsatzmerkmalen wie z. B. Stellbereich

(diskontinuierlich, kontinuierlich) oder Stellverfahren (proportional, integrierend). Eine der Klassifikation von Sensoren sehr ähnliche Betrachtungsweise ist die von [POEp94] skizzierte Taxonomie nach funktionalen Kriterien. Hier wird zwischen Stellgliedern, Antrieben, Steuereinrichtungen und Energiespeichern unterschieden.

Für die Realisierung der jeweiligen technischen Grundfunktion haben sich bei Aktorik und Sensorik über viele Jahrzehnte Entwicklung und Forschung vielfältige prinzipielle Möglichkeiten entwickelt. Diese Verfahren und Prinzipien werden im Folgenden als Lösungsprinzipien bezeichnet. Vertreter solcher Lösungsprinzipien sind zum Beispiel Messprinzipien und -verfahren, mit denen Messaufgaben unter Ausnutzung verschiedenster physikalischer Phänomene grundsätzlich technologisch realisiert werden können. So werden z. B. die Fließgeschwindigkeit einer elektrisch leitenden Flüssigkeit als Ursache einer durchflussproportionalen induzierten Spannung bei magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten [MWR+12] oder Laufzeiten ausgesendeter Signale bei Ultraschall-, Mikrowellen- oder Radar-Füllstandmessgeräten genutzt. Abbildung 2-5 zeigt einige solcher Messprinzipien beispielhaft für die Aufgabenstellung Durchflussmessung.

Die große Diversifizierung und Vielfalt der zur Verfügung stehenden Lösungsprinzipien hat ihre Ursache nicht nur in der historischen Entwicklung. Ihre Vielfalt ist notwendig, um den jeweiligen Besonderheiten und Anforderungen von Anwender und Prozess technisch gerecht werden zu können. „Durch die optimale Zusammenfassung der Effekte oder Wirkprinzipien, der Wirkflächen und der Fertigungsverfahren ergeben sich für das gesamte Lösungsprinzip charakteristische Eigenschaften.“ [Rot01]. Nicht alle Lösungsprinzipien sind verständlicherweise gleich gut für die Erfüllung der Aufgabenstellung an einem spezifischen Einsatzort geeignet. [BRU08A] betont beispielsweise, dass es ein universelles Messverfahren wegen der Komplexität der Messungen und der vielfältigen Einschränkungen der einzelnen Messverfahren nicht geben kann – jedes hat seine individuellen Stärken und Grenzen. Eine Auswahl rein unter dem Gesichtspunkt durchzuführen, die neueste Technologie oder ein modernes Verfahren einzusetzen, ist unzureichend [SCH12B]. Die im Hinblick auf die Sensorik notwendige und verfügbare Vielfalt an Lösungsprinzipien lässt sich gleichermaßen auf die Aktorik übertragen, wie u. a. [ERB13] zeigt.

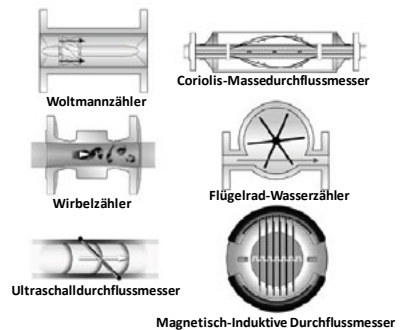


Abbildung 2-5: Verschiedene Messprinzipien für die Durchflussmessung [MWR+12]

2.4 Charakteristik und Herausforderungen der Engineeringaufgabe

Lösungsprinzipien für Sensoren und Aktoren oder konkrete TR müssen gezielt, unter Beachtung relevanter Kriterien, hinsichtlich ihrer Eignung für eine spezifische Aufgabenstellung geprüft und ausgewählt werden. Dabei können sowohl rein technologische als auch darüber hinaus ökonomische Kriterien eine wichtige Rolle spielen [SCH92].

Da die Feldebene die dem Prozess nächste Ebene ist, sind die dort befindlichen TR stark abhängig von den Einsatz- und Umgebungsbedingungen im Feld. Im Allgemeinen ausschlaggebend für die Eignung von TR oder Lösungsprinzipien in verfahrenstechnischen Anlagen sind daher vor allem Eigenschaften des Messstoffs (z. B. Temperatur, Druck, Dichte, Viskosität, elektr. Leitfähigkeit)

[NOR90], mögliche Prozesseinflüsse (z. B. Pulsation, Vibration, Druckstöße, bidirektionale Strömungen, Schaumbildung) und die Bedingungen am Einsatzort (z. B. Prozessanschluss, Ein- und Auslaufstrecken, elektro-magnetische Felder, Explosionsgefährdung, Umgebungstemperatur, äußere mechanische Einflüsse wie Schmutz, Spritzwasser) [SCH12B]. Insbesondere bei rauen, anspruchsvollen Umgebungs- und Betriebsbedingungen zeigen sich Auswirkungen einiger Faktoren auf Sensorsysteme und Stellgeräte dabei erst nach längerem Betriebseinsatz [BOJ06] und müssen demnach vorausschauend geprüft und berücksichtigt werden.

Neben der technologischen Durchführbarkeit der spezifischen Aufgabe der TR besitzen andere Eigenschaften Relevanz für die Verwendung der TR in ihrem Lebenszyklus. Als Elemente der Prozessleittechnik sind hierbei Faktoren hinsichtlich Kommunikation (z. B. Signalart, Protokoll), Datenübertragung (z. B. pneumatisches Einheitssignal, analoges elektrisches Einheitssignal, schaltende Ausgänge, HART-Protokoll, Feldbus) [FGH+11[@]] und Anzeige- und Bedienkonzept zu klären und Kriterien für Installation (z. B. Sternverdrahtung, Feldbus, Feld- und Feldbusmultiplexer [STR04]), Montage (z. B. Einbaumaße, Gewicht) sowie Integration und Inbetriebnahme [BRW07] zu prüfen. Bedeutung erhalten zunehmend Eigenschaften hinsichtlich Nachhaltigkeit und Umweltschutz [GGK+09[@]] (z. B. Sicherheit, Recycling, Energieeffizienz [BFK+10], Entsorgung [REG05], Emissionen), die sich unter anderem aus den ständig steigenden gesetzlichen Anforderungen an die Anlagenplanung [BER01] und sozio-ökonomischen Einflüssen [BFK+10] ableiten lassen. Neben quantitativen, konkreten Kriterien können auch indirekte, qualitative Eigenschaften wie z. B. Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Wartungsbedarf und Bedienkomfort eine entscheidende Rolle für die Auswahl spielen [MÜL79]. Ökonomische Faktoren können darüber hinaus die Verwendbarkeit und Güte einer Lösung beeinflussen – sie lassen sich in der Regel unter dem Gesichtspunkt anfallender Kosten (z. B. Stückkosten, Systemkosten, Wartungs-, Reparatur-, Ersatzkosten [LAN04], [EGB09]) betrachten.

Zusammenfassend lassen sich grundsätzliche Charakteristika und Rahmenbedingungen feststellen, welche die Herausforderungen der Engineeringaufgabe der Auswahl von TR maßgeblich bestimmen:

Grundsätzliche Charakteristika:

- Für die Behandlung sensorischer oder aktorischer Aufgabenstellungen existiert eine große Anzahl verfügbarer Lösungsprinzipien und eine noch größere Anzahl an möglichen TR [JAN06], [SGG10A]. Die Lösungsmenge verfügbarer Optionen ist damit nahezu unüberschaubar groß [MES07].
- Für die Auswahl von Lösungsprinzipien und darüber hinaus von TR sind viele Kriterien zu berücksichtigen [SCH12B], [ERB13]. Die tatsächliche Relevanz einzelner Eigenschaften und die Zusammensetzung bzw. das Zusammenwirken dieser Eigenschaften für die Eignungsbeurteilung von Lösungsprinzipien oder gar TR sind je nach Aufgabenstellung sehr unterschiedlich [MMK+11].
- Die Details der Eigenschaften von TR zeigen bei jedem Lösungsprinzip Abhängigkeiten von den physikalischen Bedingungen [BRU08A]. Eigenschaften von TR sind daher nicht beliebig kombinierbar. Zudem stehen Eigenschaften von TR meist im Zusammenhang zueinander und können demnach nicht unabhängig voneinander optimiert werden. Wird eine Eigenschaft verbessert, so verschlechtern sich typischerweise ein oder mehrere andere Eigenschaften [GLO01]. Für eine optimale Auswahl müssen diese deshalb stets in ihrer Gesamtheit betrachtet werden [HEL03], [ESW+10].

Rahmenbedingungen:

- Zum Zeitpunkt der Auswahl von TR ist der notwendige Informationsstand bezüglich relevanter Auswahlkriterien oft unvollständig bzw. unter Umständen in frühen Planungsphasen auch mit Unsicherheiten behaftet [FAY09], [HAB12].
- Neue Prozessanforderungen [BGS09], [GGK+09[@]], der Wettbewerb [BFK+10], neue Richtlinien und Gesetze [SCH12A], neue Technologien [GGK+09[@]] aus Grundlagenforschung [BIR01] und IT-Entwicklung [BFK+10], [ESW+10] zwingen die Hersteller von TR der Feldebene zu einer ständigen Weiterentwicklung ihrer Produkte. Marktstudien wie [SCH09], [SCH11A[@]], [SCH11B[@]], [SCH12[@]] aber auch andere Quellen aus der Fachliteratur [BRU08A], [SCH08C] zeigen deutlich wie sich Trends verändern und die Schwerpunkte der Anwender verschieben können. Diese Innovationsdynamik [BSW+09] bedingt einen dauerhaften und hohen Aktualisierungsdruck bezüglich des Wissens über Vorhandensein, Einsatzfähigkeiten und Einsatzmöglichkeiten entsprechender Produkte. Bedingt durch die aufgeführten Faktoren existiert mittlerweile eine unüberschaubar große und weiter wachsende Menge an verfügbaren TR und deren Varianten für die Automatisierungstechnik [BAMA92], [BAPA04], [JAN06], [SGG10A].
- Die Aufgabenstellung der Auswahl von TR gehört zu den sehr häufig durchzuführenden Aufgabenstellungen im Rahmen des Anlagen- bzw. PLT-Engineerings, wie die hohe Anzahl zu bearbeitender PLT-Stellen bei mittleren und größeren Anlagen (vgl. [BRU08B], [BRSC15]) und die mitunter notwendige iterative Überarbeitung gefundener Lösungen [ERB13] deutlich macht.

Nicht zuletzt aufgrund der dargestellten Punkte ist die Auswahl von TR sowie auch von Lösungsprinzipien eine nichttriviale [BAsE96], komplexe Engineeringaufgabe. Ihre Bearbeitung und Lösung ist zeitaufwändig [OME92] und bedarf Expertise [FRE00] sowie profunder Kenntnis [BRU08A]. Meist wird in diesem Zusammenhang auch von einer reinen Erfahrungssache [SCH04], [REG05] gesprochen.

3 Status Quo und Handlungsbedarf

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung der Auswahl von TR basiert auf der Sammlung und Auswertung von relevantem Wissen und wird daher im Folgenden hinsichtlich zweier Aspekte betrachtet: Wissensakquise und Wissensverarbeitung. Hierzu wird der Status Quo im Hinblick auf die Möglichkeiten und Voraussetzungen, die sich aus Forschung und Entwicklung sowie praktischen Vorgehensweisen ergeben, beleuchtet und anschließend bewertet.

Mitunter werden in praktischen Anwendungsfällen auch geeignete Lösungsprinzipien gesucht, um beispielsweise prinzipielle Machbarkeiten festzustellen oder die Auswahl konkreter TR einzugrenzen. Die Aspekte Wissensakquise und -verarbeitung sind ebenso für die Bewertung und Auswahl von Lösungsprinzipien relevant. Zudem existieren Ansätze, welche sich auf die Auswahl von Lösungsprinzipien anstelle von TR konzentrieren und beschränken. Aus diesen Gründen werden die Betrachtungen im Folgenden um Lösungsprinzipien erweitert. Sofern notwendig, wird an entsprechender Stelle konkret zwischen TR und Lösungsprinzipien differenziert.

3.1 Wissensakquise

Bei der Suche nach Wissen über Eigenschaften und Einsatzfähigkeiten von Lösungsprinzipien, bzw. darüber hinaus von konkreten TR, mangelt es keinesfalls an Wissensquellen. Ganz im Gegenteil: der Planungsingenieur sieht sich einer Landschaft vielfältiger Möglichkeiten der Wissensakquise gegenüber, die sich über viele Jahrzehnte in unterschiedlichsten Formen und Medien manifestiert haben. Anhang E gibt einen tabellarischen Überblick über das Spektrum dieser Wissensquellen. Für ihre Einordnung und Bewertung³ werden folgende Charakteristika betrachtet:

- *Aktualität*: Wie aktuell ist das Quellenwissen (Die Nutzung der aktuellsten Vertreter der Quellenart wird jeweils vorausgesetzt.)?
- *Zugänglichkeit/Zugriffsmöglichkeit*: Ist der Inhalt der Quelle prinzipiell öffentlich zugänglich (z. B. Veröffentlichung oder recherchierbare Online-Quelle)?
- *Neutralität/Allgemeingültigkeit*: Ist das Quellenwissen neutral und wettbewerbsunabhängig?
- *Formalisierung*: Liegt die Wissensquelle hinsichtlich Syntax und Struktur in einer festen Form vor? Diese Form kann dabei sehr individuell sein, wird aber innerhalb einer spezifischen Quelleninstanz grundlegend beibehalten.
- *Standardisierung*: Beruht die Quelle hinsichtlich Inhaltssemantik sowie Struktur und Syntax der Inhaltsbeschreibung auf anerkannten, verbreiteten Standards?

Bei der Betrachtung dieser Vielzahl an grundsätzlichen Wissensquellen wird die vorherrschende Heterogenität deutlich (→ Anhang E, Anhang F). Die möglichen Quellen für die Wissensakquise des Planungsingenieurs unterscheiden sich in ihrer Qualität hinsichtlich der betrachteten Charakteristika unter Umständen stark. Nicht alle Quellen weisen die für die Planungsaufgabe notwendige Aktualität auf. Dies ist zumeist sehr großen Aktualisierungsintervallen oder einer sehr eingeschränkten Datenbasis zuzuschreiben. Einige Quellen sind zudem nicht für jeden öffentlich zugänglich und daher grundsätzlich nicht von jedem nutzbar. Große Unterschiede gibt es auch bezüglich der Neutralität der Wissensquelle. Insbesondere marktnahe Quellen mit Informationen über konkrete TR sind zwangsläufig proprietär und besitzen daher nur sehr eingeschränkt Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Art und Grad der Formalisierung der Wissensquellen sind sehr unterschiedlich – zur Wissensabbildung wird quasi das gesamte Spektrum nichtformaler bis semi-

³ Die verwendete Metrik ist bewusst grob skaliert und soll eine rein qualitative Orientierung bei der Quelleneinordnung bieten.

formaler Strukturen genutzt. Beispielhaft zu nennen sind textuelle Beschreibungen, Diagramme, Tabellen, Struktogramme und Entscheidungsbäume. Anhang F zeigt Beispiele dieser Vielfalt. Das Niveau der Formalisierung ist durchgehend eher niedrig ausgeprägt. Durchgängigkeit, Einheitlichkeit oder gar Standardisierung bezüglich der formalen Struktur ist de facto nicht gegeben. Dies hat große Auswirkungen auf die einheitliche Deutung von Wissensinhalten. Erschwerend kommt die Verwendung diverser Formate (beispielsweise XLS, PDF, Datenbanksprachen, Textformate) der Wissensdokumentation hinzu. Durch die aufgeführte Heterogenität der Wissensquellen leiden grundsätzlich die Möglichkeiten zur deren rechnergestützter, automatisierter Verarbeitung.

Auch die Inhalte der Wissensquellen an sich können differieren. Bezugnehmend auf die in Abschnitt 2.4 dargestellte Engineeringaufgabe kann dies im konkreten Fall bedeuten, dass Quelleninhalte sich unterscheiden in: Anzahl und Art der beschriebenen Lösungsprinzipien bzw. TR, Anzahl und Art der beschreibenden bzw. relevanten Kriterien, Art und Formalisierung der Beschreibung der charakteristischen Kriterienausprägungen [MSA93]. Besonders bei stark proprietären Wissensquellen wird die beschriebene Diversität von einigen Herausgebern durchaus bewusst erzeugt [ERB13] und genutzt, um eine Vergleichbarkeit auf Produktebene zu erschweren und damit z. B. wettbewerbsrelevante (zum Teil nur scheinbare) Alleinstellungsmerkmale [BIR01] zu beanspruchen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Punkte bei der Betrachtung der Möglichkeiten zur Wissensakquise festhalten:

- Es existieren sehr viele mögliche Arten und Ausprägungen nutzbarer Wissensquellen.
- Die Wissensquellen unterscheiden sich qualitativ hinsichtlich der betrachteten Charakteristika (→ Anhang E) teilweise signifikant. Gleichwohl können auch die Inhalte syntaktisch und/oder semantisch differieren [EGB09].
- Die einzelnen Quellenarten sind bezüglich der Gesamtheit ihrer Charakteristika und hinsichtlich einer umfassenden (automatisierten) Nutzung nicht befriedigend.

Zusätzlich zur Heterogenität der Wissensquellen haben u. a. Faktoren wie der Anwendungsfall, die Domäne sowie firmen- und personenspezifische Arbeitsweisen Einfluss auf die tatsächliche Nutzung der Wissensquellen. Diese Uneinheitlichkeit bei der Auswahl und der Verwendung einer oder mehrerer Wissensquellen erschwert die Vergleichbarkeit und die Qualitätssicherung der Engineeringlösungen.

3.2 Wissensverarbeitung

Für die Auswahl geeigneter Lösungsprinzipien bzw. TR muss aus den vorhandenen Informationen über grundsätzlich verfügbare Lösungen geschlussfolgert werden, um deren jeweilige Eignung bezüglich spezifizierter Anforderungen festzustellen. Dazu muss das vorliegende Wissen aus den jeweiligen Wissensquellen (→ 3.1) effektiv verarbeitet werden. Im Folgenden werden hierfür neben der manuellen Durchführung des Auswahlprozesses mehrere rechnergestützte Ansätze vorgestellt, jeweils auf ihre Vorteile und Einschränkungen hin betrachtet und abschließend zusammenfassend bewertet.

3.2.1 Manuelle Auswahl

Die manuelle Auswahl wird nachfolgend verstanden als die Durchführung der Auswahl von TR unter Zuhilfenahme sowohl papierbasierter als auch digitaler Wissensdokumente. Dabei ist die Nutzung von Rechnerunterstützung zum Zweck der Wissensverarbeitung in Form aktiver Entscheidungsunterstützung ausgeschlossen.

Eine verallgemeinerte Aussage über die Vorgehensweise bei der manuellen Durchführung der Auswahl ist schwer zu treffen, da diese sehr stark von der subjektiven Nutzung der Wissensquellen (→ 3.1) abhängt. Für die Suche nach geeigneten Lösungsprinzipien werden bevorzugt Quellen mit übersichtlicher Strukturierung wie Entscheidungstabellen (vgl. [BRU08A], [FGH+11[@]]) und sogenannte Konstruktionskataloge herangezogen. Konstruktionskataloge sind zweidimensionale Datendarstellungen, wobei die Inhalte im Sinne einer Matrix nach bestimmten Gesichtspunkten strukturiert sind [ERB13]. [MES07] und [ERB13] berichten ausführlich über Arten und Nutzung solcher Konstruktionskataloge.

Insbesondere für die manuelle Auswahl sind graphische Darstellungen, aber auch die grundsätzliche Übersichtlichkeit der Wissensquellen von vorrangiger Bedeutung. Aus diesem Grund haben sich verschiedene Forschungsaktivitäten mit der methodischen Unterstützung des Auswahlprozesses beschäftigt. Ansätze für die Unterstützung der Aktorauswahl finden sich z. B. bei [HFA97] in der graphischen Aufbereitung der Leistungscharakteristika verschiedener Wandlerprinzipien mit Hilfe einfacher physikalischer Modelle und der Analyse von Herstellerangaben [JAN06]. [BLF+05] erweitern den Ansatz der makroskopischen Wandlerprinzipien um den Bereich der mikrosystemtechnischen Aktoren [JAN06] mit ähnlichen Diagrammdarstellungen. Für den Bereich der Sensorik liefern frühe Ansätze eher grundlegende Methodiken und Richtlinien für die Auswahlunterstützung. Z. B. entwirft [NOR90] gezielte Fragen und [EDNo00] Vorgehensmodelle um den Auswahlprozess zu unterstützen. [SHF+01] lehnen sich an den graphischen Ansatz von [HFA97] an und entwickeln Diagramme zur graphischen Gegenüberstellung der Eigenschaften von Sensorprinzipien. Abbildung 3-1 stellt dies am Beispiel von Temperaturmessprinzipien dar, wobei die Auflösung des Sensors und die Betriebstemperatur als charakteristische Vergleichsmerkmale genutzt werden. [BLF+05] liefern analog zu ihrer Unterstützung der Aktorauswahl einen entsprechenden Ansatz für mikrosensorische Messprinzipien. Für die Suche und die Auswahl konkreter TR wird im Sinne der manuellen Wissensverarbeitung zumeist auf proprietäre Wissensquellen wie Produktkataloge und Datenblätter individueller Hersteller zurückgegriffen [ESW+10], [MMK+11].

Die Vorteile der manuellen Durchführung der Wissensverarbeitung liegen einzig in der theoretischen Möglichkeit das komplette Spektrum zur Verfügung (ggf. jedoch auch hinsichtlich der Zugänglichkeit eingeschränkt) stehender Wissensquellen nutzen zu können, ohne dabei besonderen technischen Voraussetzungen an Hilfsmittel zur Verarbeitung (z. B. Rechner, Datenbank) zu unterliegen. Diese Gesichtspunkte relativieren sich aber in der praktischen Durchführung schnell, da der Durchführende unmittelbar mit der heterogenen Wissenslandschaft (→ 3.1) konfrontiert wird. Unübersichtliche Medien und Darstellungsformen [PoEp94], uneinheitliche Wissensdarstellungen und viele nicht-relevante Informationen [OEM89] erschweren die Nutzung, so dass zumeist nur auf eine sehr eingeschränkte Menge an Quellen zurückgegriffen wird. Oft verwendete Produkt- und Konstruktionskataloge stellen abgeschlossene Dokumente mit vorgeschriebenen Ordnungskriterien und unveränderlichem Inhalt dar [ERB13]. Sie repräsentieren immer nur eine Momentaufnahme [FGH+11[@]] und unterliegen damit der grundsätzlichen Problematik der Aktualisierung [JAN06], [ERB13]. Solche proprietären Wissensquellen bilden,

ggf. nur teilweise, den Lieferumfang eines bestimmten Herstellers ab [ERB13]. Viele Hersteller sind darüber hinaus nur auf ausgewählte Prinzipien spezialisiert [ESW+10]. Der ganze Prozess der manuellen Wissensverarbeitung ist stark von der subjektiven Nutzung der Wissensquellen und zudem von Faktoren wie der individuellen Erfahrung, dem Verständnis und den Vorlieben des Anwenders abhängig. Erfahrungswissen [SCH04] spielt dabei eine große Rolle. Diese Form des Wissens ist jedoch schwer explizierbar [TRI11] und daher stark an die Person des Erfahrungsträgers gebunden. Durch die zunehmende Menge verfügbarer TR und die steigende Komplexität moderner Produkte und Produktumfelder wird es zudem immer schwieriger für den Einzelnen sein Wissen auf aktuellem Stand zu halten [KAH05]. Die bei manueller Durchführung einer komplexen Aufgabenstellung grundsätzlich auftretenden Nachteile menschlicher Fehleranfälligkeit, mangelnder Vergleichbarkeit und Wiederholgenauigkeit der Ergebnisse sowie Zeit- und damit Kostenaufwand werden durch die Notwendigkeit der häufigen Wiederholung dieser Aufgabenstellung vervielfacht.

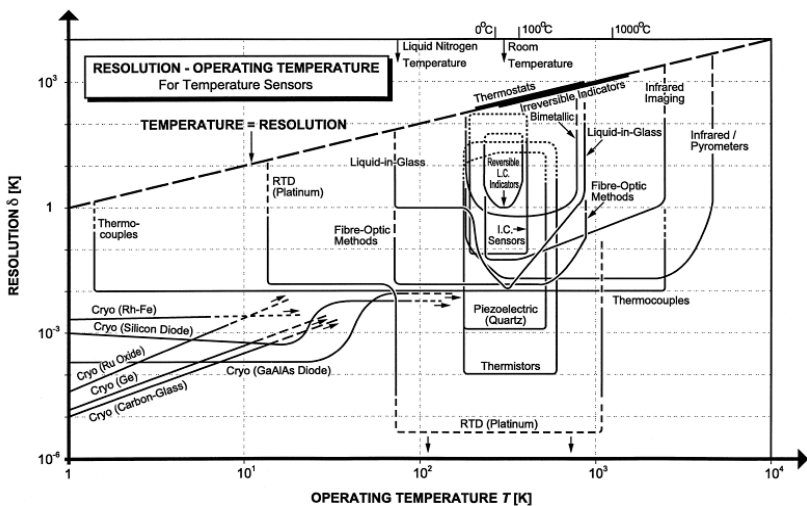


Abbildung 3-1: Graphische Gegenüberstellung von Sensorprinzipien zur Temperaturmessung [SHF+01]

3.2.2 VDI 2644-Richtliniensoftware

Ende 1994 gründete sich der *Fachausschuss „Auswahl und Einsatz von Durchflussmesseinrichtungen“* der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). In diesem Fachausschuss (heute *GMA FA 2.40*) sind Experten von Anwender- und Herstellerseite der Durchflussmesstechnik sowie von Universitäten und Hochschulen vertreten. Erklärtes Ziel ist das Zusammentragen und die Publikation von domänenspezifischem Expertenwissen über Auswahl und Einsatz von Durchflussmesseinrichtungen. In diesem Sinne wurde 2001 die Richtlinie [VDI 2644] veröffentlicht. Neben dem üblichen papierbasierten Dokument enthält die Richtlinie eine Software zur Konservierung des Richtlinienwissens und zur Unterstützung des Anwenders. Dieser wird mit Hilfe der Software menügeführt zu einem oder mehreren der für ihn und seine Anforderungen günstigen Durchflussmessverfahren hingeleitet [VDI 2644]. Abbildung 3-2 zeigt exemplarisch Ausschnitte der Anwenderschnittstelle der Applikation. Die Spezifikation der Anforderungen (wie z. B. Stoffeigenschaften des Messmediums und Prozess-

bedingungen) ist über mehrere Eingabemasken möglich. Als Ergebnis wird eine Übersicht über betrachtete Messverfahren und deren jeweilige Eignung präsentiert.

Die Software zur [VDI 2644] stellt eine rechnergestützte Wissensverarbeitung im Auswahlprozess dar. Sie enthält herstellerunabhängiges Wissen eines Expertengremiums und erfüllt damit prinzipiell den Anspruch an Neutralität und Allgemeingültigkeit. Die Rechnerverarbeitung sorgt für einen deterministischen und beschleunigten Auswahlprozess. Der Umgang mit unvollständigen Anwenderangaben ist jedoch problematisch und grundsätzlich nicht vorgesehen. Die Gestaltung und die Nutzungsmöglichkeiten der Software sind nicht auf dem aktuellen Stand der Technik, eine Anbindung an einen durchgängigen, elektronischen Workflow ist zudem nicht möglich. Das Wissen ist innerhalb der Software explizit in spezifischen Methoden und innerhalb einer starren Verarbeitungsreihenfolge codiert. Die programmtechnische Verschmelzung von Wissen und seiner Verarbeitung ist somit auch der größte Nachteil dieser Anwendung. Die Pflege und Aktualisierung der Wissensinhalte ist nur über den aktiven Eingriff in den Quellcode der Software, unter Berücksichtigung der ihr eigenen Syntax, möglich. Eine Schnittstelle zur Pflege und Aktualisierung des Wissens ist nicht vorhanden. Nicht zuletzt deshalb befinden sich Software und enthaltenes Wissen im Jahr 2017 immer noch auf dem Stand ihrer Veröffentlichung. Die Alterung dieses Wissens ist somit unaufhaltsam – Akzeptanz und Nutzung der Software schwinden in mindestens gleichem Maße.

The screenshot displays the 'Meßstoffeigenschaften (1)' window. It contains input fields for 'Meßstellen-Nr.', 'Meßstoff', 'Aggregatzustand' (gasförmig (Dampf) or flüssig), 'Art der Flüssigkeit' (Newtonsche Flüssigkeit or Nicht-Newtonsche Flüssigkeit), 'Min', 'Betriebspunkt', 'Max', 'Einheit', 'Arbeits Temperatur', 'Arbeitsüberdruck', and 'Dichte'. A note states: 'Die Eingabe der minimalen und maximalen Dichte ist optional!'. Below the inputs are 'Weiter' and 'Hilfe' buttons. A label 'Beispiel einer Eingabemaske' points to this section.

The 'Bewertung' window shows a table of measurement devices and their suitability ratings:

Meßgerät	geeignet
1 Drosselgerät	>>> KO <<<
2 Magnetisch-induktives Durchflußmeßgerät	>>> KO <<<
3 Coriolis-Massendurchflußmeßgerät	>>> KO <<<
4 Thermisches Massendurchflußmeßgerät	>>> KO <<<
5 Wirbelzähler	>>> KO <<<
6 Drallszähler	>>> KO <<<
7 Verdrängungszähler für Flüssigkeiten	>>> KO <<<
8 Verdrängungszähler für Gas	>>> KO <<<
9 Turbinenradflüssigkeitsszähler	>>> KO <<<
10 Turbinenradgaszähler	>>> KO <<<
11 Schwebekörper-Durchflußmeßgerät	>>> KO <<<
12 Ultraschall-Durchflußmeßgerät für Flüssigkeiten	>>> KO <<<
13 Ultraschall-Durchflußmeßgerät für Gase	>>> KO <<<

At the bottom of the 'Bewertung' window are buttons: 'Eingabedaten speichern', 'Eingabedaten ändern', 'Drucken', and 'Fertig'. A label 'Ergebnisausgabe (Eignungsbewertung der Messprinzipien)' points to the table.

Abbildung 3-2: Anwender-Schnittstelle der Software zur Richtlinie VDI 2644 [RfA14*]

3.2.3 Proprietäre datenbankbasierte Auswahl durch Konfiguratoren

Ein mittlerweile sehr verbreitetes Hilfsmittel zur Auswahl von TR der Feldebene sind datenbank-gestützte Online-Konfiguratoren. Diese sind in Form relationaler Datenbanksysteme abgebildete Produktkataloge der jeweiligen Hersteller, die über eine entsprechende Anwenderschnittstelle, heutzutage fast ausnahmslos mit Zugriff über das World Wide Web, zur Verfügung gestellt werden. Die Nutzungsmöglichkeiten bewegen sich von einer einfachen Anzeige der Datenbank-

inhalte bis hin zur gezielten Eingabe von Anforderungsdaten und der damit verbundenen Selektion geeigneter Produkte. Anhang G zeigt die Bedienschnittstellen einiger ausgewählter Beispiele zur Auswahl von Sensoren und Aktoren. Die Bezeichnung „Konfigurator“ ist dabei irreführend, da es zumeist nicht um die passende Zusammenstellung von TR oder gar deren kundenindividuelle Konfiguration geht, sondern um die Einschränkung des Produktportfolios auf eine den Anwenderanforderungen genügende Menge von verfügbaren TR.

Die Entwicklung hochperformanter Datenbankabfragesprachen und die visuellen Darstellungsmöglichkeiten zeitgemäßer Webanwendungen ermöglichen mit Hilfe der Online-Konfiguratoren einen komfortablen Zugriff auf die Produktdaten. Darüber hinaus bieten die hinterlegten Datenbanken mehrdimensionale Suchstrategien durch die Zuordnung von Produkteigenschaften zu beliebig vielen Kriterien sowie die Möglichkeit umfangreiche Dokumente zu hinterlegen. [MES07] stellt weitere Vorteile dieser Wissensabbildung und -verarbeitung dar. Auch wenn Qualität und Häufigkeit der Aktualisierung dieser Datenbanken firmenspezifisch sind, so kann prinzipiell von einer dem Wettbewerb geschuldeten hohen Aktualität des enthaltenen Produktwissens ausgegangen werden. Da datenbankgestützte Konfiguratoren die rechnerverarbeitbare Umsetzung der Produktkataloge und Datenblätter des jeweiligen Herstellerproduktportfolios sind, bringen sie auch deren grundsätzliche Nachteile mit sich. Das enthaltene Datenbankwissen bezieht sich auch hier auf das spezifische Produktangebot bzw. den Lieferumfang des entsprechenden Wissensanbieters (Hersteller). Fokus ist nicht in erster Linie die lösungsorientierte Unterstützung des Anwenders, sondern die Präsentation des eigenen Portfolios zum Zwecke des Vertriebs. Demnach ist auch die Wahl und Bezeichnung von Selektionsparametern, Arbeitsprinzipien und die strukturelle, visuelle Aufbereitung auf Marketingaspekte (z. B. Betonung von Alleinstellungsmerkmalen) ausgerichtet. Durch die proprietäre Prägung wird jedes System für den Anwender unterschiedlich in Darstellung (→ Anhang G) und Handhabung. Der Vergleich mit Lösungen anderer Anbieter wird dadurch häufig behindert. Zudem wird die Kontaktaufnahme mit dem jeweiligen Hersteller aufgrund mehrdeutiger oder fehlender Informationen notwendig und dieser Zwang durchaus auch als Marketinginstrument der Hersteller genutzt [ERB13]. Die Datenbasis der Konfiguratoren beruht auf TR. Eine Auswahl ist daher immer produkt- und nicht lösungsorientiert [ERB13]. Eine umsetzungsneutrale Auswahl auf Ebene von Lösungsprinzipien wird somit nicht unterstützt. Datenbanken sind grundsätzlich passiv [BAPA04] und ihre Ergebnisfindung von sich aus nicht selbsterklärend. Die manuelle Datenakquise (Anforderungen des Anwenders) ist bei Nutzung der Konfiguratoren obligatorisch – oft müssen dabei die Anforderungsdaten implizit auf die im Konfigurator genutzte spezifische Semantik übersetzt werden. Die Einbindung in einen durchgängigen, elektronischen Workflow wird dadurch erschwert.

3.2.4 Ansätze aus Forschung und Entwicklung

Im Folgenden werden Ansätze für die Unterstützung der Sensor- und Aktorauswahl, die den Bereichen Forschung und Entwicklung zuzuordnen sind, vorgestellt und kurz bewertet. Der Fokus der betrachteten Domäne wird hier ganz bewusst erweitert, da es prinzipiell relativ wenige Ansätze zu dem hier betrachteten Themenkomplex gibt und auch die Übertragbarkeit von Lösungsansätzen benachbarter Domänen nicht vernachlässigt werden soll. Neben Ansätzen aus dem Bereich der Prozessindustrie werden hier somit beispielsweise auch Ansätze aufgeführt, die durch den Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme im Allgemeinen motiviert sind. Die Betrachtung der Ansätze erfolgt dabei chronologisch.

Ansätze zur Sensorauswahl

[OEM89] entwickelten Ansätze und schließlich ein System [OME92] zur regelbasierten Sensorauswahl. Sie betonen ausdrücklich die Notwendigkeit solcher Anwendungen und leisteten mit der zugehörigen Implementierung (*SENSES*) Pionierarbeit auf dem Gebiet der wissensbasierten Auswahl von Sensoren. Die Wissensbasis enthält spezifische Sensoren zur Wegmessung, die auf Basis festgelegter Eigenschaften hinsichtlich ihrer Ausprägungen systematisch codiert sind. Der Preis der Sensoren wird dabei als wichtiges Kriterium ebenfalls abgebildet. Über eine konsolenbasierte Bedienung werden dem Anwender in Dialogform Fragen zu spezifischen Auswahlkriterien (Eigenschaften) gestellt und direkt über ihre codierte Form mit den Sensoren der Wissensbasis verglichen. TR werden irreversibel aus dem aktuellen Auswahlprozess eliminiert, sobald Anforderungen nicht zur entsprechenden Eigenschaftscodierung der Lösung passen. Von den übrigbleibenden TR wird der Sensor mit dem niedrigsten Preis angezeigt. Die irreversible Löschung ist kritisch, da somit auch naheliegende Lösungen, die nicht alle Anforderungen erfüllen, nicht mehr in die Betrachtung gezogen werden können. Das spätere Anpassen der Anforderungen hat damit keine Auswirkungen mehr – ein Gefühl des Anwenders für das Leistungspotential der jeweiligen TR kann nicht vermittelt werden. Viele der beschreibenden Eigenschaften (z. B. Umgebungsbedingungen) werden durch das Codierungssystem in eine binäre Skalierung (ja/nein) gezwungen. Dadurch geht potentiell Ausdrucksmächtigkeit verloren. *SENSES* verfügt über keinerlei Erklärungskomponente und ist hinsichtlich der technischen Umsetzung (Konsole) nicht mehr zeitgemäß bzw. für eine Integration in den Engineering-Workflow nicht geeignet. Problematisch ist letztlich vor allem auch die Bildung der Wissensbasis auf der Basis von Daten konkreter TR.

Auch [MSA93] verfolgen einen Ansatz, der auf der Abbildung von Produktdaten einzelner Sensoren beruht. Ihr entwickeltes *Sensor Selection System* ist als Datenbank zur Ablage der Sensorinformationen verschiedener Hersteller zu verstehen. Die Produktinformationen werden dabei auf der Basis definierter Merkmale abgelegt. Zusätzlich ist die Speicherung informeller Informationen über spezifische Erfahrungswerte zu einer TR möglich. Die Auswertung von Anforderungsdaten des Anwenders mit den Beschreibungsdaten der Sensoren erlaubt die Assoziation der Anzahl nichterfüllter Anforderungen zum jeweiligen Sensor. Der Anwender kann entscheiden, bis zu welcher Anzahl nichterfüllter Anforderungen Ergebnisse einbezogen werden, und so die Eingrenzung des Auswahlresultates beeinflussen. Zudem ist eine rudimentäre statistische Auswertung hinsichtlich des Abgleichs zwischen Anforderungen und Lösungen möglich. Die Konsolenanwendung war mit den gebotenen Funktionalitäten für den Entwicklungsstand ihrer Zeit sehr fortschrittlich, genügt aber hinsichtlich Datenverarbeitung und Präsentation nicht mehr den Ansprüchen der Gegenwart bzw. der benötigten Integrationsfähigkeit in den Engineering-Workflow eines Anlagenplaners. Der Aktualisierungsaufwand der Datenbasis ist darüber hinaus bei der von den Autoren angestrebten Anzahl von mehreren tausend Sensorprodukten beträchtlich und, da manuell durchzuführen, nicht realistisch umsetzbar.

Das von [BASE96] entwickelte Tool *EXSENSEL* versteht sich als Nachfolger des 1993 entwickelten *TRANSELEX*, einem Werkzeug für die Auswahl von Durchfluss-, Temperatur- und Drucksensoren. *EXSENSEL* ist ein regelbasiertes Auswahltool für insgesamt zwölf verschiedene Messaufgaben, u. a. Gaschromatographie und Luftfeuchtigkeit. Das Wissen aus Handbüchern und Expertengesprächen wurde von den Autoren dabei über positiv formulierte Regelattribute in der Wissensbasis abgebildet (→ Abbildung 3-3). Die Regelattribute werden je nach regelspezifischer Reihenfolge dialogbasiert abgefragt. Dabei wird immer nur ein Sensor zur gleichen Zeit

betrachtet. Wenn die Bedingungen für einen Sensor erfüllt sind, wird dieser als Lösung vorgeschlagen. Lösungen, die erst später in der Wissensbasis Berücksichtigung finden würden und zu diesem Zeitpunkt nicht durchsucht wurden, können somit nicht in Betracht gezogen werden.

If the process variable is oxygen content, and good stability of the measurement system is required, and (...) , and the lowest range is 0 to 2070 oxygen, and the desirable resolution is 1/1500th of range, and the desirable accuracy is $\pm 2\%$ of full scale, and the desirable linearity is $\pm 1\%$; then: use a thermomagnetic type Rein 1 oxygen content sensor.

Abbildung 3-3: Als Regel formuliertes Wissen der Wissensbasis von EXSENSEL (nach [BAsE96])

Im Gegensatz zum Ansatz von [OEM89] ist die Wissensbasis bei [BAsE96] auf Lösungsprinzipien in Form von Messprinzipien und Bauformen der Sensoren aufgebaut und daher eher allgemeingültig. Aufbau und Pflege der Wissensbasis erfolgen in der KI-Programmiersprache PROLOG und erfordern somit hinsichtlich Syntax und Struktur spezielles Expertenwissen. Die feste, unflexible Regelverarbeitung macht den Umgang mit fehlenden Anwenderinformationen (Anforderungen) unmöglich und die sorgfältige Beachtung der Attributreihenfolge beim Editieren der Regeln notwendig. Die Regelattribute werden auf eine binäre ja/nein-Skalierung reduziert – ihre skalenniveaugerechte Behandlung ist daher nicht unbedingt gegeben. Der Umfang der abgefragten Attribute unterscheidet sich mitunter von Regel zu Regel beträchtlich (zwischen zwei und acht) – scheint in Gänze jedoch für die eigentliche Auswahlkomplexität der Messverfahren aus heutiger Sicht nicht ausreichend. Eine Ergebniserklärung findet nicht statt und die Einbindung der implementierten Anwendung in den elektronischen Engineering-Workflow ist weder beabsichtigt noch möglich.

[BAPa04] entwickelten eine Expertensystemanwendung für die Auswahl der Instrumentierung im Kontext von in-situ-Messungen in Gebäudestrukturen (z. B. Stahlbrückenkonstruktionen). Die sehr domänenspezifische Anwendung (Bauwesen) INSEL soll speziell geeignete Abstandsmessverfahren (displacement quality) selektieren und arbeitet ebenfalls auf Regelwissen. Die Konsultation des Systems erfolgt zweistufig. Zuerst wird der Anwender durch mehrere vordefinierte Fragen bezüglich qualitativer Kriterien geführt. Darauf basierend werden passende Regeln (Lösungen) angezeigt und mit spezifischen quantitativen Werten (z. B. Linearitätswerte) ergänzt. Der Anwender kann in Folge die für ihn am besten geeignete Lösung manuell auswählen. Die entwickelte Anwendung zeigt die Notwendigkeit der Unterstützung bei der Sensorauswahl in einer anderen Domäne als der Prozessindustrie auf. Die Umsetzung enthält Wissen über konkrete Messgeräte als Blätter eines hierarchischen Wissensbaums und ist deshalb schwer für die Suche nach allgemeingültigen Lösungsprinzipien einsetzbar. Unvollständige Anwenderangaben sind problematisch, da der Wissensbaum nur auf Basis vollständiger Anforderungsinformationen bis zu den Blättern durchlaufen werden kann. Eine rudimentäre Erklärungskomponente gibt den jeweiligen Entscheidungspfad des Durchlaufs an. Auswahlkriterien beschreibende Regelattribute bleiben rein qualitativ – nur die Beschreibung der Daten der TR erfolgt quantitativ. Eine Workflow-integrierte Nutzung der prototypischen Umsetzung ist nicht vorgesehen.

Der von [SGG10b] entwickelte Ansatz basiert auf einer selbstformulierten Ontologie über Prozesswissen und Wissen über Prozessmesstechnik (Verfahren und TR). Der Ansatz ordnet Prozessen Prozesspunkte (analog: Messstelle) und diesen wiederum Prozessvariablen (analog: Messaufgabe) zu. Für jede Prozessvariable werden im Datenmodell mögliche Messverfahren und diesen entsprechende TR (Messgeräte inklusive des Herstellers) zugeordnet (→ Abbildung 3-4). Die TR als „Blätter“ im Datenbaum werden anhand von Kriterien (Specifications) wie „Accuracy“ und „Precision“, aber auch „Costs“ individuell quantitativ beschrieben. Mittels Vorwärtssuche innerhalb der Ontologie werden geeignete TR durch Vergleich ihrer jeweiligen

Spezifikationen mit den Anforderungen des Anwenders gesucht. Nach einer Bewertung (Ranking) der möglichen Lösungen, wird die TR mit dem höchsten Ranking angezeigt. Sensoren, die gegen die Anfordererforderungen hinsichtlich einer Spezifikation verstoßen, werden von vornherein ausgeschlossen und nicht als Lösung in Betracht gezogen. Über eine Rückwärtssuche können zu TR oder Messverfahren potentielle Prozessvariablen und Prozesse abgeleitet werden.

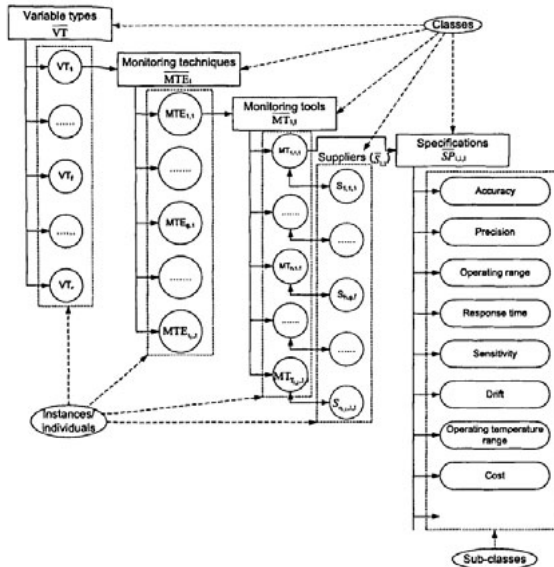


Abbildung 3-4: Ontologie-Datenmodellausschnitt "Prozessmesstechnik" [SGG10B]

Der Vorteil des umfassenden Ansatzes von [SGG10B] liegt hauptsächlich auf dem Versuch einer ganzheitlichen Beschreibung von Wissen über relevante Prozessentitäten und deren Zusammenhang. Eine Erklärungskomponente dokumentiert die entlang der Auswahlsschritte selektierten Instanzen der Prozessentitäten. Die aufgebaute Ontologie wird für die Auswahl prinzipiell analog einer relationalen Datenbank aufgebaut und in Form von Suchanfragen genutzt. Die Basis des enthaltenen Wissens stellen konkrete Daten der TR (ähnlich einem Produktkatalog) dar. Für eine hinreichende Aussagemächtigkeit auch hinsichtlich von Lösungsprinzipien muss die Wissensbasis sehr groß sein und einer intensiven Pflege unterliegen – im beschriebenen Ansatz ist von derzeit 511 angelegten konkreten TR mit jeweils elf Spezifikationsmerkmalen die Rede. Der Umgang mit möglichen qualitativen Spezifikationsmerkmalen ist unklar, die Betrachtung suboptimaler potentieller Alternativen (TR) wird nicht unterstützt und eine elektronische Anbindung an vor- oder nachgelagerte Engineeringprozesse ist nicht vorgesehen.

Ansätze zur Aktorauswahl

Der von [ZAF02] entwickelte Ansatz zur Unterstützung der Aktorauswahl kann als datenbank-technische Umsetzung des bereits erwähnten Ansatzes von [HFA97] angesehen werden und fokussiert auf die Auswahl von linearen und rotatorischen Aktoren mit Positionskontrolle. Über die Formulierung von direkten Attributen und Verhältnisskennzahlen (normalized attributes) werden konkrete Aktoren in einer zentralen Tabelle abgebildet (ähnlich einer Produktdatenbank). Mit Hilfe weiterer Tabellen werden diese ggf. mit passenden Energiequellen oder Konvertern

assoziiert. Über die Eingabe von Anwenderanforderungen werden passende Aktoren aus der Datenbank abgeleitet und ggf. mit zusätzlichen Informationen der weiteren Tabellen ergänzt. Die graphische Aufbereitung und zweidimensionale Darstellung der einzelnen Aktoren auf der Anwenderoberfläche macht eine Abschätzung der Einsatzbereiche von Aktorprinzipien (Ellipsoide) implizit als Obermenge der Aktoreinsatzbereiche konkreter TR möglich (→ Abbildung 3-5).

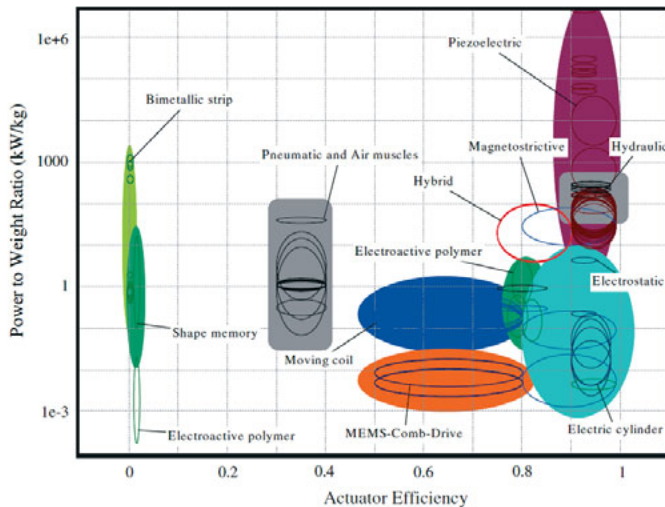


Abbildung 3-5: Einsatzbereiche von Aktoren auf Basis von Verhältnisskennzahlen [ZAF02]

Die Qualität der Aussagen ist bei diesem Ansatz von der Größe der Datenbasis abhängig und kann bei einer schwachen Datenbasis durchaus fragwürdig sein. Insgesamt unterliegt der beschriebene Ansatz, abgesehen von der schematischen Darstellung der Einsatzbereiche, den bereits unter Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Vor- und Nachteilen von datenbankbasierten Produktabbildungen.

Als Ansatz im Sinne des vorhergehend beschriebenen versteht sich auch die von [MFB05] entwickelte Anwendung. Der Fokus liegt hier ganz bewusst auf einer einfach nutzbaren Auswahlunterstützung für unkonventionelle, lineare Mikroaktoren aus dem wissenschaftlichen Bereich und der Entwicklung, die bis dahin wenig bis gar nicht betrachtet wurden [MFB05]. Die entwickelte Applikation verfügt über eine kleine Datenbasis (zehn Aktorprinzipien mit neun verschiedenen Auswahlkriterien) und berechnet aus den Anwendereingaben Kennwerte und Verhältniszahlen wie Arbeitsdichte und Aktorvolumen. Diese Kennwerte werden anschließend mit der Datenbasis verglichen und als Ergebnis grafisch dargestellt (→ Abbildung 3-6). Der Anwender kann dadurch leicht erkennen an welchen Kriterien ein Aktorprinzip möglicherweise gescheitert ist.

Das *Actuator Selection Tool* ist eine der sehr wenigen webbasierten Anwendungen, die kein proprietärer Produktkonfigurator sind. Datenbasis und Auswertungsergebnis verstehen sich als Unterstützung für eine ungefähre Abschätzung der abgebildeten Aktorprinzipien, wobei dem Anwender darüber hinaus das Einholen weiterer Expertise und weitere Recherche angeraten wird. Problematisch ist, dass alle Anwendereingaben obligatorisch sind und das Wissen größtenteils in festcodierten Formeln und Algorithmen zur Bestimmung fester Kennzahlen vorliegt. Es werden

Lösungsalternativen beruht auf qualitativen anwenderspezifisch gewichteten Kriterien (wie z. B. applicability), welche über einen fuzzy-linguistischen Ansatz abgebildet werden. Die entwickelte Anwendung verwirft Lösungselemente, die schon einer einzigen Anwendereingabe widersprechen. Diese werden somit im Verlauf des Auswerteprozesses nicht weiter betrachtet. Die Nutzung fester Entscheidungsbäume macht zudem die vollständige Eingabe aller benötigten Anwenderangaben erforderlich. Die für die Auswahl genutzten Kriterien sind durchweg qualitativ. Quantitative Anwendereingaben werden intern auf qualitative Ausprägungen (z. B. hoch, mittel, niedrig) abgebildet und dementsprechend behandelt. Das Ranking der Lösungen ist sinnvoll, kann aber durch die Nutzung spezifischer Zugehörigkeitsfunktionen (Fuzzy Sets) sehr individuell ausfallen. Zudem erfordert die Einstellung der Systemparameter (z. B. Form und Lage der Fuzzy Sets) viel Erfahrung [FAY99] und Aufwand. Die fehlende Erklärungskomponente macht die dezidierte Nachvollziehbarkeit von regelbasierter Auswahl und Fuzzy-basierter Entscheidung schwierig.

[EGB09] lieferten einen Ansatz und die zugehörige Anwendung, um die Aktorauswahl für die Automatisierung im Bereich der Low-Cost-Automation zu unterstützen. Sie fokussieren dabei auf die Auswahl geeigneter elektrischer Antriebslösungen (Elektromotor inklusive zugehöriger Peripherie, wie die für Regelung/Steuerung notwendige Elektronik und Sensoren). Der subtraktive Ansatz eliminiert alle Lösungen, die gegen die Anwenderanforderungen verstoßen, und liefert als Ergebnis die zum jeweiligen Stand der Anforderungsspezifikation noch gültigen Lösungen. Ein Umgang mit unvollständigen Anforderungsdaten ist damit gegeben, jedoch können durchaus Lösungen ausgeschlossen werden, die nur knapp an den spezifizierten Anwenderanforderungen gescheitert sind. Eine geeignete Erklärungskomponente, die diese Informationen liefern könnte, existiert nicht. Die hier als Auswahlregeln bezeichneten Tabellen dienen ausschließlich der Abbildung (Mapping) von Ausprägungen der Anwenderanforderungen auf Ausprägungen der Aktorbeschreibungen zum Zwecke des Vergleichs und der Prüfung auf Eignung des jeweiligen Aktors (Abbildung 3-8 stellt eine solche Tabelle beispielhaft dar). Dieses Mapping wird auch notwendig, da keine explizite Skalierung der genutzten Merkmale vorgenommen wird. Mit der entwickelten Anwendung *Actuator Selection Design Aid* erheben die Autoren den Anspruch, generelle Aussagen über die Einsetzbarkeit von Aktortypen als Lösungsprinzipien zu treffen. Dies muss aber als kritisch gesehen werden, da die Datenbasis der Anwendung einzig auf den Produkten eines Herstellers (SEW Eurodrive) beruht.

Application requirement	Properties of eliminated actuators			
	Position control > 360°	Position accuracy < ±360°	Position accuracy < ±5° to ±45°	Position accuracy < ±1°
Position control > 360° or no control				
Position accuracy < ±360°	X			
Position accuracy < ±5° to ±45°	X	X		
Position accuracy < ±1°	X	X	X	

Abbildung 3-8: Regeln für die Abbildung des Kriteriums "Positionskontrolle" [EGB09]

[ERB13] nutzt mit seinem Ansatz zur Unterstützung der Aktorauswahl eine Datenbasis von ca. 3300 Aktoren, welche über relevante Kriterien charakterisiert und in einer relationalen Datenbank verwaltet werden. Nach einer Vorauswahl von Lösungen aufgrund qualitativer Kriterien wird in diesem Ansatz ein adaptiertes Derivat des Skyline-Algorithmus verwendet (→ Abbildung 3-9), um passende Aktoren zu selektieren. Die Besonderheit dabei ist, dass die Selektivität des Algorithmus durch verschiedene Parameter (z. B. Dominanzwinkel) beeinflusst werden kann und

somit auch Lösungen in Betracht gezogen werden, die die spezifizierten Anwenderanforderungen nur unzureichend erfüllen. Die Auswahlresultate des Selektionsalgorithmus werden tabellarisch und diagrammatisch visuell aufbereitet. Der entwickelte Ansatz ist prinzipiell eine intelligente, weil zielgerichtet parametrierbare Datenbanksuche. Er kann effektiv für die Suche nach passenden und ggf. weniger passenden Aktoren in großen Datenbanken eingesetzt werden. Über die Ergebnismenge kann indirekt auf verfügbare Akteurprinzipien geschlossen werden.

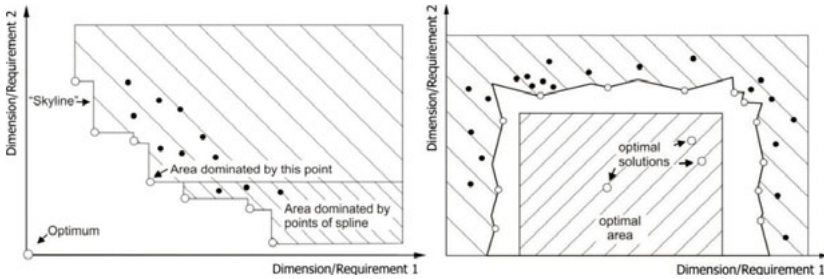


Abbildung 3-9: Klassischer (li.) und adaptierter Skyline-Ansatz mit Winkeldominanz und Anforderungsintervall (re.) [ERB13]

Als problematisch erweist sich das Fehlen einzelner Parameterausprägungen in den Datensätzen – betroffene Aktoren werden nicht der erwähnten Selektion unterworfen [ERB13], was zu einer Verfälschung des Auswahlresultates führt. Es gilt darüber hinaus zu beachten, dass der hier eingesetzte Skyline-Ansatz ausschließlich für quantitative Parameter eingesetzt werden kann. Die qualitativen Parameter werden in der Vorauswahl bereits als Anforderungen abgearbeitet und werden somit nicht als wirkliche Auswahlkriterien behandelt, sondern eher als Klassifikationsmerkmale der Datenbankeinträge. Die Datenbasis selbst ist eine, wenn auch umfassende, willkürliche Sammlung von Produktdaten, welche einer aufwändigen Akquise und kontinuierlichen, manuellen Aktualisierung ihrer Daten bedarf. Die effiziente Etablierung und Pflege einer solchen Datenbank mit wettbewerbsrelevanten Inhalten kann darüber hinaus ein kritisches, wenn nicht unmögliches Unterfangen darstellen.
































































3.2.5 Bewertung der Möglichkeiten zur Wissensverarbeitung

Aufgrund der in Abschnitt 3.2.1 aufgeführten, schwerwiegenden Nachteile und Einschränkungen der manuellen Durchführung der Wissensauswertung, insbesondere bei häufigen Wiederholungen der Aufgabenstellung der Auswahl von TR, wird diese im Folgenden nicht weiter betrachtet. Neben der Möglichkeit der manuellen Wissensauswertung haben sich in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von Methoden, Ansätzen und Werkzeugen entwickelt, die die Auswertung von Wissensinhalten zur genannten Aufgabenstellung rechnerbasiert unterstützen. Auffällig ist, dass sich im Bereich von Forschung und Entwicklung, trotz eines Betrachtungszeitraums von etwa 25 Jahren, nur verhältnismäßig wenige Ansätze zur Auswahlunterstützung finden lassen. Insbesondere Ansätze für TR oder Lösungsprinzipien der Feldebene sind sehr rar, so dass auch andere Domänen in Betracht gezogen werden müssen. Es gibt wesentlich mehr Literatur, die sich mit den Herausforderungen und der Grundproblematik der Aufgabenstellung befasst und eine baldige Lösung einfordert, als Literatur zu konkreten Lösungsansätzen oder gar implementierte Umsetzungen.

Tabelle 3-1 stellt eine Übersicht über die im Vorangegangenen betrachteten Möglichkeiten zur rechnergestützten Wissensverarbeitung im Fokus dieser Arbeit dar. Für eine zusammenfassende Bewertung dieser wurden folgende Bewertungskriterien herangezogen:

- **Flexibilität der Wissensverarbeitung:** Wie hoch ist die Flexibilität der Wissensverarbeitung hinsichtlich fehlender Anforderungsinformation? Werden Lösungen frühzeitig verworfen?
- **Erklärungsfähigkeit:** Wie hoch sind die Qualität und der Nutzen von Ergebnisaufbereitung und Erklärungsfähigkeit der Ergebnisfindung?
- **Allgemeingültigkeit der Wissensbasis:** Hat die zugrunde liegende Wissensbasis Anspruch auf Allgemeingültigkeit? Können gültige Schlüsse hinsichtlich der Einsatzfähigkeit auf abstrakter Ebene von Lösungsprinzipien gezogen werden?
- **Abbildungsfähigkeit:** Wie hoch ist die Abbildbarkeit und Verarbeitbarkeit von Parametern bzw. Auswahlkriterien verschiedener Skalenniveaus?
- **Integrationsfähigkeit:** Wie hoch ist die Möglichkeit einer Integration in einen durchgängigen elektronischen Workflow einzuschätzen?

Tabelle 3-1: Möglichkeiten zur rechnergestützten Wissensverarbeitung für die Auswahl von Sensoren und Aktoren

Quelle	Fokus	Wissens- repräsentation	Flexibilität	Erklärungs- fähigkeit	Allgemein- gültigkeit	Abbildungs- fähigkeit	Inte- grations- fähigkeit
[VDI 2644]	Sensorik für Durchfluss- messung	Algorithmen					
Produktkonfi- guratoren	Sensorik/Aktorik	(relationale) Datenbank					
Ansätze aus Forschung und Entwicklung:							
[OME92]	Sensorik zur Wegmessung	regelbasiert					
[MSA93]	Winkel- und Positionssensorik	(relationale) Datenbank					
[BaSe96]	Prozesssensorik	regelbasiert					
[BaPa04]	Sensorik (in-situ-Messung in Gebäudestrukturen)	regelbasiert/ Entscheidungs- baum					
[SGG10b]	Prozesssensorik	Ontologie					
[ZAF02]	Lin. und rotator. Aktorik mit Positionskontrolle	(relationale) Datenbank					
[MFB05]	unkonventionelle, lineare Mikroaktorik	(relationale) Datenbank + Algorithmen					
[ChEg05]	Materialhandhabungs- systeme	regelbasiert/ Entscheidungs- baum, Fuzzy					
[Egb09]	Elektr. Antriebslösungen für Low Cost Automation	tabellen- /regelbasiert					
[Erb13]	Aktorik für mechatron. Systeme	(relationale) Datenbank + Algorithmen					
 = stark ausgeprägt  = mittel ausgeprägt  = gering ausgeprägt							

Prinzipiell scheint bei der Auswahl von Sensorik und Aktorik eine streng disziplinäre Trennung vorzuherrschen – für die übergreifende Auswahl von TR oder Lösungsprinzipien beider Bereiche lässt sich kein Lösungsansatz identifizieren. Im Gegenteil, die existierenden Ansätze sind meist

sehr spezifisch für die fokussierte Behandlung einer Problematik oder eines Teilbereichs der Sensorik oder Aktorik beschrieben und ausgelegt. Entsprechend spezifisch ist oft die zugehörige Repräsentation und Verarbeitung von Wissen (z. B. in festgeschriebenen Algorithmen). Insgesamt überwiegen Ansätze für die Auswahl konkreter TR vor denen, die auf einer abstrakteren Ebene die Auswahl von Lösungsprinzipien unterstützen [JAN06]. Als problematisch kann dabei die allgemeingültige Ableitung von prinzipiellen Schlüssen gesehen werden. Oft besteht die Datenbasis dieser Ansätze aus einer starken Wettbewerbseinflüssen unterliegenden [MES07] und mehr oder weniger objektiven Sammlung von Produktdaten auf der Basis wiederum individueller Beschreibungskriterien. Einige Ansätze (z. B. [OME92]) nutzen beispielsweise Produktpreise als Kriterium, wobei dieses von anderen (z. B. [ESW+10]) als kritisch, weil schwer eindimensional bewertbar und generalisierbar, gesehen wird. Die konkreten Quellen der Datenbasis oder die Bedingungen ihrer Aufstellung bleiben dem Anwender für gewöhnlich verborgen. Die Mächtigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse solcher Ansätze steigt zwar mit der Größe ihrer Datenbasis, gleichwohl steigt auch der Erstellungs- und Pflegeaufwand sowie der Aktualisierungsbedarf der Wissensgrundlage [JAN06].

Die Flexibilität der Wissensverarbeitung ist in vielen der betrachteten Ansätze durch das frühzeitige Ausschließen suboptimaler Lösungen und die Unfähigkeit des Umgangs mit fehlenden Anforderungsdaten eingeschränkt. Ebenfalls leidet die Erklärungsfähigkeit der meisten unter unzureichender Ergebnisaufbereitung und mangelnder Erläuterung des Zustandekommens des Auswahlergebnisses. Die Bedeutung und Herausforderungen von grundsätzlich heterogenen Lösungsräumen bei der Auswahlaufgabe werden von den Ansätzen entweder gar nicht thematisiert, umgangen oder unvollständig behandelt. Ein Konzept für die notwendige skalenübergreifende Beschreibung und Behandlung der repräsentierenden Parameter ist bei keinem der vorgestellten Ansätze vorhanden. Meist können entweder nur qualitative oder nur quantitative Parameter für die Ergebnisfindung betrachtet werden oder eine jeweils separate Behandlung ist erforderlich. Auch vereinfachende Transformationen werden, ggf. unter Verlust von Aussagekraft, eingesetzt. Grundsätzlich haben relationale Datenbanken, aufgrund der für die relationale Abbildung notwendigen Datenaufbereitung und -strukturierung, günstigere Voraussetzungen für die potentielle Integration in einen softwaregestützten Workflow als wissensbasierte Ansätze. Jedoch sehen kein Ansatz und keine implementierte Anwendung eine solche Anbindung der Auswahlunterstützung vor. Dies wird schon durch das Fehlen von Beschreibungsstandards (z. B. für die Auswahlkriterien) und Schnittstellen (z. B. für Import von Anforderungsdaten oder Export von Auswahlergebnissen) deutlich. Alle zu den Ansätzen implementierten Anwendungen sind durchgängig prototypisch entwickelt und unter Umständen funktionell sehr auf die Bewältigung einer fokussierten Aufgabenstellung eingeschränkt. Bezüglich Weiterentwicklung, Etablierung und einer umfangreichen praktischen Nutzung dieser Anwendungen gibt es keinerlei Anhaltspunkte.

Abschließend kann festgestellt werden, dass bisher nur sehr wenige etablierte Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um die Wissensauswertung innerhalb der Aufgabenstellung Auswahl rechnergestützt durchzuführen. Die insgesamt wenigen Ansätze, die im Rahmen von Forschung und Entwicklung entstanden sind, zeigen hinsichtlich der untersuchten Charakteristika teilweise gute Ergebnisse. Kein einziger Ansatz ist diesbezüglich jedoch umfassend zufriedenstellend. Jeder weist mehr oder weniger stark ausgeprägte Defizite auf. Die anhaltende Forschungs- und Entwicklungsaktivität über ca. 25 Jahre bis heute unterstreicht die anhaltende Aktualität der Thematik.

3.3 Beurteilung des Status Quo

Art und Qualität der Bewältigung der Aufgabenstellung der Auswahl von TR sind im Planungsprozess verfahrenstechnischer Anlagen nicht einheitlich. Wissensakquise und -verarbeitung differieren mitunter stark und basieren im Wesentlichen auf der Expertise und den Erfahrungen des Durchführenden [REG05], [EGB09], [ERB13]. In der Praxis haben sich daher verschiedene Verfahrensweisen und Trends entwickelt, um der beschriebenen Komplexität der Aufgabenstellung und der Herausforderung einer zielgerichteten, effizienten Nutzung der verfügbaren Wissensquellen zu begegnen [RiFA14*]:

- Direktauswahl von konkreten gerätetechnischen Lösungen [MMK+11], [ERB13], hauptsächlich unter Nutzung von Produktkatalogen [ESW+10], ohne den Prozess einer sukzessiven Konkretisierung der Spezifikation.
- Bewusste oder unbewusste Einschränkung des Betrachtungsumfangs verfügbarer Lösungen:
 - Durch die Beschränkung auf wenige, ausgewählte Lieferanten der gesuchten TR [ERB13], z. B. in Form von „preferred-vendor“-Konzepten und im Extremfall von Universal-lieferanten, wobei ökonomische Vorteile und Geschäftsbeziehungen häufig mit der Gefahr der technologischen Abhängigkeit [SCH08D] abgewogen werden müssen.
 - Durch die Fokussierung auf bewährte bzw. bekannte Lösungen [ZIN06], [SCH10@] in Form einer a priori Einschränkung auf diese [STR02], z. B. durch hausinterne Standardgerätelisten [NA 35]. Motivation für diesen Wiederverwendungsgedanken sind u. a. Vereinfachung [MAH13], Praktikabilität und Wirtschaftlichkeit [POEP94], Zeitersparnis gegenüber einer umfassenden Suche sowie Vermeidung von Risiken beim Einsatz nicht bekannter bzw. vertrauter TR [EGB09] und Lösungsprinzipien. In einem abstrakteren Sinn werden sogar Bequemlichkeit, Mangel an Inspiration und fehlender Maßstab für die Güte einer gefundenen Lösung genannt [HAB12].

Als Nebeneffekt kann die Verlagerung der Auswahlkompetenz vom Planer zum Hersteller bzw. Lieferant der TR gesehen werden.

Abgeleitet aus den Ausführungen der vorangegangenen Abschnitte und aus den Vorgehensweisen in der Praxis werden in Tabelle 3-2 die sich ergebenden Auswirkungen des Status Quo hinsichtlich ausgewählter Aspekte zusammengefasst. Bei der konkreten Durchführung der Auswahl von TR treten meist mehrere Ausprägungen des Status Quo und deren Auswirkungen zusammenwirkend auf.

Tabelle 3-2: Potentielle Ausprägungen des Status Quo und sich daraus ergebende Auswirkungen

Aspekt	Status Quo	Auswirkungen
Wissensquellen und Wissensverarbeitung	Vorwiegend manuelle Wissensverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Immanente Fehleranfälligkeit ↑ • Zeit- und Kostenaufwand ↑ • Belastung des Planers mit sich oft wiederholender (komplexer) Aufgabenstellung ↑
	Vorwiegende Verwendung von Erfahrungswissen	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängigkeit von Erfahrungsträgern (Wissen ist personell und lokal gebunden) ↑ • Explizierbarkeit des Wissens (Erklärungsfähigkeit und Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen) ↓
	Eingeschränkte Betrachtungsräume (z. B. durch Verwendung proprietärer Wissensgrundlagen oder bewusster Beschränkung)	<ul style="list-style-type: none"> • Suboptimale Entscheidungen ↑ • Optimierung und Abwägung hinsichtlich technischer und ökonomischer Faktoren ↓ • Gefahr „blinder“ Wiederverwendung von Lösungen ↑ • Entscheidungsspielraum ↓ • Abhängigkeiten von Zulieferern und externen Experten ↑
	Spezifische Wissens- und Entscheidungsgrundlagen sowie Wissensverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Reproduzierbarkeit von Entscheidungen ↓ • Vergleichbarkeit von Entscheidungen ↓
Dokumentation des Entscheidungsprozesses	Spezifische oder keine Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidungsbegründung ↓ • Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen ↓ • Fehler- und Ursachenfindung ↓
Wissensverwaltung und -weitergabe	Spezifische oder keine Wissensverwaltung und -weitergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Unstrukturierte, nichtformalisierte, individuelle Verwaltung und Weitergabe ↑ • Externe Qualitätssicherung und -kontrolle von Wissen ↓ • Konservierung von Wissen als wichtigste Ressource von Engineering-Unternehmen ↓ • Möglichkeiten unerfahrenere Berufsanfänger einzulernen ↓
Aktualisierung des Wissens	Manuelle Aktualisierung oder Vertrauen auf Aktualität von Wissensquellen	<ul style="list-style-type: none"> • Aktualität der genutzten Wissensquellen ↓ • Aktualisierungsaufwand ↑
Zeichenerklärung	↓ : Verringerung, Senkung dieses Aspekts ↑ : Erhöhung, Steigerung dieses Aspekts	

4 Grundlagen und Anforderungen für die Konzeptentwicklung

Die Ausführungen von Kapitel 3 zeigen, dass die Aufgabenstellung der Auswahl von TR derzeit nur unbefriedigend unterstützt und gelöst werden kann. Aus den beschriebenen Defiziten und deren Folgen ergeben sich sowohl Potential als auch Notwendigkeit für Verbesserungen und alternative Lösungsansätze. Dies motiviert zur Entwicklung eines Konzepts für die Repräsentation und Verarbeitung von Wissen zur Unterstützung, bzw. darüber hinaus zur Automatisierung, dieser Planungsaufgabe.

Im ersten Teil des vorliegenden Kapitels wird ein Grundkonzept entworfen, welches aus den drei Eckpfeilern Prinzipiellösungen, Experten-Konsenswissen und wissensbasierter Rechnerunterstützung besteht. Der zweite Teil umreißt die sich daraus ergebenden Besonderheiten und zusätzlichen Herausforderungen. Die Ableitung konkreter Anforderungen an das Konzept erfolgt schließlich aus den grundsätzlichen Rahmenbedingungen im Engineering der Anlagenplanung (→ 2.1), den Charakteristika und Herausforderungen der Engineeringaufgabe der Auswahl von TR (→ 2.4), den Defiziten des Status Quo aus Praxis und Theorie (→ 3.3) sowie den Besonderheiten und zusätzlichen Herausforderungen, die sich aus dem Grundkonzept ergeben (→ 4.2). Abbildung 4-1 gibt einen Überblick über Vorgehensweise und Quellen zur Anforderungserhebung.

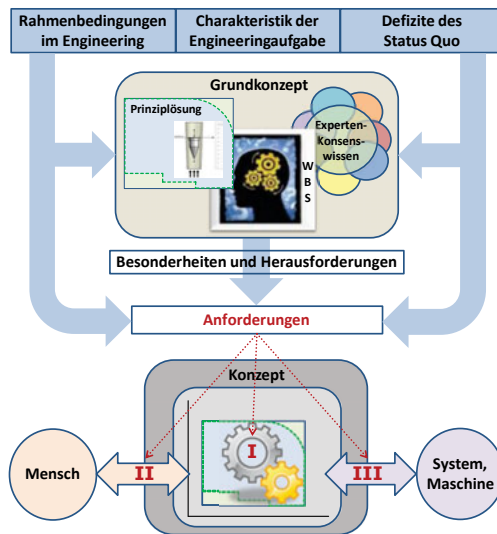


Abbildung 4-1: Ableitung konkreter Anforderungen an Konzept und Umsetzung

4.1 Eckpfeiler eines Lösungsansatzes

4.1.1 Prinzipiellösungen

Wie Abschnitt 2.1 aufzeigt, ist die Planung verfahrenstechnischer Anlagen, ebenso wie die PLT-Planung, geprägt durch ein grundsätzlich nicht sequentielles, iteratives Vorgehen [BRSc15]. Innerhalb des Planungsprozesses müssen Änderungen und Aktualisierungen rückwirkend berücksichtigt [WWM+11] sowie Entscheidungen auch auf Basis unvollständiger und unsicherer Informationen getroffen werden [FAY05]. Gleichwohl kann man davon sprechen, dass

Informationsstand, Sicherheit und Vollständigkeit der Informationen im Laufe des Planungsprozesses ständig ansteigen, wenn auch nichtdeterministischen Faktoren (z. B. Unsicherheit, Rücknahme von Entscheidungen) unterworfen, wie in Abbildung 4-2 angedeutet. Entstehende Informationen werden stetig verfeinert und angereichert [LSG+14]. Dies lässt sich u. a. an der wachsenden Anzahl und Detailtiefe sowie an der Art der entstehenden und genutzten Planungsdokumente (\rightarrow 2.2) im Laufe des Planungsprozesses erkennen (vgl. [WEB08]).

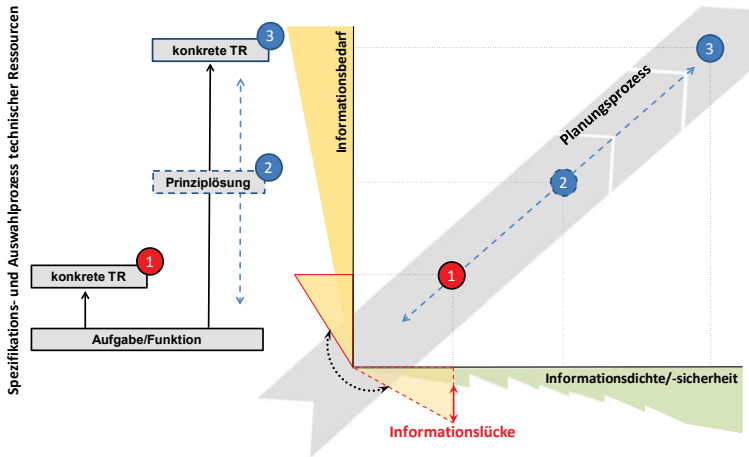


Abbildung 4-2: Verfügbare vs. notwendige Informationen im Planungsprozess

Konkrete TR (z. B. Durchflussmessgerät „XY“ des Herstellers „YZ“) werden durch sehr viele Informationen beschrieben, wobei ihre Charakterisierung nicht nur durch technologische Einsatzgrenzen, sondern auch durch andere Lebenszyklus-relevante Eigenschaften erfolgt (\rightarrow 2.4). Diese Eigenschaften werden zudem angereichert⁴ mit Produkt- oder herstellerspezifischen Informationen (z. B. Bestellnummern, Preisen, Lieferbedingungen). Die teils aus technischen Bedürfnissen, teils aus Marketing-bezogenen Gründen gesteigerten Produktfunktionalitäten und damit die in den letzten Jahrzehnten gewachsene Produktkomplexität [BIR01], [KAH05] erhöhen mehr und mehr das sowohl zur Beschreibung als auch zum Verständnis von TR notwendige Wissen. Die produktorientierte Beschreibung einer TR erfordert damit eine große Informationsmenge, welche zur Eignungsbeurteilung (z. B. bezüglich der Auswahl für eine bestimmte PLT-Stelle) der TR notwendig ist und im Rahmen der Planung zumeist in Form von Anforderungen spezifiziert werden muss. Werden zu einem frühen Zeitpunkt des Planungsprozesses konkrete TR ausgewählt (\rightarrow 2.4), so entsteht ein Informationsbedarf, der nicht adäquat von der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Informationsmenge (z. B. spezifizierbare Anforderungen) bedient werden kann. Es resultiert damit eine Informationslücke (\rightarrow Abbildung 4-2, Nr. 1). Die direkte Auswahl von TR erfordert eine Konkretisierung der Anforderungen, die in einem frühen Planungsstadium [MES07]⁵, [ESW+10] bzw. sogar im Abfrageprozess zwischen Hersteller und Planer

⁴ [WÄL12] führt an, dass die Anzahl der repräsentierten Eigenschaften mit fortschreitendem Konkretisierungsgrad in der Produktentwicklung stark ansteigt. Das fertige Produkt (TR) kann schließlich als Realisierung des konkretesten Produktmodells angesehen werden.

⁵ Mess bezieht sich hier auf die Konstruktion und Entwicklung mechatronischer Produkte (in die z. B. Sensoren integriert werden müssen). Eine Anlage als ein solches abstrahiert, rechtfertigt jedoch die Verwendung seiner Argumentation auch in diesem Kontext.

[DIN EN 60534-7] meist nicht gegeben ist. Zudem muss sich der Planer zu einem frühen Zeitpunkt bereits mit Produkteigenschaften und damit ggf. mit vielen irrelevanten Informationen beschäftigen [OEM89]. Verstärkt wird die geschilderte Herausforderung durch die große, am Markt verfügbare Menge an Produkten und Produktvarianten, deren Verfügbarkeit und Eigenschaften der ständigen Veränderung unterliegen (→ 2.4).

Die Kombination aus den Charakteristika des Planungsprozesses und den Bedingungen einer Direktauswahl konkreter TR verursacht eine Problematik, die in der Praxis entweder in Kauf genommen oder im Rahmen der in Abschnitt 3.3 skizzierten Vorgehensweisen behandelt wird. Wie Abschnitt 3.3 darstellt, resultiert dies in Defiziten, welche die Qualität und Effizienz des Planungsprozesses negativ beeinflussen. Daraus motiviert wird in dieser Arbeit die Verwendung von **Prinziplösungen (PZL)** als vorläufige und vorgelagerte Lösungselemente im Planungsprozess anstelle der frühzeitigen Festlegung von konkreten technischen Realisierungen vorgeschlagen (→ Abbildung 4-2, Nr. 2). Der Terminus PZL wird als ein Kernbegriff der vorliegenden Arbeit in einer spezifischen Bedeutung verwendet und daher im Folgenden erklärt und zu bestehenden Definitionen abgegrenzt.

Der vor allem im Bereich der Konstruktion genutzte Begriff PZL (dort oft auch Lösungsprinzip genannt) zielt auf die Beschreibung prinzipieller physikalischer und logischer Wirkungsweisen ab und beschreibt „[...] grobe aber funktionsbestimmende Spezifikationen des mechatronischen Systems ... [als] Lösungselemente und Wirkprinzipien zur Erfüllung von Teilfunktionen [...]“ [KAL98] oder „[...] Effekte und Effekträger [...], welche geeignet sind, die zu realisierende Funktion zu verwirklichen.“ [KOL98] bzw. „[...] grundsätzlich denkbare Lösungsprinzipien im Sinne von Systemarchitekturen [...]“ [HAB12]. In ähnlicher Physik-affiner Bedeutung wird der Begriff z. B. auch von [JAN06] und [MES07] verwendet.

Der hier zu definierende und im Folgenden verwendete Begriff PZL besitzt Analogien und semantische Überdeckung zu diesen Begriffsbedeutungen, da er auch im Übergangsbereich zwischen einer Funktion und der konkreten technischen Realisierung anzuwenden ist. Jedoch soll er im Rahmen der vorliegenden Arbeit über das reine konstruktionstechnische oder physikalische Verständnis eines Lösungsprinzips (→ 2.3) hinaus genutzt werden können, um seiner konkreten Ausgestaltung mehr Freiheit einzuräumen:

➤ *Unter PZL wird eine durch Eigenschaften charakterisierte und semantisch eindeutig definierte, abstrakte Lösung(svariante) verstanden. Als Lösung (beispielsweise in Form eines Handlungs- oder Umsetzungsprinzips) bietet sie damit grundsätzlich das Potential, eine zugehörige Funktion zu erfüllen, und bildet mit anderen PZL zusammen die mögliche Lösungsmenge der Funktion. Die PZL stellt keine konkrete technische Umsetzung dar, kann jedoch auch als Verkörperung einer Gruppe oder Klasse mehrerer konkreter technischer Umsetzungen interpretiert werden.*

Funktionen beschreiben dabei den zweckgebundenen Sinn eines Objekts oder Systems [EPP08], [GAA10] und damit die Aufgabe, die ihm in seiner Umgebung zugeordnet ist [EPP08]. Sie erklären das „Wozu?“ und „Warum?“, ggf. auf verschiedenen Abstraktionsstufen [HUB76] und beschreiben das Objekt/System damit lösungsneutral, ohne das „Wie?“ zu beantworten. Davon ausgehend werden Funktionen in der vorliegenden Arbeit als definierbare, abstrakte, funktionale Aufgabenstellungen betrachtet, die sich nicht zwangsläufig am rein technischen Zweck orientieren müssen.

Folgende Beispiele für mögliche Vertreter von PZL sowie Funktionen sollen den Begriff der PZL in seiner hier beabsichtigten Bedeutung greifbarer machen, jedoch auch seine inhaltliche Ausgestaltungsfreiheit verdeutlichen:

- Auf physikalischen Wirkprinzipien beruhende Messtechnologien wie Radar, Ultraschall, Radiometrie, Schwimmer (Funktion: Füllstandmessung)
- Arten von Transportmitteln wie Bahn, Bus, Fahrrad, PKW (Funktion: Personentransport)
- Bauarten bzw. Gerätetypen von Förderbändern wie Riemenförderer, Kettenförderer, Rollenförderer, Schleppklinkenförderer (Funktion: Förderbandtransport)

Die Ausgestaltung und Definition von PZL sollte sich aus folgenden Gründen primär an der Frage nach der technologischen Machbarkeit und Einsetzbarkeit der späteren TR orientieren [RiFA14*]:

- Die Betrachtung und Beurteilung der Einsetzbarkeit der späteren TR unter technologischen Aspekten stellt das Fundament für den sinnvollen und zweckgerechten Einsatz im Rahmen der jeweils gegebenen Bedingungen der späteren TR dar. Können bereits geforderte, meist auf physikalischen Randbedingungen beruhende, Leistungsspezifika nicht erfüllt werden, so ist die Betrachtung weiterer Aspekte, z. B. bezüglich Integration, Kommunikation und Parametrierung, hinfällig und überflüssig.
- Im Planungsprozess verfahrenstechnischer Anlagen ist die Verfahrenstechnik das führende Gewerk (→ 2.1). Dadurch bedingt liegen neben der eigentlichen Funktion (z. B. „Durchfluss messen“) im frühen Stadium der PLT-Planung meist bereits die verfahrenstechnischen Parameter, beispielsweise Stoffeigenschaften des Prozessmediums sowie Einsatz- und Einbaubedingungen vor und können aus Planungsdokumenten wie Fließbildern (Verfahrens-/R&I-Fließbild), PLT-Stellenblättern und ergänzenden verfahrenstechnischen Spezifikationsblättern entnommen werden (→ 2.2). Diese Informationen genügen, um auf der einen Seite die technologischen Anforderungen ausreichend zu spezifizieren als auch auf der anderen Seite PZL zu definieren und mit den Eigenschaften zu beschreiben, die notwendig sind, um die Eignung der PZL für den spezifischen Fall anhand der Anforderungen prüfen zu können. Hingegen ist eine entsprechende Konkretisierung von nicht direkt einsatzrelevanten Kriterien (z. B. hinsichtlich Integration, Kommunikation, Umweltverträglichkeit) der späteren TR im frühen Planungsstadium eher schwierig, da sich diese Informationen in der Regel nicht aus den verfahrenstechnischen Daten ableiten lassen und oftmals sogar von der Durchführung oder der Entscheidung weiterer Planungsschritte abhängen.

Anhaltspunkte für die Definition und Festlegung von Funktionen, PZL und zugehörigen Eigenschaften können grundsätzlich alle in Abschnitt 3.1 aufgeführten Quellenarten der jeweils domänenspezifischen Wissenslandschaft bieten. Für die TR der Feldebene ist beispielsweise die Nutzung von Taxonomien (→ 2.3, Anhang B) oder etablierten Klassifikationshierarchien (→ 5.2) sinnvoll, um Funktionen und PZL zu bestimmen. Für die Formulierung von Funktionen können beispielsweise Spezifikationen wie [IEC 62424] und [NE 150] mit den dort beschriebenen PLT-Funktionen⁶ und -Teilfunktionen, Anlagenfunktionen nach [HAD14] sowie mehr oder weniger abstrakt formulierte, grundsätzliche Automatisierungsaufgaben z. B. nach [SCH99] zur Orientierung herangezogen werden. Für Eigenschaften von PZL eignen sich auswahl- und entscheidungsrelevante Kriterien, wie sie u. a. in der Fachliteratur, z. B. in [GEV00], [BON02],

⁶ PLT-Funktionen werden durch den Erstbuchstaben der PLT-Stelle bezeichnet – z. B. mögliche Messaufgaben wie Füllstand (L), Druck (P), Durchfluss (F) oder Temperatur (T).

[BRU08], [FGH+11[@]] oder in normativen Werken und Richtlinien wie [NA 55] beschrieben werden.

Im konkreten Fall der Sensorik bieten sich z. B. Messaufgaben als Funktion an, für die PZL als Verkörperung unterschiedlicher (physikalischer) Messprinzipien definiert werden (→ 2.3). Die Beschreibung der PZL erfolgt über Eigenschaften, welche Auswahlkriterien zur Eignungsbeurteilung darstellen. Für die Funktion „Durchfluss messen“ sind beispielsweise PZL wie „Magnetisch Induktiv“ oder „Coriolis“ und Eigenschaften wie „Prozesstemperatur“ oder „Einbaulage“ denkbar.

Der Abstraktions- bzw. Detaillierungsgrad einer PZL ist flexibel wählbar und muss den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden. So kann der Übergang zwischen Funktion und technischer Realisierung durch PZL über mehrere Abstraktionsstufen unterstützt werden: Beispielsweise kann die abstrakte Funktion „allgemeines Transportmittel“ mit den PZL Kran, Förderband, autonomes Fahrzeug, Schienenfahrzeug gelöst werden. Sofern die (begründete) Wahl auf die PZL Förderband fällt, könnten in einem nächsten Schritt für die Funktion „Transport mittels Förderband“ dann weniger abstrakte Typen von Förderbändern (siehe oben) PZL darstellen. Ebenso ist eine mehrstufige Durchführung der Spezifikation und Auswahl von PZL mit jeweils verschiedenem funktionalem Fokus denkbar (z. B. erst auf der technologischen Machbarkeit und später auf Kommunikation oder Integration). Abbildung 4-2, Nr. 2 deutet diese Flexibilität schematisch an.

Für das hier propagierte Prinzip der Verwendung abstrakter Zwischenlösungen (PZL) im Planungsprozess auf dem Weg zur Auswahl konkreter TR finden sich in verwandten, aber auch in entfernteren Domänen grundsätzliche Analogien: Speziell im Bereich der Sensorik [REG05] oder der Auswahl von Aktoren bei [ERB13] wird gefordert, eine Auswahl von TR erst auf der Basis vorher zu betrachtender technologischer Aktor- oder Messprinzipien durchzuführen. Ebenfalls lässt sich eine Analogie zur Anlagenbeschreibung mittels CAEX (Computer Aided Engineering Exchange) über das dort genutzte Rollenkonzept herstellen. Die Idee dabei ist, Anlagenelementen in der Planungsphase über definierte Rollen Bedeutungen zuzuweisen, ohne die konkrete technische Implementierung dieser festzulegen. So soll mittels dieser Platzhalter die schrittweise Spezifizierung von abstrakten zu konkreten Objekten unterstützt werden [PLS+11B]. Mit dem Beschreibungsmittel der formalisierten Prozessbeschreibung [VDI/VDE 3682] zur Modellierung von Prozessen lassen sich neben Operatoren, Produkten, Energien auch TR als abstrakte und lösungsorientierte Platzhalter, ohne Berücksichtigung ihrer konkreten späteren Realisierung, abbilden. Im Themengebiet von Konstruktion und Produktentwicklung fordert [JAN06] mehr Unterstützung bei der Auswahl von Wandlerprinzipien auf abstrakter Ebene, und [MES07] propagiert ein zweistufiges Vorgehen bei der Sensorauswahl für mechatronische Konstruktionen, um sich jeweils auf die für die Phase wichtigsten Aspekte konzentrieren zu können. Angestrebt ist, in einer Vorauswahl Lösungsprinzipien auszuwählen, anhand von Bereichen und Randbedingungen, in denen die Messaufgabe erfüllt werden kann, und erst in der folgenden Detailauswahl konkrete Sensorprodukte. Richtlinien wie [VDI 2221] und [VDI 2206] empfehlen und unterstützen ebenfalls iterative Vorgehensschritte von abstrakten, groben zu konkreteren, detaillierten Strukturen durch die Zerlegung von Gesamtfunktionen in Teilfunktionen und die Findung von Wirkprinzipien und Lösungselementen zur Erfüllung dieser. [HAB12] schlägt im Bereich der Softwareentwicklung und Systemtheorie vor, Konzepte auf höheren Ebenen als verschiedene Lösungsvarianten zu betrachten und als Orientierungshilfen für die detailliertere

Ausgestaltung der Lösung zu nutzen. Er unterstützt damit auch ausdrücklich ein mehrstufiges, iteratives Vorgehen mit zunehmender Konkretisierung der Lösungsbildung.

Die Nutzung von PZL als vorgelagerte Zwischenlösung(en) (→ Abbildung 4-2, Nr. 2) in wählbarer Abstraktion und Ausgestaltung zur Unterstützung der späteren Auswahl von TR (→ Abbildung 4-2, Nr. 3) bringt abschließend betrachtet einige Vorteile, gegenüber der frühzeitigen direkten Auswahl konkreter TR, für die Durchführung des Planungsprozesses mit sich:

- Die Ausgestaltung und Verwendung von PZL hilft, sich auf die in der Planung jeweils tatsächlich notwendigen Aspekte zu konzentrieren (d. h. die aus Prozesssicht relevanten Anforderungen und Einsatzbedingungen) und nicht auf die Produkteigenschaften am Markt verfügbarer TR.
- Die Verwendung von PZL ermöglicht eine sukzessive Konkretisierung und Detaillierung der Planungsgegenstände und damit eine Spezifizierung und Auswahl, die wesentlich besser an den zur Verfügung stehenden Informationsstand (Planungsartefakte) des Planungsprozesses angepasst ist. Dadurch kann die aufgezeigte Informationslücke (→ Abbildung 4-2) verkleinert und die Sicherheit des Planungsprozesses gesteigert werden.
- Erst durch die Nutzung abstrakter Platzhalter wird die Möglichkeit eröffnet das Spektrum potentieller Lösungsvarianten umfassend zu betrachten, was bei der Auswahl konkreter Produkte aufgrund der unüberschaubaren Anzahl von Elementen als auch beschreibender Parameter nicht möglich wäre [MES07], [ESW+10]. Durch die Berücksichtigung möglichst vieler, ggf. auch unüblicher Lösungen [REG05], können die notwendige Breite möglicher Applikationen erfasst [BRU08A] sowie auch neue technische Entwicklungen und kostengünstigere Lösungen betrachtet werden [STR02]. Die Heterogenität der Lösungen schafft dabei einen großen Machbarkeitsraum [VDI 2206] und damit Entscheidungsspielraum für die Betrachtung und den Vergleich mehrerer Lösungsoptionen – ein Merkmal guter Planung [HAB12]. Die vorzeitige Festlegung auf eine TR wird verhindert und dadurch die Chance eröffnet, auch entsprechende Alternativen zuzulassen [AHR10]. Abbildung 4-3 veranschaulicht dazu den Unterschied zur direkten Auswahl von TR hinsichtlich der jeweiligen Betrachtungsmengen und der darauf basierenden Selektion. Bei einer Direktauswahl von TR für eine gewünschte Funktion kann nur eine relativ kleine Betrachtungsmenge (hier: c1, c2, c5) überblickt und bewertet werden (Gründe dafür werden zu Beginn dieses Abschnitts und in Abschnitt 3.3 geliefert) – andere, nicht betrachtete TR scheiden daher frühzeitig für eine Auswahl aus. Aus dieser eingeschränkten Menge wird eine geeignete TR ausgewählt (hier: c5). Da zu jeder PZL jedoch meist viele TR zuzuordnen sind, ermöglicht die Betrachtung mehrerer PZL (hier: A, B, C, D) und die Selektion von ein oder mehreren geeigneten PZL (hier B, C) im Weiteren das Zurückgreifen auf eine potentiell wesentlich größere Lösungsmenge geeigneter TR (hier: b1, b2, b3, b4, c1, c2, c3, c4, c5).
- Auf Basis der so zur Verfügung stehenden Lösungsmenge kann wiederum zu einem frühen Zeitpunkt eine systematische Auswahl geeigneter PZL und damit eine effiziente Eingrenzung der Lösungsmenge [JAN06] erfolgen. Das begründete Selektieren von Lösungen (bzw. Reduktion um nicht zweckmäßige oder nicht sinnvolle Lösungen) erhöht die Sicherheit und die Qualität des Planungsprozesses aufgrund fundierter und nachvollziehbarer Entscheidungen. Die Effizienz des Prozesses wird, z. B. durch die Reduktion potentieller Iterationszyklen [ERB13], gesteigert.

- Es kann davon ausgegangen werden, dass das Wissen über abstrakte PZL länger aktuell ist als das Wissen über am Markt erhältliche Produkte [MES07]. Dies reduziert die Aktualisierungsnotwendigkeit und den -aufwand.

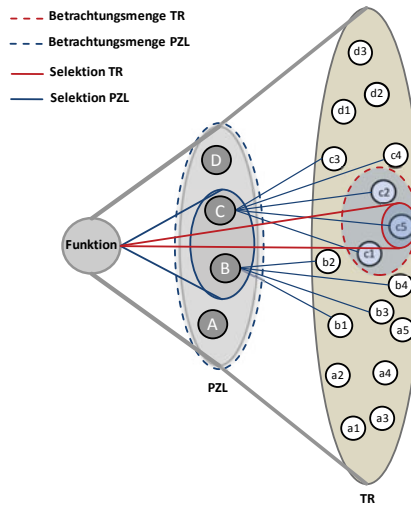


Abbildung 4-3: Lösungsmengen bei der Betrachtung von PZL und TR

4.1.2 Experten-Konsenswissen

Die starke Heterogenität der verfügbaren Wissensquellen (→ 3.1) stellt eine zusätzlich erschwerende Rahmenbedingung bei der Suche nach geeigneten TR bzw. bei deren Beurteilung dar. Dies trifft insbesondere auch für die Akquise von Wissen zur Beschreibung von PZL zu. Allgemeines Wissen über z. B. Messprinzipien ist wesentlich seltener verfügbar [JAN06] als konkretes Produktwissen über TR, wobei die vorhandenen Quellen (→ 3.1) die PZL meist sehr rudimentär (wenige Kriterien, oft eher qualitativ und allgemein gehalten) und lückenhaft beschreiben. Einzelne Erfahrungsträger und Spezialisten sind oft nur mit einigen PZL vertraut, was nicht zuletzt auf die Komplexität jedes einzelnen Verfahrens bzw. Prinzips [EGB09], [ESW+10] zurückzuführen ist.

Das zur Formulierung einer Wissensgrundlage bezüglich PZL notwendige Wissen ist Expertenwissen. Es liegt daher nahe, dass die Bildung von domänenspezifischen Expertengruppen eine adäquate Möglichkeit zur Sammlung und Pflege des entsprechenden Wissens darstellt [RiFA14*]. Um die Breite des oft großen Lösungsspektrums abzudecken und mit ausreichend fachlicher Tiefe zu vertreten, ist es dabei notwendig, dass möglichst viele Spezialisten mit unterschiedlichem Hintergrund (z. B. Forschung und Entwicklung, Betrieb und Anwendung, Standardisierung) und/oder aus verschiedenen Organisationseinheiten (Hersteller, Anwender, Akademia) in solchen Gruppen mitwirken. Als organisatorische Plattformen können dabei z. B. Experten-/Normungsgremien sowie unabhängige, fachliche Arbeitskreise (z. B. Namur-Arbeitskreise, VDI/VDE-GMA-Fachausschüsse) dienen. Die Expertengruppen bieten das Potential, unterstützt durch die Heterogenität ihrer Vertreter und die Art ihrer Expertise ([SCH00] stellt hierzu verschiedene, sich ggf. ergänzende Typen von Experten dar), Wissen über die jeweilige Domäne zusammenzutragen

und über den fachlichen Diskurs konsensual zu vereinigen. Das somit entstehende Konsenswissen, mit Inhalten verschiedenster Art und Herkunft (z. B. Erfahrungswissen, Heuristiken, theoretisches Wissen, Produktwissen) angereichert, bietet u. a. folgende Nutzeffekte [RiFA14*]:

- *Neutralität*: Unter der Voraussetzung eines ausgewogenen Konsensbildungsprozesses wird ggf. rein proprietäres Wissen (Produktwissen) zu Konsenswissen umgebildet.
- *Qualität und Vollständigkeit*: „Die Beteiligung einer Vielzahl von Experten erhöht die Breite und Tiefe der Systemabbildung und fördert die Qualität und die Vollständigkeit des abgebildeten Wissens.“ [SCH08A]
- *Einheitlichkeit und Verständlichkeit*: Die Bildung einer homogenen Vorstellung von Struktur, Syntax und Semantik (z. B. in Form von Terminologien) des Wissens, als gemeinsame Arbeitsbasis innerhalb des betroffenen Wissensbereichs, wird gefördert.
- *Aktualität*: Neueste Forschungs- und Entwicklungsergebnisse können in den Wissensbildungsprozess einfließen. Regelmäßige Überarbeitung und Validierung sichert einen aktuellen Wissensstand.
- *Akzeptanz*: Durch gemeinsame und anerkannte Wissensbildung im Konsens ist das Ergebnis innerhalb der Expertengemeinschaft und ggf. auch darüber hinaus akzeptiert.

4.1.3 Wissensbasierte Rechnerunterstützung

„Im Engineering von Anlagen sind komplexe Aufgabenstellungen zu bearbeiten“ [MÜH12]. Die vollständige und gründliche Durchführung der Auswahl von geeigneten TR oder PZL gehört zweifellos zu diesen Aufgabenstellungen. Die teilweise große Anzahl beteiligter Kriterien, ihre Vernetzung (Abhängigkeiten zwischen den Kriterien), die ggf. partielle Intransparenz (fehlende Informationen) und die Polytelie (Berücksichtigung und ggf. Optimierung mehrerer Teil(-Ziele), mehrdimensionale Informationsverarbeitung) sind nach [BFP11] u. a. eindeutige Anzeichen für die Komplexität der zu lösenden Aufgabenstellung. Auch [OME92], [MSA93], [EGB09], [ESW+10] und [SGG10A] attestieren diese Eigenschaft speziell für die Auswahl geeigneter Sensoren und Aktoren. Gleichzeitig gehört die Aufgabenstellung zu den sehr häufig durchzuführenden Routineaufgaben im Rahmen der Anlagen- bzw. der PLT-Planung (→ 2.4). Diese Kombination führt, in Anbetracht der Defizite und Probleme bei manueller Aufgabenbewältigung (→ 3.2.1), zur Forderung nach einer rechnergestützten Durchführung bzw. Unterstützung dieser Aufgabenstellung.

Ziel der Rechnerunterstützung ist die Integration informationeller Prozesse in technische Systeme [MÜL92], um nach [LAGö99] u. a. Spezifikations- und Entwurfsfehler zu vermeiden, Projektbeteiligte von lästigen Routinearbeiten zu entlasten, Komplexität beherrschbar zu machen und die Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten zu verbessern. Die Auswahl geeigneter PZL beinhaltet oft wiederkehrende, nicht wertschöpfende Tätigkeiten des Planungsprozesses, wie z. B. die manuelle Suche nach Informationen und die Konsistenzprüfung. Ihre Automatisierung durch die Delegation an die unterstützende IT [ZIN06] hilft bei der Konzentration auf kreative [SCH08E] und wertschöpfende [ZIN06] Tätigkeiten und unterstützt das notwendige Streben nach steigender Qualität und sinkenden Kosten [SSE09].

Einen vielversprechenden Ansatz für die angestrebte rechnergestützte Automatisierung bieten *wissensbasierte Systeme (WBS)* als Informationssysteme, die in einem abgrenzbaren Bereich menschliches Problemlösungsverhalten nachbilden. WBS ermöglichen die Repräsentation und Nutzung von kombiniertem Wissen vieler Domänenexperten (vgl. Konsenswissen → 4.1.2) in einem einzelnen Unterstützungssystem [BAPA04]. Der Einsatz von WBS ist besonders sinnvoll,

wenn das zu lösende Problem algorithmische Komplexität aufweist [LUN10], [MÜH12] und durch situations-bezogene Regeln sowie heuristisches Wissen beschrieben werden kann [SON95], [BAPA04], [LUN10]. Diese Voraussetzungen sind durch die Aufgabenstellung der hier fokussierten Auswahl gegeben. WBS bieten sich insbesondere für Auswahlaufgaben an, da sie auch bei großen Datenmengen potentielle Alternativen berücksichtigen [GEI90], was [OME92] und [SGG10A] ebenfalls ausdrücklich bestätigen. Die bei WBS inhärente Trennung von Wissen und seiner Verarbeitung [LUG03] erleichtert zudem die problemneutrale Erstellung und Modifizierbarkeit des Wissens [PUP91], [LUN10], wodurch Probleme, wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt, vermieden werden können.

Der relativ hohe Anteil an WBS innerhalb der in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Ansätze sowie die Dokumentation vieler darüber hinaus erfolgreicher Anwendungsbeispiele ([FAY99], [RFS+11], [MÜH12] geben u. a. einen Überblick) unterstreichen das Potential des wissensbasierten Ansatzes, Planungsingenieure von Routinetätigkeiten zu entlasten sowie Qualität und Effizienz des Planungsprozesses zu verbessern [SON95], und damit die Sinnhaftigkeit seiner Verwendung als Grundlage für das zu entwickelnde Konzept dieser Arbeit.

4.1.4 Fazit

Die definierten Eckpfeiler des Grundkonzepts sind als lösungsorientierte Reaktion auf die Defizite des Status Quo (→ 3.3) bezüglich der Ausgangs- und Durchführungsbedingungen bei der Auswahl von TR zu sehen. Sie geben eine erste Antwort auf die Fragen nach dem grundsätzlichen Charakter des notwendigen Wissens (PZL), seiner Herkunft (*Experten-Konsenswissen*) und seiner Verarbeitung (*wissensbasiert* und *rechnergestützt*). Die drei Eckpfeiler bilden den äußeren Rahmen für das zu entwickelnde Konzept, welches damit die:

Wissensbasierte (rechnergestützte) Auswahl von, auf der Basis von Experten-Konsenswissen beschriebenen, Prinziplösungen

zum Ziel und Inhalt hat [RiFA14*].

Die erfolgreiche Umsetzung und Anwendung des Konzepts bietet das Potential, sowohl die Qualität der fokussierten Engineering-Aufgabenstellung zu steigern als auch gleichzeitig den zur Durchführung notwendigen Aufwand zu verringern. Damit kann eine Effizienzsteigerung im Planungsprozess erreicht werden. Abbildung 4-4 verdeutlicht dies schematisch (Nr. 2), wobei die abgebildeten Charakteristika *Qualität* und *Aufwand* hier hauptsächlich den Lösungsfindungsprozess adressieren (im Sinne einer schematischen Darstellung werden u. a. Initialaufwände zur Erstellung der Wissensbasis und einer geeigneten Implementierung vernachlässigt).

Die Qualitätssteigerung beruht dabei vor allem auf der Verhinderung einer willkürlichen, schwer nachvollziehbaren, künstlichen a priori Beschränkung der verfügbaren Lösungsmenge (Abbildung 4-4, Nr. 1). Wettbewerbsneutrales Wissen von Domänenexperten auf abstrakter PZL-Ebene ermöglicht die unvoreingenommene und umfassende Betrachtung potentieller Lösungsalternativen und schafft damit eine breite Basis für die begründ- und dokumentierbare Selektion geeigneter Vertreter. Gleichzeitig wird die, dem Informationsstand entsprechende, Nutzung des verfügbaren Wissens durch die Verwendung von PZL unterstützt und damit dem besonderen Charakter des Planungsprozesses Rechnung getragen. Die wissensbasierte Rechnerunterstützung hilft bei der Abbildung und Verarbeitung des benötigten Wissens. Die dadurch erreichbare Automatisierung reduziert die diesbezüglichen Aufwände (hinsichtlich Zeit und damit Kosten)

und gleichwohl die inhärente Fehleranfälligkeit einer manueller Durchführung (Abbildung 4-4, Nr. 1). Somit wird eine zusätzliche Qualitätssteigerung erreicht.

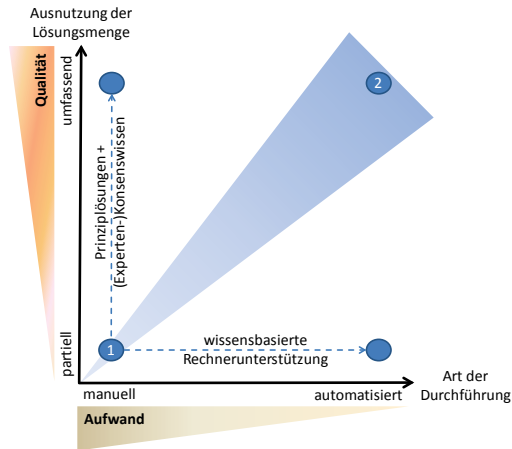


Abbildung 4-4: Effizienzsteigerung durch die Eckpfeiler des Grundkonzepts

4.2 Besonderheiten und resultierende Herausforderungen

Aus einer grundlegenden Betrachtung der den Eckpfeilern des vorgestellten Grundkonzepts innewohnenden Charakteristika ergeben sich Besonderheiten, die maßgeblich Verständnis, Repräsentation und Verarbeitung des notwendigen Wissens beeinflussen. Aus diesen Besonderheiten resultieren zusätzliche Herausforderungen, die ebenfalls für die Ableitung von konkreten Anforderungen (→ 4.3) an das zu entwickelnde Konzept Berücksichtigung finden müssen.

Trotz einer gewissen Analogie und strukturellen Ähnlichkeit zwischen dem Wissen über konkrete TR und dem über PZL stellen beide nicht das Gleiche dar (→ 4.1.1). Der Unterschied ist einerseits durch den verkörperten Begriffsinhalt selbst und andererseits durch die zur Beschreibung genutzten Wissensquellen bedingt.

Die Beschreibung einer konkreten TR erfolgt im Regelfall über eine Auflistung betrachteter Eigenschaften und deren spezifischer Ausprägungen (z. B. in Form eines Gerätedatenblattes). Die Beschreibung einer TR stellt damit einen Vektor im relevanten Eigenschaftsraum dar und repräsentiert die möglichen bzw. zulässigen Eigenschaftsausprägungen der TR beispielsweise in Form von Einsatzgrenzen (z. B. Prozesstemperatur: 0 – 150 °C).

Die im Konsensbildungsprozess entstandene Beschreibung einer PZL stellt hingegen die prinzipiell möglichen Ausprägungen der beschreibenden Eigenschaften einer abstrahierten Lösungsoption dar. Sie bildet damit nicht eine einzelne konkrete TR ab. Sie kann z. B. als vereinigende Repräsentation einer Menge von TR verstanden werden, die im Rahmen eines gemeinsamen Lösungsprinzips oder (Bau-)Typs zweckgebunden zusammengefasst werden. Die PZL kann sich aber in ihrer Beschreibung auch völlig vom Zusammenhang mit real existierenden TR lösen und einen rein abstrakten Lösungsraum beschreiben, der ihre Einsatz- und Verwendungsgrenzen wiedergibt. Der Grad der Abstraktion und des Zusammenhangs zwischen

PZL und TR ergibt sich vor allem aus dem anwendungsfallspezifischen Einsatzzweck erstellter PZL-Beschreibungen, aber auch aus der Art des dazu verfügbaren und verwendeten Wissens.

Konsenswissen kann sich mitunter aus vielen verschiedenen Wissensarten zusammensetzen (→ 4.1.2). Wissen über TR (z. B. in Form von Gerätedatenblättern) ist dabei nur eine Möglichkeit. Da der Auswahlprozess sehr stark auf Erfahrungswissen beruht (→ 2.4, 3.3), wird zumeist auch dieses Wissen u. a. in Form von Heuristiken (z. B. regelhafte Zusammenhänge der Form „wenn A dann B“) in den Konsensfindungsprozess einfließen. Auch die Beschreibung physikalisch bedingter Zusammenhänge und Randbedingungen kann mögliche Wissensinhalte erfordern bzw. mit sich bringen. Es ist zu erwarten, dass das im Rahmen von Expertengruppen domänenspezifisch zusammengetragene Wissen zur Definition und Beschreibung von PZL somit hybriden Charakter hat. Der Prozess der Konsensbildung wird dadurch zumeist zu einer konstruktiven Vermischung sowie Abstraktion des eingebrachten Wissens führen. Proprietäres, produktspezifisches Wissen ist damit, insofern eingebracht, mitunter nicht mehr als solches ersichtlich. Dies kommt auch dem Ziel einer wettbewerbsneutralen, funktionsorientierten Unterstützung des Planungsprozesses entgegen.

Bezüglich der Formulierung von Wissen zur Beschreibung von PZL sind insbesondere folgende Herausforderungen zu erwarten:

- **Mannigfaltigkeit und Heterogenität der beschreibenden Eigenschaften:** Trotz Beschränkung auf für die Beschreibung relevante Eigenschaften kann die Anzahl dieser, anwendungsfallspezifisch bedingt, durchaus groß ausfallen, wie das Beispiel der Durchflussmessung (→ 9.1) zeigt. Zusätzlich ist, aufgrund der unterschiedlichen Mess- und Formulierbarkeit von Eigenschaftsausprägungen [SCH08A], eine starke Heterogenität der Eigenschaftsskalierung und dadurch der durch sie beschriebenen Wertemengen möglich und zu erwarten (ähnliche Herausforderungen werden u. a. von [OP180] als „mixed-data problems“ bezeichnet). So ist die Nutzung des gesamten Spektrums, von diskreten, ggf. sogar subjektiv geprägten, qualitativen, bis hin zu präzisen mess- und quantifizierbaren Eigenschaften für die Beschreibung der PZL vorstellbar. Dadurch ergibt sich ein multidimensionaler, potentiell stark heterogener Eigenschaftsraum, der durch die betrachteten Eigenschaften aufgespannt wird.
- **Abhängigkeiten, Zusammenhänge, Restriktionen zwischen den beschreibenden Eigenschaften:** Wie bereits in Abschnitt 2.4 aufgeführt sind die Eigenschaften eines technischen Systems meist hochgradig voneinander abhängig (vgl. [LEO01], [MFB05], [WÄL12]). Bei der Beschreibung einer konkreten TR besitzen diese Abhängigkeiten meist keine Bedeutung mehr, da sie bereits im Rahmen des notwendigen Entwicklungsprozesses implizit oder explizit berücksichtigt wurden. Die entstandene TR kann daher als das Ergebnis der Auseinandersetzung mit den bestehenden Beziehungen während der Produktentstehung angesehen werden. Da PZL jedoch eine abstrahierte, zusammengefasste Lösungsmenge beschreiben können, ist die Existenz von Relationen zwischen den sie beschreibenden Eigenschaften von Relevanz. Die Ausprägungswerte einer Eigenschaft können die Werte und Wertebereiche anderer Eigenschaften beschränken und dadurch u. a. kombinatorische Unverträglichkeiten zum Ausdruck bringen. Die Notwendigkeit dieser Beschränkungen kann ähnlich zu den oben erwähnten Wissenseinflüssen z. B. durch Marktverfügbarkeiten, physikalische Randbedingungen, Erfahrungswerte und andere restriktions-bildende Ursachen begründet sein. Es sind dabei Zusammenhänge zwischen zwei, aber auch zwischen deutlich mehr Merkmalen zu erwarten. Diese können sowohl gerichtet (kausaler Zusammenhang: „Wenn A, dann B“) als auch ungerichtet (z. B. physikalische Gleichung zwischen mehreren

Eigenschaftparametern) auftreten und letztlich über die Verkettung mehrerer Relationsbeziehungen sogar Netzwerke bilden. Damit wird der multidimensionale Eigenschaftsraum zusätzlich noch in seinen Dimensionen relationsspezifisch beschnitten (deformiert). Abbildung 4-5 verdeutlicht diese Vorstellung anhand einer vereinfachten und schematischen, zweidimensionalen Darstellung des Eigenschaftsraums.

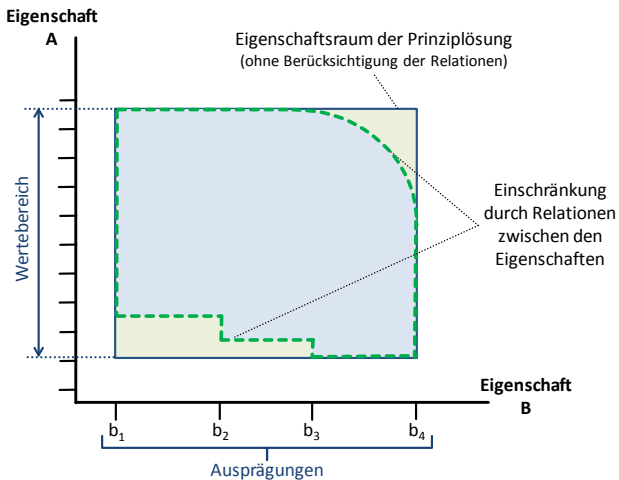


Abbildung 4-5: Eigenschaftsraum einer PZL

4.3 Ableitung konkreter Anforderungen

Die praktische Anwendbarkeit des Konzepts wird als obligatorisch betrachtet. Daher werden die Implementierbarkeit sowie die softwaretechnische Umsetzung des Konzepts als grundsätzliche Anforderung vorausgesetzt. Die aufgestellten Anforderungen im Rahmen dieses Kapitels gelten daher zwar hauptsächlich für das zu entwickelnde Konzept, aber prinzipiell auch für die zu realisierende softwaretechnische Umsetzung. Es wird somit innerhalb der Anforderungen nicht explizit zwischen Konzept und Implementierung unterschieden. Gleichmaßen wird sowohl die Erfüllung der spezifischen Aufgabenstellung (Auswahlunterstützung von PZL) als auch die zweckmäßige Interaktion mit der Umgebung verlangt – dies spiegelt sich in der gewählten Strukturierung der Anforderungen wider (→ Abbildung 4-1). Die drei Anforderungsgruppen subsumieren jeweils Anforderungen bezüglich der:

- I: Abbildung und Verarbeitung des Wissens (→ 4.3.1)
- II: Nutzung und Schnittstelle zum Menschen (→ 4.3.2)
- III: Integration und Schnittstelle zur System-/Maschinenumgebung (→ 4.3.3)

Die Anforderungserhebung innerhalb der folgenden Abschnitte konzentriert sich dabei auf die Herleitung der wesentlichen, im Rahmen der Aufgabenstellung dieser Arbeit unbedingt notwendigen Anforderungen. Wo möglich und sinnvoll werden dazu Beispiele oder Aussagen zur Unterstützung der Argumentation hinzugezogen. Ausschließlich implementierungsbezogene Anforderungen, beispielsweise hinsichtlich spezieller Oberflächenfunktionalitäten, Implementierungssprachen, Performance und Softwaresicherheit, werden an dieser Stelle nicht behandelt.

4.3.1 Abbildung und Verarbeitung des Wissens

Oberste Priorität muss im Rahmen der Anforderungen die Sicherstellung der Machbarkeit sein, d. h. die Herstellung der beabsichtigten Kernfunktionalität auf Basis der Eckpfeiler des Grundkonzepts. Diese Kernfunktionalität steht und fällt mit der Abbildungs- und Verarbeitungsfähigkeit des notwendigen Wissens.

Ia – Repräsentation und Verarbeitung von Prinziplösungswissen

Wissen über PZL muss adäquat abgebildet und verarbeitet werden können. Dazu gehört, dass *sowohl Eigenschaften als auch Relationen zwischen diesen repräsentiert werden können*. Die Abbildungs- und Verarbeitungsfähigkeit bezüglich der Relationen muss dabei sowohl kombinatorisches, mathematisch bzw. symbolisch formulierbares als auch heuristisches Wissen umfassen. Nur dadurch kann es gelingen die Eigenschaftsräume der PZL und deren ggf. vorhandene innere Beschränkungen (→ 4.2) so detailliert wie notwendig zu beschreiben. Damit kann eine Wissensabbildung erreicht werden, die wesentlich weniger Daten benötigt als beispielsweise Ansätze, die direkt auf Daten konkreter TR beruhen (z. B. [EGB09], [SGG10B], [ERB13], → 3.2.4, 3.2.5). Zugleich kann die Abbildung dadurch wesentlich präziser und an die Notwendigkeiten angepasst erfolgen als Ansätze, die nur grobe äußere (z. B. elliptische) Umrandungen der Möglichkeitsbereiche abbilden (z. B. [HFA97], [ZAF02], [BLF+05] oder in [ERB13] beschriebene Ansätze, → 3.2.4). Da *sowohl gerichtete als auch ungerichtete Beziehungen* zwischen den beschreibenden Eigenschaften von PZL auftreten können, müssen auch diese Unterschiede explizit berücksichtigt werden können. Relationen müssen *n-stellig* (mit $n > 2$, d. h. Relationen mit mehr als zwei Beteiligten) formulierbar sein, insofern dies für die jeweilige Aufgabenstellung sinnvoll ist. Somit wird eine kombinatorische Explosion der Anzahl möglicher Relationen vermieden (eine n-stellige Relation kann ggf. n-1 zweistellige Relationen ersetzen).

Ib – Umgang mit unvollständigen Informationen

Eine häufige Randbedingung des Planungsprozesses ist, dass insbesondere in frühen Phasen viele Informationen, z. B. in Form von Anforderungen, noch nicht vorliegen. Eine zu entwickelnde Lösung muss daher die *Arbeit auch mit unvollständigen Informationen* ermöglichen. Trotz fehlender Ausgangsinformationen müssen Konzept und Umsetzung ermöglichen, dass eine Eignungsprüfung von PZL trotzdem so präzise und umfassend wie möglich auf den vorhandenen Informationen durchgeführt werden kann. Die Erfüllung dieser Anforderung ist bei vielen der in den Abschnitten 3.2.4 und 3.2.5 untersuchten Ansätze nicht gegeben.

Ic – Skalenniveaugerechte Abbildung und Verarbeitung

Das adäquate Beschreiben von Objekten sowie deren Ausprägungen und Beziehungen untereinander erfordert neben Relationen auch geeignete Skalierungen [SCH99]. Die Wissensbeschreibung und -verarbeitung muss demnach auch die *explizite Differenzierung aller relevanten Skalenniveaus und deren jeweils niveaugerechte Behandlung* umfassen. Somit kann eine Abbildung im Rahmen angemessener Präzision erfolgen und Transformationen mit unnötigem Informationsverlust (Diskretisierung) oder ungerechtfertigtem Informationsgewinn (Quasimetrisierung) vermieden werden (vgl. [OP180], [REI91B]). Ein entsprechender Informations-Mehrwert gegenüber der üblichen Einteilung in „qualitativ“ und „quantitativ“ (→ 3.2.4) entsteht [HEE05]. Die Wissensverarbeitung muss auf der einen Seite skalenniveauspezifische Charakteristika der Elemente zur Wissensbeschreibung berücksichtigen und auf der anderen Seite eine Ungleichbehandlung vermeiden. Damit wird Ansätzen (→ 3.2.4, [DRE91]) widersprochen, die eine explizit vorrangige Behandlung qualitativer Eigenschaften propagieren.

Id – Flexible Wissensverarbeitung

So verschieden die spezifischen Problemstellungen der Auswahl im Planungsprozess sind, so verschieden kann die entsprechende Gestaltung und Abbildung von PZL-Wissen hinsichtlich der beschreibenden Eigenschaften, ihrer Art und ihrer Beziehungen untereinander ausfallen. Eine starre, vorgeschriebene Verarbeitungsprozedur wird dieser Individualität nicht gerecht. Zudem können dadurch Verarbeitungsvorgänge stark limitiert bzw. sogar (z. B. bei Fehlen notwendiger Zwischeninformationen) unmöglich werden (→ 3.2.4). Es muss daher eine flexible Wissensverarbeitung *ohne eine fest vorgegebene Verarbeitungsreihenfolge* der Wissens Elemente möglich sein, so dass bei Vermeidung einer willkürlichen Verarbeitungspriorität die prinzipiell gleichzeitige und -rangige Betrachtung aller vorliegenden Informationen gegeben ist.

Dadurch nicht ausgeschlossen und sogar gefordert wird wiederum die *Steuerbarkeit der Wissensverarbeitung*, z. B. durch den Einsatz anwendungsunabhängiger Heuristiken und Algorithmen, die es ermöglichen dynamisch auf jeweils individuelle Wissensstrukturen zu reagieren und damit die Wissensverarbeitung in einem gewissen Rahmen an die spezifischen Charakteristika des vorliegenden Wissens anzupassen.

Ie – Einfache, effiziente und verifizierbare Wissensabbildung

Für die Abbildung des Wissens muss „Einfachheit als Konstruktionsprinzip“ [EP11A] gelten. Eine nachvollziehbare [SON95], natürliche [BAPA04], möglichst explizite und deklarative [GFF90], [BEKE08] Wissensrepräsentation legt den Grundstein für den effektiven und akzeptierten Umgang mit den Wissensinhalten durch menschliche Anwender (dies gilt sowohl für den Ersteller als auch für den Anwender des Wissens). Daher muss eine *intuitive Wissensabbildung* gefordert werden, die *aus wenigen, einfach aufgebauten und gut verständlichen Elementen* besteht. Sie sollte zudem der Natur der Problemstellung entsprechen und prinzipiell eine Erkundbarkeit ihrer Strukturen [SCeP08] durch den Menschen unterstützen.

Für die maschinelle Verarbeitung des Wissens relevant ist dahingegen eine *kompakte Wissensabbildung (wenig Redundanz)*. Zudem muss die *grundsätzliche Analysierbarkeit des Wissens* [SCH99] gegeben sein. Dies ermöglicht die notwendige *Untersuchung und ggf. Umsetzung von Methoden zur Verifikation und Konsistenzprüfung der Wissensinhalte*. Nur so können verlässliche, weil überprüfbare, qualitativ hochwertige Wissensinhalte verwaltet und verarbeitet werden.

If – Generische, domänenübergreifende Verwendbarkeit

Wie viele andere Problemstellungen, so unterliegt auch die Konzeptentwicklung in diesem Fall dem „reusability-usability trade-off problem“⁷. Auch wenn die hier zu entwickelnde Lösung den Anforderungen des speziellen Bereichs der Automatisierungstechnik in der Planung verfahrenstechnischer Anlagen gerecht werden muss, darf dies ihren sinnvollen Einsatz nicht streng limitieren. Wissensabbildung und -verarbeitung müssen so anwendungsfallunabhängig und generisch wie möglich sein und damit eine *domänenübergreifende Verwendbarkeit* und hohe Problemvarianz sicherstellen. Über möglichst flexible und anwendungsfallunabhängige Verarbeitungsmechanismen (→ Anforderung Id) hinaus wird die *Trennung von Wissensbasis und Wissensverarbeitung* als eine dahingehend wichtige Forderung gesehen. Die so erreichbare Modularität sichert die Wartbarkeit und Erweiterbarkeit des Problemwissens unabhängig vom Problemlösungswissen [BEKE08], [RUN11]. Auch die *Wiederverwendbarkeit von Wissens-*

⁷ [MER11] bezeichnet damit den Zielkonflikt zwischen der Problemangepasstheit und Eignung einer Lösung für ein spezielles Problem und der Wiederverwendbarkeit dieser Lösung für andere Probleme.

elementen der Wissensbasis in verwandten Problembereichen [GFF90], [BEKE08] steht im Sinne dieser Modularität und fördert zudem die Effizienz der Wissenserstellung.

4.3.2 Nutzung und Schnittstelle zum Menschen

Wie bei allen technischen Systemen, die zur Unterstützung des Menschen geschaffen werden, ergeben sich auch im Rahmen dieser Arbeit besondere Anforderungen an die Schnittstelle zwischen System und Mensch (*Mensch-Maschine-Schnittstelle*). Im vorliegenden Abschnitt werden die Anforderungen thematisiert, die von unbedingtem Interesse für die Bereitstellung der Kernfunktionalität von Konzept und Umsetzung und die Interaktion mit dem Anwender sind. Ihre Einhaltung bestimmt im Wesentlichen die Akzeptanz und damit auch Intensität und Qualität der tatsächlichen Nutzung. Eine strenge Differenzierung der Nutzung hinsichtlich verschiedener Stakeholder und Rollen, wie sie z. B. [KUR92] oder [SCH00] beschreiben, wird hier nicht als relevant und zielführend gesehen und daher nicht vorgenommen.

IIa – Zugang zur Wissensbasis

Die akzeptierte und nachhaltige Nutzbarkeit eines wissensintensiven Unterstützungssystems steht und fällt mit einer geeigneten Möglichkeit das benötigte Wissen zuzuführen bzw. enthaltenes Wissen zu pflegen. Dies wird umso mehr deutlich, da der Prozess des Wissenserwerbs nicht selten als der eigentliche Engpass [ASS97], [FAY99], die sogenannte Wissensakquisitionskomponente durchaus als wichtigste Komponente [KEL00] und die Wartungsproblematik als Grund des Scheiterns [KUR92] bei der Entwicklung entsprechender Systeme gesehen wird.

Große Relevanz für Verständnis, Anschaulichkeit und somit letztlich auch für die Bedienbarkeit durch den Anwender besitzt dabei die Form der Darstellung [SCH99]. Diese muss möglichst *natürlich, anschaulich und intuitiv* sein [GFF90], [BEKE08]. Da bereits verschiedene Ansätze gezeigt haben, wie problematisch der direkte Umgang mit Wissensinhalten z. B. in Form von Regelbasen [FAY99] oder Matrizen [LRZ06] sein kann und wie vorteilhaft dagegen die *Repräsentation durch ein visuelles, Graph-basiertes Beschreibungs-/Darstellungsmittel*, so ist letztere zu bevorzugen. Auch [HAR10[@]] betont, dass diesbezüglich ein einfacher Texteditor nicht mehr ausreicht. Gerade bei Wissensinhalten mit inneren Zusammenhängen fördert erst die geeignete Visualisierung den Überblick [WAL12] über diese, ein Verständnis für die Problemstruktur [LRZ06] und damit auch die Transparenz [FAY99] der gesamten Wissensbasis.

Komplexere Wissensinhalte sind für den Menschen schlecht überschaubar und bereits ab relativ bescheidenen Größenordnungen inhaltlich schwerlich überprüfbar [FAY99]. Konsistenzfehler, wie z. B. die in [NAZ89] beschriebenen Fehlertypen, gefährden den zweckmäßigen Einsatz des betroffenen Wissens. Über die Möglichkeit einer ggf. visuell gestützten Sichtprüfung hinaus muss deshalb eine *idealerweise automatische Unterstützung bei Analyse und Verifikation des Wissens geschaffen werden*, unter Nutzung der in Anforderung 1e geforderten Voraussetzungen. Nur so kann ein korrekter Wissensbasisaufbau bzw. ein konsistenter Zugriff auf erstelltes Wissen durch den Menschen erfolgen, die Qualität des abgelegten Wissens gesichert und folgenschweres Fehlverhalten der Unterstützungssystems verhindert werden [BEKE08].

Es ist zu erwarten, dass sowohl die Anwender als auch die Ersteller des enthaltenen Wissens zwar ggf. Domänenexperten, jedoch keine Experten auf dem Gebiet der Abbildung oder gar der technischen Umsetzung des Wissens sind. Folglich *darf die Nutzung der Mensch-Maschine-Schnittstellen keinerlei spezielle informationstechnische Kenntnisse über die Wissensrepräsentation selbst oder ihre softwaretechnische Implementierung erfordern*. So fordern es beispielsweise auch [CBR91] und [VDI 2889]. Ein entsprechender Laie soll damit schnell und

unkompliziert in die Lage versetzt werden können, Aufbau und Pflege des Wissens durchzuführen.

IIb – Erklärungsfähigkeit und Repräsentation des Ergebnisses

Es gilt die Eignungsprüfung von PZL anhand spezifizierter Anforderungen und Bedingungen durchzuführen. Im Sinne einer Einschätzung und weitergehenden Nutzung des Ergebnisses muss eine Aufbereitung dessen erfolgen. Diese kann u. a. die Bewertung der PZL, muss jedoch in jedem Fall jeweils das *Aufzeigen von Spielräumen und ggf. auswahlkritischen Eigenschaften* beinhalten und damit die Einschätzung der Eignung der PZL und das Abwägen vorhandener Alternativen unterstützen. Wiederum ist auch hier die *geeignete Repräsentation des Ergebnisses* von entscheidender Bedeutung für das Verständnis und den Eindruck beim Anwender. Wegen des multidimensionalen Charakters der Aufgabenstellung (→ 4.2) ist die *Visualisierung* dabei gleichermaßen eine Herausforderung [ESW+10].

Eng mit der Ergebnisaufbereitung verknüpft ist die *Erklärungsfähigkeit des Systems*. Das Aufzeigen der Wissenszusammenhänge und Schlussfolgerungen dient der Plausibilitätskontrolle der Lösung und Transparenz der Lösungsfindung [PUP91]. Diese Nachvollziehbarkeit trägt im Wesentlichen zur Akzeptanz durch den Anwender bei.

Aufgrund der großen und weiter steigenden Bedeutung der Dokumentation im Rahmen der Anlagenplanung (→ 2.1) muss auch die *Dokumentierbarkeit des Auswahlprozesses* gefordert werden. Dies sollte die Aufstellung aller in Betracht gezogenen Kriterien, die Identifikation der verwendeten Wissensbasis, die Spezifikation der Anforderungen und Bedingungen, das aufbereitete Prüfungsergebnis sowie eventuelle Besonderheiten und zusätzliche Informationen zum jeweiligen Problemfall beinhalten. Die Dokumentation gewährleistet Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen im Planungsprozess und erleichtert ggf. spätere Iterationsschritte oder gar Fehler- und Ursachenfindung.

IIc – Umsetzung und Nutzung

Die weltweite Arbeitsteilung, die damit verbundene Verteilung von vorhandenem sowie benötigtem Expertenwissen und der stark iterative, parallele Charakter der Planungstätigkeiten (→ 2.1) erfordern eine *ortsunabhängige Verfügbarkeit* von Engineeringwissen [MÜH12] und softwaretechnische Unterstützung in Form einer *plattformunabhängigen und ohne spezielle technische Voraussetzungen einfach nutzbaren Umsetzung*.

4.3.3 Integration und Schnittstelle zur System-/Maschinenumgebung

Zahlreiche softwarebasierte Werkzeuge unterstützen heute bereits den Engineeringprozess. Im Sinne eines umfassenden, konsistenten Datenmanagements und eines möglichst lücken- und verlustfreien, effizienten Planungsprozesses ist dabei die Integration solcher Werkzeuge in die bestehende Dokumenten- und Werkzeuglandschaft unabdingbar [HER10], [TAU13]. Erst durch die Sicherstellung einer entsprechenden Integrationsfähigkeit können Konzept und Umsetzung einen wichtigen Beitrag zur „Automatisierung der Automatisierung“ [SSE09] leisten.

IIIa – Verwendung standardisierter, einheitlich strukturierter Informationsträger

Die Formulierung von PZL-Wissen basiert u. a. auf der Beschreibung der charakterisierenden Eigenschaften von PZL. Die Abschnitte 3.1 und 3.2.5 zeigen, dass bei Auswahl- und Entscheidungsaufgaben heterogene, schwer vergleichbare Semantiken und Syntaxen nicht hilfreich sind. Ein einheitliches Verständnis bei der Nutzung, aber vor allem die softwaretechnische, algorithmische Verarbeitung und die Integration in bzw. Anbindung an andere Softwaresysteme erfordern die Verwendung von *einheitlich strukturierten und beschriebenen*

Informationsträgern als Bausteine zur Beschreibung von PZL. Bereits [DRE91] sieht die eindeutige Eigenschaftsbeschreibung als Grundlage für eine algorithmische, effiziente Verarbeitung von Produktdaten. Darüber hinaus muss untersucht werden, inwiefern bereits *existierende Standards und Spezifikationen dabei zur Orientierung oder Referenzierung genutzt werden können*.

IIIb – Fähigkeit zur Integration in den Engineeringprozess

Sowohl Konzept als auch insbesondere die Umsetzung dessen müssen sich in den Planungsprozess einbinden lassen. Diese Integrationsfähigkeit ist verknüpft mit der Offenheit für die Anbindung an die vor- und nachgelagerte Informationsverarbeitung. Darunter ist die möglichst bruchfreie *Nutzung bereits vorhandener Engineeringinformationen* (Import) zu verstehen sowie die *Bereitstellung von Ergebnissen oder aufbereiteten Informationen für deren weitergehende Nutzung* (Export) im Planungsprozess. Dabei sind auch hier bereits *etablierte Modelle und Beschreibungsformate in Betracht zu ziehen*. Die auf diesem Wege erreichbare Durchgängigkeit der Werkzeugkette vermindert den notwendigen Eingriff durch den Menschen und minimiert dadurch Fehlerursachen (z. B. durch manuelle Eingaben des Anwenders) sowie Aufwand (z. B. durch redundante Datenerhebung) [TAU13].

4.3.4 Zusammenfassung

Die in den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.3 abgeleiteten Anforderungen bilden den äußeren Rahmen für die Entwicklung des Konzepts und seiner entsprechenden Umsetzung auf Basis des in Abschnitt 4.1 beschriebenen Grundkonzepts. Zugleich dienen die formulierten Anforderungen als Referenz- und Messmarken für die Evaluation einer erfolgreichen Konzeptentwicklung.

Die vorgenommene Anforderungsermittlung und -aufbereitung macht die große Relevanz zweier Aspekte deutlich und damit eine vertiefte inhaltliche Auseinandersetzung mit diesen obligatorisch. Zum einen müssen Möglichkeiten untersucht werden Elemente für die Abbildung des Wissens auf Grundlage standardisierter und strukturierter Informationsträger zu formulieren (leitet sich hauptsächlich aus den Anforderungen Ic, Ie, Ig, IIIa, IIIb ab). Diesem Aspekt ist das sich anschließende Kapitel 5 gewidmet. Zum anderen gilt es, für die Repräsentation des abzubildenden Wissens im Kontext von Auswahl- und Entscheidungsaufgaben, bereits existierende Ansätze und Methoden auf ihre Verwendbarkeit für die Konzeptentwicklung hin zu analysieren (leitet sich hauptsächlich aus den Anforderungen Ia, Ib, Id, Ie, Ig, IIa, IIb ab). Kapitel 6 betrachtet daher diesen Aspekt ausführlich.

5 Beschreibung technischer Objekte durch Merkmale

In Abschnitt 4.3.3 wird die Verwendung einheitlich strukturierter, möglichst standardisierter Informationsträger gefordert (Anforderung IIIa). Für die Erfüllung dieser Anforderung bieten sich *Merkmale* an, deren Nutzung zur Beschreibung von TR mittlerweile als Stand der Technik angesehen wird [PLS+11A] und auch in der Anlagenplanung verbreitet ist [PLS+11B].

Ziel dieses Kapitels ist die Vorstellung und Einordnung von Merkmalen als Beschreibungsmittel technischer Objekte und darüber hinaus ihre Bewertung hinsichtlich einer Verwendung als Informationsträger im Rahmen des zu erstellenden Konzepts. Dazu werden zunächst die grundsätzlichen Begriffe erklärt und abgegrenzt sowie ein Überblick über existierende Systematiken und Standards gegeben. Im Kern wird das Merkmal anschließend als Informationsträger bezüglich seiner Umgebung, seiner Eigenschaften und seiner möglichen Semantik charakterisiert. Es werden zudem Strukturen und Ansätze vorgestellt, die kompakte Informationen einer Merkmalmenge repräsentieren. Abschließend wird die Verwendung von Merkmalen als Informationsträger kurz zusammengefasst und bewertet.

5.1 Grundlagen und Begriffsbestimmung

Alle lebenden oder unbelebten, natürlichen oder künstlichen Objekte dieser Welt besitzen Eigenschaften, durch die sie beschrieben werden können [DRE91], [EPP11B]. Diese Eigenschaften werden z. B. durch Beobachtung, Messungen, Berechnungen, Definitionen von einem Objekt festgestellt bzw. festgelegt [WÄL12], wobei stets eine Abstraktion stattfindet [MER11], wie Abbildung 5-1 zeigt. Die Relevanz einzelner Eigenschaften eines Objektes ist, genau wie die Sichtbarkeit dieser, meistens perspektivabhängig [MER11].



Abbildung 5-1: Entstehungsprozess von Merkmalen (nach [MER11])

Für den Merkmalbegriff gibt es vielfältige Definitionen, wie [MER11] zeigt. Im allgemeinen Konsens können Merkmale jedoch als klassifizierbare Eigenschaften (Abbildung 5-1) zu beschreibender Objekte aufgefasst werden [MER11], die zur Identifizierung [WÄL12] und Unterscheidung [DIN 4002-2], [WÄL12] bzw. Klassenbildung [MER11], [HAD114] dieser Objekte dienen. Eine Eigenschaft setzt sich aus einem Merkmal und seinem Wert zusammen [DRE91], wobei der Wert eines Merkmals als seine Ausprägung bezeichnet wird [DIN 4002-2] und das Merkmal einen Sammelbegriff für die Menge aller möglichen Ausprägungen darstellt [DRE91]. Beschreibungsinhalt und Komplexität von Ausprägungen sind nicht grundsätzlich festgelegt – das Spektrum kann von sehr einfachen (z. B. Umgebungstemperatur = 50 °C) zu sehr komplexen (z. B. Kennlinie einer Pumpe) Ausprägungen reichen. Im Sinne einer automatisierten Verarbeitbarkeit und einer möglichst eindeutigen Semantik, sollten Merkmalausprägungen jedoch durch so elementare Datentypen wie möglich repräsentiert werden können. Müssen Merkmale hinsichtlich einer rechnergestützten Spezifikation und Verarbeitung eher formal beschrieben werden, so sollen sie gleichzeitig verständlich und ausdrucksstark im Rahmen zwischenmenschlicher Kommunikation verfügbar sein – dieser ambivalente Anspruch wird bei jeder Modellierung und Nutzung von merkmalsbasierten Informationen deutlich [MER11].

5.2 Merkmal- und Klassifikationssysteme

Merkmale zur Beschreibung technischer Objekte oder Systeme sind ein wichtiger Inhalt von Normungs- und Standardisierungsprozessen. Die vor allem im steigenden Wettbewerb der Globalisierung [DIN 4002-1] notwendige engere Kooperation unterschiedlicher Unternehmen in allen Produktlebenszyklusphasen sowie ein erhöhter Bedarf des elektronischen (Produkt-) Datenaustauschs bedingen, ökonomisch getrieben, die Bildung von Merkmalssystemen und Komponentenbibliotheken. Ein gewerke- oder unternehmensübergreifender Austausch merkmalsbasierter Informationen wäre ohne eine definierte, gemeinsame Basis nicht möglich [MER11]. Neben unzähligen firmenspezifischen Standards [DKD14] existiert daher mittlerweile eine Vielzahl von standardisierten Merkmal- und Klassifikationssystemen [PLS+11A]. Diese meist von Interessengruppen aus Herstellern und Anwendern erarbeiteten externen Standards definieren Anforderungen an die Produktdatenbereitstellung [DKD14].

Merkmal- und Klassifikationssysteme sind schwerlich separat zu betrachten. Klassenbildung von Objekten (z. B. TR) erfolgt immer über deren Ähnlichkeitsbeziehungen. Da Ähnlichkeit nur bezüglich der beschreibenden Eigenschaften/Merkmale festgestellt bzw. -gelegt werden kann [WÄL12], sind Merkmale über die Charakterisierung ihrer Träger hinaus essentiell für deren Klassifizierung [HAD114]. Abbildung 5-2 stellt hierzu eine Auswahl von Spezifikationen sowie Klassifikationssystemen dar. Ausgehend vom Klassifikationssystem *eCI@ss* werden dabei auch referenzielle Verbindungen zwischen einzelnen Standards beispielhaft deutlich gemacht. Die für den Bereich der Automatisierungstechnik relevantesten Vertreter werden im Folgenden kurz vorgestellt.

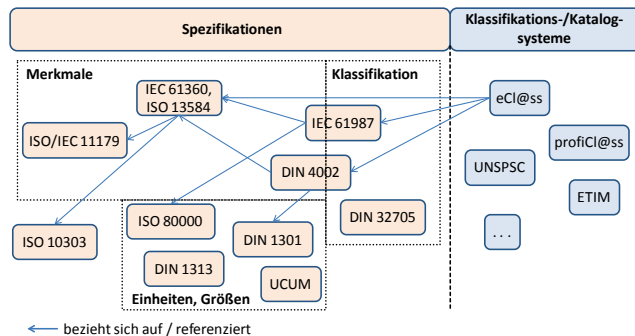


Abbildung 5-2: Übersicht ausgewählter Spezifikationen sowie Klassifikationssysteme

Die [ISO/IEC 11179] definiert die innere Struktur von Merkmalen durch Festlegung von anwendungsunabhängigen Basisattributen. Im Weiteren spezifiziert sie die Beschreibung dieser durch sogenannte Deskriptoren und gruppiert die Attribute in semantische Klassen, wie [HEE05] beschreibt. Durch die Festlegung von Metadaten zu Merkmalen [MER11] bildet sie eine Grundlage für andere Spezifikationen.

Die [DIN EN 61360] beschreibt ein Informationsmodell für den Aufbau [HEE05] und für die eindeutige semantische Beschreibung von Merkmalen. Neben der Definition von strukturellen und syntaktischen Regeln für den Aufbau der Merkmale werden wichtige Attribute für die Merkmalbeschreibung festgelegt [HED007]. Das Datenmodell der Norm ist mit der Spezifikationssprache *EXPRESS* aus [ISO 10303] (STEP) beschrieben und mit dem Standard [ISO 13584] harmonisiert [AHR10]. Die Arbeiten an der [DIN EN 61360] manifestieren sich u. a.

auch in der international organisierten Datenbank *IEC CDD* (Component Data Dictionary), einem Merkmallexikon für die Produktbeschreibung.

Die Spezifikation eines Datenmodells zur Beschreibung von Merkmalen (in der Norm als *Strukturelemente* bezeichnet), deren Attributen und Relationen sowie formalen Regeln in einer anwendungsneutralen, einheitlichen Methodik, ist das Ziel der [DIN 4002]. Basierend auf dem Datenmodell von [DIN EN 61360], [ISO 13584] beabsichtigt man mit dieser Norm eine praktikable Unterstützung für den Aufbau eines Merkmallexikons zu bieten [DIN 4002] und definiert dazu Merkmale in einem eigenen Merkmallexikon [ADK+06].

Die [IEC 61987] legt herstellerunabhängige Klassifikationsschemata [HEE05] für elektrische und prozessleittechnische Einrichtungen (z. B. Messgeräte, Aktoren, Niederspannungs-Schaltanlagen) fest. Sie liefert zudem einen Ansatz für den Aufbau von *Merkmalleisten* als zweck- und rollenspezifische Gruppierung der nach [DIN EN 61360], [ISO 13584] strukturierten Merkmale. Diese Merkmalleisten dienen zur Spezifizierung einzelner Typen von TR (insbesondere in den Teilen 10ff. der [IEC 61987]) und beschreiben, welche Merkmale zur Beschreibung dieser jeweils anzugeben sind. Ziel ist die einheitliche Dokumentation [HEE05] und der standardisierte Datenaustausch [MER11] zur Optimierung der Abläufe innerhalb und zwischen Unternehmen [IEC 61987-11]. In die Normierung sind große Teile der [NE 100] eingeflossen [MER11], die Erweiterung um andere Gerätefamilien ist geplant und findet bereits statt [GEO14B].

Die [DIN 32705] definiert methodische und terminologische Grundsätze für die hierarchische Anordnung von Begriffen [MER11], typisiert Arten von Klassifikationssystemen und bildet damit eine domänenunabhängige Grundlagen-Norm zu diesem Thema [HEE05].

Insbesondere bei Merkmalen zur Repräsentation physikalischer Größen spielen Einheiten eine bedeutende Rolle. Normen wie die [DIN 1301] oder die internationale [DIN EN ISO 80000] stellen hierzu die normierenden Standards dar. Weitere Spezifikationen wie z. B. die *UCUM* (Unified Code for Units of Measure) beschreiben u. a. Codierungssysteme für den elektronischen Austausch von Maßeinheiten.

Unter den Klassifikations- bzw. Katalogsystemen hat vor allem *eCl@ss* durch verschiedene Kooperationen (z. B. mit PROLIST (NAMUR)) und durch eine starke Orientierung an verbreiteten Standards (→ Abbildung 5-2) bzw. eigene Normierungsbestrebungen [AHR10], [GEO14B] eine wachsende Bedeutung für das Engineering, insbesondere das der Automatisierungstechnik, erlangt. *eCl@ss* ist ein branchenübergreifendes Klassifikationssystem zur Beschreibung von Produkten und Dienstleistungen [HEEp03]. Ursprünglich zum Zwecke der Materialwirtschaft [HEE05] und hinsichtlich einer Verbesserung der Arbeitsabläufe vor allem im Beschaffungsprozess entwickelt, hat es sich mittlerweile darüber hinaus für die Unterstützung verschiedener Engineeringprozesse und des Lebenszyklus-übergreifenden Produktdatenmanagements etabliert [AHR10]. Die vierstufige Klassifikationshierarchie ist in Abbildung 5-3 zu sehen. Klassifikationsendpunkte sind die Anwendungsklassen der untersten Ebene. Sie können z. B. die abstrakte Repräsentation einer Klasse von TR darstellen. Diesen Klassen sind Merkmale zur Beschreibung in Form von Merkmalleisten zugeordnet. Ein standardisierter Warengruppenschlüssel bildet einen eindeutigen Klassifikationscode für die Klassen jeder Ebene. Als Beispiel sei hier der „Coriolis-Massedurchflussmesser“ (Schlüssel: 27-20-04-02) in der Gruppe „Messgerät, Durchfluss, Menge“ (27-20-04) in der Hauptgruppe „Messtechnik, Prozessmesstechnik“ (27-20) im Sachgebiet „Elektro-, Automatisierungs- und Prozessleittechnik“ (27) aufgeführt. Die Weiterentwicklung von *eCl@ss* wird weiter vorangetrieben, was sich vor allem in

der stetig wachsenden Anzahl an Klassen, Merkmalsleisten und Merkmalen niederschlägt [GEO14B].

Als weitere Klassifikations- und/oder Katalogsysteme seien an dieser Stelle *procl@ss*, *ETIM* (Katalogformat des Elektrogroßhandels), *UNSPSC* (United Nations Standard Products and Services Code), *RNTD* (RosettaNet Technical Dictionary), *eOTD* (ECCMA Open Technical Dictionary), *GPC* (Global Product Classification) erwähnt, jedoch nicht näher beschrieben. Eine Übersicht über entsprechende Systeme findet sich in [HEE05], detaillierte Vergleiche zwischen ausgewählten Systemen in [HLS07].

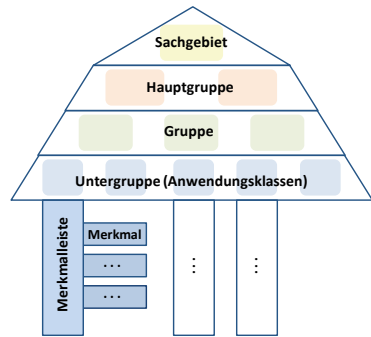


Abbildung 5-3: Struktur von eCl@ss

5.3 Das Merkmal als Informationsträger

5.3.1 Merkmalkontext

Merkmale charakterisieren Objekte hinsichtlich deren Eigenschaften und dienen zur weitergehenden Behandlung dieser Objekte (z. B. Vergleich, Klassifizierung). Durch Merkmale charakterisierte Objekte werden allgemein Merkmalsträger genannt. Im Rahmen der Anlagenplanung und speziell für den Bereich der Automatisierungstechnik können solche Merkmalsträger konkrete TR darstellen, aber auch abstrakte Platzhalter, die funktionale Anforderungen für die zukünftige technische Realisierung beschreiben [ME09]. Abbildung 5-4 gibt einen Überblick über diese Zusammenhänge in Anlehnung an die Modelle von [ME09], [FEH+13], [HAD13]. Der Merkmalsträger bildet den semantischen Kontext für das zugeordnete Merkmal. Die volle Bedeutung des Merkmals kann somit erst durch Herstellung dieser konkreten Verbindung zwischen Merkmalsträger und Merkmal erschlossen werden [HAD13].

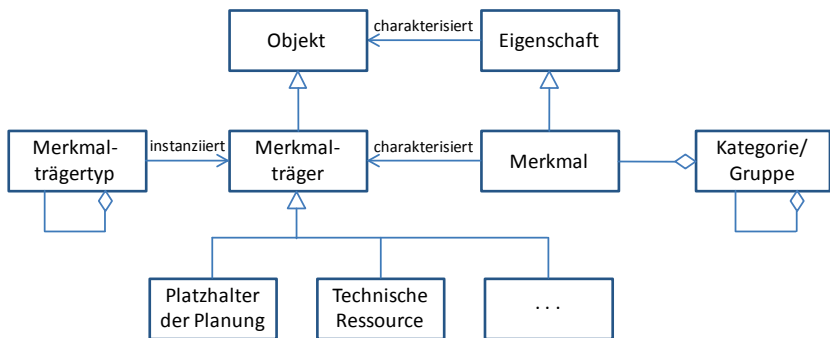


Abbildung 5-4: Merkmalsträger als Kontext des Merkmals

Eigenschaften bzw. Merkmale lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten kategorisieren und gruppieren. Sowohl die Merkmalkategorie als auch Art und Menge der enthaltenen Merkmale sind dabei abhängig von unterschiedlichen Aspekten, wie beispielsweise der Verwendungsdomäne (z. B. Konstruktion⁸, Automatisierungstechnik⁹) oder der modellspezifischen Sichtweise

⁸ [BR80] unterscheidet beispielsweise u. a. funktionelle, ästhetische, ergonomische und wirtschaftliche Eigenschaften von Produkten.

(z. B. Anforderungen an ein Produkt, Beschreibung einer Produktlinie). Beispiele für verschiedene Merkmalkategorisierungen geben u. a. [BIR80], [KOL98], [GAA10], [WÄL12].

Wie in Abbildung 5-4 ersichtlich, sind Merkmalsträger Instanzen von sogenannten Merkmalsträgertypen. Merkmalsträgertypen stellen im Bereich der Informationswelt (Modellbildung) Klassen von Merkmalsträgern dar. Merkmalsträgertypen können in einem hierarchischen Begriffssystem geordnet sein und dadurch sowohl verschiedene Abstraktionsstufen von Objektklassen repräsentieren als auch Vererbung von Eigenschaften in Form beschreibender (Klassen-)Merkmale ermöglichen. Einzig die unterste Abstraktionsebene einer Merkmalsträgertypen-Hierarchie ist sinnvoll instanziiierbar. Die instanziierten Merkmalsträger können sowohl eine Instanz der Informationswelt sein, die ein physisches Objekt repräsentiert als auch (physisch) reale Objekte selbst (z. B. ein konkretes Individuum einer TR). Abbildung 5-5 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den abstrakten Klassen (Merkmalsträgertypen) der Informationswelt in verschiedenen Abstraktionsebenen und Instanzen am Beispiel der Durchflussmesser. Als höhere Abstraktionsstufe in der dargestellten Hierarchie wäre z. B. der Merkmalsträgertyp „Messgerät“ denkbar.

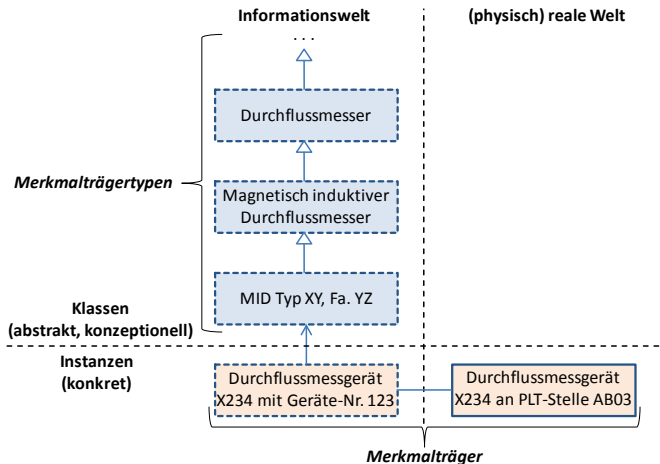


Abbildung 5-5: Klassen und Instanzen von Merkmalsträgern

Jedes technische Objekt besitzt theoretisch unendlich viele mögliche Eigenschaften bzw. Merkmale [DRE91], [WÄL12]. Umso bedeutender ist, dass jede Betrachtung (bzw. jedes Modell) eines solchen Objekts stets nur auf einer definierten Untermenge (Sicht) dieser Merkmale stattfindet und damit auf einer vereinfachenden Abstraktion des Objekts beruht. Umfang und Art dieser Auswahlmenge sind immer abhängig von einer zweckgebundenen Perspektive oder einem zu betrachtenden Aspekt (z. B. kann eine solche Sicht an Gewerke-, Stakeholder-, Aufgaben- oder Methoden-spezifischen Aspekten orientiert sein [MÜH12]). Die Sortierung oder auch die Auswahl von Objekten nach bestimmten Kriterien könnte beispielsweise eine solche spezifische Perspektive bedingen. Merkmale, die im Rahmen des Betrachtungszwecks nicht relevant sind, brauchen diesbezüglich auch nicht berücksichtigt zu werden [HAD113].

⁹ [NA 55] unterscheidet beispielsweise u. a. die Merkmalkategorien Einsatz-, Einbau-, Stoff-, und Umgebungsbedingungen für PLT-Geräte.

5.3.2 Merkmalbeschreibung

Betrachtet man Merkmale auf einer Metaebene, so werden diese selbst Gegenstand der Betrachtung [EPP11b] und Beschreibung – wiederum durch charakterisierende Merkmale. Um die Vermischung der Betrachtungsebenen zu vermeiden, verwendet man für Merkmale zur Beschreibung von Merkmalen den Begriff „Attribute“ [AHR10]. Die Definition von Attributen dient dem Aufbau standardisierter Merkmale und somit zum gemeinsamen Verständnis ihrer Struktur.

Als grundsätzlichste normative Spezifikation dazu kann die [ISO/IEC 11179] angesehen werden. Sie legt Struktur und Eigenschaften merkmalsbeschreibender Basisattribute fest und kategorisiert diese. Die Standards [DIN EN 61360-2], [ISO 13584-42] sowie [DIN 4002] bauen hinsichtlich der Beschreibung ihrer Merkmale auf der [ISO/IEC 11179] auf. Dabei werden teilweise Erweiterungen vorgenommen. Die [DIN EN 61360] unterscheidet mittlerweile fast 40 Attribute zur Beschreibung von Merkmalen, wobei diese verschiedenen Stufen der Angabepflicht (z. B. optional, obligatorisch) unterliegen. Obwohl die oben erwähnten Spezifikationen in der Art und Kategorisierung der Merkmalattribute sowie verwendeter Terminologien mitunter differieren, bestehen große Schnittmengen. Folgende Attribut-Kategorien umfassen die wichtigsten Aspekte der Merkmalbeschreibung und werden prinzipiell in allen aufgeführten Standards behandelt:

Identifizierende Attribute, deren Aufgabe die möglichst global eindeutige Kennzeichnung eines Merkmals ist. Hervorzuheben ist dabei die ID (manchmal auch (G)UID – (Global) Unique Identifier), eine Kennung, welche sprachunabhängig und unverwechselbar die durch das Merkmal abgebildete Semantik Domänen-übergreifend repräsentiert. Weitere Beispiele für Attribute zur Identifizierung sind Name, Synonyme, Formelzeichen, ggf. Versions- und Änderungsnummern.

Semantische/definierende Attribute definieren die Bedeutung des Merkmals, indem dessen semantische Aspekte informell (z. B. durch natürliche Sprache oder Bilder) beschrieben oder referenziert werden. Sie sind daher besonders an der Mensch-Maschine-Schnittstelle von Bedeutung für die Interpretation und Einordnung des Merkmalsinhalts. Typische semantische Attribute sind erklärende Definitionen, Bilder und Formeln sowie Referenzen zu anderen externen Semantiken.

Relationale Attribute können als beziehungsstellende Attribute auf eine oder mehrere Klassen eines Klassifikationsschemas referenzieren bzw. den Zusammenhang zu anderen Merkmalen herstellen.

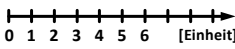
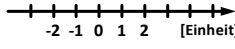

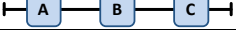
Administrative Attribute enthalten Informationen zum Lebenszyklus und zur Historie des Merkmals und dienen zudem der Beschreibung des administrativen oder organisatorischen Kontexts der Merkmalsbeschreibung. Es werden z. B. Angaben zur verantwortlichen Organisation oder zum Registrierungsstatus des Merkmals, Einführungs- und Änderungsdaten, Normungsstatus gemacht.

Werteattribute charakterisieren die Ausprägung des Merkmals. Damit werden neben dem eigentlichen Wert, Art und Anzahl der möglichen Ausprägungswerte festgelegt. Obligatorisch sind in der Regel Datentyp und Werteformat, optional sind z. B. Wertelisten (mögliche diskrete Ausprägungen), Wertebereiche, Maßeinheiten u. a. Werteattribute sind besonders für die algorithmische, also rechnerbasierte, Verarbeitung der Merkmalsinhalte von Bedeutung, da sie Hinweise bzw. Grenzen für die Interpretation und Behandlung der Ausprägungen geben.

Werden Objekte aufgrund ihrer Merkmale verglichen, so geschieht dies meist über den Vergleich der Ausprägungen zweier strukturell und semantisch gleicher Merkmale (z. B. Vergleich von

Prozessdruck A mit Prozessdruck B). Sowohl für die Interpretation des Ausprägungswertes als auch für seine Verarbeitung (z. B. Vergleich, Ableitung von Aussagen) ist eine weitere Frage von zentraler Bedeutung, die in der Werteattributierung vorhandener Spezifikationen keine explizite Beantwortung erfährt: welches Messniveau bzw. welche Aussagegenauigkeit haben die Ausprägungen des betrachteten Merkmals? Das dafür zu betrachtende Charakteristikum ist das *Skalenniveau*. Unterschieden werden vier Skalenniveaus, wobei das jeweilige Niveau durch die zulässigen Transformationen (einer Skala in eine andere Skala des gleichen Typs) bestimmt wird, bei denen die Skaleneigenschaften invariant bleiben [DRE91]. Mit steigendem Niveau nimmt die Zahl der gültigen bzw. sinnvoll anwendbaren Relationen zwischen den Skalenwerten zu – in gleichem Maße steigen Informationsgehalt und Interpretationsfähigkeit [POEp94]. Tabelle 5-1 zeigt die möglichen Skalenniveaus, ihre Eigenschaften und jeweils Beispiele auf.

Tabelle 5-1: Übersicht über die Skalenniveaus

Skalenniveau	Darstellung	Relationen zwischen den Skalenwerten	Beispiele
Verhältnisskala (Rationalskala)		Identität ($=$; \neq) Vergleich ($<$; \leq ; \geq ; $>$) Differenz (+; -) Verhältnis ($/$; \times)	Physikalische Größen mit SI-Grundeinheiten und abgeleiteten Einheiten (z. B. Länge in m, Druck in Pa)
Intervallskala		Identität ($=$; \neq) Vergleich ($<$; \leq ; \geq ; $>$) Differenz (+; -)	Datum, Temperaturen in $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$
Ordinalskala		Identität ($=$; \neq) Vergleich ($<$; \leq ; \geq ; $>$)	Erdbeben- und Windstärkeskala, Güte- und Sicherheitsklassen
Nominalskala		Identität ($=$; \neq)	Postleitzahlen, Aggregatzustände, Geschlecht, Werkstoffbezeichnungen

Die Ausprägungen nominaler Merkmale werden durch diskrete, nicht komparierbare Begriffe dargestellt. Durch die fehlende Ordnung auf dieser Skala gibt es keine mengentechnischen Berührungen zwischen den Skalenelementen (einzelne Werte sind disjunkt zueinander). Ordinale Merkmale hingegen verwenden vergleichbare Ausdrücke (z. B. steigerungsfähige Adjektive wie „klein“, „mittel“, „groß“) als Ausprägungswerte, wobei über die Distanz innerhalb der dadurch gebildeten Rangordnung keine Aussage getroffen werden kann. Beide Skalenniveaus beschreiben qualitative Merkmalausprägungen. Intervall- und Verhältnisskala hingegen beschreiben quantitative Merkmalausprägungen und werden teilweise auch als Kardinalskalen zusammengefasst [DRE91]. Die technisch bedeutsamere ist dabei die Verhältnisskala, da sich die meisten physikalischen Größen, aufgrund ihres definierten Nullpunkts, auf diesem Niveau skalieren lassen. Weitere Ausführungen und Beispiele zum Thema der Skalenniveaus finden sich u. a. in [OP180], [DRE91], [RE91B], [HEE05].

5.3.3 Merkmalaussagen

Die Beschreibung von Objekten durch Merkmale ermöglicht die Vergleichbarkeit dieser Objekte über die Bewertung ihrer Ähnlichkeit auf Basis definierter Eigenschaften. Insbesondere im technischen Umfeld ist der Objektvergleich hochgradig relevant, wenn es um die Aufstellung und Erfüllung von Anforderungen geht. Anforderungen spezifizieren Soll-Eigenschaften eines hypothetischen Objektes und implizieren damit eine Erfüllungsforderung durch die Eigenschaften eines realisierenden Objektes (z. B. eine TR).

Wie bereits in Abschnitt 5.3.1 erwähnt, sind innerhalb der Anlagenplanung, speziell der Automatisierungstechnik, dahingehend zwei Arten von Objekten (Merkmalsträger) besonders interessant: a) abstrakte Platzhalter als Verkörperung zu realisierender Funktionen und b) realisierender TR. Im allgemeinen Sprachgebrauch beschreiben Platzhalter der Planung

Anforderungen, während TR die Erfüllung dieser Anforderungen zusichern. Anforderungen werden im Rahmen der Planung verfahrenstechnischer Anlagen auf konzeptioneller Ebene als Beschreibung der erwünschten Anlage [ME09], meist in Form planungstechnischer Dokumente (z. B. R&I-Fließbilder, PLT-Stellenblätter, → 2.2) formuliert, während Zusicherungen in der Regel inhärent durch Beschreibungen von TR (z. B. in Datenblättern, Produktkatalogen) gegeben sind. So kann beispielsweise für den Platzhalter „PLT-Stelle FIC 001“ ein maximaler Volumenstrom von 100 m³/h angegeben werden, während der Gerätetyp „XY“ des Herstellers „AB“ durch einen maximalen Volumenstrom von 150 m³/h beschrieben wird. Es handelt sich dabei um zwei unterschiedliche *Aussageziele* auf der Basis eines Merkmals: *Anforderungen* und *Zusicherungen*. Abbildung 5-6 erweitert dazu Abbildung 5-4 um den Aspekt der *Ausprägungsaussagen*. Eine Merkmalausprägung kann durch verschiedene Ausprägungsaussagen semantisch konkretisiert werden. Während das Aussageziel die Intention der Ausprägungsaussage wiedergibt, charakterisiert die *Aussage* die Ausprägung hinsichtlich des Verhältnisses zu einem Vergleichswert. Die jeweilige Aussage wird dabei durch eine binäre Relation (=, <, ≤, ≥, >) ausgedrückt (vgl. [Epp11b]) und kann damit z. B. einen Festwert (=) oder Grenzwerte (<, ≤, ≥, >) repräsentieren. Das aufgeführte Beispiel des Durchflussmessers kann damit einerseits als Ausprägungsaussage mit dem Aussageziel Anforderung und der Aussage „Volumenstrom ≤ 100 m³/h“ (Ausprägung bezeichnet oberen Grenzwert) und andererseits mit dem Aussageziel Zusicherung und der Aussage „Volumenstrom ≤ 150 m³/h“ (Ausprägung bezeichnet oberen Grenzwert) formuliert werden.

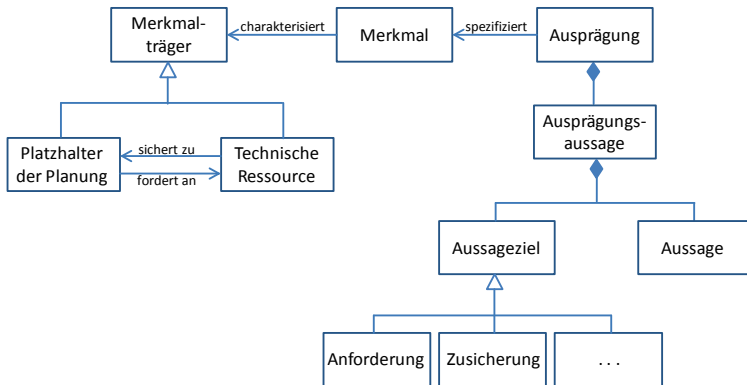


Abbildung 5-6: Aussagenformulierung auf der Basis von Merkmalen (nach [ME09] und [Epp11b])¹⁰⁾

Sowohl [Epp11b] als auch [MER11] betonen, dass das konkrete Aussageziel jeweils auf Merkmalebene betrachtet werden muss. Damit kann auch die Anforderungsspezifikation der Anlagenplanung an die zukünftige TR durchaus Zusicherungen enthalten (z. B. mögliche Hilfsenergiearten, die bereitgestellt werden können) sowie die Beschreibung einer TR auch Anforderungen (z. B. eine definierte Einbaulage) formulieren kann. Es muss hier also zwischen der allgemeinen Bezeichnung („Anforderung“, „Zusicherung“) im technischen Sprachgebrauch auf Merkmalsträgerebene und der eher auf Merkmalmodellen beruhenden, theoretischen Zuordnung von Aussagezielen („Anforderung“, „Zusicherung“) auf Merkmalebene unterschieden werden.

¹⁰⁾ [ME09] und [Epp11b] führen weitere Typen von Aussagezielen auf (z. B. Istwert), welche jedoch bei der Auswahlunterstützung im Rahmen dieser Arbeit keine Relevanz besitzen.

Durch Schaffung einer semantischen Verbindung [ME09] zwischen zwei Merkmalsträgern (z. B. TR und Platzhalter) ist eine vergleichende Betrachtung dieser, auf Basis ihrer Merkmale und unter Einbeziehung der jeweiligen Ausprägungsaussagen, möglich¹¹. Bei der im Fokus dieser Arbeit liegenden PLT-Planung liefert gerade die Prüfung und Bewertung, inwieweit die Erfüllungsforderung spezifischer Anforderungen durch Zusicherungen (z. B. von Seiten TR) befriedigt werden kann, wertvolle Informationen und unterstützt damit notwendige Entscheidungen.

5.4 Informationsstrukturen auf Basis von Merkmalen

5.4.1 Merkmalleiste

Werden mehrere Merkmale zweckgebunden zur Beschreibung einer Klasse (gleichartiger Objekte (Merkmalsträgertypen) gruppiert [DIN 4002-2], dann spricht man von *Merkmalleisten* (ML). Unter der dringenden Notwendigkeit durchgängige Arbeitsabläufe durch standardisierte Kommunikations- und Datenaustauschgrundlagen zu schaffen, entstanden industrielle Normierungsbestrebungen für die einheitliche Beschreibung von TR auf der Basis solcher ML. Ziel war anfangs vor allem eine Optimierung an der Schnittstelle zwischen Herstellern und Kunden (z. B. Planer) im Beschaffungsprozess. Entsprechende optimierungswürdige (reale) und mittels ML optimierte Workflows werden u. a. in [GEO14B], [ZGO15] skizziert. Mittlerweile werden ML darüber hinaus auch in anderen Anwendungsgebieten und Lebenszyklusphasen wie der Instandhaltung oder Parametrierung [GEO14A] genutzt, weitere Einsatzgebiete nennt [LUT11]. ML für TR der Prozessautomatisierung wurden bereits in der [NE 100] spezifiziert [GEO14A]. Seit 2008 erfolgt die Migration in das Klassifikationssystem *eCI@ss* [AHR10] (→ 5.2), zudem wird die internationale Normung innerhalb der [IEC 61987] vorangetrieben [GEO14A]. Speziell für die Prozessautomatisierung sind auf dem aktuellen Stand ML für Sensorik, Aktorik, Prozessanalysetechnik, Niederspannungsschaltanlagen u. a. verfügbar [AHR10]. Die Normenwerke [PAS 1040-1042] definieren über TR für die Prozessautomatisierung hinaus ML für Maschinen, Apparate und Rohrleitungen in der chemischen Industrie wie z. B. Druckbehälter, Wärmetauscher und Kreislumpen. Die standardisierten ML stehen zum Zwecke der Verwendung und Einbindung in den elektronischen Workflow jeweils auch als *XML* (eXtensible Markup Language)-Formalisierung zur Verfügung [GEO14B], [ZGO15].

Wie bereits Abschnitt 5.2 zeigt, beschreiben ML in *eCI@ss* Produktklassen auf der untersten Abstraktionsebene (*Anwendungsklassen* vgl. Abbildung 5-3). In einer ML zusammengefasste Merkmale bilden damit die abstrahierte Beschreibung z. B. einer Klasse TR, die stellvertretend für einen bestimmten Typ TR (z. B. Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser) steht und für alle zu dieser Klasse gehörenden konkreten TR (z. B. MID Typ XY Firma YZ) genutzt werden kann.

Prinzipiell sind ML zunächst lineare Listen aus Merkmalen ohne innere Hierarchie oder Struktur. Um den Notwendigkeiten bei der Abbildung komplexer Typen TR Rechnung zu tragen und gleichzeitig Lesbarkeit und Übersichtlichkeit zu erhöhen, wurden die ML im Laufe der Zeit weiterentwickelt und durch verschiedene Strukturkonzepte erweitert. Zu nennen sind hier beispielsweise der Block als Element zur Gruppierung von Merkmalen (z. B. kann der Block „Prozesseigenschaften“ u. a. die Merkmale „Prozessdruck“, „Prozesstemperatur“ enthalten), Kardinalität zur Vervielfachung von Blöcken gleicher Struktur (ermöglicht z. B. mehrfaches Anlegen des Blocks „Prozessanschluss“) und Polymorphismus zur Beschreibung verschiedener

¹¹ Oft entstehen durch unterschiedliche Modellierung und Formatierung semantische Lücken zwischen zwei Merkmalsträgern. Eine Vermeidung solcher Lücken setzt voraus, dass die jeweilige Vergleichsbasis (Merkmale) möglichst wohldefiniert oder gar standardisiert ist [ME09].

struktureller Ausprägungen eines Aspekts (z. B. die Beschreibung eines analogen und eines digitalen Eingangs, die sich bezüglich Art und Anzahl ihrer Merkmale unterscheiden können). Ein weiteres wichtiges Strukturkonzept ist die Sicht. Sichten ermöglichen eine anwendungsbezogene Filterung der Gesamtmerkmale der ML. Empfohlene Standardsichten sind die Betriebsmerkmaleliste (Merkmale, die die Betriebs- und Prozessbedingungen beschreiben, ähnlich einem PLT-Stellenblatt), die Gerätemerkmaleliste (Merkmale, die die Eigenschaften einer konkreten TR beschreiben, ähnlich einem Gerätedatenblatt) sowie die administrative Merkmaleliste für abwicklungsspezifische Merkmale (z. B. Kontaktadressen, Ansprechpartner) und die kommerzielle Merkmaleliste für ökonomische Aspekte der Vertragsabwicklung (z. B. Preise, Lieferzeit). Der Nutzen der spezifischen ML-Sichten hängt sowohl vom Anwender (verschiedene Gewerke bzw. Teilnehmer wie z. B. Planer, Hersteller) als auch von der jeweiligen Phase des Planungsprojektes (z. B. Beschaffung, Instandhaltung) ab und kann sehr unterschiedlich ausfallen, wie [AHZG09] und [PLS+11b] übersichtlich darstellen. Insbesondere für die Domäne der Automatisierungstechnik sind eCI@ss-ML aufgrund teilweise unzureichender Standardisierung nicht immer vollständig und müssen ggf. problemspezifisch ergänzt werden [PFR+15].

5.4.2 Merkmalnetz

Neben den beschriebenen ML wurden im Bereich der Forschung andere Möglichkeiten entwickelt, auf der Basis von Eigenschaften bzw. Merkmalen Informationsstrukturen zur Objektbeschreibung aufzubauen. Nachfolgend werden dazu kurz zwei dieser Ansätze vorgestellt.

Im Rahmen einer Methode zur Reduzierung der Variantenvielfalt in der Produktentwicklung schlägt [GEM98] das sogenannte *Merkmalnetz* als merkmalerorientierte Abbildung variantenreicher Objekttypen vor. Das Ziel ist eine übersichtliche, formale Darstellungsweise der Unterscheidungsmerkmale des abzubildenden Objekttyps sowie deren Abhängigkeiten als Graph. Die Knoten des Graphen werden von primären (vom Kunden ausgewählt/gefordert) und sekundären (von primären oder anderen sekundären abgeleitet) Unterscheidungsmerkmalen gebildet. Beziehungen zwischen den Merkmalen werden zum einen durch sogenannte funktionale Abhängigkeiten gebildet, welche die Ableitungsreihenfolge stringent vorgeben (damit werden quasi abhängige und unabhängige Merkmale definiert) und zum anderen durch logische Abhängigkeiten, welche die gerichteten, kombinatorischen Einschränkungen zwischen den Ausprägungen zweier Merkmale beschreiben. Die eher abstrakte Visualisierung durch das Merkmalnetz wird im vorgestellten Ansatz durch Abhängigkeitstabellen (ähnlich Entscheidungstabellen) ergänzt, welche die jeweiligen Merkmalbeziehungen durch die Abbildung logischer Abhängigkeiten detaillieren. Abbildung 5-7 stellt ein solches Merkmalnetz beispielhaft dar.

Der Kern des Ansatzes liegt vor allem in der systematischen Aufbereitung, Strukturierung und übersichtlichen Darstellung von Objekten in komplexeren Problemen (Variantenbildung). Die netzartige Modellvorstellung und Visualisierung kommt dem Charakter des von ihm behandelten Problems wesentlich näher als z. B. die reine Auflistung beschreibender Merkmale. Der verwendete Merkmalbegriff bleibt vereinfacht und qualitativ. Wie in Abbildung 5-7 erkennbar ist, werden nur Merkmale mit wenigen, diskreten Ausprägungen behandelt. Stetige Ausprägungsbereiche werden bewusst von der Betrachtung ausgeschlossen. Eine algorithmische Verarbeitung dieses Modells läuft auf die Verknüpfung von Entscheidungstabellen hinaus, wird jedoch im Rahmen von [GEM98] nicht weiter ausgeführt oder implementiert.

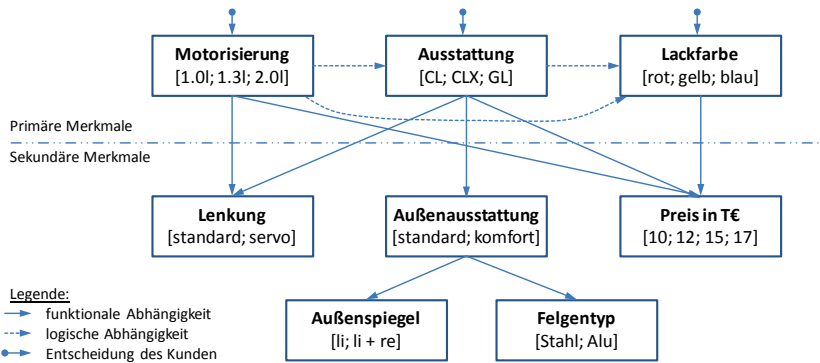


Abbildung 5-7: Merkmalsnetz am Beispiel der Angebotsdefinition eines PKWs [GEM98]

[WÄL12] entwirft eine Theorie der Eigenschaften technischer Produkte. Neben der Aufstellung einiger Ordnungskategorien von Eigenschaften wie Geometrie, Prozess und Werkstoff werden alle Eigenschaften strikt in unabhängige Parameter klassifiziert, die vom Konstrukteur maßgeblich beeinflusst und im Produktentwicklungsprozess festgelegt werden sowie abhängige Parameter, welche die nach außen wirkenden und z. B. vom Kunden geforderten Eigenschaften beschreiben. Kern des Ansatzes ist der Entwurf eines Modells, in dem Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts und die Beziehungen zwischen diesen abgebildet werden. Die sich dadurch ergebenden sogenannten *Eigenschaftsnetzwerke* sollen helfen, die Zusammenhänge zwischen den konstruktiven Parametern (unabhängig) und den geforderten Eigenschaften (abhängig) unter Berücksichtigung von Umwelt- und Prozesseigenschaften offenzulegen [WÄL12] und dadurch Einflussmöglichkeiten durch den Entwickler sowie mögliche Zielkonflikte zwischen Parametern identifizierbar zu machen. Abbildung 5-8 stellt ein solches Eigenschaftsnetzwerk für das Beispiel eines Wärmetauschers dar.

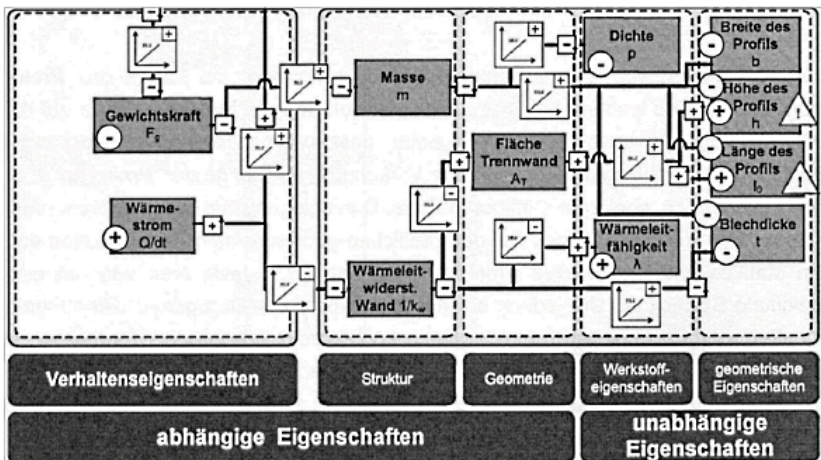


Abbildung 5-8: Eigenschaftsnetzwerk für einen Wärmetauscher [WÄL12]

[WÄL12] zeigt mit seinem Ansatz und dem verwendeten Modellgedanken klar die Vorteile einer graphischen Visualisierung von Eigenschaften und greift darüber hinaus auch die Problematik der gegenseitigen Abhängigkeiten auf. Der entwickelte Ansatz ist jedoch eher methodisch zu sehen. Die Betrachtung der Eigenschaften bleibt vereinfacht (kein Merkmalbegriff im Sinne der in den vorangegangenen Abschnitten angesprochenen Modellbegriffe oder Spezifikationen) und abstrakt. Ihre Einordnung (abhängig/unabhängig) und die dargestellten Zusammenhänge sind stark auf die Produktentwicklung und Konstruktion ausgerichtet (z. B. gibt es nur gerichtete Zusammenhänge mit fester Ursache-Wirkungs-Beziehung) und nicht auf die Betrachtung existierender Produkte oder Lösungen. Im Mittelpunkt steht klar die Erstellung der Eigenschaftsnetzwerke zur Aufbereitung und Darstellung als systemdarstellende Basis für die weiterführende Nutzung im Rahmen der Produktentwicklung. Die grundsätzlichen Möglichkeiten einer automatisierten bzw. algorithmischen Verarbeitung werden angesprochen, jedoch nicht detailliert untersucht oder gar umgesetzt.

5.5 Bewertung

Sinne Objekte oder Systeme klassifiziert, verglichen und/oder bewertet und darüber hinaus im Sinne einer automatisierten Verarbeitung datentechnisch betrachtet werden, so führt kein Weg daran vorbei die Eigenschaften dieser Entitäten zu beschreiben und rechnergestützt verarbeitbar zu machen. Wie Abschnitt 5.2 zeigt, sind dazu seit über 20 Jahren vielfältige Normungs- und Standardisierungsbestrebungen im Gange – sowohl von Forschungsseite als auch getrieben von einer praktischen Umsetzung und industriellen Verbreitung.

Ein hinsichtlich seiner Struktur, Syntax und Semantik umfassend beschriebenes Merkmal (→ 5.3.3) eignet sich sehr gut als Träger von Eigenschaftsinformationen. Merkmale bilden einen strukturierten Rahmen zur Aufnahme von Daten (z. B. Ausprägungen) und sind somit wohl-definierte Informationsträger. Die Nutzung von Merkmalen (z. B. zum Vergleich zweier Merkmalsträger) begünstigt durch ihre Formalisierbarkeit und Rechnerverarbeitbarkeit die Repräsentation und die Ableitung von Wissen (z. B. Eignung einer PZL hinsichtlich gestellter Anforderungen). Ihre Verwendung erlaubt den einfachen Austausch vieler wesentlicher Informationen [EPP11b] und schafft die Basis für automatisierte Verarbeitungsschritte [MER11]. Die Merkmalbeschreibung sollte dabei in Anlehnung an anerkannte Konzepte und Datenmodelle oder durch die Nutzung bereits definierter Elemente erfolgen. Ein besonderer Wert liegt bei existierenden Merkmalsystemen in der Definition und semantisch eindeutigen, produkt-unabhängigen Festlegung tausender Merkmale [PLS+11b] für die Eigenschaftsbeschreibung von Betriebsmitteln. Dies kann auch auf abstrakte PZL (→ 4.1.1) übertragen und angewendet werden.

Für das zu erstellende Konzept im Rahmen dieser Arbeit kann nicht die Erstellung von Merkmalmodellen oder Klassifikationssystematiken im Fokus stehen. Viel eher muss geprüft werden, inwiefern existierende Modellvorstellungen im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung und ihrer Lösung genutzt werden können und ggf. angepasst werden müssen. Als Beispiel für eine solche Anpassung kann das Skalenniveau gesehen werden. In Abschnitt 5.3.2 wird bereits darauf hingewiesen, dass die explizite Zuweisung und Nutzung des Skalenniveaus unumgänglich für die skalengerechte Behandlung der Merkmalsinformation ist. Dies ermöglicht einen Informationsmehrwert gegenüber der meist üblichen Einteilung in „qualitativ“ und „quantitativ“ [HEE05]. Da im Blickpunkt dieser Arbeit vor allem durch Merkmale beschriebene Objekte (Merkmalsträger und Merkmalträgertypen) und ihre vergleichende Bewertung stehen, muss zudem besonderer Wert auf die Beachtung unterschiedlicher Ausprägungsaussagen

(→ 5.3.3) gelegt werden, um ihre bedeutungsgerechte und konsistente Verarbeitung sicherzustellen.

Für die Beschreibung von Merkmalträgern und Merkmalträgertypen durch Merkmale haben sich ML (→ 5.4.1) etabliert. Ungeachtet ihrer inneren Strukturkonzepte sind diese als Informationsträger interessant, weil sie im Aufbau und bezüglich der verwendeten Elemente (Merkmale) stark an Spezifikationen und realen industriellen Bedürfnissen sowie Workflows orientiert sind. Sie eignen sich sowohl für die Abbildung von Klassenwissen (Typen von TR) als auch für die Beschreibung konkreter Instanzen (TR „XY“). Ihre wachsende industrielle Anwendung macht sie zudem u. a. für die definierte Formulierung von Spezifikationen interessant.

Eine besondere Herausforderung ergibt sich, wenn bei der Beschreibung von abstrakten Merkmalträgerklassen bzw. -typen (wie z. B. PZL) die zum Teil komplexen Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen untereinander berücksichtigt werden sollen. ML können solchen Abbildungsanforderungen nicht gerecht werden. Auch Merkmalmodelle und Merkmalbeschreibungen betrachten die Beziehungen zwischen Merkmalträgern und zwischen Merkmalen untereinander nicht [HAD15]. Alternative Anregungen dazu bieten Modellvorstellungen aus dem Bereich der Produktentwicklung. Beide hierzu vorgestellten Ansätze (→ 5.4.2) zeigen Darstellungsmöglichkeiten auf, die zur Abbildung und Visualisierung von Merkmalen bzw. Eigenschaften und deren Beziehungen (Abhängigkeiten) fähig sind. Die Repräsentation als Netzwerk ist intuitiv und ermöglicht semantisch benachbartes Wissen auch im entsprechenden Zusammenhang abzubilden [DRE91]. Die dort jeweils verwendeten Merkmale sind sehr vereinfacht und nicht im Einklang mit standardisierten Merkmal-Modellvorstellungen. Die Anwendung der Ansätze ist sehr spezifisch und auf das Gebiet der Produktentwicklung beschränkt. Zudem wurde eine algorithmische Verarbeitung der merkmalsbasierten Informationen in den Ansätzen nicht hinreichend behandelt. Trotz dieser Einschränkungen sollte der Repräsentationsansatz „Merkmalnetz“ zumindest als prinzipielle Modellvorstellung bei der Konzeptentwicklung im Rahmen der vorliegenden Arbeit Beachtung und Verwendung finden.

6 Auswahl und Entscheidung mit Hilfe von Wissen (im Engineering)

Ziel der Konzeptentwicklung im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Unterstützung bei der Auswahl geeigneter PZL. Der Planungsingenieur soll somit in seinem Auswahlprozess unterstützt werden, indem entweder Entscheidungen systematisch (automatisch) abgeleitet werden oder notwendiges Wissen so aufbereitet wird, dass der Auswahlprozess wesentlich einfacher gehandhabt werden kann (semiautomatisch). Entscheidungsunterstützungssysteme können zielgerichtet eingesetzt werden, um hinsichtlich Qualität und Effizienz bessere Entscheidungsgrundlagen zu erzeugen [MBG93]. Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Schaffung eines Überblicks und der notwendigen Grundlagen hinsichtlich von Ansätzen und Methoden für die auf Wissen basierende Auswahl bzw. Entscheidung. Nach einem Einblick in grundsätzliche Problemtypen wird dazu das Konzept Wissensbasierter Systeme (WBS) vorgestellt. Anschließend werden ausgewählte Formen der Wissensrepräsentation beleuchtet sowie eine Bewertung hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für die Konzepterstellung im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen.

6.1 Einordnung

Wissen befähigt zur Vorbereitung und Durchführung von Handlungen und Entscheidungen [WIE04]. Zur zielgerichteten Nutzung muss dieses Wissen akquiriert, aufbereitet und verarbeitet werden. Für die Bewältigung ingenieurwissenschaftlicher Problem- und Aufgabenstellungen handelt es sich bei diesem Wissen stets um eine Mischung aus verschiedenen Wissensarten (deklaratives, prozedurales, steuerndes Wissen), in verschiedenen Graden der Explikation (implizit – explizit), Spezialisierung (allgemein – spezifisch) und Qualität (Sicherheit, Vollständigkeit) vorliegend und mehr oder weniger gut zugänglich (bewusst – latent) an Wissensträger (individuell – kollektiv) gebunden¹².

Hinsichtlich der Wissensverarbeitung werden zwei verschiedene Aufgabentypen unterschieden: analytische und synthetische. Bei analytischen Aufgaben existiert das zu untersuchende System bereits, ist jedoch nicht vollständig bekannt – es wird hierbei versucht, charakterisierende Aussagen über das System abzuleiten. In synthetischen Aufgabenstellungen hingegen existiert das System noch nicht, sondern muss erst spezifischen Anforderungen entsprechend „konstruiert“ werden [SCH00]. Gemäß dieser grundsätzlichen Unterscheidung werden den Aufgabentypen Analyse und Synthese meist die Problemkategorien/-lösungstypen Diagnostik und Konstruktion zugeordnet [BHS07], welche wiederum untergeordnete, elementare Problemtypen bzw. Anwendungsgebiete einschließen (vgl. [SCH00], [LUG03], [HAA07], [BHS07], [HAR10[@]]):

- *Analyse*: Klassifikation, Diagnose, Interpretation, Überwachung/Steuerung, Beratung u. a.
- *Synthese*: Konfiguration, Planung u. a.

Eine solche Einteilung und Klassifizierung kann helfen, die eigene Problemstellung einzuordnen und dadurch geeignete Ansätze verwandter oder ähnlicher Problemstellungen zielgerichteter zu identifizieren. Für die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit ist die Einordnung hinsichtlich nur eines Aufgabentyps nicht zielführend. Zum einen muss ein Lösungsraum aus den Wissensbasisinhalten unter Einbeziehung der Anwenderanforderungen synthetisch aufgebaut werden. Zum anderen muss dieser Lösungsraum anschließend analytisch untersucht werden, um Aussagen für die Eignung einer PZL abzuleiten. Ergo sind sowohl synthetische als auch analytische Aufgabenanteile zu bewältigen. Adäquat verwandte Problemtypen sind hierfür die Konfiguration (Synthese), bei der eine Struktur aus Komponenten erstellt werden soll, die

¹² Mehr zu einzelnen Merkmalen und Klassifikationen von Wissen u. a. in [ASS97], [HER10].

gegebenen Bedingungen genügt [BR199], sowie die Klassifikation und Selektion (Analyse), bei denen eine Lösung aus einer Menge vorgegebener Alternativen ausgewählt wird [BHS07].

In Systemen zur Entscheidungsunterstützung kommen u. a. Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung (z. B. *AHP/ANP*¹³) sowie signalgestützte, modellgestützte oder konnektionistische Verfahren (z. B. *Neuronale Netze*) zum Einsatz. Eine besondere Nähe zum menschlichen Problemlösungsverhalten besitzt jedoch der *wissensbasierte Ansatz* [FAY99]. Er bietet sich daher hervorragend an, um an der Schnittstelle zwischen Wissensträgern (Experten) und Wissensanwendern eingesetzt zu werden. Unter anderem deshalb wurde bereits in Abschnitt 4.1.3 der wissensbasierte Ansatz als ein Eckpfeiler des Konzepts definiert. Zudem unterstützt er prinzipiell alle oben aufgeführten Problemtypen [PUP91], [LUG03]. Die folgenden Abschnitte fokussieren daher auf das Konzept der WBS und im Rahmen dessen verwendbare Wissensrepräsentationsformen.

6.2 Wissensbasierte Systeme zur Entscheidungsunterstützung und Auswahl

WBS sind ein Forschungsbereich der künstlichen Intelligenz (KI). Im Zusammenhang mit diesem fällt oft der Begriff der Expertensysteme. In der klassischen Definition von Watermann [WAT86] sind diese dabei als eine Untermenge der wissensbasierten Systeme zu sehen. [BEL09[@]] definiert Expertensysteme wie folgt: “Expert Systems [...] are computer programs that try to replicate knowledge and skills of human experts in some area, and then solve problems in this area (the way human experts would do).” [BEL09[@]]. Die klassische Trennung der beiden Begriffe verschwindet in den letzten Jahren jedoch zunehmend [LUT11], da prinzipiell in allen Anwendungsbereichen entsprechende Systeme das Wissen von Experten bzw. domänenspezifisches Fachwissen abbilden müssen [RUN11]. Im Folgenden wird daher auf die begriffliche Differenzierung verzichtet und ausschließlich die Bezeichnung WBS verwendet.

WBS weisen bereits eine lange Entwicklungshistorie auf. Auf eine Anfangszeit großer Euphorie folgte eine nicht minder große Enttäuschung über die nicht erreichbaren, zu hoch gesteckten Ziele, menschliche Experten vollständig zu ersetzen [PUP91], [BSW+09]. Seit dem konzentrierte sich die Entwicklung wissensbasierter Systeme jeweils auf spezifische, begrenzte Anwendungsfälle und -bereiche [KUR92], [BHS07] mit deutlich höherem Erfolg. Seit ca. 15 Jahren ist darüber hinaus der Trend vom klassischen „stand-alone“-WBS zur eingebetteten Applikation oder sogenannten „Add In“ zu beobachten. Somit erobern die WBS trotz scheinbar schwindender expliziter Präsenz viele Anwendungsbereiche, indem sie bereits vorhandene Lösungen sinnvoll unterstützen [RFS+11].

Das Konzept WBS umfasst eine Gruppe von obligatorischen Komponenten, die erst in ihrem Zusammenwirken die Charakteristik und Fähigkeiten dieser Systeme umfänglich darstellen. Abbildung 6-1 zeigt eine schematische Darstellung dieser Komponenten. Meist wird bei der Interaktion mit WBS zwischen den Rollen Anwender und Experte (für Pflege und Wartung des Systems) differenziert, da beide mitunter sehr unterschiedliche Fähigkeiten und Ziele bezüglich des Systems besitzen [KUR92], [LUT11].

Die *Wissensbasis* enthält das bereichsbezogene, formalisierte Expertenwissen. Die Art der Wissensrepräsentation hat dabei eine große Bedeutung [VAM98], da ihre Eignung hinsichtlich der zu lösenden Problemstellung entscheidend für die Nutzbarkeit und den Erfolg des WBS ist. Abschnitt 6.3 beschreibt mögliche Repräsentationsarten sowie deren Charakteristika und Einsatz-

¹³ AHP: Analytic Hierarchy Process, ANP: Analytic Network Process; mehr dazu z. B. bei [PEZE08].

gebiete. Im Allgemeinen wird zur Wissensbasis auch die sogenannte Faktenbasis gezählt. Diese enthält fall- bzw. problemspezifisches Wissen¹⁴ des Anwenders, welches über entsprechende Schnittstellen von diesem zugeführt wird. Die *Inferenzkomponente* verarbeitet und interpretiert das Wissen der Wissensbasis mit dem Ziel der Ableitung von Wissen zur Lösung des gegebenen Problems. Sie enthält meist Algorithmen und Heuristiken zur Suche in und Schlussfolgerung aus dem abgebildeten Wissen. Die Inferenzkomponente ist bei WBS bewusst von der eigentlichen Wissensrepräsentation getrennt. Über die in Abschnitt 4.1.3 aufgeführten Effekte hinaus berichten u. a. [LUG03] und [RFS+11] ausführlich von den Vorteilen dieses charakteristischsten Grundprinzips der WBS. Die *Wissenserwerbskomponente* realisiert und unterstützt Aufbau, Erweiterung und Pflege der Wissensbasis. Ggf. werden dazu Mechanismen zur Prüfung des Wissens auf Korrektheit und Konsistenz angeboten [ASS97]. Die *Dialogkomponente* dient hingegen der Interaktion mit den menschlichen Nutzern. In heutigen Anwendungen ist diese Komponente zumeist über eine graphische Anwenderoberfläche realisiert. Die *Erklärungskomponente* soll die Transparenz der Lösungsfindung ermöglichen [ASS97]. Die geeignete Erklärung des „Warum?“ bildet die Grundlage für die Akzeptanz des ganzen Systems.

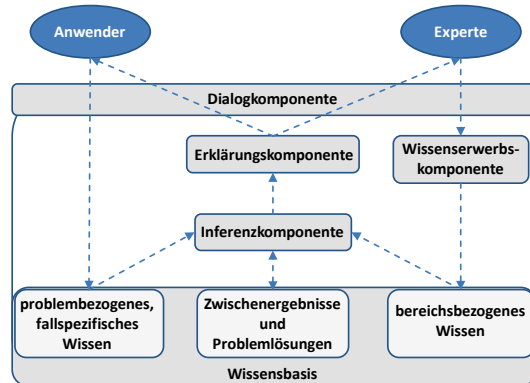


Abbildung 6-1: Allgemeine Architektur wissensbasierter Systeme (nach [PUP91])

Als Vorteile und Nutzeffekte von WBS gelten u. a.:

- neutrale Urteilsfähigkeit und Normierung des Wissensbereichs [SON95], [VDI 2889], [HAA07],
- Rationalisierung von wissensintensiven Prozessen/Arbeitsschritten [MBG93], [SON95], [SCH00],
- Beherrschung von Komplexität [MBG93], [LUN10], [RFS+11],
- Sicherheit und Vollständigkeit innerhalb ihres Einsatzbereichs [MBG93] und in diesem Zuge die Qualitätssicherung von Arbeitsschritten [SON95],
- Wissenssicherung [MBG93], [RFS+11] und Wissensmultiplikation [MBG93], [TRI11] durch personen- und randbedingungenunabhängige Bereitstellung von Wissen [VDI 2889], [HAA07].

Aufgrund dieser Potentiale zur Unterstützung in Aufgabenstellungen verschiedenster Problemtypen (→ 6.1) sind WBS und ihre Anwendungen mittlerweile erfolgreich in viele unterschiedliche Fachbereiche wie u.a. Medizin, Mathematik, Wirtschaftswissenschaften, Chemie, Geologie,

¹⁴ Bei der Auswahl von PZL würde eine solche Faktenbasis u. a. aus den spezifischen Anforderungsdaten des Anwenders bzw. Prozesses bestehen.

Recht, Informatik [LUG03] und vor allem auch in die Ingenieurwissenschaften vorgedrungen. Umfassende, allgemeine Übersichten über Anwendungsbeispiele für WBS im Bereich des Engineerings finden sich u. a. in [LIE98] und [SCH08E]. Fokussiert auf die Engineeringunterstützung im verfahrenstechnischen Anlagenbau seien an dieser Stelle beispielhaft die Ansätze zur wissensbasierten Automatisierung leittechnischer Funktionen und HAZOP-Analyse [SCH08E], Planung der Instrumentierung von Chemieanlagen [SON95], Selektion von Reaktoren [JJI00] und Erstellung von Fließbildern [UZSC12] aufgeführt. Für das Engineering der Automatisierungstechnik gibt [RUN11] einen Überblick über weitere Anwendungsbeispiele von WBS. Speziell für die Unterstützung bei der Selektion von TR wie z. B. Sensoren und Aktoren sind insgesamt verhältnismäßig wenige Systeme in der Forschung und noch weniger in der Praxis zu finden, wie Abschnitt 3.2.4 zeigt.

6.3 Abbildung und Repräsentation von Wissen

6.3.1 Überblick und Systematik

Bei der Erstellung von WBS konzentriert sich ein großer Teil der Anstrengungen darauf, Wissen für die rechnergeeignete Nutzung so abzulegen, dass es leicht wieder auffindbar ist und effizient Schlüsse daraus gezogen werden können. Die dazu notwendige Wissensrepräsentation kann als die äußere Form der Darstellung des entsprechenden Wissens verstanden werden. Um aus der Repräsentation das benötigte Wissen zu extrahieren, bedarf es zwangsläufig einer Interpretationsvorschrift [MEY02]. Wissensrepräsentation ist damit eine Menge syntaktischer und semantischer Konventionen zur Beschreibung von Dingen oder Sachverhalten [SPU97]. Die nach diesen Konventionen gebildete Repräsentationsstruktur beschreibt einen (meist problembezogenen) Ausschnitt einer zu repräsentierenden Welt. Dabei stellt die dem Repräsentationsvorgang innewohnende, gezielte Abstraktion ein unabdingbares Werkzeug für den Umgang mit der Komplexität realer Sachverhalte dar [LUG03]. Es gibt sowohl keine einheitliche Theorie der Wissensrepräsentationen [BAFE81], [GFF90] als auch kein allgemeingültiges, abstraktes „Über-Beschreibungsmittel“ [FAY99] bzw. keine einzige, für alle Problemarten angemessene Wissensrepräsentation [KUR92]. Es haben sich jedoch, aus verschiedenen Sichtweisen und Problemstellungen heraus motiviert, vielfältige Beschreibungsmittel und Repräsentationsformen entwickelt.

Neben qualitativen Kriterien wie: Ausdrucksstärke [LUG03], Ökonomie und Freiheit von Redundanz [BHS07] sowie Effizienz [LUG03], [BAPA04], Uniformität [LUN10], Modularität [GFF90], [LUN10] Flexibilität [GFF90] und Erweiterbarkeit [BHS07], natürliche Darstellung [LUG03] und Erhaltung von Strukturen [LUN10], Transparenz [BHS07], Verständlichkeit [GFF90] und Erlernbarkeit [SCH99], Konsistenz [BAPA04], [LUN10] und Vollständigkeit [LUN10], müssen vor allem die grundsätzlichen Anforderungen: Ausdrucksfähigkeit [LUN10] und Verarbeitbarkeit [GFF90] von der Wissensrepräsentation erfüllt werden. Das heißt, dass die wichtigsten Merkmale einer Problemdomäne adäquat beschrieben und die Inhalte wiederum einem Problemlösungsverfahren zugänglich gemacht werden können [LUG03]. Letztlich gilt es aber auch das Umfeld der Systementwicklung zu berücksichtigen [SCH99], wobei sowohl die technische Kompatibilität und Integrationsfähigkeit der Wissensrepräsentation [BAPA04] als auch die Beachtung der problem-spezifischen Praxisrelevanz [ASS97] sichergestellt werden müssen.

So vielfältig die Betrachtungen von Wissensarten und Problemklassen sind, so heterogen sind die Ansichten zur Systematisierung von Repräsentationsformen und Beschreibungsmitteln von Wissen. Es gibt keinen Konsens über die Klassifikation der Wissensrepräsentationen [BAPA04].

Verschiedene Sichtweisen und Kategorisierungen finden sich z. B. in [SCH99], [KEL00], [PUL02], [RUD06], [SCH08A], [BEKE08] und [LÄCL12]. Da ein vollständiger Überblick bzw. eine Kategorisierung im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend ist, wird an dieser Stelle auf die Darstellung einer Systematik der Wissensrepräsentationsformen verzichtet. Die detailliertere Betrachtung einzelner Vertreter in den nachfolgenden Abschnitten ist unabhängig von einer solchen Einordnung und bezieht sich auf eine Auswahl von Wissensrepräsentationen, die sowohl allgemein große Verbreitung und Akzeptanz erlangt haben als auch mit einer gewissen Relevanz für die Konzepterstellung und -umsetzung dieser Arbeit betrachtet werden. Die bereits erwähnte charakteristische Trennung von Wissen und seiner Verarbeitung und damit die völlige Unabhängigkeit der Inferenz vom zu lösenden Problem sind praktisch nicht vollständig realisierbar. Die Art der Wissensrepräsentation beeinflusst immer auch die Art der Wissensverarbeitung [FAY99]. Diese Erkenntnis wird auch als „interaction problem“ bezeichnet [GUA97]. Aus diesem Grund werden im Folgenden ggf. auch Aspekte der Wissensverarbeitung für spezifische Repräsentationen angeführt.

6.3.2 Logik

Die *Logik* ist eine der grundsätzlichsten und ältesten Wissensrepräsentationsformen. Motiviert durch die logische Beweisführung bzw. Wiederlegung von Hypothesen, ist ihr Ziel die Darstellung von Wissen durch Formeln eines geeigneten Kalküls (Satz aus Formeln oder Regeln) und die Herleitung neuen Wissens auf der Grundlage geeigneter Inferenzregeln [BHS07]. Aussagen („Axiome“) aus der realen Welt werden aussagenlogischen Variablen zugeordnet („Interpretation“) [LÄCL01] und diese wiederum zu aussagenlogischen Formeln verknüpft.

Die sogenannte *Aussagenlogik* bietet dafür Basis-Operatoren, wie Negation und Implikation und Verknüpfungs-Operatoren (Junktoren) wie z. B. *UND* und *ODER* (Abbildung 6-2). Damit können Ausdrücke wie beispielsweise: " $\neg((A \cup \neg B) \cap (\neg A \cup \neg B \cap \neg C))$ " (entnommen aus [BHS07]) formuliert werden. Als die beiden wichtigsten Inferenzgrundlagen sind der *Modus Ponens* und der *Modus Tollens* anzusehen [LÄCL01] (\rightarrow Abbildung 6-2).

Operatoren und Quantoren		Inferenzgrundlagen	
Bezeichnung:	Symbol:	Modus Ponens:	Modus Tollens:
Implikation	\rightarrow	$A \rightarrow B$	$A \rightarrow B$
Negation	\neg	A	$\neg B$
Äquivalenz	\leftrightarrow	-----	-----
UND	\wedge	B	$\neg A$
ODER	\vee		
...			
All-Quantor	\forall		
Existenz-Quantor	\exists		

Abbildung 6-2: Operatoren, Quantoren und Inferenzgrundlagen der Logik

Die *Prädikatenlogik* beschreibt Individuen als Variablen oder Konstanten und erweitert die Ausdrucksmächtigkeit der Aussagenlogik hauptsächlich um Quantoren (All-Quantor, Existenz-Quantor) (\rightarrow Abbildung 6-2) und das syntaktische Element des Prädikats zur Modellierung von Beziehungen zwischen betroffenen Argumenten („Individuen“). Damit werden quantifizierende Formulierungen wie: " $(x_1 = a) \cup \forall x_2 \exists x_3 (x_1 = f(x_2, x_3)) \rightarrow (x_1 = x_2 \cup x_2 = a)$ " (entnommen aus [KEL00]) möglich. Die Prädikatenlogik ist ausdrucksstärker als die Aussagenlogik [LÄCL01], aber nicht mehr in allen Fällen eindeutig entscheidbar [BEKE08], [ERT09].

Die *Beschreibungslogik* (Description Logic) ist eine Weiterentwicklung der Prädikatenlogik – auch zur Abbildung netzwerkbasierter Strukturen [BAA07] – und gleichzeitig Teilmenge dieser [DIT07]. Eine typische Wissensbasis auf der Basis von Beschreibungslogik besteht aus den zwei Komponenten *TBox* (terminological box) und *ABox* (assertional box). Die *TBox* enthält allgemeingültiges Wissen über eine Problemdomäne und beschreibt die Eigenschaften derer grundsätzlicher Konzepte. Die *ABox* beinhaltet spezifisches Wissen über Individuen des konkreten Problemereichs. Das allgemeingültige Wissen ist dabei wesentlich konstanter, während das Wissen der *ABox* eher von der spezifischen Situation abhängt und meist einer kontinuierlichen Veränderung unterliegt [SCH08A]. Verschiedene Speziallogiken widmen sich mittlerweile jeweils individuellen Problemstellungen und reagieren auf spezielle Anforderungen an die Ausdrucksmächtigkeit. Beispiele sind u. a.: *Fuzzy Logik* [SAZA87], *Modallogik* [HUCR96], *Mehrwertige Logik* [GOT89], *Temporallogik* [FRE91].

6.3.3 Semantische Netze und Ontologien

Obwohl bereits wesentlich länger ähnliche Gedankenmodelle in der Psychologie, Linguistik und Philosophie genutzt wurden (z. B. bei [HAR65]), basieren die Grundlagen *Semantischer Netze* (SN) aus der Perspektive der KI und deren Wissensrepräsentationsformen hauptsächlich auf den Arbeiten von Quillian (vgl. [QUI68], [QUI67]). Dieser entwickelte die graphbasierte Repräsentation angelehnt an die Strukturen des menschlichen Gedächtnisses im Rahmen der Sprachforschung, um die semantische Verwandtschaft von unterschiedlichen Begriffen durch verschiedene Relationen zu repräsentieren.

SN sind gerichtete Graphen, bei denen eine Menge von *Konzepten (Knoten)* über *Relationen (Kanten)* in Verbindung gesetzt werden [SCH08A] und damit Inhalte eines Wissensbereichs strukturiert und repräsentiert werden können (Abbildung 6-3 zeigt ein solches Netz beispielhaft). Konzepte stellen dabei Objekte der realen Welt, Abstraktionen, Eigenschaften, Ereignisse und Zustände dar, während Relationen als Assoziationen oder Beziehungen zwischen diesen verstanden werden [GFF90].

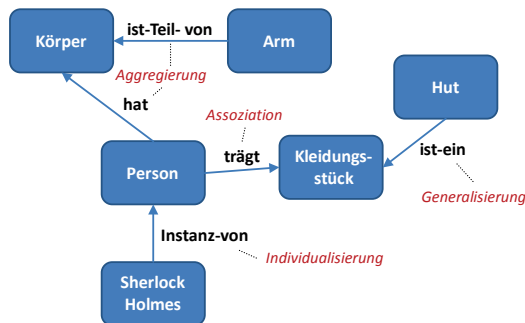


Abbildung 6-3: Beispiel eines Semantischen Netzes (in Anlehnung an [KEI00])

Grundsätzlich ist die Verwendung vieler verschiedener Relationstypen möglich. Die bedeutendsten sind die sogenannten epistemologischen Primitive. Mit diesen können Beziehungen wie Generalisierung (is-a; a-kind-of), Individualisierung (instance-of; member-of) und Aggregation (part-of, has-a-part) und damit letztlich auch Vererbungsbeziehungen ausgedrückt werden.

Nach und nach haben sich viele verschiedene Typen von SN entwickelt (z. B. Definitional-, Assertion-, Implicational Networks). Anzahl und Art erlaubter Kanten und Beziehungstypen können dabei jeweils stark variieren [CON10]. Haupteinsatzgebiete sind die Abbildung lexikalischen Wissens¹⁵ (ein Beispiel aus der Automatisierungstechnik bietet hierzu [DMS09]), Topic Maps [SCH08A] und die Verarbeitung natürlicher Sprache [GFF90], [PUL02]. SN eignen sich dabei vor allem für Wissensgebiete mit bereits existierenden Klassifikationsschemata und begrifflichen Zuordnungen mit klaren hierarchischen Strukturen [LUT11]. Konkrete Anwendungsbeispiele führt u. a. [REI10] auf.

Obwohl der Begriff der *Ontologie* als „Lehre vom Seienden“ [GST14] seine Wurzeln bereits in der theoretischen Philosophie der Antike hat, können Ontologien aus technischer Sicht als Weiterentwicklung der SN [DIT07] beziehungsweise als Verknüpfung der Konzepte von SN und Frames [LÄCL01] gesehen werden. Im Bereich der KI hat sich die Definition einer Ontologie als „[...] formal explicit specification of a shared conceptualisation [...]“ von [GRU93] verbreitet. Damit beschreibt eine Ontologie eine möglichst maschineninterpretierbare Repräsentation („formal... specification“) mittels definierter („explicit“) Beschreibung von Konzepten („conceptualisation“) und bildet damit Elemente eines Wissensbereichs im Rahmen eines anerkannten, gemeinsamen Verständnisses („shared“) ab. Inbegriffen ist dabei, analog zu den SN, auch die Abbildung von Beziehungen zwischen den enthaltenen Konzepten. Ontologien sind an sich selbst nicht formalisiert. Meist werden deshalb Logik bzw. Logik-Derivate zur Formalisierung genutzt [STU11]. Verschiedene Sprachen für die Modellierung und Formalisierung von Ontologien wurden spezifiziert – z. B. die auf *RDF* (Ressource Description Framework) basierende Sprache *OWL* (Web Ontology Language) [GAA10], [CON10], [RUN11]. Nähere Informationen zu diesen Spezifikationen finden sich unter anderem in [LAC05], [HIT08], [MPP12@]. Die wichtigsten Anwendungen der Ontologien haben sich im Bereich der natürlichen Sprachverarbeitung, im Wissensmanagement oder im Bereich des *Semantic Web* entwickelt [SCH08A]. Weitere Übersichten und konkrete Beispiele für Anwendungen dieser Repräsentationsform finden sich u. a. in [FER04], [SGG10B], [RUN11].

6.3.4 Frames und der objektorientierte Ansatz

Das von [MIN75] eingeführte Konzept der *Frames* beruht auf der Erfahrung, dass Wissen oft situationsabhängig gespeichert und abgerufen wird und die Wissensverarbeitung wesentlich von unseren Erwartungen abhängt. Der thematische Kontext bildet somit einen Rahmen für das entsprechend benötigte Wissen (z. B. Begriffe und ihre Werteausprägungen). Frames verstehen sich als Repräsentationsformate für stereotype Situationen und Objekte [CBR91], also Situationen und Objekte mit gleich bleibendem oder häufig vorkommendem Muster [CON10]. Die Datenstruktur des Frames sammelt zu einem Begriff eine Menge von Fakten, wobei die Fakten als Eigenschaften des Begriffes bezeichnet und ihre Werte in sogenannten „Slots“ gespeichert werden [KEL00]. Frames können in hierarchischer Beziehung zu anderen Frames stehen [CBR91] und dadurch das Prinzip der Vererbung nutzen. Abstraktere Frames (Typ, Klasse) stellen somit einen Prototyp für mögliche Individuen ihrer Art dar. Tritt ein solches spezifisches Individuum (Situation, Objekt) auf, wird es durch einen individuellen Frame (Instanz des Prototyps) beschrieben [GFF90]. Abbildung 6-4 stellt die relevanten Begriffe und Beziehungen der Frames anhand eines Beispiels dar.

¹⁵ Vgl. Thesauri, Glossare, Taxonomien.

Die Framedarstellung kann auch auf Teile von SN angewendet werden. Der Frame bietet dann eine strukturierte Repräsentation eines Netzknotens [CBR91], [CON10]. Frames erweitern die Möglichkeiten von SN grundsätzlich durch die Fähigkeit komplexe Objekte kompakt und nicht als große Netzwerkstruktur darstellen zu können, und um die Fähigkeit passive Prozeduren als Eigenschaften in die Objekte einzufügen [LUG03]. Im Gegensatz zu SN sind jedoch keine frei definierbaren Objektrelationen möglich [CBR91].

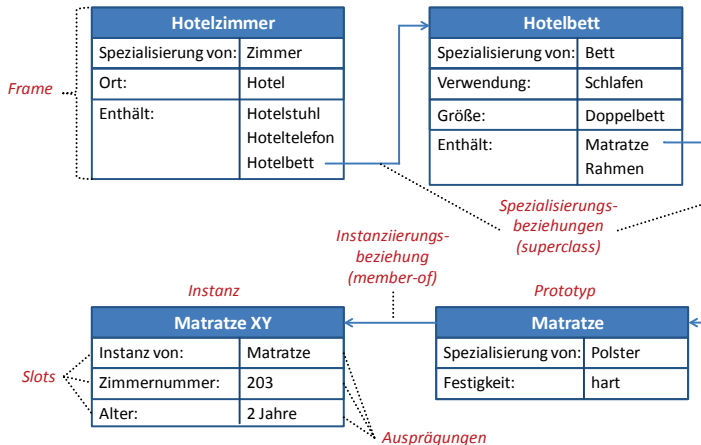


Abbildung 6-4: Partielle Frame-Beschreibung eines Hotelzimmers (in Anlehnung an [LUG03])

Die Ideen und Konzepte aus dem Bereich der Frames haben stark die Entwicklung des *objektorientierten Paradigmas* (OO) und dessen Programmiersprachen beeinflusst [LACL01], [LUG03]. Es bestehen daher große Parallelitäten zur objektorientierten Modellierung [SPSP08], die heute durchaus als legitimer Nachfolger und die konsequente Weiterentwicklung des Frame-Konzepts verstanden werden kann. Der objektorientierte Ansatz beschreibt die Welt in Form von Objekten¹⁶ mit Zustand¹⁷ (Attribute und Werte) und Verhalten¹⁸ (Methoden) [MEY02]. Objekte vereinigen und kapseln Daten und Funktionen, erweitern den Frame-Ansatz jedoch dahingehend, dass sie ihre Prozeduren (Methoden) nicht nur passiv sondern auch aktiv zur Ausführung bringen können [KEL00]. Als wichtigste Prinzipien gelten Vererbung, Kapselung und Abstraktion, Hierarchie und Modularisierung [SCH94]. Das objektorientierte Paradigma hat sich mittlerweile in fast selbstverständlicher Art und Weise in verschiedensten Programmiersprachen und Modellierungskonzepten etabliert – weitergehende Informationen zu diesem umfassenden Thema finden sich z. B. in [OES04] und [BAL11].

6.3.5 Regelbasierte Methoden

Regeln sind eine sehr natürliche Beschreibung für menschliches Verhalten und menschliches Schlussfolgern. Sie helfen, komplexe Prozesse in Gesellschaft, Recht, Bildung, Verkehr und Wissenschaft zu organisieren [SCFA07]. Konditionalsätze wurden schon in vorchristlichen Zeiten benutzt, um Handlungsanweisungen oder Vorhersagen zu formulieren [BEKE08]. Insbesondere in Technik und Wissenschaft kann Wissen sehr gut in Form von Regeln ausgedrückt werden

¹⁶ Als abstrakte Prototypen („Klasse“) oder Instanzen („Objekt“) – vgl. „Frame“ bei Frames

¹⁷ Vgl. „Slots“ bei Frames

¹⁸ Vgl. „Prozeduren/Dämonen“ bei Frames

[PUL02] – u. a. deshalb waren die Expertensysteme der ersten Generation (1970er Jahre) ausschließlich regelbasiert [ASS97]. Regeln sind formalisierte Konditionalsätze [BEKE08] der Form: „Wenn (Bedingung), dann (Folgerung)“. Mit der Bedeutung: Wenn die *Bedingung* (Prämisse, Antezedenz) erfüllt ist, dann schließe, dass auch die *Folgerung* (Konklusion, Konsequenz) wahr ist – die Regel kann dann angewendet werden [BEKE08]. Dabei ist es möglich, dass mehrere Bedingungsaussagen über logische Junktoren (\rightarrow 6.3.2) verknüpft werden. Es kann durchaus auch mehrere Folgerungen in einer Regel geben, wobei die Disjunktion zwischen diesen meist vermieden [BEKE08] und die Regel in solchen Fällen logisch adäquat in mehrere Einzelregeln geteilt wird. Folgerungen in Regeln können auch Reaktionen bzw. Handlungen darstellen. In diesen Fällen spricht man dann von sogenannten *Produktionsregeln* (production rules) [BEKE08] oder auch von *Geschäftsregeln* (business rules).

Nutzen WBS Regeln als Wissensrepräsentation, so sind diese innerhalb einer Regelbasis abgelegt. Die Regeln bilden dort implizit Regelnetzwerke, welche graphisch anschaulich wie in Abbildung 6-5 dargestellt werden können. Die Nutzung der formulierten Regeln erfolgt in Verbindung mit einer Faktenbasis. In diesem Arbeitsspeicher werden sowohl die zu Anfang vorliegenden als auch neu hinzugewonnene Informationen (durch Schlussfolgerungen oder durch weitere Informationsakquise) verwaltet. Alle Algorithmen arbeiten dabei zyklisch auf den generischen Schritten *match* (Suche nach auf den Problemzustand anwendbaren Regeln), *select* (Auswahl der zufeuernden Regel) und *act* (feuern der Regel und Schlussfolgerung) [ASS97].

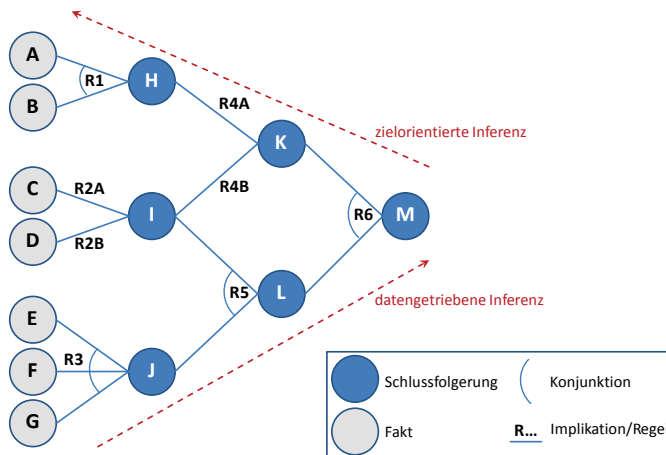


Abbildung 6-5: Regelnetzwerk und Schlussfolgerungskonzepte (in Anlehnung an [ASS97] und [BEKE08])

Regeln lehnen sich an logische Grundkonzepte an [KUR92]. Ihre Inferenz basiert ebenfalls u. a. auf den in Abschnitt 6.3.2 bereits erwähnten Verfahren *Modus Ponens* und *Modus Tollens* [BEKE08]. Bei der Verarbeitung von regelbasiertem Wissen unterscheidet man zwei grundsätzliche Schlussfolgerungskonzepte. Die *datengetriebene Inferenz* (Vorwärtsverkettung) beginnt beim fallspezifischen Faktenwissen und arbeitet sich über transitive Regelverknüpfung durch den Lösungsraum. Abgeleitete Fakten gehen erneut als Faktenwissen in den Inferenzprozess ein – solange, bis keine neuen Fakten mehr abgeleitet werden können [BEKE08]. Bei der *zielorientierten Inferenz* (Rückwärtsverkettung) wird ausgehend vom Zielobjekt (z. B. eine Hypothese) rückwärts durch die Regelbasis gearbeitet. Dabei wird geprüft, ob das jeweilige

Zielobjekt in der Konklusion vorliegender Regeln enthalten ist. Wenn ja, dann stellen die Prämissen dieser Regeln neue Zielobjekte dar. Die Eignung des jeweiligen Inferenzverfahrens hängt dabei vom spezifischen Problem und von der vorliegenden Regelbasis selbst ab [KEL00]. Als eine der Hauptherausforderungen bei der Verarbeitung von Regelwissen werden meist Konflikte genannt, die entstehen, wenn mehr als eine Regel gleichzeitig angewendet werden kann. Zu diesem Zweck wurden verschiedenste domänenabhängige und -unabhängige Heuristiken entwickelt (vgl. z. B. [BAMA92], [BHS07]).

6.3.6 Constraints

In vielen technischen oder organisatorischen Problemstellungen treten Rand- oder Nebenbedingungen auf, die beachtet bzw. erfüllt werden müssen. Als mögliche Repräsentationsform dieser Einschränkungen haben sich *Constraints* etabliert. Diese definieren Beschränkungen und Beziehungen zwischen Objekten bzw. den Eigenschaften (z. B. Attributen) dieser Objekte [RUD06], ohne dass eine konkrete Problemlösung vorgegeben wird [KEL00], [SCH08A]. Formal kann ein Constraint als k-stellige Relation $P(x_1, \dots, x_k)$, aber auch als mathematischer Term der Form¹⁹ $f(x_1, \dots, x_k) = y$ gesehen werden. Legt man mehrere Constraints über die Objekte einer Wissensdomäne, bildet sich ein sogenanntes *Constraint-Netz* [PUL02], welches in Form eines Constraint-Graphen dargestellt werden kann [BHS07] (\rightarrow Abbildung 6-6).

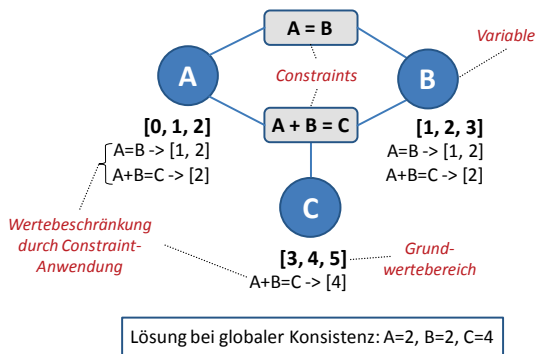


Abbildung 6-6: Constraint-Netz und Wertebschränkung durch Propagierung (nach [PUL02])

Constraints (C_1, \dots, C_n) in einem solchen Netz werden über Variablen (x_1, \dots, x_m) verbunden, wobei jede dieser Variablen einen Wertebereich (D_i , $i = 1 \dots m$) besitzt. Ein k-stelliger Constraint besteht aus einer Untermenge der Netzvariablen x_1, \dots, x_k und einer entscheidbaren Relation (R) zwischen diesen, wobei R eine Teilmenge von $D_1 \times \dots \times D_k$ darstellt (d. h. mögliche Variablenausprägungen beschreibt). Ein unärer Constraint besitzt die Stelligkeit $k=1$, während ein binärer Constraint die Stelligkeit $k=2$ besitzt (der obere Constraint in Abbildung 6-6 ist beispielsweise 2-stellig, während der untere 3-stellig ist).

Sucht man nach einer, mehreren oder allen Lösungen eines solchen Constraint-Netzes, so spricht man von einem *constraint-Satisfaction-Problem* (CSP). Eine Lösung ist dabei ein Tupel $(d_1, \dots, d_m) \in D_1 \times \dots \times D_m$, das C_1, \dots, C_n erfüllt [GRS10], d. h. eine Wertebelegung der beteiligten Variablen, die allen formulierten Relationen und Einschränkungen gerecht wird. Existiert keine solche Lösung, spricht man von inkonsistenten²⁰ oder überbestimmten Netzen [KEL00], [GRS10].

¹⁹ Typisch für Inhalte von Constraints sind Gleichungen, aber auch Ungleichungen (z. B. $A + B < 3$) [PUL02], [LUT11].

²⁰ Inkonsistenz bezieht sich hier auf die spezifische Wertebelegung der Variablen, nicht auf die Struktur der Repräsentation selbst.

Die Grundidee zur Lösung solcher Probleme ist, ausgehend von einer Variablen-Anfangsbelegung, sukzessive Constraints zu aktivieren und durch ihre Auswertung die Wertebereiche verbundener Variablen einzuschränken (→ Abbildung 6-6). Dieses Verfahren heißt *Constraintpropagierung*. Dabei wird versucht, lokale Lösungen (lokale Konsistenz) zu einer globalen Lösung zu kombinieren (globale Konsistenz) [BHS07]. Bei den einzelnen, speziellen Propagationsverfahren können verschiedene Grade (k) lokaler Konsistenz im Netz erreicht werden [GRS10]. Hierbei wird u. a. zwischen Knotenkonsistenz ($k=1$), Kantenkonsistenz ($k=2$), Pfadkonsistenz ($k=3$) und höheren Konsistenzgraden ($k>3$) unterschieden. Einen Überblick über mögliche Verfahren zur Lösung von CSP geben u. a. [HoWo07], [TAC09].

Mit Hilfe von Constraints können bestimmte Variantenkombinationen explizit ausgeschlossen werden [RUD06], deshalb eignen sie sich grundsätzlich gut für die Überwachung der Konsistenz von Konfigurationen im Bereich der Produktkonfiguration (z. B. [KOH05]), PLM-Systemen [RUD06], aber auch im CAD-Umfeld [LUT11]. Weitere Hauptaufgabenbereiche für Constraints sind die Ressourcenzuteilung (z. B. Produktionsplanung) [FRAB97] und das Scheduling (z. B. Erstellung von Stundenplänen) [HKB+94], [BHS07].

6.4 Bewertung der Repräsentationsansätze

Wie anhand der vorgestellten Repräsentationen zu erkennen ist, haben sich verschiedenste Formen für die Darstellung von Wissen entwickelt. Eine spezifische Repräsentation muss problemadäquat sein, d. h. gut geeignet, um das jeweilige Problem zu lösen – dabei kann eine geschickte Wahl der Repräsentation entscheidend zur Problemlösung beitragen [BHS07]. Die Wissensrepräsentationen leiden „[...] heute noch an einem sehr abstrakten Gedankengut, das mit einer Vielzahl für den Praktiker unverständlichen Begriffen einhergeht [...]“ [ASS97]. Praktische Probleme und ihre Komplexität können allein durch die Transformation der Problembeschreibungs- und -lösungsmethoden einfacher Beispiele oft nicht behandelt werden [ASS97]. Es gilt daher die Praxisrelevanz und Einsetzbarkeit der Wissensrepräsentation hinsichtlich des komplexen Umfangs des zu lösenden Problemfalles umfänglich zu beachten. Im Folgenden werden die Möglichkeiten zur Wissensrepräsentation vor allem hinsichtlich der Problemstellung dieser Arbeit bewertet. Weiterhin erfolgt eine synoptische Darstellung vor- und nachteilhafter Aspekte der Repräsentationen in Verbindung mit den in Abschnitt 4.3 formulierten Anforderungen. Abschließend werden Konsequenzen für die Konzeptentwicklung im Rahmen der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

Logik

Die Konzepte und Theorien der *Logik* sind über Jahrhunderte hinweg gereift, zudem haben sich anerkannte, formale Definitionen von Syntax und Semantik entwickelt [KEL00]. Die Logik ist eine sehr ausdrucksstarke Form der Wissensrepräsentation [LAC101], jedoch als Kunstsprache nicht unbedingt leicht verständlich und interpretierbar. Die praktische An- und Verwendung von Logik als Wissensrepräsentation ist mühsam, fehleranfällig [SpSp08] und spricht gerade im Hinblick auf den hohen Formalisierungsgrad und den Einarbeitungsaufwand gegen eine intuitive An- und Verwendung durch Nicht-KI-Experten der Automatisierungstechnik. Die Möglichkeit einer effizienten, performanten Verarbeitung ist durch die Ausdrucksmächtigkeit der Prädikatenlogik (ab einem gewissen Repräsentationsumfang) nicht gegeben [GRS10]. Die Konzentration auf formal beweisbare Verfahren macht die Beeinflussung [LAC12] und Nachvollziehbarkeit der Wissensverarbeitung schwierig. Die klassische Logik konzentriert sich auf die „[...] Verwendung von Wissen in einer unerbittlichen, beweisbar richtigen Weise [...]“ [KEL00]. Ihr Hauptziel ist daher der Beweis bzw. die Widerlegung von Aussagen. Eine differenzierte, quantitative Aussage

zu Lösungsräumen (z. B. mögliche Einsatzbereiche von PZL) ist hiermit nicht bzw. nur sehr umständlich möglich. Die Logik als grundsätzlichstes der Beschreibungsmittel sollte trotzdem nicht unerwähnt bleiben, denn das zugrunde liegende Paradigma spielt implizit bei vielen der anderen Repräsentationsformen eine Rolle oder findet indirekte Anwendung²¹ [KUR92], [MER11]. Für das zu entwickelnde Konzept wird sie jedoch u. a. aufgrund der genannten Punkte keine eigenständige Rolle einnehmen. Der Grundgedanke der Komponenten *ABox* und *TBox* und die damit verbundene Trennung der Wissensinhalte erscheint jedoch für die Verwendung im Konzept dieser Arbeit als sinnvoll und sollte daher weiter betrachtet werden

Semantische Netze und Ontologien

Durch die Abbildung von assoziativen Strukturen sind *SN* dem menschlichen Gedächtnis sehr ähnlich [CON10]. Die Repräsentation von Wissen ist durch die graphische Visualisierung der enthaltenen Entitäten prinzipiell sehr intuitiv und verständlich [PUL02], [SPSP08], [STU11]. Die Abbildung in Netzform fördert die Darstellung und schnelle Erfassung von Zusammenhängen [CON10]. Wissensgebiete können somit gut strukturiert werden. *SN* sind flexibel [CON10], da die Erweiterbarkeit um neue Wissensinhalte problemlos gegeben ist [SPSP08]. Als Nachteile werden oft ihre unklare Semantik [REI91A] und ihre begrenzte Ausdrucksmächtigkeit, z. B. durch das Fehlen von Formulierungsmöglichkeiten für Existenzaussagen, Oder-Aussagen [LÄCL01] oder Negationen [KEL00], genannt. Bei der Beschreibung von regelhaften Zusammenhängen, einschränkenden Bedingungen und unvollständigem Wissen ist die Repräsentation mittels *SN* sehr umständlich [REI91A]. Die Wissensverarbeitung ist auf zweiwertige Relationen beschränkt [LÄCL01], wobei es aufgrund der offenen Semantik keine spezifizierten Verarbeitungsmechanismen gibt. Vor allem deswegen gelten *SN* als schwer implementierbar [PUL02].

Als höchste Stufe semantischer Netze [HAA07], [REI10] erweitern *Ontologien* diese um wesentlich komplexere Relationen und Regeln [DIT07]. Prinzipiell besitzen sie die oben genannten Vorteile von *SN*, wobei der Fokus nicht so stark auf der graphischen Repräsentation liegt, wie bei *SN*. Ein Wissensverarbeitungsproblem, insbesondere das in dieser Arbeit zu behandelnde, ist darauf angewiesen, dass die verwendete Wissensbasis die Anwendungsdomäne umfassend beschreibt und formale oder inhaltliche Widersprüche möglichst ausgeschlossen sind. Dafür ist die *Annahme der Abgeschlossenheit der Welt*²² wichtig²³. Sowohl *SN* als auch *Ontologien* unterliegen der sogenannten *Annahme der Offenheit der Welt*²⁴, welche für die von ihnen typisch behandelten Aufgabenstellungen oft sehr hilfreich ist, da z. B. weniger Informationen spezifiziert werden müssen bzw. als implizit vorhanden vorausgesetzt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit ist diese Annahme jedoch kritisch zu sehen, da eine „offene Welt“ sehr viel schwieriger oder ggf. unmöglich auf Konsistenz geprüft werden kann und insbesondere regelhafte Ausdrücke z. B. mit gegensätzlichen Aussagen problematisch werden [ANG+10]. Nicht zuletzt daher sieht [ASS97] sogar die Einhaltung einer „abgeschlossenen Welt“ als Voraussetzung für die konsistente und vollständige Wissensrepräsentation. Zudem ist die Inferenz in „geschlossenen Welten“ wesentlich einfacher und effizienter zu handhaben. *Ontologien* sind zur Formalisierung auf Logik-basierte Sprachen angewiesen. Die Semantik der

²¹ Z. B. bei der regelbasierten Wissensrepräsentation.

²² „Closed-World-Assumption“: alles, was nicht direkt aus der Wissensbasis geschlossen werden kann, ist für das spezifische Problem nicht wahr oder nicht relevant [ASS97].

²³ Die in einer Wissensbasis bzw. einem Wissensmodell zu beschreibenden Lösungsräume von PZL müssen streng definierte Grenzen besitzen, um eine Bewertung und Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass alles, was sich innerhalb des Lösungsraums befindet (explizit modelliert wurde), bekannt und „wahr“ ist und alles außerhalb befindliche entsprechend nicht bekannt und daher „falsch“ ist. Aus diesem Grund ist eine Open-World-Annahme für das Konzept der vorliegenden Arbeit eine notwendige Voraussetzung.

²⁴ „Open-World-Assumption“: gegenteilige Annahme zur „Closed-World-Assumption“, mehr z. B. bei [PBD+13].

Formalisierungssprachen erschließt sich Anwendern ohne Hintergrundwissen im Bereich formaler Logik und Ontologie-basierter Modellierung nur schwer, was die Arbeit mit Ontologien für nicht-Ontologie-erfahrene Personen schwierig macht [GAA10], [MÜH12]. Abschließend sei erwähnt, dass sich die Forschungen zur automatischen Berechnung numerischer Werte von Funktionalbegriffen im Bereich der Ontologien noch in der Anfangsphase befinden [STO09].

Frames und der objektorientierte Ansatz

Frames sind ein „[...] sehr natürliches Verfahren zur Repräsentation von stereotypischen Entitäten [...]“ [LUG03]. Durch die Möglichkeit, Wissen in festen Schemata als Eigenschaften eines Objektes abzulegen, erleichtern sie die hierarchische Strukturierung von Wissen [LUG03]. Bis heute ist die Grundidee der Frames nahezu vollständig im *Paradigma der Objektorientierung* aufgegangen. Dieses kann daher durchaus als die konsequente Weiterführung des Frame-Gedankens gesehen werden und bietet die grundsätzliche Möglichkeit zur möglichst strukturerhaltenden Abbildung eines Wissensgebietes [SPSP08]. OO-Prinzipien wie Vererbung und Kapselung unterstützen die Datenhaltung und -verarbeitung und haben sich in vielen Implementierungssprachen manifestiert. Durch ihre weite Verbreitung und generelle Akzeptanz spielt die Objektorientierung als übergeordnetes Lösungskonzept und als Einbettungsmöglichkeit für viele verschiedene Vorgehens- und Repräsentationskonzepte eine bedeutende Rolle [CON10].

Regelbasierter Ansatz

Mit ihrer großen Ähnlichkeit zu Entscheidungstabellen und einer starken Analogie zur menschlichen Denk- und Problemlösungsweise [BEKE08], [LUT11] eignet sich die *regelbasierte Repräsentationsform* sehr gut für klar strukturierte Aufgabenstellungen [BEKE08], [KSY10], wie sie vor allem im Bereich von Wissenschaft und Technik zu finden sind. Regeln enthalten meist eine Mischung aus theoretischem Wissen und aus Erfahrung abgeleiteten Heuristiken [LUG03]. Damit machen sie einen Großteil des Expertenwissens formulierbar und „[...] stellen einen außerordentlich guten Kompromiss zwischen Verständlichkeit der Wissensdarstellung und formalen Ansprüchen dar [...]“ [BEKE08]. Jede Regel für sich stellt eine Wissensportion dar [ASS97], welche, aufgrund fehlender syntaktischer Interaktion mit anderen als unabhängig betrachtet werden kann [LUG03]. Das ermöglicht leichte Erweiterbarkeit und modularen Aufbau (vgl. [LÄCL01], [BEKE08], [SPSP08]) einer Wissensbasis. Regeln unterstützen zudem die gezielte Wissensverarbeitung [LÄCL01] und darüber hinaus auch den Erklärungsprozess der Ergebnisbildung (vgl. [KEL00], [LÄCL01], [LUG03]) durch die Nachvollziehbarkeit ihrer Schlussfolgerungspfade. Während einzelne Regeln intuitiv verständlich [SPSP08] und selbsterklärend (vgl. [KEL00], [LÄCL01], [BEKE08]) sind, leidet die Nachvollziehbarkeit unter der Kombination vieler Regeln [KEL00]. Die Zusammenhänge zwischen den Regeln sind schwer überschaubar [PUL02], da Wissen zu ein und demselben Gegenstand an verschiedensten Stellen verstreut über die Regelbasis vorliegen kann [STA07]. Bei größeren Wissensmengen zeigen sich damit schnell die Grenzen der regelbasierten Repräsentation: Wissensbasen werden bei vielen Regeln schnell unübersichtlich [KEL00], [SPSP08], [LUT11] und die Regelauswertung eingeschränkt transparent [FAY99]. In gleichem Maße bereiten die Prüfung von Konsistenz und Konfliktfreiheit große Probleme [KEL00], [PUL02] – mitunter unverhältnismäßig für die Vielzahl schwerwiegender potentieller Fehler in Regelbasen, die z. B. in [NAZ89] aufgeführt werden. Insbesondere im Hinblick auf die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit muss erwähnt werden, dass Regeln prinzipiell auf die Abbildung gerichteter Zusammenhänge beschränkt sind [PUL02], [LUT11] sowie die Tatsache, dass regelbasierte Ansätze im Allgemeinen auf einer endlichen Menge diskreter Werte arbeiten [BEKE08]. Nicht zuletzt die Richtungsgebundenheit von Regeln bringt Schwierigkeiten beim Umgang mit unvollständigen Informationen mit sich [LUG03].

Constraints

Konzept und Lösungsmechanismen der *Constraint*-Theorie sind prinzipiell sehr allgemeingültig [BHS07], daher vielseitig und problemunabhängig einsetzbar. Ähnlich wie bei Regeln können hier einzelne Zusammenhänge unabhängig voneinander formuliert werden und damit eine lokale Beschreibung von Beziehungen auf natürliche Art und Weise erreicht werden [HKB+94]. Die Richtungsungebundenheit [KEL00], [LUT11] ermöglicht im Gegensatz zu Regeln größere Gestaltungsfreiheit sowie die Modellierung und Auswertung wechselseitiger Beziehungen [RUD06], [PUL02]. Constraints sind jedoch schwer strukturell interpretierbar [KEL00]. Analog zu Regeln schwindet beim Zusammenwirken vieler Relationen die Übersichtlichkeit [PUL02]. Das explizite Ausdrücken von Kausalitätsbeziehungen ist durch die bidirektionale Formulierung schwer möglich. Das Lösen von CSP ist im Allgemeinen nicht trivial [GRS10] und die Bearbeitung hinsichtlich Berechnungsaufwand und Komplexität aufwändig [BR99], [RU012]. Verfügbare Algorithmen sind nur für binäre Constraint-Probleme ausgelegt, wobei eine vorherige Umwandlung von höher-stelligen in binäre Probleme stets vorausgesetzt wird [GRS10]. Problematisch ist zudem die Behandlung von unendlichen Wertedomänen [GRS10], [RU012]. Solche Probleme sind prinzipiell unentscheidbar [HIR99], [HER11].

Synopsis

Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der besprochenen Wissensrepräsentationen. Dabei wird unterschieden zwischen Eigenschaften, die nützlich für die Verwendung im Rahmen der Problemstellung dieser Arbeit sind, und Eigenschaften, die diesbezüglich problematisch oder einschränkend wirken. Wo sinnvoll, wird jeweils eine Referenz auf eine oder mehrere betroffene Anforderungen (→ 4.3) gegeben. Wie nicht zuletzt anhand von Tabelle 6-1 ersichtlich wird, weist jede Wissensrepräsentation (und ggf. die zugehörige Verarbeitung) Vor- und Nachteile sowie nützliche und problematische Aspekte auf, insbesondere im Hinblick auf das zu entwickelnde Konzept gemäß den in Abschnitt 4.3 formulierten Anforderungen. Diese Situation ist charakteristisch für komplexe praktische Probleme und wird oft dadurch gelöst, dass mehrere verschiedene Repräsentationsformen zusammen zum Einsatz kommen [MIN91] und damit hybride Systeme bilden [ASS97], [HAR10[@]]. Für die folgende Konzeptentwicklung muss daher untersucht werden, welche der aufgeführten nützlichen Repräsentationseigenschaften an welcher Stelle bzw. für welche Funktionalität zielführend in die Wissensrepräsentation und Verarbeitung eingebracht werden können. In Abbildung 6-7 werden diese schematisch zusammengeführt.

Der *objektorientierte Ansatz* eignet sich gut für den strukturellen Aufbau und die Organisation des Wissens sowie für die Beschreibung der notwendigen Wissens Elemente, sowohl auf abstrakter (Klassen) als auch auf spezifischer (Instanzen) Ebene (→ Abbildung 6-7). Mit seinen bewährten Konzepten zur Datenhaltung und seiner Anwendungsverbreitung stellt er zudem eine praktisch nutzbare Basis für die Implementierung bereit. Die Wissensorganisation der Elemente einer Wissensdomäne, insbesondere auf Klassenebene, kann zusätzlich von Grundgedanken der *SN* und *Ontologien* unterstützt werden. Da die zu behandelnde Problemstellung prinzipiell als gut strukturiertes und abgeschlossenes Wissensgebiet betrachtet werden kann, dürfen dabei die hierfür geltenden Vorteile einer *Closed-World* nicht zugunsten hier wenig nutzbarer Vorteile der *Open-World* aufgegeben werden. Vor allem aber können die *SN* Orientierung für die graphische Wissensdarstellung geben. Die Aufbereitung und Visualisierung des Wissens in assoziativer Netzform stellt eine sehr naheliegende, natürliche Abbildung dar, in der sowohl Wissens Elemente im Einzelnen als auch die Komplexität durch die Vernetzung im Ganzen deutlich werden. Die

Darstellung in Netzform ermöglicht an der Mensch-Maschine-Schnittstelle ein intuitives Verständnis durch den Nutzer (Anwender, Experte) und erhöht auf diese Weise Zugänglichkeit, Transparenz, Verständnis und damit die nachhaltige Nutzbarkeit von Konzept und Anwendung.

Tabelle 6-1: Eigenschaften/Aspekte der Wissensrepräsentationsformen im Hinblick auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit

Repräsentation	Nützliche Eigenschaften/Aspekte für:	Einschränkungen hinsichtlich:
Logik	<ul style="list-style-type: none"> Formale Basis (If) Ausdrucksstärke (Ia) 	<ul style="list-style-type: none"> Praktische An- und Verwendung (IIa, IIb) Pflege und intuitives Verständnis; Nutzerfreundlichkeit (Ie, IIa, IIb) Beeinflussbarkeit der Abarbeitung (Id) Mögliche Unentscheidbarkeit (Ia) Effiziente, performante Verarbeitung (Ie)
Semantische Netze & Ontologien	<ul style="list-style-type: none"> Repräsentation ähnlich menschlichem Gedächtnis (assoziative Strukturen) (Ie, IIa, IIb) Anschaulichkeit durch graphische Repräsentation (IIa, IIb) Darstellung und Strukturierung (IIa, IIb) Flexibilität und Erweiterbarkeit (If) 	<ul style="list-style-type: none"> Aufwändige Implementierung (IIc) Unklare, freie, offene Semantik (Ia, Ie) Begrenzte Aussagekraft (Ia) Open-World-Annahme (Ia) Beschreibung regelhafter Zshg. und einschränkender Bedingungen (Ia) Konsistenzprüfung (Ie, IIa) Spezifizierte Verarbeitungsmechanismen (SN) (Id) Arbeit mit Ontologien durch nicht-Experten (IIa) Fähigkeit zu numerischer Berechnung (Ia)
Frames und OO Ansatz	<ul style="list-style-type: none"> Prinzipien wie Vererbung, Kapselung u. a. (If) Fester Rahmen für die Eigenschaften eines Objektes (Ia, Ie) Hierarchische Strukturierung des Wissens; strukturerhaltende Abbildung eines Wissensgebietes (Ia) Einbettungsmöglichkeit für andere Repräsentationen (If) Weite Verbreitung, Etablierung, Einbettung in vielen Implementierungssprachen (IIc) 	<ul style="list-style-type: none"> Darstellung von Relationen (Ia) Spezifizierte Verarbeitungsmechanismen (Id)
Regelbasierter Ansatz	<ul style="list-style-type: none"> Wissensportionen formulierbar (Ie, If) Intuitiv, da dem menschlichen Verständnis und Problemlösungsverhalten sehr nah (Ie, IIa, IIb) Im Einzelnen einfach, verständlich und selbsterklärend (Ie, IIa, IIb) Modular, erweiterbar (If) Darstellung heuristischen und empirischen Wissens (Ia) Gezielte Steuerung der Abarbeitung (Id) Unterstützt Erklärungsfähigkeit (IIb) Beschreibung von kausalen Zshg. (Ia) Closed-World-Annahme (Ia) 	<ul style="list-style-type: none"> Große Regelmengen; Organisation von Regelmengen (IIa, IIb) In Kombination schwer nachvollziehbar; schwierig überschaubare Zshg. der Regeln untereinander; Transparenz und Wartung erschwert (Ie, IIa, IIb) Konsistenzprüfung der Regelbasis (Ie, IIa) Richtungsgebundenheit (Ia) Arbeiten im Allgemeinen auf einer endlichen Menge diskreter Werte (Ic) Umgang mit unvollständigen Informationen (IIa)
Constraints	<ul style="list-style-type: none"> Allgemeinheit des Ansatzes (If) Einzelne Zshg. unabhängig voneinander formulierbar (Ie, If) Lokale Beschreibung der Beziehungen auf natürliche Art und Weise (Ie) Richtungsungebundenheit, Flexibilität (Ia) 	<ul style="list-style-type: none"> Kausale Abhängigkeiten (Ia) Unübersichtlichkeit (IIa, IIb) Strukturelle Interpretierbarkeit (IIa, IIb) Verarbeitung hinsichtlich Berechnungsaufwand und Komplexität; Nichttrivialität der Lösung eines CSP (Ia) Mögliche Unentscheidbarkeit (Ia) Algorithmen grundsätzlich für binäre Probleme ausgelegt (Ia) Umgang mit unendlichen Wertedomänen (Ic)

Für die Beschreibung der Beziehungen zwischen einzelnen Wissensselementen bietet sich vor allem die Repräsentation durch *Regeln* und *Constraints* an. Ihre Abbildungsfähigkeit von empirischem und heuristischem Wissen in kausalen (Regeln) oder ungerichteten (Constraints) Relationen ist vor allem in technischen Domänen hilfreich bzw. notwendig. Mit ihnen können

kleine und überschaubare Wissensseinheiten intuitiv formuliert und im Weiteren mit anderen dieser Wissensseinheiten gekoppelt werden. Letztlich bieten Regeln und Constraints Heuristiken und etablierte Verfahrensweisen, um die Wissensverarbeitung zielgerichtet und steuerbar durchzuführen. Durch die sinnvolle Kombination von Eigenschaften und Prinzipien von objektorientiertem Ansatz, SN, Regeln und Constraints kann die Konzeptentwicklung für das zu entwickelnde WBS sinnvoll unterstützt werden. Abbildung 6-7 gibt abschließend einen schematischen Überblick über die Wissensrepräsentationen und ihre Verwendung für die Konzeptentwicklung dieser Arbeit.

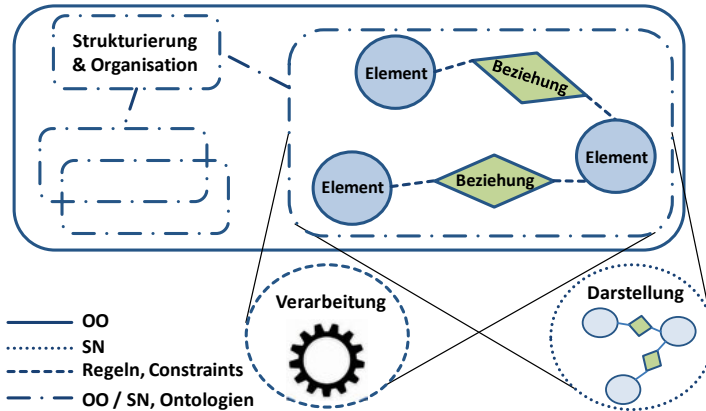


Abbildung 6-7: Wissensrepräsentationen und konzeptionelle Verwendung

7 Konzept zur Repräsentation und Auswertung vernetzter Merkmalräume

Auf Basis des in Kapitel 4 entworfenen Grundkonzepts und der hierbei aufgestellten Anforderungen soll die wissensbasierte Auswahl von Prinzipzlösungen (PZL) ermöglicht werden. Die Formulierung der PZL soll dabei auf Expertenwissen beruhen. Der folgende Abschnitt führt, unter Berücksichtigung des fachlichen Exkurses der Kapitel 5 und 6, in die Konzepterstellung ein. Danach werden zunächst die notwendigen Festlegungen und Voraussetzungen im Rahmen einer generischen Betrachtung geschaffen (→ 7.2) und ein Wissensmodell mit den notwendigen Modellelementen entwickelt (→ 7.3). Die folgenden beiden Abschnitte widmen sich dann der Wissensanalyse und den Möglichkeiten zur Prüfung der Konsistenz (→ 7.4) sowie der Verarbeitung der Merkmalräume (→ 7.5). Abschließend wird eine Methodik zur Anwendung des Konzepts entworfen (→ 7.6) und Möglichkeiten zur Integration werden dargestellt (→ 7.7).

7.1 Überblick

Grundsätzliches Ziel des Konzepts ist die softwarebasierte Unterstützung bei der Auswahl geeigneter PZL als Grundlage für die Auswahl von TR im Rahmen des Anlagenplanungsprozesses. Dafür muss sowohl die gemäß dem allgemeinen Sprachgebrauch (→ 5.3.3) anforderungserhebende Seite als auch die Seite der potentiellen Anforderungserfüllung betrachtet werden. Für die Beschreibung der Anforderungserhebung wird im Rahmen des Konzepts der Begriff **Planungselement (PE)** genutzt. Das PE stellt einen abstrakten Platzhalter (→ 5.3.3) innerhalb der Planung dar und kann bei verfahrenstechnischen Anlagen u. a. für eine PLT-Stelle (R&I-Fließbild, PLT-Stellenblatt, → 2.1) stehen und beispielsweise für die Spezifikation einer sensorischen oder aktorischen Funktion genutzt werden. Das PE verkörpert zu tolerierende Bedingungen der zukünftigen Einsatzumgebung und spezifische Anforderungen. Es beschreibt damit zu realisierende Eigenschaften der später zu implementierenden TR und kann als Merkmalträger²⁵ (→ 5.3.1) betrachtet werden. In Abschnitt 4.1.1 wird vorgeschlagen die Auswahl von TR im Planungsprozess durch die Verwendung von **PZL**, als abstrakte Zwischenlösungen, zu unterstützen. PZL können, genau wie konkrete TR selbst, als Träger ihrer jeweils spezifischen Eigenschaften und daher ebenfalls als Merkmalträger²⁶ betrachtet werden. PZL stellen Lösungsoptionen für die Erfüllung einer bestimmten **Funktion** dar (→ 4.1.1). Die Funktion bleibt dabei selbst abstrakt (Merkmalträgertyp ohne konkrete Ausprägungen) und wird vom PE deklariert (z. B. PLT-Stelle „FIC12“ deklariert die Funktion „Durchflussmessung“). Die Funktion stellt damit das semantische Bindeglied zwischen einem PE und den verfügbaren PZL dar. Abbildung 7-1 gibt eine Übersicht über die hier relevanten Entitäten und die Beziehungen zwischen diesen, angelehnt an die in Abschnitt 5.3 eingeführten Modellvorstellungen zu Merkmalen, Merkmalträgern und Merkmalträgertypen.

Die Auswahlunterstützung geeigneter PZL basiert auf der Untersuchung und Eignungsprüfung verschiedener PZL im Hinblick auf die durch das PE spezifizierten Bedingungen und Anforderungen. Die Eignungsprüfung einer jeweiligen PZL muss über den Vergleich ihrer spezifischen Ausprägungen mit den spezifischen Ausprägungen des PE auf Basis gemeinsamer charakterisierender und für den Vergleich relevanter Merkmale geführt werden

²⁵ In Anlehnung an die in Abschnitt 4.3.3 erhobene Anforderung und das Ergebnis der Untersuchung in Abschnitt 5.5 werden Merkmale im Folgenden als definierte und strukturierte Repräsentanten von Eigenschaften verwendet.

²⁶ Bei genauer Betrachtung haben PZL einen hybriden Charakter. In ihrer Bedeutung als abstrakte Klasse verkörpern sie, im Verständnis gängiger Modelle, eigentlich einen Merkmalträgertyp (→ 5.3.1). Im Verständnis des zu erstellenden Konzepts müssen PZL jedoch Träger von Merkmalen mit konkreten Ausprägungen sein und damit Merkmalträger.

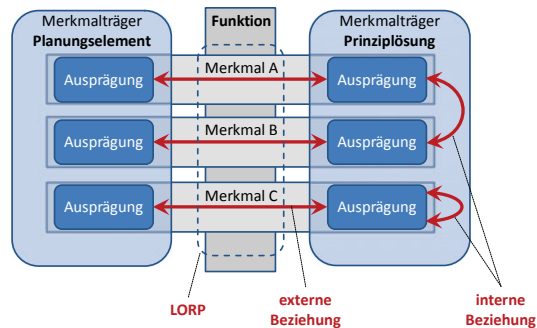


Abbildung 7-2: Beziehungen zwischen den Merkmalsträgern Planungselement und Prinziplösung

Einer etwas abstrakteren Vorstellung folgend (Eigenschaftsraum → 4.2), spannen die Merkmale der LORP einen sogenannten **Merkmalraum** auf – ein Werteraum, in dem jede Dimension ein einzelnes Merkmal darstellt und sich die Dimensionsausgestaltung nach der jeweils möglichen Ausprägung des entsprechenden Merkmals richtet (→ Abbildung 7-3). Sowohl PE als auch PZL können im Kontext dieser Raumvorstellung abgebildet werden und gestalten mit ihren spezifischen Ausprägungen Unterräume innerhalb dieses Merkmalraums. Zur Unterscheidung beider werden die Begriffe **Problemraum** (repräsentiert PE) und **Lösungsraum** (repräsentiert PZL) genutzt. Im Rahmen des Vergleichs zwischen PZL und PE werden Lage und Ausgestaltung beider Unterräume verglichen (externe Beziehung, → Abbildung 7-2). Die bereits in Abschnitt 4.2 erwähnten Relationen, als besondere abzubildende Herausforderungen, können dabei Form und Lage der Merkmalräume beeinflussen, wie in Abbildung 7-3 beispielhaft dargestellt ist. Relationen stellen interne Beziehungen (Abbildung 7-2) zwischen Merkmalen bzw. zwischen deren Ausprägungen innerhalb des Merkmalsträgers dar.

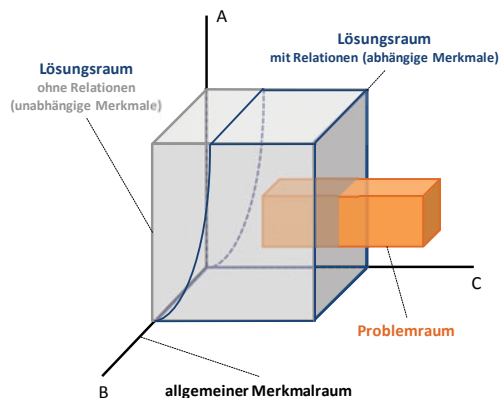


Abbildung 7-3: Problem- und Lösungsraum als Unterräume des allgemeinen Merkmalraums

Für den Vergleich von Problem- und Lösungsraum muss daher zuerst eine Synthese der Merkmalräume unter Auswertung der internen und ggf. bereits Berücksichtigung der externen

Beziehungen durchgeführt werden. Anschließend kann dann die Analyse (Vergleich) beider Merkmalräume durch die Auswertung der externen Beziehungen erfolgen.

7.2 Voraussetzungen, Festlegungen und Annahmen

Die Merkmalausprägungen bestimmen Form und Lage der Merkmalräume. Sowohl Repräsentation als auch Verarbeitung von Merkmalräumen resultieren letztlich in der Arbeit mit und auf Merkmalausprägungen. Operationen im Merkmalraum (Synthese, Analyse) müssen deshalb auf der Basis von Merkmalausprägungen durchgeführt werden. Dabei sind Beziehungen zwischen:

- I. Ausprägungen eines Merkmals eines Merkmalträgers (interne Beziehung)
- II. Ausprägungen verschiedener Merkmale eines Merkmalträgers (interne Beziehung)
- III. Ausprägungen eines Merkmals verschiedener Merkmalträger (externe Beziehung)

zu realisieren (→ Abbildung 7-2).

Eine automatisierte Verarbeitung merkmalsbasierter Informationen ist grundsätzlich möglich, ohne die spezielle Semantik der Merkmale kennen zu müssen [MER11]. In diesem Sinne müssen für die automatisierte Verarbeitung der Informationsträger (Anforderung IIIa) und Realisierung der aufgeführten Beziehungen geeignete Grundvoraussetzungen geschaffen werden. Für das Konzept werden dafür drei relevante Ausprägungscharakteristika identifiziert:

- das Skalenniveau des Merkmals bzw. seiner Ausprägung (→ 7.2.1)
- die Ausprägungsaussage (→ 7.2.1)
- das Aussageziel (→ 7.2.2)

In den folgenden Abschnitten werden zunächst eine domänen- und anwendungsfallunabhängige, generische Betrachtungsweise entwickelt sowie Annahmen und Festlegungen getroffen, welche später zur Beschreibung bzw. Behandlung der genannten Charakteristika und Beziehungen dienen. Angestrebt wird dabei eine möglichst elementare, einfache Darstellungs- und Vorgehensweise, die den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Zielen und Vorstellungen sowie der Bewältigung der in Abschnitt 4.2 dargestellten besonderen Herausforderungen Rechnung trägt. Abschließend wird in Abschnitt 7.2.5 die unterschiedliche Betrachtungsweise von Lösungs- und Problemraum dargestellt. Abschnitt 7.2 dient damit als Fundament und als Werkzeugkasten für die folgenden Konzeptschwerpunkte Modellierung bzw. Repräsentation sowie Verarbeitung und adressiert vornehmlich die Anforderungen Ia, Ic, Ie, If, IIIa (→ 4.3).

7.2.1 Skalenniveau-übergreifende Betrachtung

Jede Merkmalausprägung kann grundsätzlich als eine *Menge* (A) auf der dem zugehörigen Merkmal zugeordneten Skala aufgefasst werden. Sie stellt dabei eine Untermenge aller verfügbaren Elemente der durch die Skala verkörperten Werte (Definitions Menge D) dar: $A \subseteq D$.

Skalen werden anhand ihrer Aussagefähigkeit in verschiedene Niveaus klassifiziert (→ 5.3.2). Eine möglichst mächtige Repräsentation und Verarbeitung sollte alle Skalenniveaus umfassen können (→ Anforderung Ic). Die für die folgenden Betrachtungen im Rahmen der Konzepterstellung primär entscheidende Skaleneigenschaft ist die Existenz bzw. Nichtexistenz einer inneren Ordnung. Darunter wird hier das Vorhandensein einer inhärenten Reihenbeziehungsweise Rangfolge der Mengenelemente verstanden. Während Ordinal-, Intervall- und Rationalskalen eine innere Ordnung aufweisen, fehlt diese bei Nominalskalen völlig. Für eine

Skalenniveau-übergreifende Behandlung ist die vorerst getrennte Betrachtung beider Fälle erforderlich.

Skalen mit innerer Ordnung (m.i.O.): Ausprägungen können bei diesen Skalen als Abschnitte auf der inneren Ordnungsreihenfolge, ergo als *Intervall*, aufgefasst werden. Das jeweilige Intervall zeigt damit Anfangs- und Endwerte der Ausprägung an.

$A \rightarrow [a, b]$ mit $a \leq x \leq b$ (geschlossenes Intervall)

Durch die vorhandene innere Ordnung werden dabei implizit alle Elemente zwischen a (Untergrenze) und b (Obergrenze), inklusive a und b, in der Ausprägungsmenge eingeschlossen, ungeachtet dessen, ob es sich um qualitative oder quantitative, diskrete oder kontinuierliche Skalen handelt. Das Inkludieren aller endlichen (diskrete Skalen) und unendlichen (kontinuierliche Skalen) Teilmengen der vom Intervall begrenzten Menge wird damit impliziert und im Folgenden vorausgesetzt. Ebenfalls als Voraussetzung wird angenommen, dass der durch das Intervall beschriebene Wertebereich stetig ist, d. h. keine Lücken enthält und damit die von a und b umschlossene Wertemenge vollständig beschreibt. Die Ausprägungsmenge als Intervall hat die Ausdrucksfähigkeit, um Wertebereiche, aber auch, bei Zusammenfall von Unter- und Obergrenze, Punkte abzubilden.

Die Eigenschaften von Skalen m.i.O. ausnutzend, wird die Repräsentation entsprechender Ausprägungen im Folgenden erweitert auf die Betrachtung von *Semi-Intervallen*. Diese können betrachtet werden als „[...] repräsentationale Primitive [...], die für die Anfänge und Enden von Intervallen stehen.“ [GÖR95]. Dafür wird das Intervall $[a, b]$ hier ersetzt durch die zwei Semi-Intervalle $[a, *]$ und $[*, b]$. Der „*don't care-Operator*“ „ $*$ “ repräsentiert dabei eine nicht relevante Intervallhälfte³⁰ (auf die differenzierte Bedeutung und Interpretation des Operators wird in Abschnitt 7.2.2 näher eingegangen). Die Semi-Intervalle stellen jeweils einen begrenzenden Punkt in Verbindung mit einem offenen Wertebereich auf dem Wertespektrum der zugehörigen Skala dar (\rightarrow Abbildung 7-4). Das Semi-Intervall $[a, *]$ wird im Folgenden als Minimalwert bezeichnet und besitzt eine untere Begrenzung der verkörperten Wertemenge (A), wogegen das Semi-Intervall $[*, b]$ über eine obere Begrenzung der verkörperten Wertemenge verfügt und im Folgenden als Maximalwert bezeichnet wird. Sowohl Minimal- als auch Maximalwert³¹ spezifizieren damit die Aussage einer Merkmalausprägung³² (\rightarrow 5.3.3) und repräsentieren die binären Relationen „ \leq “ (Maximalwert) und „ \geq “ (Minimalwert) (vgl. [EPP11B]).

Für die konsistente Verwendbarkeit der Semi-Intervalle als Stellvertreter des Ausprägungsrepräsentierenden Intervalls muss jedoch die Bedingung $a \leq b$ zwingend erfüllt sein, d. h. der Minimalwert darf den Maximalwert bei allen Operationen niemals überschreiten. Damit wird verhindert, dass der durch die Semi-Intervalle verkörperte eindimensionale Merkmalraum quasi umgestülpt wird und eine Ausprägungsmenge entstehen würde, die weder semantisch sinnvoll, noch hinsichtlich einer Konsistenz zielführend ist. Die genannte Bedingung wird im Folgenden als *Min \leq Max-Constraint* bezeichnet. Die Bedingung schließt als Nebeneffekt aus, dass bei Skalen m.i.O. eine leere Ausprägungsmenge entstehen kann.

³⁰ Bewusst wird hier nicht die in der Literatur oft genutzte Darstellung $[a; \inf[$ und $]-\inf; b]$ verwendet. Nicht-Relevanz geht im hiesigen Kontext über die Bedeutung einer Intervallgrenze bei \inf/\inf hinaus, da z. B. qualitative Skalen (ordinales Niveau) ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

³¹ Begriffe in Anlehnung an die in [DIN EN 61360-1] genutzten Begriffe „Kleinstwert (min)“ und „GrößtWert (max)“. Hier jedoch in einem über die dort genannten „Betriebsbedingungen“ hinaus gehenden Verständnis.

³² Beide Grenzen der Wertemenge der Merkmalausprägung werden im Folgenden in Anlehnung an [EPP11B] vereinfachend (nach [EPP11B] eigentlich „Aussage der Ausprägungsaussage“) jeweils als Ausprägungsaussage bezeichnet.

Durch die Aufspaltung des Wertintervalls in zwei Semi-Intervalle werden folgende Vorteile für die spätere Arbeit mit und auf Ausprägungen im Merkmalraum erreicht:

- Bei Operationen mit Mengen müssen prinzipiell alle möglichen Mengenbeziehungen³³ (Überlappung, Teilmenge, disjunkte Mengen) berücksichtigt werden. Durch die Ausnutzung der inneren Ordnung der Skala vereinfachen sich bei der Verwendung von Semi-Intervallen die Mengenbeziehungen auf reine Teilmengenbeziehungen auf der Basis simpler Punktvergleiche unter Verwendung der binären Relationen \leq und \geq . Damit kann möglichst einfach operiert werden (unter Wahrung des $\text{Min} \leq \text{Max}$ -Constraint), während die eigentliche, geschlossene Ausprägungsmenge des Merkmals (Intervall) implizit bleibt und erst bei der Ergebnisauswertung zum Tragen kommt.
- In technischen Anwendungsfällen sind Merkmalausprägungen (z. B. Einsatzbereiche) manchmal nur einseitig eingeschränkt oder es treten gar Fälle auf, in denen Abhängigkeitsbeziehungen (Fall II, \rightarrow 7.2) nur eine Grenze der Merkmalausprägung betreffen bzw. beide Grenzen in unterschiedlichen Beziehungen stehen. Eine wesentlich mächtigere, weil differenziertere, Abbildung und Verarbeitung von Merkmalausprägungen wird möglich, wenn durch die Verwendung der Semi-Intervalle ein weitestgehend unabhängiges Operieren (unter Wahrung des $\text{Min} \leq \text{Max}$ -Constraint) auf den Grenzen der Merkmalausprägungen erfolgen kann.

Skalen ohne innere Ordnung (o.i.O.): Bei diesen Skalen kann nur über Existenzaussagen die Zugehörigkeit von Elementen von D zur Ausprägungsmenge A ausgedrückt werden. Die Existenz jedes einzelnen Elements muss dabei explizit formuliert werden (Werteauflistung). Eine implizite Inklusion von nicht aufgeführten Mengenelementen gibt es nicht, da alle Mengenelemente zueinander disjunkt sind. Repräsentationen als Intervall oder Semi-Intervall sind daher nicht gegeben. Theoretisch ist die Anzahl der Mengenelemente bei diesen Skalen nicht begrenzt, praktische Relevanz besitzen jedoch nur Ausprägungen mit endlichen Mengenelementen.

$$A \rightarrow \{a, b, c \dots\} \text{ mit } x \in \{a, b, c \dots\}$$

Im Folgenden werden als Teilmengen der Ausprägung die Elemente ihrer *Potenzmenge* \mathbb{P} (mögliche Kombinationen der Mengenelemente der Ausprägung)³⁴ als implizit enthalten angenommen.

$$\mathbb{P}(A) = \{X : X \subseteq A\} \text{ Bsp.: } A = \{a, b, c\} \rightarrow \mathbb{P}(A) = \{\{\emptyset\}, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}\}$$

Ausprägungen von Skalen o.i.O. werden im Folgenden als Nominalwert bezeichnet und repräsentieren als Ausprägungsaussage die Äquivalenzrelation³⁵. Beim Operieren mit Nominalwerten untereinander müssen über die Teilmenge hinaus auch alle anderen möglichen Mengenbeziehungen berücksichtigt werden. Beispiele dafür geben unter anderem die Paarung des ersten und zweiten Elements (Disjunktheit) der oben aufgeführten Potenzmenge bzw. die Paarung des vierten und fünften Elements (Überlappung). Leere Mengen können bei Nominalwerten auftreten, sind jedoch nicht per se problematisch (\rightarrow 7.2.2). Abbildung 7-4 gibt einen Überblick über die Repräsentation und die Begriffe im Zuge einer Skalenniveau-übergreifenden, mengentechnischen Betrachtung.

³³ Auf eine umfassende Grundlagendarstellung von Mengen und -beziehungen wird hier verzichtet. Übersichten finden sich u. a. in [NEH03].

³⁴ Da alle n Elemente von A paarweise verschieden sind (disjunkt), enthält die Potenzmenge $\mathbb{P}(A)$ genau 2^n Elemente.

³⁵ Eigentlich die binäre Relation „=“, hier jedoch auch im erweiterten Sinne von „enthält“.

Zusammenfassend kann konstituiert werden: Mit Hilfe einer *mengentheoretischen Betrachtungsweise* kann eine neutrale und formale Behandlung von Merkmalausprägungen in Verbindungen mit deren Aussagen über verschiedene Skalenniveaus hinweg entwickelt werden. Diese Betrachtungsweise ist unabhängig von spezifischen Aussagezielen (\rightarrow 7.2.2), der Behandlung spezieller Elementbeziehungen (\rightarrow 7.2.3) bzw. Mengenbereiche (\rightarrow 7.2.4) oder Operationen in verschiedenen Merkmalräumen (\rightarrow 7.2.5). Während bei Ausprägungen von Skalen o.i.O. alle Mengenelemente explizit repräsentiert und behandelt werden müssen, sind bei Vorhandensein einer inneren Ordnung Vereinfachungen möglich und nötig, da meist unendlich viele Mengenelemente betroffen sind. In solchen Fällen können die Ausprägungen der betroffenen Skalen als Intervalle aufgefasst und als Semi-Intervalle formuliert und verarbeitet werden. Unter Wahrung des $\text{Min} \leq \text{Max}$ -Constraint ermöglicht dies eine mächtigere und gleichzeitig einfachere Behandlung, wobei beide Aussagen der Ausprägung trotzdem unter dem gleichen semantischen Dach des Merkmals verbleiben (z. B. Minimal- und Maximalwert des Merkmals „Prozessdruck“, die zusammen die Ausprägungsmenge, beispielsweise den Einsatzbereich einer PZL, darstellen).

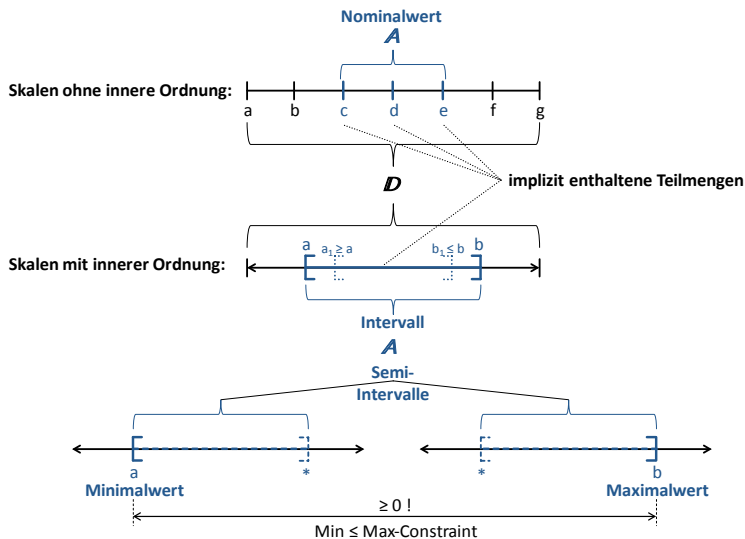


Abbildung 7-4: Begriffe einer Skalenniveau-übergreifenden Betrachtungsweise

7.2.2 Aussageziele

Das Aussageziel charakterisiert die Intention einer Ausprägung. Obwohl eine Ausprägung grundsätzlich ohne Aussageziel formuliert werden kann, ist dieses ein entscheidender semantischer Beitrag zur Interpretation der Merkmalausprägung und demnach für eine automatisierte Verarbeitung im Hinblick auf die Generierung von Ergebnissen und Entscheidungsgrundlagen obligatorisch.

Die zwei im Rahmen der Konzepterstellung relevanten Aussageziele sind *Anforderung* und *Zusicherung*. Durch die mögliche Heterogenität von Aussagezielen innerhalb eines Merkmalsträgers (\rightarrow 5.3.3) können sowohl PZL als auch PE beide Aussageziele auf Merkmalebene besitzen. Bezüglich der Verarbeitung der Merkmale und ihrer Ausprägungen wird festgelegt: Im

Rahmen externer Beziehungen (Fall III, \rightarrow 7.2) müssen die Aussageziele bezogen auf das betroffene Merkmal komplementär sein – d. h. Anforderungen auf entsprechende Zusicherungen treffen oder umgekehrt. Bei internen Beziehungen (Fall I) treten grundsätzlich nur homogene Aussageziele (Anforderung-Anforderung, Zusicherung-Zusicherung) auf. Bei internen Beziehungen (Fall II), den sogenannten Relationen, können jedoch auch heterogene Aussageziele aufeinander treffen.

Sowohl das semantische als auch das mengentheoretische Verständnis der Ausprägungen ist in Abhängigkeit vom Aussageziel sehr verschieden und wird daher im Folgenden in Bezug auf das hier zu erstellende Konzept definiert und genauer erläutert:

Die **Anforderung** beschreibt eine bestimmte Eigenschaft bzw. Merkmalausprägung (A_{Anf}), deren Tolerierung oder Erfüllung gefordert wird. Sie beschreibt damit den Mindestumfang der Ausprägung hinsichtlich der Eigenschaft einer fiktiven Entität, der benötigt wird, um die Anforderung zu erfüllen.

Bsp.: (Prozessbedingung) Prozessdruck = 1 bis 5 bar. Die Spezifikation des PE fordert damit, dass eine anforderungserfüllende Lösung (z. B. PZL oder konkrete TR) diese Eigenschaft zusichern bzw. tolerieren kann (d. h. zwischen 1 und 5 bar betriebsgerecht funktioniert).

Die **Zusicherung** beschreibt eine bestimmte Eigenschaft bzw. Merkmalausprägung (A_{Zus}), deren Tolerierung oder Erfüllung zugesichert wird. Sie beschreibt damit den maximalen Umfang der Ausprägungen hinsichtlich der Eigenschaft der zusichernden Entität.

Bsp.: Eine PZL sichert die Tolerierung von Betriebsdrücken im Bereich von 0,5 und 10 bar zu (die betriebsgerechte Funktion unter diesen Bedingungen wird zugesichert).

Eine klare Zuordnung oder Identifikation eines Aussageziels zur Merkmalausprägung eines Merkmalträgers ist nicht immer intuitiv möglich und lässt durchaus Interpretationsspielraum zu [MER11]. Jenseits der Orientierung durch die oben festgelegte Bedeutung der Aussageziele schlägt Abschnitt 7.6 eine einfache Heuristik vor, welche die eindeutige Zuordnung der Aussageziele bei der Verwendung dieses Konzepts ermöglicht.

Die vom Konzept zu leistende Eignungsprüfung von PZL hinsichtlich der Spezifikation eines PE beinhaltet das bewusste Abgleichen von Anforderung und Zusicherung (externe Beziehungen) beider Merkmalsträger auf Basis jeweils eines Merkmals (*semantische Synchronität* \rightarrow 7.1). Grundsätzliches Ziel im Sinne einer Eignung hinsichtlich des betroffenen Merkmals ist die Erfüllung bzw. Tolerierung der Anforderungsausprägung (A_{Anf}) durch die Zusicherungsausprägung (A_{Zus}). Dies kann mengentheoretisch als Teilmengenbeziehung verstanden werden, bei der die Wertemenge von A_{Zus} die Wertemenge von A_{Anf} vollständig enthält.

$$A_{\text{Anf}} \subseteq A_{\text{Zus}} \rightarrow \text{Anforderung wird durch Zusicherung erfüllt}$$

Jede Menge enthält implizit auch ihre Teilmengen (\rightarrow 7.2.1). Die in A_{Zus} enthaltenen Teilmengen sind somit schwächere Zusicherungen, da sie weniger Elemente zusichern. Die in A_{Anf} enthaltenen Teilmengen sind schwächere Anforderungen, da sie weniger Elemente anfordern.

$$A_{\text{Zus}1} \subset A_{\text{Zus}2} \rightarrow \text{Zusicherungsausprägung 1 ist schwächer als Zusicherungsausprägung 2}$$

$$A_{\text{Anf}1} \subset A_{\text{Anf}2} \rightarrow \text{Anforderungsausprägung 1 ist schwächer als Anforderungsausprägung 2}$$

Die formulierten Teilmengenbeziehungen erlauben eine einfache Interpretation beim Zusammenreffen jeweils zweier Ausprägungen in Abhängigkeit von deren Aussagezielen. In einem

allgemeineren mathematischen Verständnis spricht man von einer partiellen Ordnungsrelation³⁶ zwischen den Mengen. Durch die Herstellbarkeit dieser Ordnungsrelation ist eine automatisierte Interpretation gemäß der oben formulierten Deutung möglich.

Folgende Annahmen können hieraus weiter abgeleitet werden:

- Eine Merkmalausprägung mit dem Aussageziel „Zusicherung“ A_{Zus} hat ein größeres Potential eine Anforderung zu erfüllen, je größer die von ihr repräsentierte Wertemenge ist.
- Eine Merkmalausprägung mit dem Aussageziel „Anforderung“ A_{Anf} hat ein größeres Potential durch eine Zusicherung erfüllt zu werden, je kleiner die von ihr repräsentierte Wertemenge ist.

Im Hinblick auf die Erreichung des übergeordneten Prüfungsziels „Eignung der Zusicherung zur Anforderungserfüllung“ (sowohl auf Merkmal- als auch später auf Merkmalsträgerebene) können aus diesen Annahmen Präferenzrichtungen für die Wertemengen von A_{Zus} und A_{Anf} abgeleitet werden – hier im Folgenden **generische Präferenz**³⁷ genannt. Während A_{Zus} hinsichtlich ihrer enthaltenen Wertemenge optimaler Weise so groß wie möglich sein sollte (verkörperter Merkmalraum strebt nach außen), verhält es sich bei den Wertemengen von A_{Anf} gegenteilig (verkörperter Merkmalraum strebt nach innen). Abbildung 7-5 stellt dies schematisch dar.

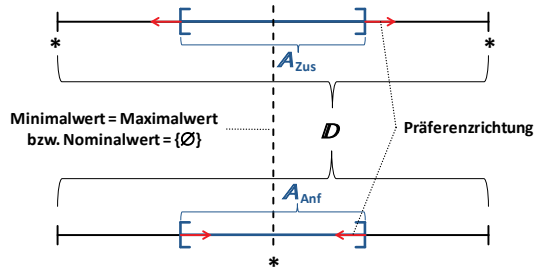


Abbildung 7-5: Präferenzrichtung und „don't care“-Operator in Abhängigkeit vom Aussageziel

Wie in Abbildung 7-5 zu sehen ist, hat das Aussageziel auch Einfluss auf die Deutung des „*-Operators“³⁸. Dieser wird als generischer Stellvertreter der Irrelevanz über alle Skalenniveaus, Aussageziele und Aussagen hinweg genutzt und erhöht damit die Ausdrucksmächtigkeit. Er repräsentiert grundsätzlich die Extremzustände der Ausprägungen. Seine konkrete Deutung hängt damit jedoch von D , Skalenniveau, Aussageziel und Ausprägungsaussage ab. Bei Zusicherungen und Skalen m.i.O. steht er für das jeweilige Ende von D (z. B. entspricht der Operator beim Merkmal Prozessdruck als Minimalwert 0 [Einheit] und als Maximalwert ∞ [Einheit]) bzw. bei Skalen o.i.O. für die gesamte D . Bei Anforderungen steht der „*-Operator für den Wert der jeweils gegenüberliegenden Intervallgrenze, ohne das $\text{Min} \leq \text{Max}$ -Constraint zu verletzen (z. B. beim Merkmal „Prozessdruck“ mit einem Maximalwert von 5 bar entspricht der Operator bei der Verwendung als Minimalwert ebenfalls 5 bar – damit ist die mengentechnisch kleinstmögliche Anforderung des Minimalwertes dargestellt) sowie bei Skalen o.i.O. für die leere Menge $\{\emptyset\}$. Bei Operationen mit dem „*-Operator, beispielsweise im

³⁶ Partielle Ordnungsrelationen sind transitive, reflexive und antisymmetrische Relationen. Näheres unter anderem bei [NEH03]. Die potentielle Existenz unvergleichbarer Elemente (Skalen o.i.O.) sorgt dafür, dass hier keine totale Ordnung herstellbar ist.

³⁷ Die generische Präferenz orientiert sich am Prinzip der minimalen Präjudizierung. Danach ist jener Lösung der Vorzug zu geben, welche am wenigsten präjudiziert und damit die beste Robustheit gegenüber sich ändernden Randbedingungen und die größte Flexibilität aufweist [HAB12].

³⁸ Der Operator wird unter anderem auch bei sogenannten erweiterten Entscheidungstabellen als Irrelevanzanzeiger zur Formulierung komplexer Regeln genutzt (vgl. [SCH99]).

Rahmen der Wissensverarbeitung (\rightarrow 7.5), muss dieser ggf. durch einen adäquaten mathematischen Ausdruck substituiert werden (z. B. 0 oder ∞).

Unter der Voraussetzung der **implizit inkludierten Teilmengen** (\rightarrow 7.2.1) lassen sich weitere Aussagen ableiten: Eine Ausprägungsmenge verkörpert implizit auch alle in ihr enthaltenen Teilmengen. Das bedeutet z. B. für Zusicherungsausprägungen bei Skalen m.i.O. in der Repräsentation als Semi-Intervall, dass ein Maximalwert b alle Maximalwerte $x < b$ implizit zusichert, und dass ein Minimalwert a alle Minimalwerte $x > a$ implizit zusichert. Hat also z. B. eine PZL die obere Leistungsgrenze a , so sichert sie auch gleichzeitig niedrigere Leistungsgrenzwerte zu. Bei Skalen o.i.O. ist das analog zu verstehen. Wird eine Ausprägung $\{a, b, c\}$ zugesichert, so beinhaltet dies auch die Zusicherung ihrer Teilmengen (Elemente von $\mathbb{P}(\mathcal{A})$), beispielsweise $\{a, b\}$.

Dieses Verständnis entspricht einer praktischen Intuition, nach der ein größeres Vermögen einer Eigenschaft ein kleineres automatisch einschließt. Diese Annahme wird gestützt durch Aussagen von [CHEG05], [EGB09] sowie Ansätzen und Umsetzungen von [SHF+01], [ZAF02], [MFB05], [EGB09], [ERB13]. So basiert beispielsweise das Konzept von „Einsatz- und Möglichkeitsbereichen“ (\rightarrow Abbildung 3-5), wie sie unter anderem in [SCH99], [SHF+01] und [ZAF02] aufgeführt werden, grundsätzlich auf dieser Annahme.

Beim Aussageziel Anforderung ist das Verständnis analog zum Aussageziel Zusicherung, wenngleich sich nicht ähnlich intuitive Beispiele, wie oben beschrieben, finden lassen. Es gilt hier, dass stärkere Anforderungen auch schwächere Anforderungen implizit enthalten. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch die hier umgekehrte Präferenzrichtung, im Sinne einer Zusicherungserfüllung schwächere Anforderungen günstiger sind als stärkere.

7.2.3 Relationen

Treten Abhängigkeiten, Restriktionen oder Zusammenhänge zwischen den Merkmalen des Merkmalträgers auf, so treffen verschiedene Merkmale und damit auch unterschiedlichste Merkmalausprägungen aufeinander. Dies trifft insbesondere bei der Abbildung von Wissen über PZL und deren Lösungsräume zu. Es besteht die Notwendigkeit, diese Fälle durch interne Beziehungen (Fall II, \rightarrow 7.2) zwischen den Elementen verschiedener Merkmalräume zu realisieren – in Form von Relationen. Die Grundlagen und Annahmen der Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2 bleiben dabei in ihrer Gültigkeit unbenommen.

Stehen verschiedene Merkmale eines Merkmalträgers nicht in einer internen Beziehung, so können ihre Ausprägungen als unabhängig voneinander betrachtet werden. Der durch die Ausprägungen gebildete Unterraum des Merkmalraums ist aus mengentheoretischer Sicht dann das kartesische Produkt der Ausprägungsmengen ($\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 \times \dots \times \mathcal{A}_n$). Grafisch kann dieser Raum durch ein Rechteck (bzw. n -dimensionalen Quader) visualisiert werden (\rightarrow Abbildung 7-3). Der so aufgespannte Raum ist der größtmögliche zwischen den beteiligten Ausprägungsmengen, da er jede mögliche Kombination der Elemente der verschiedenen Mengen enthält. Existiert hingegen eine interne Beziehung zwischen Elementen verschiedener Ausprägungsmengen, wird dieser Raum eingeschränkt (\rightarrow Abbildung 7-3). Die *Relation* \mathcal{R} stellt damit eine Teilmenge des kartesischen Produkts dar: $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 \times \dots \times \mathcal{A}_n$. Diese Teilmenge repräsentiert zwar einen Unterraum des allgemeinen Merkmalraums, wird im Folgenden jedoch auch als Merkmalraum bezeichnet.

Im Sinne der Konzepterstellung muss die Relation eine konkrete Verbindung (z. B. Abhängigkeit) zwischen Merkmalen herstellen und repräsentieren sowie in diesem Zuge Informationen über diese Abbildung enthalten und ausdrücken (Anforderung Ia). Die Herausforderung bei der Repräsentation von Beziehungen zwischen verschiedenen Merkmalen liegt vor allem in der potentiellen Verschiedenartigkeit der Merkmalausprägungen. Prinzipiell können alle denkbaren Kombinationen der Ausprägungscharakteristika Skala (Niveau, D), Ausprägungsaussage und Aussageziel auftreten. Diese mögliche Heterogenität muss sowohl im zwei- als auch im n -dimensionalen³⁹ Fall repräsentiert und verarbeitet werden. Abbildung 7-6 gibt einen Überblick der Gestaltungsmöglichkeiten des Merkmalraums durch Relationen und führt die dabei relevanten Einflussfaktoren auf. Die beteiligten Skalen bestimmen durch ihr jeweiliges Niveau und die jeweilige D die grundsätzliche Struktur und die Gestaltungsmöglichkeiten des Merkmalraums und damit auch des durch die Relation(en) beschriebenen Unterraums (z. B. Lösungsraum der PZL). Der Verständlichkeit und Darstellbarkeit geschuldet, werden in den folgenden Abbildungen beispielhaft Skalen m.i.O. verwendet, da eine Visualisierung von Skalen o.i.O. unter Umständen irreführend oder unzureichend sein kann.

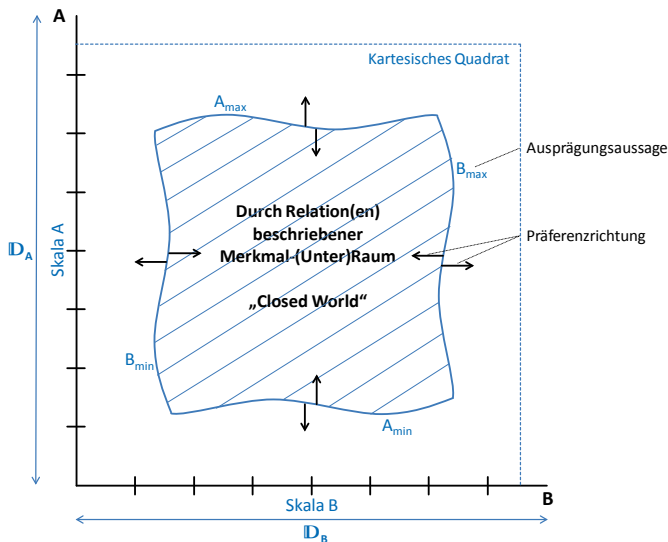


Abbildung 7-6: Einflussfaktoren bei der Gestaltung des Merkmalraums durch Relationen

Entscheidend für die äußeren Grenzen des umspannten Unterraums sind der Umfang der Ausprägung und die Art ihrer Ausprägungsaussage. Dabei legt die Ausprägungsaussage die jeweilige äußere Grenze fest: Minimalwert (Untergrenze) und Maximalwert (Obergrenze). Bei Skalen o.i.O. werden die Grenzen allein vom Umfang der Nominalwerte bestimmt (\rightarrow 7.2.1). Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Grenzen in Relationen abhängig von dem/den anderen in der Relation beteiligten Merkmal(en) sind. Bsp.: $A_{\max} = f_1(B)$, $A_{\min} = f_2(B)$, damit gilt für die Werte im durch die Relation beschriebenen Merkmalunterraum $f_1(B) \leq A \leq f_2(B)$. Die Bildung der Grenzen durch die Ausprägung mit ihrer jeweiligen Ausprägungsaussage entspricht

³⁹ Obwohl vor allem im Hinblick auf eine möglichst mächtige, generische Lösung grundsätzlich der n -dimensionale Fall angenommen wird, werden sämtliche Visualisierungen im Folgenden vereinfacht auf die 2-dimensionale Darstellung beschränkt.

dem *Closed-World-Verständnis* (\rightarrow 6.4). Der Merkmalraum und damit alle einbezogenen, gültigen Werte sind durch die äußeren Grenzen explizit spezifiziert. Über alle anderen Werte kann lediglich gesagt werden, dass sie nicht zu diesem Raum gehören.

Die in Abbildung 7-6 aufgeführte Präferenzrichtung trägt nicht zur Merkmalraumgestaltung selbst bei. Sie ist vom Aussageziel der jeweiligen Ausprägung abhängig (\rightarrow 7.2.2) und eher für die spätere Verarbeitung relevant als für die Repräsentation.

Bei der Bildung des Merkmalraums müssen nicht alle Grenzen durch Relationen betroffen sein. Es können verschiedene Mischformen auftreten. So ist es möglich, dass Teile des Raums gar nicht begrenzt werden oder auch statische Grenzen existieren, die jedoch völlig unabhängig von/vom anderen Merkmal(en) sind. Dies hat oft praktische Relevanz, wie Kapitel 9 zeigt, und wird durch die Verwendung von Semi-Intervallen (\rightarrow 7.2.1) ermöglicht.

Neben den Merkmalen und ihren Ausprägungen, sind auch die Relationen Informationsträger. Die von ihnen abgebildeten Informationen sind ebenfalls für die Repräsentation und für die Verarbeitung der Merkmalräume relevant und werden durch die folgenden Charakteristika repräsentiert:

- *Beteiligte Relationsteilnehmer*: Die an der Relation beteiligten Merkmale bzw. die beteiligten Ausprägungen (Abbildung 7-6: A_{\min} , A_{\max} , B_{\min} , B_{\max}).
- *Relationsinhalt*: Die Abbildungsvorschrift zwischen den Relationsteilnehmern. Der Relationsinhalt prägt dabei maßgeblich den Umfang des durch die Relation beschriebenen Merkmalraums (schraffierter Raum in Abbildung 7-6).
- *Richtung der Relationswirkung*: Die Richtung der Auswirkung des Relationsinhalts. Damit kann eine rein omnidirektionale bzw. symmetrische Interpretation erweitert werden, z. B. um bewusst kausale Beziehungen auszudrücken oder die Abarbeitung zu steuern.

Im Rahmen der Konzepterstellung werden zwei Relationstypen unterschieden, mit denen die meisten praktischen Aufgabenstellungen abgedeckt werden können.

Extensionale⁴⁰ Relationen (\mathcal{R}_e): Eine explizite Auflistung der Abbildung von Mengenelementen auf Mengenelemente ist sinnvoll in Fällen mit überschaubaren Mengeninhalten. Mit diesem Relationstyp lassen sich vor allem kombinatorische Abhängigkeiten und Wissen in der Form von Regeln („wenn...dann...“) abbilden. Die Möglichkeit der Abbildung umfasst alle Skalenniveaus, und besonders qualitative Skalen sowie nichtstetige quantitative Zusammenhänge (z. B. Treppenfunktionen oder durch Stützpunkte beschriebene Abbildungen) lassen sich mit Hilfe von \mathcal{R}_e sehr gut beschreiben und behandeln. Dies ist vor allem bei nur sehr aufwändig beschreibbaren mathematischen oder heuristischen Zusammenhängen nützlich.

Der Relationsinhalt lässt sich am einfachsten an Hand einer Matrix beschreiben. Abbildung 7-7 zeigt im rechten Teil durch \mathcal{R}_e gebildete Merkmalräume in den Dimensionen zweier Merkmale A und B. Der rot schraffierte Merkmalraum (I) wird dabei durch die Kombination der Ausprägungen A_{\min} , A_{\max} , B_{\min} , B_{\max} gebildet. Dies entspricht im linken Teil der Abbildung der Zeile mit der Indexnummer 1⁴¹. Markant an \mathcal{R}_e ist, dass diese nicht nur den einen⁴², sondern mehrere Merkmalräume beschreiben. Diese Räume entsprechen jeweils Zeilen in der abgebildeten Matrix und sind logisch disjunktiv (\cup) zueinander. Die Mächtigkeit der Matrix ist abhängig von

⁴⁰ Der Begriff ist hierbei angelehnt an die extensionale Darstellung von Mengen und extensionale Constraints (vgl. [Bri99]).

⁴¹ Bei Beteiligung von Merkmalen mit Skalen o.i.O. wird von diesen jeweils nur eine Spalte belegt (Nominalwert).

⁴² In solchen Fällen läge keine echte Abhängigkeit vor und die Abbildung durch eine Relation wäre überflüssig.

der Anzahl der beteiligten Merkmale (Spaltenzahl) und der abzubildenden Merkmalräume (Zeilenzahl). Sollen die Merkmalräume bei Skalen m.i.O. durch die Relation nur einseitig begrenzt werden, so fehlt die entsprechende Spalte der Matrix. Ebenso ist die Verwendung des „*-Operators für Zellenwerte zulässig. Im Sinne der *Closed-World* wird der abzubildende Merkmalraum jeweils nur durch die in der Relation (Matrix) explizit spezifizierten Werte aufgespannt. Eine implizite Einbeziehung außerhalb liegender Werte (z. B. durch Interpolation zwischen den Aufspannpunkten) findet nicht statt.

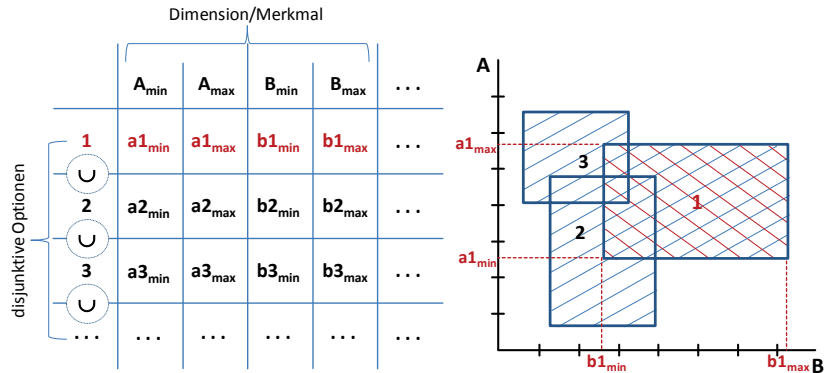


Abbildung 7-7: Begrenzung des Merkmalraums durch extensionale Relation(en)

Bei der Verarbeitung der durch die Relation abgebildeten Merkmalräume kann unterschieden werden zwischen einer expliziten (jeder Merkmalraum wird einzeln bewertet → z. B. rot schraffierter Raum 1) und einer impliziten (zusammengesetzter Merkmalraum wird bewertet → blau schraffierter Raum) Interpretation. Beide Möglichkeiten können fallabhängig praxisrelevant und sinnvoll sein. Abschnitt 7.5.2 führt hierzu weitergehend aus.

Während die Zeilen disjunktiv zueinander verstanden werden, gibt es spaltenweise ein grundsätzlich logisch konjunktives (\cap) Verständnis. In einer omnidirektionalen Interpretation der Relation stellen die Werte einer Zeile damit eine notwendig zusammenhängende Kombination dar, die den jeweiligen Merkmalraum eingrenzt. Dieses Verständnis kann durch Spezifizierung der Wirkungsrichtung der Relation hin zu einer klassischen regelbasierten Interpretation⁴³ (→ 6.3.5) mit flexiblen Anteilen von Prämisse und Konklusion gewandelt werden. Näheres dazu im Rahmen der Wissensverarbeitung (→ 7.5.2).

Funktionale Relationen (R_f): Dieser Relationstyp bietet sich an, wenn sehr große (meist sogar unendliche) Mengeninhalte ausgedrückt werden sollen. Dabei können funktionale Zusammenhänge, die sich beispielsweise in symbolischen Abbildungsvorschriften (z. B. Gleichungen) wiederfinden, repräsentiert werden. Die Mengenelemente der durch die Relation verkörperten Merkmalräume werden dabei implizit adressiert. R_f eignen sich damit vor allem für Fälle, in denen gut beschreibbare Zusammenhänge (z. B. physikalische oder mechanische Grundlagen) oder Modelle vorliegen und als Wissen beschrieben werden sollen. Für die

⁴³ Beispielsweise kann ein zusammengesetzter Ausdruck der Form „A UND (B ODER C) → D“ durch zwei disjunktive Zeilen ausgedrückt werden: 1. $A \cap B \cap * \rightarrow D$ und 2. $A \cap * \cap C \rightarrow D$. Dies setzt die entsprechende Spezifizierung der Wirkungsrichtungen voraus (→ 7.5.2).

Beschreibung von Zusammenhängen mit Relationsteilnehmern, die eine qualitative Ausprägung aufweisen (Nominal- und Ordinalskalenniveau), sind sie hingegen nicht geeignet.

Abbildung 7-8 zeigt beispielsweise, wie sich die Relation auf die Merkmalraumgestaltung auswirkt, indem eine Abhängigkeit der oberen Grenze A_{\max} von Merkmal B abgebildet wird: $A_{\max} = f(B)$. Die restlichen Begrenzungen des Merkmalraums sind von der Relation selbst nicht betroffen und sind in diesem Fall statisch (B_{\max}) oder nicht vorhanden.

Eine omnidirektionale Deutung (z. B.: $A = 3B + 1 \leftrightarrow B = (A - 1) / 3$) von R_f ist ebenso möglich und fallabhängig sinnvoll, wie eine spezifisch gerichtete. Abschnitt 7.5.2 führt weiter zu verarbeitungsrelevanten Aspekten der Wirkungsrichtung der Relationen aus.

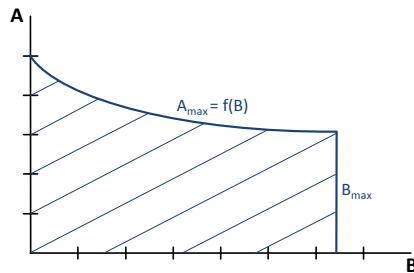


Abbildung 7-8: Begrenzung des Merkmalraums durch funktionale Relation(en)

7.2.4 Eine Hierarchie von Mengen

Für die Abbildung und Verarbeitung der durch Mengen repräsentierten Merkmalräume müssen verschiedene Mengen differenziert werden. Im Folgenden werden diese Mengen erläutert und die Zusammenhänge zwischen ihnen dargestellt.

Definitions-*menge* (\mathcal{D}): Definitorisch zur Verfügung stehende Wertemenge des Merkmals (\rightarrow 7.2.1), die alle möglichen Ausprägungswerte beschreibt. Diese werden meistens durch die Semantik des Merkmals (z. B. physikalisch begründet) vorgegeben. \mathcal{D} ist im Gegensatz zu den anderen Mengen merkmalspezifisch, jedoch anwendungsfallunspezifisch. \mathcal{D} entspricht dem Definitionsbereich.

Grundwertemenge (\mathcal{G}): Grundsätzlich verfügbare Wertemenge aus \mathcal{D} für den jeweiligen Anwendungsfall, die spezifisch festgelegt wird (Modellierung). Obwohl in der Wissensbasis statisch bleibend (gemäß Spezifizierung), wird \mathcal{G} im Rahmen der Wissensverarbeitung für die Ergebnisbildung genutzt und ggf. angepasst.

Relations-*menge* (\mathcal{R}): Durch kombinatorische oder funktionale Einschränkungen gegebene Menge. Diese Einschränkungen sind anwendungsfallspezifisch und erfolgen (z. B. durch physikalische Zwänge oder technische Machbarkeiten begründet) in der Modellierung mit Hilfe von Relationen.

Ergebnis-*menge* (\mathcal{E}): Wird im Gegensatz zu den anderen Mengen nicht explizit spezifiziert (Wissensbasis), sondern entsteht im Laufe der Wissensverarbeitung dynamisch an verschiedenen Stellen. \mathcal{E} wird lediglich als Zwischenlösung während und zum Zweck der Verarbeitung benötigt.

Die verschiedenen Mengen sind nicht unabhängig voneinander zu betrachten. Sie bedingen und beschränken sich gegenseitig bzw. bauen aufeinander auf. So lassen sich die Mengen \mathcal{G} , \mathcal{R} und \mathcal{E} in eine Hierarchie bringen, deren Ordnung aussagezielspezifisch gedeutet werden muss und sich

an der jeweiligen Präferenzrichtung orientiert. So müssen bei einer Zusicherung $E \subseteq R \subseteq G$ und bei einer Anforderung $G \subseteq R \subseteq E$ gelten. D ist aussagezielinvariant stets die größte Menge, in der sich alle anderen Mengen wiederfinden müssen. Daher steht D bei Zusicherungen hierarchisch an der Spitze der Präferenzrichtung, jedoch bei Anforderungen am Ende. Abbildung 7-9 zeigt die Auswirkungen der Hierarchie und die sich ergebenden Beziehungen zwischen den Mengen in Abhängigkeit vom Aussageziel.

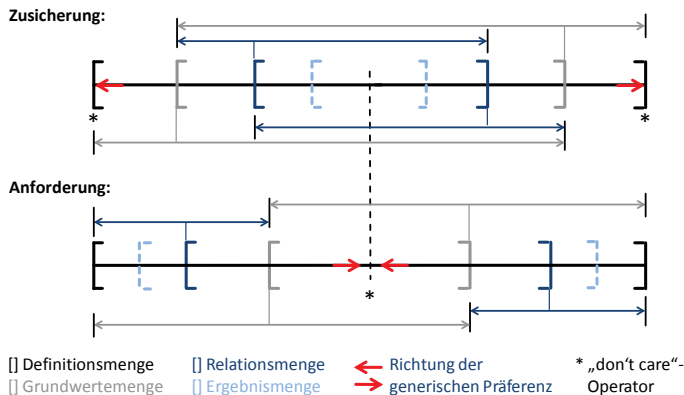


Abbildung 7-9: Hierarchische Ordnung und Beschränkungen verschiedener Mengen

Die farbigen Pfeile deuten die entsprechenden Grenzen an, in denen sich die jeweilige Menge bewegen darf. Dabei ist zu erkennen, dass sich die Mengen gegenseitig beschränken, da ihre dynamischen Außengrenzen (außer bei D) an die Grenzen anderer Mengen gekoppelt sind. Zudem sind die Außengrenzen durch die jeweils gegenüberliegende Grenze beschränkt (Min \leq Max-Constraint \rightarrow 7.2.1). Für E wurden die Grenzen nicht explizit dargestellt. Ihre Bildung ist jedoch analog zu den anderen Mengen in Verbindung mit der jeweils hierarchischen Stellung von E abzuleiten. Die dargestellten Beziehungen zwischen den Grenzen der Mengen müssen für deren konsistente Betrachtung und Verarbeitung zwingend beachtet und ihre Einhaltung abgesichert werden.

7.2.5 Problem- und Lösungsraum

Der das PE beschreibende Problemraum und der die PZL beschreibende Lösungsraum unterliegen zwar beide uneingeschränkt den in den vorangegangenen Abschnitten getroffenen Aussagen, dennoch bestehen im Rahmen des Konzepts Betrachtungsunterschiede der genannten Räume. Im Gegensatz zum Lösungsraum enthält der Problemraum keinerlei durch Relationen geformte Anteile. D. h. Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Merkmalen werden dort nicht modelliert. Der Problemraum wird daher statisch aus den entsprechend erhobenen Spezifikationen gebildet. Diese Betrachtungsweise wird gewählt, da

- sie den Bedingungen der praktischen Anwendung gerecht wird. So ist beispielsweise die Spezifikation einer PLT-Stelle eine feste Aufstellung von Bedingungen und Anforderungen. Etwaige Interdependenzen zwischen den Merkmalen müssen bereits bei der Aufstellung der Spezifikation berücksichtigt sein. Dies soll nicht Aufgabe bei der Eignungsprüfung von PZL sein.

- dies gleichzeitig eine einfachere Modellierung und Verarbeitung (Anforderung Ie) ermöglicht. Der Problemraum muss nicht extra explizit modelliert, sondern lediglich spezifiziert werden, da er sich aus den Merkmalen der LORP ableitet. Eine gesteigerte Komplexität durch zusätzliche dynamische Anteile (Relationen) oder separate Konsistenzprüfung im Problemraum entfällt hierdurch.

Die in Abschnitt 7.1 propagierte *semantische Synchronität* zwischen PE (Problemraum) und PZL (Lösungsraum) gilt für die Modellierung und wird sichergestellt durch die Verwendung einer gleichen Merkmalbasis (LORP) für die externen Beziehungen. In realen Anwendungsfällen können Art und Menge verfügbarer Merkmale zwischen beiden Merkmalträgern durchaus abweichen. Dieser Problematik wird im Rahmen des Konzepts durch das Modellelement „**passives Merkmal**“ begegnet. Passive Merkmale unterscheiden sich von den bereits behandelten Merkmalen nur darin, dass sie nicht direkt mit der Umgebung des eigenen Merkmalträgers zusammenwirken und daher keine externen Beziehungen eingehen können. Sie haben hierdurch keinen direkten Einfluss bei der Ergebnisbildung (Analyse), sondern wirken nur indirekt über Relationen auf andere Merkmale desselben Merkmalträgers und beeinflussen somit die Synthese des Lösungsraums. Aufgrund fehlender Relationen im Problemraum, treten passive Merkmale dort nicht auf. Passive Merkmale können im Rahmen der Modellierung u. a. zum Mapping (mit Hilfe einer Relation) eingesetzt werden. Dabei werden verfügbare, jedoch nicht für den Vergleich notwendige (passive) Merkmale auf zum Vergleich notwendige Merkmale der LORP, bei denen z. B. nur ungenügend Informationen verfügbar sind, gemappt. Dies kann helfen, semantische Lücken zu überbrücken und zusätzliche Informationen nutzbar zu machen. Ein weiterer Nutzeffekt ist die Repräsentation von Eigenschaften, die nicht direkt zur Eignungsprüfung benötigt werden, jedoch für die korrekte Synthese des Lösungsraums notwendig sein können. Als mögliche Beispiele dafür lassen sich Hilfsparameter (z. B. Stoffgrößen), Kennzahlen oder vergleichbare Größen aufführen. Somit können Beziehungen zwischen Merkmalen einfacher oder ggf. auch umfänglicher ausgedrückt werden. Zudem ist die Einbringung zusätzlicher Bedingungen und Restriktionen (z. B. physikalische Grenzen) möglich. Passive Merkmale müssen nicht zwangsläufig als Modellelement genutzt werden. Sie können jedoch im Einzelfall die Mächtigkeit der Modellierung erhöhen und eine bessere Annäherung an den realen Anwendungsfall ermöglichen.

Als Beispiel kann die Turn-Down-Ratio (T_D) gesehen werden, eine Verhältniszahl zwischen minimalem und maximalem Durchfluss bei Durchflussmessern. Wird diese als passives Merkmal modelliert, ist es möglich, PZL-spezifische Bedingungen bzw. Grenzen (z. B. $T_{Dmax} = 1:10$) darzustellen (in Relation mit beiden Durchflusswerten), ohne für dieses Merkmal eine konkrete Anforderungsspezifikation abzufordern. Eine PLT-Stelle fordert für gewöhnlich kein explizites T_D an.

7.3 Modellierung

Inhalt dieses Abschnitts ist die Entwicklung einer Modellierung als Basis für die Repräsentation und die Verarbeitung der benötigten Wissensinhalte. Nach der Vorstellung eines Rahmenmodells werden die daraus resultierenden Modellebenen hinsichtlich Inhalt und Bedeutung erläutert sowie eingeordnet. Die Formalisierung der modellierten Wissensinhalte kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Sowohl Durchführung als auch Art der Formalisierung liegen nicht im Fokus des Konzepts und werden daher erst in Kapitel 8 im Zuge der Implementierung angesprochen.

7.3.1 Rahmenmodell

Bereits die Entwicklung des Grundkonzepts (→ 4.1) und die Erhebung definierter Anforderungen an das Konzept (→ 4.3) machen den wissensintensiven Charakter, sowohl von Aufgabenstellung als auch Lösungsansatz, deutlich. Für die Bewältigung der Herausforderungen ist ein Zusammenwirken verschiedenster Formen und Arten von Wissen notwendig. Um die benötigten Inhalte geeignet abbilden und später verarbeiten zu können, müssen sich diese geeignet im zu entwickelnden Modell des Konzepts wiederfinden.

Aus einer anwendungsorientierten Perspektive kann dabei grundsätzlich zwischen anwendungsfallunabhängigen und -spezifischen Wissensanteilen unterschieden werden. Anwendungsfallunabhängige Anteile bilden dabei die strukturelle und terminologische Grundlage der Wissensbasis, definieren die Semantik und ermöglichen die Anwendung von prozessualem Verarbeitungswissen. Der dieses Wissen enthaltende Modellteil unterliegt wenigen oder gar keinen Änderungen bei der Nutzung des Modells. Um den Detailanforderungen konkreter Aufgabenstellungen gerecht zu werden und deren Besonderheiten geeignet abzubilden, sind wiederum anwendungsfallspezifische Wissensanteile notwendig. Aufgrund der möglichen Vielfalt bei der Problemausgestaltung besteht hierbei der Bedarf, solche Wissensinhalte (auch Fakten-, Aufgaben- oder Problemwissen, vgl. [GFF90], [ASS97]) flexibel hinzufügen oder modifizieren zu können.

Wissensbasierte Systeme (WBS) bieten einen geeigneten Rahmen, um die beschriebenen Wissensanteile möglichst getrennt von ihrer Verarbeitung zu behandeln. Dies konstatiert Abschnitt 4.1 und definiert die wissensbasierte Rechnerunterstützung als einen Eckpfeiler des Grundkonzepts. Insofern liegt es nahe, sich an den Konzepten und prinzipiellen Komponenten von WBS (→ 6.2) zu orientieren und diese bei der Entwicklung der Modellierung zu berücksichtigen.

Abbildung 7-10 zeigt im Ergebnis das Rahmenmodell des Konzepts. Charakteristisch ist dabei die Gliederung des Modells in drei verschiedene Abstraktionsebenen. Die Metaebene enthält das **Metamodell** und stellt den Kern der Modellierung dar. Hier werden die grundlegenden Modellelemente und deren allgemeine Zusammenhänge definiert. In der Klassenebene befinden sich zwei unterscheidbare Modellteile, die auf der Grundlage der Metaebene aufbauen. Beide beinhalten jeweils eine Sammlung wohldefinierter Klassen und deren Semantik: das **Merkmallexikon** die Merkmale und die **PZL-Bibliothek** die Funktionen und denen zugeordnete PZL. Die Instanzenebene enthält schließlich die für die jeweilige Problemstellung nutzbare, individuelle **Wissensbasis**⁴⁴, welche auf der Grundlage der Metaebene und den Modellteilen der Klassenebene gebildet wird. Der Zugriff auf das Modell von außen (Interaktion mit den jenseits der Modellgrenzen befindlichen Akteuren, Experte und Anwender) kann auf Klassen- und Instanzenebene erfolgen, wie Abbildung 7-10 darstellt. Das Zusammenspiel zwischen den Modellebenen erfolgt im Sinne eines „Baukasten-Prinzips“. In der Metaebene werden die grundsätzliche Struktur der Bausteine sowie ihr Zusammenwirken prinzipiell beschrieben („Grundsätze und Regeln der Konstruktion“). In der Klassenebene werden vordefinierte Bausteine erstellt („Baukasten“). In der Instanzenebene werden aus diesen Bausteinen schließlich individuelle Konstruktionen aufgebaut („Bauwerk“).

⁴⁴ Dem grundsätzlichen Gedanken der WBS nach, stellen alle Wissensanteile in ihrer Gesamtheit die Wissensbasis dar. Ohne diesem Verständnis zu widersprechen, wird im hier Folgenden „Wissensbasis“ lediglich für die tatsächlich für den konkreten Anwendungsfall nutzbaren Wissensinhalte auf Instanzenebene verwendet.

Abbildung 7-10 macht die bereits erwähnte Trennung in anwendungsfallunabhängige und -spezifische Modellteile deutlich. Diese Trennung ist ein Tribut an das „reusability-usability trade off-problem“ (→ 4.3.1). Die Metaebene und partiell auch die Klassenebene enthalten allgemeingültiges, generisches Wissen und stellen damit die domänen- und anwendungsfallübergreifende Verwendbarkeit sicher (Anforderung If). Der anwendungsfallsspezifische Modellteil der Instanzenebene, und partiell der Klassenebene, ermöglicht sowohl die Abbildung von als auch die flexible Anpassung an Anwendungsfallspezifika. Dieser Teil des Modells sichert die konkrete Anwendbarkeit und die Anpassung an veränderte Bedingungen und Inhalte durch den Zugang von außen (Anforderung IIa). Durch die Aufteilung in drei Ebenen enthält das Rahmenmodell alle notwendigen Abstraktionsgrade, um dem Spektrum zwischen Wiederverwendbarkeit und Anwendbarkeit gerecht zu werden. Die einzelnen Ebenen, ihre Bedeutung und Inhalte sowie die Zusammenhänge zwischen den Ebenen und die Schnittstelle nach außen werden in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

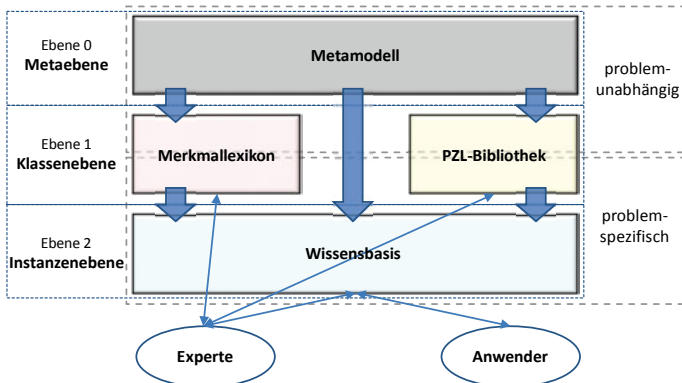


Abbildung 7-10: Rahmenmodell mit drei Modellebenen

Bei der folgenden Modellerstellung im Rahmen des vorliegenden Konzepts sind, der angestrebten Einfachheit (Anforderung Ie) geschuldet, die Modellcharakteristika Verkürzung und Pragmatismus (vgl. [DRE91]) ausschlaggebend. Die Erstellung eines umfassenden, vollständigen Modells (z. B. allgemeines Merkmalmodell) ist hier nicht zielführend und somit nicht Inhalt dieser Arbeit. Entsprechende Beschränkungen auf das Wesentliche werden an den jeweiligen Stellen der folgenden Abschnitte angesprochen.

Komplexe, praktische Problemstellungen, wie die hier vorliegende, erfordern die Kombination verschiedenster Möglichkeiten zur Abbildung und Verarbeitung von Wissen (→ 6.4). In logischer Konsequenz manifestieren sich im Konzept und damit auch im Modell verschiedene Wissensrepräsentationen bzw. deren Prinzipien. In Fortführung der Einschätzung von Abschnitt 6.4 kann für das Konzept das Zusammenspiel verschiedener Repräsentationsmechanismen konkretisiert werden. Ontologische Prinzipien, d. h. die Bildung eines Begriffssystems und die Beschreibung der Zusammenhänge für die Handhabung dieses Begriffssystems, finden sich im Metamodell wieder und werden durch dieses repräsentiert. Für die Beschreibung und datentechnische Implementierung der einzelnen Modellelemente dienen auf allen drei Abstraktionsebenen Mechanismen des OO-Ansatzes. Die Aufteilung in anwendungsfallsspezifische und -unabhängige Wissensanteile folgt dem Konzept von ABox und TBox aus der Beschreibungslogik. Die graphbasierte Repräsentation und Visualisierung lehnt sich an den Gedanken der Semantischen

Netze an und wird in Abschnitt 7.3.4 näher erläutert. Regel- aber auch constraintbasierte Abbildung und Mechanismen prägen sowohl Teile des theoretischen Fundamentes (→ 7.2) als auch die Modellierung und insbesondere die Wissensverarbeitung (→ 7.5).

7.3.2 Metaebene

Die Metaebene enthält als abstrakteste Ebene des Rahmenmodells das *Metamodell*. Dieses spiegelt die grundsätzlichen konzeptionellen Vorstellungen wieder, indem es die notwendigen Entitäten, deren Eigenschaften sowie die Beziehungen zwischen den Entitäten definiert. Die im Metamodell stattfindenden Modellfestlegungen wirken sich auf alle anderen Modellebenen aus und sind auf der Abstraktionsebene von Normen und Standards (→ 5.2) einzuordnen.

Abbildung 7-11 gibt einen Überblick über das Metamodell und die enthaltenen *Entitäten*. Zudem wird dargestellt, welche Entitäten für die Modellteile der anderen Modellebenen ausschlaggebend sind und in diesen Ebenen weiter klassifiziert oder spezifiziert werden (die farbliche Kennzeichnung erfolgt dabei in Anlehnung an Abbildung 7-10). Die geringe Anzahl der Modellelemente ist vor allem der angestrebten Einfachheit und Beschränkung auf das Sinnvolle und unbedingt Notwendige geschuldet (→ Anforderung 1e). Auf die Darstellung untergeordneter Entitäten (z. B. verschiedene Relationstypen) und weiterer Detaillierungen wird dabei aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

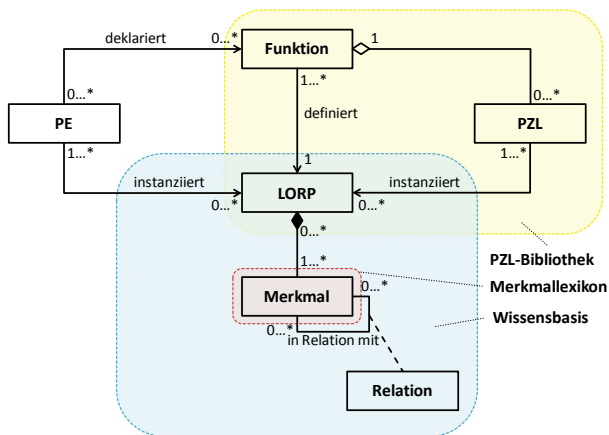


Abbildung 7-11: Das Metamodell

Die dargestellten Entitäten wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten 7.1 und 7.2 aufgeführt und erläutert, daher wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Beschreibung ihrer Bedeutung verzichtet. Der Fokus liegt viel mehr auf ihren Eigenschaften, die in der Form von *Attributen* ebenfalls tragende Elemente des Metamodells sind. Attribute haben aus objekt-orientierter Sicht Objektcharakter. Sie können einfache Werte (z. B. Symbol, Name) und durch Kapselung weiterer Inhalte durchaus auch komplexere Strukturen (z. B. Werteliste) darstellen. Das Spektrum der Attributinhalte reicht von formalisierten bis hin zu, meist natürlichsprachig ausgedrückten, informellen Inhalten.

Im Sinne der Modellverkürzung wird die Modellierung auf die hier notwendigen Attribute beschränkt. Weitere Attribute, wie sie beispielsweise in etablierten Standards (→ 5.2) vorgeschlagen werden, können bei Bedarf ergänzt werden. Solche Erweiterungen sind für das

Metamodell prinzipiell zulässig und vergrößern ggf. dessen Ausdrucksstärke. Orientierung für die Einordnung der Attribute gibt die in Abschnitt 5.3.2 aufgeführte Systematik in Anlehnung an die [DIN EN 61360]. Die dort beschriebene Kategorie der administrativen Attribute kann im Rahmen spezifischer Umsetzungen, Verwaltung und Workflow unterstützend sein. Für das Ziel des vorliegenden Konzepts sind diese Attribute jedoch nicht wesentlich und werden daher nicht in die Erstellung des Metamodells einbezogen. Ebenso werden die relationalen Attribute nicht weiter betrachtet, da der Schwerpunkt hier nicht in der Klassifikation bzw. Klassifizierung von Modellelementen gesehen wird. Entscheidend ist hingegen die Identifizierung der Modellelemente, um ihre jeweilige Eineindeutigkeit abzusichern. Die dafür ausschlaggebende Kennung (ID) ermöglicht die sprachunabhängige Identifizierung der Entitäten. Es bietet sich die Nutzung standardisierter Kennzeichnungssysteme (z. B. [ISO/IEC 11179], [ISO 13584-26] oder im Rahmen des World Wide Web in Form von *URI* [BER94[@]]) und/oder die Übernahme bereits existierender Kennungen für Modellelemente aus standardisierten Systematiken (→ 5.2) an. In solchen Fällen kann die Kennung auch eine Semantik-Referenz darstellen. Eine zentrale Rolle bei der Erstellung des Metamodells haben die semantischen und die, vor allem verarbeitungsrelevanten, Werteattribute. Diese werden im Folgenden kurz anhand der zugehörigen Entitäten aufgeführt. In Tabelle 7-1 werden die Attribute jeweils in der ersten Spalte aufgeführt (S: semantische Attribute, W: Werteattribute). Die zweite Spalte führt beispielhaft prinzipielle Möglichkeiten der Attributinhalt auf.

Tabelle 7-1: Attribute der Modellelemente

PE	Bezeichnung (S)	PLT-Kennzeichnung, Anlagenbezeichnung
	Erklärung (S)	Beschreibung, Abbildung
	Referenz (S)	PLT-Stellenummer, Anlagen(teil)kennung (z. B. nach [DIN 6779-13], [DIN EN 81346])
Funktion PZL	Bezeichnung (S)	Name
	Erklärung (S)	Beschreibung, Definition, Synonym, Abbildung
	Referenz (S)	Klassifikationssysteme, etablierte Kategorisierung und Klassifikationen aus der Fachliteratur, andere Quellen (→ 3.1)
LORP	Erklärung (S)	Beschreibung, Kontext und Ursprung der LORP
	Referenz (S)	Urheber (z. B. Expertengremium), Quelle
Merkmal	Bezeichnung (S)	Name
	Erklärung_Merkmal (S)	Beschreibung, Definition, Synonym, Abbildung
	Referenz (S)	standardisierte Systematiken (→ 5.2), Fachliteratur, andere Quellen (→ 3.1)
	Skalenniveau (W)	Nominal, Ordinal, Rational, Intervall
	Definitionsbereich (W)	z. B. „0 - ∞“
	Mögliche Einheiten (W)	z. B. „m, dm, cm, mm“
	Aussageziel (W)	Zusicherung, Anforderung
	Passive Verwendung	ja, nein
	Ausprägung(swert)	z. B. „100“
	Erklärung_Wert (S)	Kommentar, Erklärung zu Kontext/Grund/Spezifikum des Wertes
	Ausprägungsaussage (W)	Minimalwert, Maximalwert, Nominalwert
	Einheit (W)	z. B. „°C“
Relation	Bezeichnung (S)	Name
	Erklärung (S)	Beschreibung, Definition, Abbildung
	Referenz (S)	Fachliteratur, andere Quellen (→ 3.1)
	Relationstyp (S)	extensional, funktional
	Relationsteilnehmer (W)	z. B. „A _{Min} - B _{Max} “
	Wirkungsrichtung (W)	in, out, inout
	Inhalt (W)	z. B. „A = B ⁺ C“

Die Attribute stellen grundsätzliche Entitätseigenschaften dar, die im Metamodell abzubilden sind. Dabei können sie auch eine abstrakte, subsumierende Eigenschaft darstellen (z. B. Attribut

„Erklärung“), welche in einer konkreten Umsetzung durch verschiedene einzelne Attribute implementiert werden kann. Zu beachten ist, dass die Attribute durch das Metamodell lediglich zur Verfügung gestellt werden. Die inhaltliche Spezifizierung erfolgt erst auf Klassen- und Instanzebene. Rein implementierungsrelevante Attribute werden aufgrund des konzeptionellen und generischen Charakters des Metamodells hier nicht betrachtet.

Wie bereits erwähnt, sind die einzelnen Attribute für die Ebenen der Klassen und Instanzen unterschiedlich relevant. Während z. B. die Merkmalattribute Definitionsbereich, mögliche Einheiten und Skalenniveau auf Klassenebene die Merkmalklasse charakterisieren und damit auch zu dessen Semantik beitragen, beziehen sich die restlichen Werteattribute hauptsächlich auf die Ausprägungen des Merkmals und werden erst auf Instanzebene spezifiziert. Semantische Attribute wie „Erklärung_Wert“ können die bereits auf Klassenebene spezifizierten Vertreter auf Instanzebene mit anwendungsfallspezifischen Informationen ergänzen. Eine Ausnahme machen hier die Attribute der Relation. Da das Konzept keine Klassenbildung für diese Entität vorsieht, sind hier alle Attribute lediglich für die Instanzebene von Relevanz und werden erst dort für den konkreten Anwendungsfall spezifiziert.

Trotz der Vereinfachung und Beschränkung des Metamodells auf die notwendigen Entitäten und deren Eigenschaften können damit die in Abschnitt 7.2 formulierten Randbedingungen berücksichtigt und erfüllt werden. So bietet das Metamodell die explizite Abbildungsmöglichkeit unterschiedlicher Merkmalskalierungen sowie Aussageziele bei Merkmalausprägungen und darüber hinaus die Fähigkeit, verschiedenartige Relationen zwischen den Merkmalen abzubilden. Das bietet Möglichkeiten, die derzeit mit keinem der etablierten Klassifikationssysteme (→ 5.2) gegeben sind. Das Metamodell legt ausdrücklich nicht die implementierungs- und datentechnische Ausführung und die Detaillierung einer Umsetzung fest. Diesbezügliche Freiheitsgrade bleiben somit erhalten (beispielsweise können Attribute von Entitäten als reine Klassenattribute, aber auch als Klassen selbst informationstechnisch repräsentiert werden).

7.3.3 Klassenebene

Die Klassenebene nutzt die in der Metaebene vorgegebenen Modellierungsmöglichkeiten und definiert feste Klassen und Zuordnungen aus den verfügbaren Modellelementen für die spätere Nutzung auf Instanzebene. Die bewusste Trennung beider enthaltenen Modellteile, *Merkmallexikon* und *PZL-Bibliothek*, dient vor allem der modularen und damit möglichst flexiblen Nutzung und Wiederverwendbarkeit der in ihnen beschriebenen Klassen. Ein ähnliches Verständnis dieser Trennung findet sich auch in der Grundstruktur nahezu aller etablierten Klassifikationssysteme wieder, wie [HEE05] zeigt. Die dort propagierte Unterscheidung von Merkmalbeschreibung und Klassenhierarchie zur Produktklassifizierung wird u. a. auch von [AHR10] als eines der Grundprinzipien von Klassifikationssystemen gesehen. Auch wenn die Klassifizierung von Produkten bzw. TR nicht Inhalt des Konzepts ist, lässt sich die Analogie abstrakt herstellen, da in der PZL-Bibliothek ebenfalls Klassen von Merkmalträgertypen abgebildet werden, während im Merkmallexikon Klassen von Merkmalen definiert werden.

Die Klassenebene kann in ihren beiden Modellteilen sowohl anwendungsfallunabhängiges als auch -spezifisches Wissen abbilden, während der Übergang dabei meist fließend und interpretationsabhängig ist. Die Definition von PZL und Funktionen im Rahmen der PZL-Bibliothek ist tendenziell anwendungsfall- bzw. zumindest stark domänenspezifisch. Hier schlägt sich das Wissen von Experten eines abgrenzbaren Bereichs, z. B. über die Semantik der zu definierenden Klassen nieder. Die Definition von Merkmalen als Bausteine zur Beschreibung von Funktionen, PZL und PE kann jedoch im Gegensatz dazu durchaus auch anwendungsfall- und

sogar domänenübergreifend genutzt werden (z. B. Definition eines Merkmals „Druck“). Diese Nutzung ist im Einzelfall stark von der Ausgestaltung der einzelnen Klassen im Merkmallexikon abhängig. Die Wissensinhalte auf Klassenebene stellen Expertenwissen (→ 4.1.2) dar und unterliegen daher einem entsprechenden gestalterischen Zugriff durch Experten, wenngleich der Aktualisierungs- und Anpassungsbedarf wesentlich geringer (da wesentlich anwendungsfall-unabhängiger) ist als auf Instanzenebene. Beide Modellteile der Klassenebene werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Merkmallexikon: Das Merkmallexikon beinhaltet eine Sammlung von *Merkmal*klassen, die nach den strukturellen Vorgaben des Metamodells (z. B. verfügbare Attribute) beschrieben werden. Es bildet damit die Grundlage für die Erfüllung von Anforderung IIIa und stellt ein Vokabular für Aussagen über Eigenschaften der PZL zur Verfügung. Die Merkmalklassen werden dafür hinsichtlich ihrer allgemeinen Semantik (z. B. Bezeichnung, Erklärung) definiert und mittels eindeutiger Kennung identifizier- und referenzierbar gemacht. Die so bereitgestellten Merkmalklassen liefern inhaltliche, syntaktische und semantische Vorgaben (z. B. Definitionsbereich, Skalenniveau) für die Ausgestaltung von Merkmalinstanzen und damit wichtige Informationen für deren Interpretation, Einordnung und Konsistenzprüfung, aber auch einen Beitrag hinsichtlich der Erklärungs- und Dokumentationsfähigkeit. Ähnlich zu Systematiken wie [DIN EN 61360] und [DIN 4002], kann die Beschreibung von Merkmalklassen⁴⁵ unabhängig vom Merkmalträgertyp der PZL-Bibliothek, dem sie ggf. später zugeordnet werden können, erfolgen. D. h. es gibt keine strenge Bindung von Merkmalklassen an Merkmalträgertypen (kein Sachbezug). Die eindeutige Interpretierbarkeit der Merkmale wird vorausgesetzt und hat sich in den evaluierten Beispielen (→ 9) als ausreichend erwiesen. Bei der Organisation der Merkmale im Merkmallexikon können etablierte Standards (→ 5.2) Orientierung geben, in der konkreten Umsetzung des vorliegenden Konzepts wird das Merkmallexikon jedoch bewusst flach gehalten. Es wird auf spezielle Gruppierungen oder Hierarchisierungen verzichtet, da diese Ordnungsmechanismen nicht zur Funktionalität des Konzepts und zum Erreichen der gesteckten Ziele (Erfüllung der definierten Anforderungen) beitragen.

PZL-Bibliothek: Die PZL-Bibliothek versteht sich als eine Sammlung domänenrelevanter *Funktionen* und denen jeweils zugeordneten *PZL*. Sie besitzt einen Taxonomie-ähnlichen Aufbau (vgl. Anhang A) und verkörpert Domänenwissen. Funktionen stellen in der PZL-Bibliothek die obersten Elemente dar. Damit kann es, im Gegensatz zur reinen Taxonomie, nicht nur einen „Wurzel-Knoten“ in der Ordnungsstruktur geben. Die vorhandenen Funktionen können einer, aber auch verschiedenen Domänen angehören (z. B. „Durchflussmessung“ aus der Domäne Sensorik und „Pumpen“ aus der Domäne Aktorik). Es ist somit möglich, domänenreine oder auch gemischte PZL-Bibliotheken zu erstellen. Die Funktionen sowie die PZL werden jeweils als semantisch wohldefinierte Klassen (Attribute gemäß Metamodell) angelegt und zur Verfügung gestellt. Den Funktionen sind die auswahlrelevanten Merkmale (LORP) zugeordnet. Dies geschieht mittels Referenzierung auf ausgewählte, im Merkmallexikon definierte Merkmale. Die der Funktion zugeordneten PZL erben diese Merkmale. Darüber hinaus kann eine PZL weitere charakterisierende Merkmale besitzen (beispielsweise als Teil einer LOP), welche jedoch keinen Einfluss auf die Modellierung auf Instanzenebene und den späteren Eignungsprüfungsprozess haben. Die Ordnungssystematik der PZL-Bibliothek ergibt sich somit aus den Zuordnungen der PZL zu den Funktionen und aus der ggf. hierarchischen Ordnung der PZL innerhalb der

⁴⁵ Im Gegensatz zu Merkmalmodellen z. B. von [MER11], [EPP11B], bei denen man im Merkmallexikon hier von sogenannten Merkmaltypen sprechen würde.

Funktionen. Analogien zur PZL-Bibliothek können in Standards zur Systematisierung von Gerätetypen (z. B. [IEC 61987] und eCI@ss), aber auch in Rollensystemen, wie z. B. bei CAEX (→ 7.7), gesehen werden. Organisation und Strukturierungssystematik der Elemente innerhalb der PZL-Bibliothek sind jedoch nicht ausschlaggebend für die Wirkungsweise des Konzepts und bieten daher Freiheitsgrade hinsichtlich ihrer Ausgestaltung. Als ausreichend hat sich bei der Anwendung des Konzepts eine flache Hierarchie aus Funktionen und zugeordneten PZL erwiesen. Im Gegensatz zu den stark monohierarchischen Modellen der Merkmalträgertypen mit einer starren Bindung von Merkmalen an diese (vgl. [HEE05], [MER11], [EPP11B]) ist die mehrfache Verwendung und Referenzierung von Merkmalen des Merkmallexikons zu verschiedenen Funktionen sowie PZL im Rahmen des Konzepts möglich und im Sinne einer Wiederverwendung auch gewollt. Für die notwendige Flexibilität bei der Gestaltung und Modifikation des Wissens (z. B. Änderung oder Neudefinition der LORP einer Funktion) ist eine „gegenseitige Existenzabhängigkeit“ [MER11] von Merkmalen und Merkmalträgertypen nicht förderlich. Diese würde einer angestrebten größtmöglichen Unabhängigkeit der Modellteile auf Klassenebene entgegenwirken. Die Bindung einer Merkmalklasse an eine Funktion oder eine PZL ist hier zudem nicht global und statisch im Sinne einer strengen Klassifizierung zu verstehen, wie es in den aufgeführten Modellen der Fall ist.

7.3.4 Instanzenebene

Ziel der Instanzenebene, als Ebene mit dem niedrigsten Abstraktionsgrad, ist die Bildung anwendungsfallspezifischer, individueller Modelle für die Nutzung im konkreten Anwendungsfall. Dazu wird die Wissensbasis auf Grundlage der Klassen („Bausteine“) von Merkmallexikon und PZL-Bibliothek gebildet und anwendungsfallspezifisch ausgestaltet. Die Ordnungsstruktur der Wissensbasis ergibt sich aus dem Aufbau der PZL-Bibliothek. In der Wissensbasis werden die Merkmale (LORP) der in der PZL-Bibliothek definierten PZL in ihren Ausprägungen anwendungsfallspezifisch mit Inhalten versehen sowie, sofern notwendig, mit ebenfalls individuell angelegten und spezifizierten Relationen verbunden. Die so entstehenden *Instanzenmodelle* der PZL repräsentieren individuelles Wissen über den Lösungsraum der jeweiligen PZL. Wenngleich nicht zur Wissensbasis gehörend, findet auch die konkrete Ausgestaltung des Problemraums für das PE auf Instanzenebene statt – ebenfalls auf Basis der von der Funktion definierten Merkmale (LORP), unter Beachtung der in Abschnitt 7.2.5 aufgeführten Besonderheiten. Weil auf der Instanzenebene die von der Klassenebene vorgegebene Struktur der Merkmalräume (Problem- und Lösungsraum) inhaltlich ausgestaltet wird, kann auf dieser Ebene die eigentliche Wissensverarbeitung stattfinden, indem mit konkreten Ausprägungen der beteiligten Instanzen operiert wird. Damit können individuelle Anwendungsfälle (beispielsweise eine Eignungsbewertung von PZL für eine spezifische PLT-Stelle) behandelt werden.

Die Wissensinhalte der Instanzenebene sind entsprechend ihres geringen Abstraktionsgrades stark anwendungsfallspezifisch. Sie unterliegen daher über ihre eigentliche Erstellung bzw. Spezifikation hinaus ggf. starken Veränderungen, bedingt durch Anpassungen und Modifikationen im Rahmen der Aktualisierung des Wissens, welches möglichst als Konsenswissen domänenspezifischer Expertengruppen einer ständigen Überarbeitung unterliegt (→ 4.1.2). Während die Spezifizierung des Problemraums von einem Anwender für sein individuelles Problem durch Angabe von Faktenwissen (z. B. Betriebsbedingungen an einer PLT-Stelle) durchgeführt wird, bedarf die Wissenspflege bezüglich des Lösungsraums (Wissensbasis) eines entsprechenden Experten, welcher die Instanzenmodelle der PZL erstellt bzw. modifiziert.

Die Bildung der Instanzenmodelle der Wissensbasis erfolgt durch die individuelle Ausgestaltung der auf Instanzenebene relevanten Attribute der Entitäten im Rahmen zulässiger, auf Meta- und Klassenebene festgelegter, Attributinhalt. Für das Modellelement Merkmal müssen in diesem Zuge für die Ausprägungswerte des Merkmals jeweils der Wert selbst (und damit die Grundwertemenge \mathcal{O}), ggf. mit Einheit, die Ausprägungsaussage des Wertes und ggf. weitere für die Instanz relevante Informationen („Erklärung_Wert“) spezifiziert werden. Andere Attribute wie z. B. das Skalenniveau, der Definitionsbereich oder allgemeine semantische Informationen sind bereits auf Klassenebene definiert und werden auf Instanzenebene nicht mehr verändert. Um Beziehungen zwischen den Merkmalen einer PZL auszudrücken und damit den durch die Merkmale gebildeten Lösungsraum weiter zu gestalten, können Instanzen der Entität Relation gebildet werden. Nach der Wahl des Relationstyps (\rightarrow 7.2.3) und der Festlegung weiterer Informationen in den jeweiligen semantischen Attributen gilt es, die Werteattribute der Relation jeweils für ihren individuellen Zweck auszugestalten. Dazu gehören die Spezifikation des Relationsinhalts (z. B. mathematischer Term bei funktionalen Relationen) sowie die Festlegung der Relationsteilnehmer. Relationen sind grundsätzlich Abbildungen eines oder mehrerer Wert(e) der Grundwertemenge eines Merkmals auf einen oder mehrere Wert(e) der Grundwertemenge eines anderen Merkmals. Daher muss über das in der Relation agierende Merkmal hinaus auch der konkrete Ausprägungswert bzw. eine enthaltene Wertemenge (Relationsmenge \mathcal{R}) als Relationsteilnehmer spezifiziert werden. Hier macht sich die Repräsentation der Ausprägungsmenge durch zwei Semi-Intervalle (außer bei nominalem Skalenniveau) vorteilhaft bemerkbar. Durch die so mögliche Differenzierung bei der Verknüpfung über Relationen können sich die Begrenzungen des Lösungsraums in den betroffenen Dimensionen unabhängig voneinander in Relationen befinden (\rightarrow 7.2.3). Schließlich muss die Wirkungsrichtung des jeweilig beteiligten Relationsteilnehmers spezifiziert werden. Dadurch wird festgelegt, wie und mit welchem Einfluss die beteiligten Relationsteilnehmer an der Relation teilnehmen. Die Spezifizierung der Wirkungsrichtung kann zur Repräsentation gerichteter Zusammenhänge (z. B. Kausalitätsaspekte) sowie Gewichtung und Priorisierung und darüber hinaus zur Steuerung der Verarbeitung (\rightarrow Anforderung Id) genutzt werden. Dies wird in Abschnitt 7.5.2 näher erläutert.

Abbildung 7-12 gibt eine schematische Vorstellung der durch die Spezifizierung der Merkmale der LORP und ggf. von Relationen entstehenden Instanzenmodelle für die PZL. Neben unabhängigen Merkmalen bilden sich durch modellierte Relationen zwischen Merkmalen *Netzwerke* aus. Von Netzwerken soll hier gesprochen werden, sobald ein Merkmal mit mindestens einem anderen Merkmal über eine Relation verbunden ist. Anzahl, Größe und Struktur der Netzwerke sind dabei stark von der individuellen Modellierung einer PZL abhängig. Es ist somit sowohl möglich, dass kein oder auch nur ein einziges, alle Merkmale umfassendes, Netzwerk entsteht. Mischformen zwischen beiden Extremen sind, nach Erfahrungen bei den untersuchten praktischen Anwendungsfällen (\rightarrow 9), am wahrscheinlichsten.

Der gestalterischen Freiheit bei der Modellierung der Instanzenmodelle sind im Rahmen der Konsistenzwahrung Grenzen gesetzt. Obwohl prinzipiell jedes Merkmal bzw. seine Ausprägungen mit den Ausprägungen jedes anderen Merkmals über Relationen verbunden sein können (in Abbildung 7-12 dargestellte weitere mögliche Relationen zwischen den Merkmalen A und C), gibt es auch Einschränkungen, wie Abbildung 7-12 beispielhaft veranschaulicht. So ist eine funktionale Relation mit einem Merkmal nominaler Skalierung (Merkmal B) genauso wenig sinnvoll, wie eine Relation einer Merkmalausprägung mit sich selbst (Merkmal C). Die Konsistenzwahrung muss Grundvoraussetzung für die Wissensmodellierung sein, da nur so eine

funktionierende und zu sinnvollen Ergebnissen fähige Wissensverarbeitung möglich ist. Zusätzlichen Einfluss, sowohl bei der expliziten Modellierung durch den Experten als auch bei der Verarbeitung der modellierten Inhalte, nehmen die in Abschnitt 7.2 behandelten Voraussetzungen, Festlegungen und Annahmen. Diese konzeptionell verankerten Randbedingungen betreffen beispielsweise die Einhaltung der Mengenhierarchie, die Wahrung des $\text{Min} \leq \text{Max}$ -Constraint, die generische Präferenz sowie skalenniveautypische Besonderheiten. Sie müssen sowohl im Rahmen der konsistenten Erstellung der Instanzenmodelle als auch bei deren Verarbeitung Berücksichtigung finden und können vom Experten nicht modifiziert werden. In Abbildung 7-12 sind diese Randbedingungen als implizite Constraints beispielhaft in grau dargestellt.

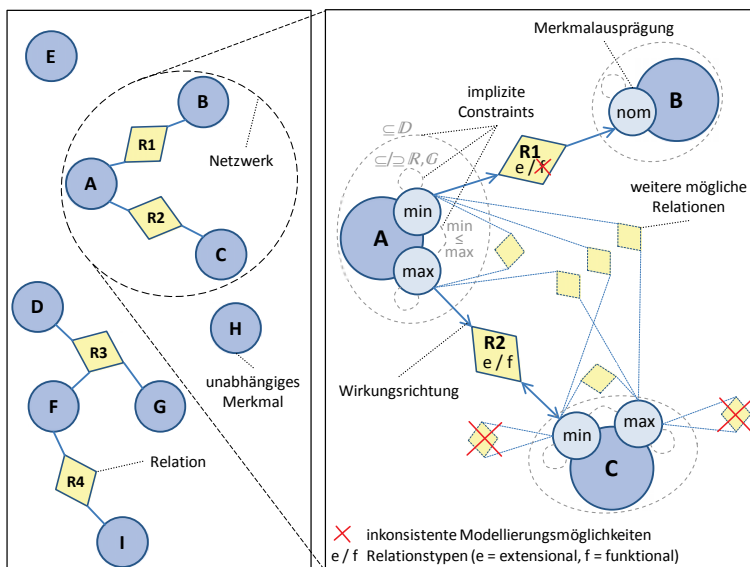


Abbildung 7-12: Instanzenmodell einer PZL (schematisch)

Die Komplexität der jeweils individuell erstellten Modelle hängt stark von der gewünschten Abbildungsgenauigkeit ab. Je höher die Anzahl einbezogener Informationen und Beziehungen, desto komplexer und aufwändiger werden Modellierung und Verarbeitung. Eine entsprechende Abwägung muss durch den Ersteller der Wissensbasis getroffen werden. Insbesondere bei umfangreichen und komplexen Instanzenmodellen ist eine geeignete Aufbereitung für den damit interagierenden Experten notwendig, um ein grundsätzliches Verständnis vom repräsentierten Wissen und dessen effiziente Erstellung und Pflege zu gewährleisten. Wie Abbildung 7-12 zeigt, kann eine visuelle Aufbereitung durch die graphische Repräsentation der Instanzenmodelle mit ihren Merkmalen und Netzwerken dazu beitragen. Vorteile einer graphischen Notation [FAY99], [SCH99] und speziell der Netzdarstellung [DRE91] zur Wissensrepräsentation werden in verschiedenen Quellen beschrieben und belegt. Im Zusammenhang mit Eigenschaften technischer Systeme geben insbesondere die in [GEM98] und [WAL12] angesprochenen Merkmal- bzw. Eigenschaftsnetzwerke hierzu Anregungen, wobei die hier im Konzept verfolgten Ziele und Möglichkeiten von diesen Quellen abweichen bzw. darüber hinausgehen, wie in Abschnitt 5.4.2 dargelegt. Bei der Modellierung muss eine geeignete technische Umsetzung den Experten sowohl

hinsichtlich einer geeigneten graphischen Visualisierung als auch bei der konsistenzkonformen, systematischen Ausgestaltung des Modells unterstützen (→ Anforderung IIa). Kapitel 8 stellt eine Implementierungslösung vor, die eine entsprechende Wissensdarstellung (ähnlich Abbildung 7-12) sowie darüber hinaus die Wissenspflege ermöglicht.

7.4 Analyse

Die in Abschnitt 7.3 dargestellte Modellierung unterstützt die strukturierte Aufbereitung und interpretierbare Abbildung des Wissens. Die auf diese Weise repräsentierte Wissensbasis bietet, ggf. unter Zuhilfenahme geeigneter Formalisierungen, eine Grundlage für die Analyse⁴⁶ des in ihr enthaltenen Wissens. Die durch eine solche Analyse gewonnenen Informationen können, über die Bereitstellung zusätzlicher Aussagen für Experten und Anwender (z. B. zur Verbesserung der Erklärungsfähigkeit) hinaus, vor allem die Wissensakquise und die -verarbeitung unterstützen. Zwei Aspekte, hinsichtlich derer die Analyse relevant sein kann, sind zum einen die Konsistenzprüfung und -sicherung sowie zum anderen die Optimierung von Repräsentation und Verarbeitung.

Mit Fokus auf diesen beiden Aspekten zielt der folgende Abschnitt vor allem darauf ab, potentielle Nutzeffekte einer Analyse aufzuzeigen. Dazu werden konkrete Zwecke und mögliche Herangehensweisen angesprochen. Ziel des Abschnitts ist dabei nicht die detaillierte Vorstellung spezifischer Methoden und Verfahren oder eine konkrete Implementierung entsprechender Mechanismen, sondern das Aufzeigen von zu berücksichtigenden Gesichtspunkten und Möglichkeiten. Viele der aufgeführten Punkte wurden bei der Erstellung des Konzepts und der Umsetzung im Rahmen entwickelter Werkzeuge (→ 8) berücksichtigt.

Im Sinne einer möglichst generischen und kontextunabhängigen Analyse bietet es sich an auf bereits existierende formale (mathematische, heuristische) Methoden und Mechanismen zurückzugreifen. Die herausforderndsten und für die Analyse interessantesten Strukturen sind die sich ggf. bildenden Netzwerke der Instanzenmodelle. Da es sich hierbei abstrakt gesehen um Graphen handelt, liegt nahe, dass eine *graphentheoretische Betrachtung* einen wichtigen Beitrag zur Charakterisierung der Wissensbasisinhalte liefern kann. So können z. B. allgemeine Charakteristika wie chromatische Zahl, Vernetzungsgrad einzelner Elemente, Vollständigkeit, Cliquenbildung und Gerichtetheit wertvolle Informationen darstellen oder zur Ableitung solcher dienen. Grundlage dafür ist eine formale Aufbereitung z. B. in Form von Adjazenz- und Inzidenzmatrix⁴⁷. Vor allem Matrizen eignen sich zur Unterstützung der Analyse, insbesondere bei graphentheoretischen Problemen, aufgrund ihrer Kompaktheit und effizienten Rechnerverarbeitbarkeit auch bei sehr komplexen Problemen [PUL02]. Zusätzlich eröffnen sich dadurch matrixbasierte Analyse- und Interpretationsverfahren wie beispielsweise die Interpretation von Zeilen- und Spaltensummen, Determinanten, Eigenwerten und Invarianten. Solche, auf formalen Grundlagen gewonnenen Ergebnisse, können sowohl ohne (kontextneutral) als auch in Verbindung zu anwendungsfallspezifischen Informationen wertvolle Rückschlüsse im Rahmen der Analyse der Wissensbasis liefern.

Analogien können hier zur Einflussanalyse bei der Entwicklung technischer Produkte hergestellt werden. Die dort stattfindende Identifikation und Charakterisierung signifikanter und relevanter Substrukturen wird ebenfalls über die Auswertung von Graphenstrukturen aus einzelnen

⁴⁶ Analyse ist im Sinne dieses Kapitels nicht zu verwechseln mit der im Rahmen der Wissensverarbeitung stattfindenden Analyse als Vergleich zwischen Problem- und Lösungsräum.

⁴⁷ Weiterführendes zu Graphentheorie und Formalisierung findet sich u. a. bei [TIT03] und [KRNO12].

technischen Komponenten und entsprechende Matrixformalisierung geführt (vgl. [PUL02], [LRZ06]). Als eine weitere Möglichkeit matrixbasierter Analysetechniken wird hier der *Analytic Network Process* (ANP) (vgl. [PEZE08]) aus dem Bereich multikriterieller Entscheidungsprobleme genannt. Mit derartigen Techniken lassen sich Einflüsse vernetzter Komponenten aufeinander analysieren und dadurch beispielsweise strukturelle Gewichtungsschwerpunkte in Netzwerken bestimmen und quantifizieren.

7.4.1 Konsistenzprüfung und -sicherung

Bereits eine geeignete graphische Aufbereitung und Visualisierung unterstützt den Wissenserwerbsprozess hinsichtlich der konsistenten Erstellung oder Pflege der Instanzenmodelle. Werden die Instanzenmodelle jedoch größer und vor allem durch Vernetzung zunehmend komplexer, können die Zusammenhänge und die sich ergebenden Konsequenzen hinsichtlich ihrer Konsistenz kaum oder gar nicht mehr vom menschlichen Experten eingeschätzt werden. Das macht die Konsistenzprüfung zu einer Hauptaufgabe der Wissenserwerbskomponente. Die Konsistenzprüfung ist eine Form der Verifikation, also formalen Überprüfung der Wissensbasis [VDI 2206], und hilft frühzeitig im Entstehungs- und Bearbeitungsprozess des modellierten Wissens, Fehler zu identifizieren und damit eine suboptimale Effizienz und/oder falsche Ergebnisse bei der Wissensverarbeitung zu vermeiden. Die Entlastung des Wissensbearbeiters und die Qualität des entstehenden Wissens steigen somit. Eine möglichst automatisierte Unterstützung zur Konsistenzprüfung kann dabei nur durch softwarebasierte Werkzeuge erreicht werden. Kapitel 8 stellt eine Werkzeugunterstützung für diesen Zweck vor.

Literatur, die sich dem Thema Konsistenzprüfung in Wissensbasen widmet, adressiert fast ausschließlich regelbasierte Systeme. So zeigen beispielsweise [NAZ89] und [GEI90] diesbezüglich Ursachen und Folgen von Inkonsistenz auf. Der Inhalt dieser Ansätze ist jedoch nur beschränkt auf das vorliegende Konzept anwendbar. Aufgrund seines hybriden Charakters sind manche bei regelbasierten Systemen relevanten Inkonsistenzen (z. B. Zyklenbildung) im vorliegenden Konzept unproblematisch, andererseits ist wiederum die Betrachtung weiterer bzw. abweichender Aspekte von Bedeutung.

Eine Konsistenzprüfung kann einen sehr komplexen Vorgang darstellen und wird auch durch etablierte Merkmalmodelle nicht abgedeckt [MER11]. Im Folgenden wird anhand wichtiger Aspekte eine Vorstellung der Konsistenzprüfung im Rahmen des hier entwickelten Konzepts gegeben. Einige Teilaspekte wurden bereits in Abbildung 7-12 als implizite Constraints skizziert. Weder ist bei der sich anschließenden Betrachtung die jeweilige Umsetzung der Konsistenzprüfung (z. B. durch Schemata, Algorithmen) von Relevanz noch wird differenziert, an welcher Stelle im Arbeitsprozess die Konsistenzprüfung stattfindet oder wie sie sich manifestiert (z. B. Warnung, automatische Berichtigung, a priori Prävention).

Das Instanzenmodell und seine Inhalte müssen sich konform zum Gesamtkonzept verhalten. Das schließt die Ebenen-übergreifende Berücksichtigung der auf Meta- und Klassenebene formulierten Bedingungen und den grundsätzlichen Randbedingungen des Konzepts (→ 7.2) ein. Diese vorwiegend auf syntaktischer Ebene stattfindende Konsistenzprüfung muss beispielsweise die Einhaltung erlaubter Wertebereiche, die eindeutige Vergabe von ID's, die Korrektheit mathematischer Ausdrücke (funktionale Relationen) und die skalenniveauadäquate Verwendung (→ 5.3.2, Tabelle 5-1) von Operatoren sicherstellen.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Einhaltung der definierten Mengenbeziehungen (→ 7.2.4) unter Berücksichtigung der jeweils individuellen Ausprägungscharakteristika wie Aussageziel und

Ausprägungsaussage. Mögliche Inkonsistenzen sind beispielsweise Abbildungslücken (d. h. die Grundwertemenge (\mathcal{G}) wird nur unvollständig durch die von den Relationen abgedeckten Wertemengen (\mathcal{R}) abgebildet) und Inkohärenz bei disjunkten Ausprägungsmengen (z. B. zwei Relationen an einem nominalen Merkmal mit der Grundwertemenge $[a, b]$ bilden jeweils nur den gegensätzlichen Ausprägungswert ab). Da u. a. mit Mengenbereichsgrenzen (Semi-Intervalle) gearbeitet wird, ist zudem die Verletzung von Monotonie und Stetigkeit innerhalb der abgebildeten Wertemengen zu prüfen.

Der Aspekt der strukturellen Konsistenz beinhaltet vor allem Prüfungen der Instanzen in ihrem Zusammenwirken. So ist die skalenniveauadaquate Verwendung von Relationstypen ebenso relevant wie die Verhinderung nicht erlaubter Kombinationen zwischen den Instanzen und Relationen auf sich selbst (Abbildung 7-12). Darüber hinaus zählt hierzu auch die Prüfung der verwendeten Richtungsbeziehungen und somit die Wahrung sowohl lokal (bezüglich einer Relation) als auch global (Richtungsbeziehungen entlang von Propagationspfaden durch die Netzwerke) konsistenter Kombinationen. Ebenfalls zu diesem Aspekt der Konsistenzprüfung gehört die Identifikation von Kreisschlüssen (Zyklen), wobei diese nicht wie bei regelbasierten Verfahren per se (vgl. [FAY99]) eine Konsistenzgefährdung darstellen. Abschnitt 7.5.2 führt zu dieser strukturellen Besonderheit aus.

Ogleich, wie aufgeführt, viele Möglichkeiten der Konsistenzprüfung bestehen, die auf Basis geeigneter Formalisierung und Methoden zufriedenstellende Ergebnisse liefern können, so hat auch die Konsistenzprüfung Grenzen. Jenseits der Möglichkeiten der Verifikation liegen beispielsweise die Fehler, die durch eine nicht problemadäquate Modellierung seitens des Wissenserstellers verursacht werden. Ebenso problematisch sind semantische Inkonsistenzen [MER11] für deren Prüfung, auch aufgrund der vorgenommenen *Closed-World-Betrachtung*, ein wesentlich über das erstellte Modell hinausgehender Kontext zur Konsistenzprüfung fehlt.

7.4.2 Optimierung

Jenseits der Konsistenzprüfung geht es beim Aspekt der Optimierung darum, bei der Analyse der Wissensbasis ableitbare Informationen zielgerichtet für die Verbesserung von Repräsentation und Verarbeitung einzusetzen. Der Übergang zwischen beiden Optimierungsteilaspekten ist dabei fließend. Die Nutzeffekte der im Folgenden aufgeführten Gesichtspunkte können sich z. B. durch Unterstützung bei der Wissenserstellung, durch Versorgung der Inferenz mit zusätzlichen Informationen oder auch im Rahmen einer vor der Inferenz stattfindenden Vorverarbeitung entfalten. Die entsprechenden Maßnahmen können optional angeboten oder automatisch durchgeführt werden. Dies wird jedoch im Einzelnen nicht differenziert. Die Hauptquellen gewinnbarer Informationen sind die spezifischen Charakteristika der im jeweiligen Instanzenmodell enthaltenen Elemente (z. B. Skalenniveau, Relationstyp), ihre konkreten Werteausprägungen und die Struktur des Instanzenmodells. Das Spektrum möglicher ableitbarer Informationen ist sehr groß und kann nachfolgend nicht erschöpfend behandelt werden.

Optimierung der Repräsentation: Optimierungsziele bei der Wissensrepräsentation sind vornehmlich die Vereinfachung und die Informationsverdichtung. Davon können sowohl die Visualisierung des Wissens (Einfachheit, Übersichtlichkeit) als auch die Speicherung (Kompaktheit) und damit auch die Verarbeitung (Performanz, Aufwand) profitieren.

Ein Gesichtspunkt ist dabei die Identifizierung redundanter Wissensanteile. Redundanz wird hierbei nicht als Inkonsistenz, sondern lediglich als suboptimale Repräsentation verstanden. Obwohl die Graphstruktur bereits eine sehr kompakte Wissensrepräsentation darstellt, da jedes

Element im Instanzenmodell nur einmal abgebildet wird, können Redundanzen beispielsweise im Bereich extensionaler Relationen auftreten. In den dort formulierten (disjunktiven) Optionen regelartiger logischer Ausdrücke (\rightarrow 7.2.3) können beispielsweise Prämissen durch mengen-technische Identität oder Subsumption redundant zueinander sein. Solche Redundanzen können durch logische Umformung (z. B. Zusammenfassung) oder Entfernung gelöst werden. Redundanzen können sich darüber hinaus auch erst dynamisch im Laufe der Wissensverarbeitung durch Operationen und Manipulationen am statischen Wissen ergeben. Diese Redundanzerscheinungen müssen dann entsprechend begleitend zur Wissensverarbeitung dynamisch identifiziert und gelöst werden.

Eine strukturelle Optimierung der Instanzenmodelle kann über die Abtrennung unabhängiger Merkmale und Konzentration auf die jeweilige Einzelbearbeitung der Netzwerke hinaus (Abbildung 7-13, Nr. 1) auch weitere Maßnahmen umfassen. Eine Auflösung von Zyklen (Nr. 2) kann unter bestimmten Voraussetzungen⁴⁸ ohne Informationsverlust durch Zusammenführung der beteiligten Relationen erfolgen, eine Entkopplung⁴⁹ von Netzwerkteilen (Nr. 3) zur Bildung kleinerer, einfacherer Netzwerke führen. Die Bildung transitiver Brücken zur Substitution von Kettensubstrukturen kann ebenfalls eine Optimierungsoption darstellen (Nr. 4), genauso wie eine hinsichtlich verfügbarer (Spezifikation des Problemraums) oder nicht verfügbarer Informationen sowie eine hinsichtlich der Verarbeitungsflexibilität optimierte Ausprägung der Wirkungsrichtungen (Nr. 5).

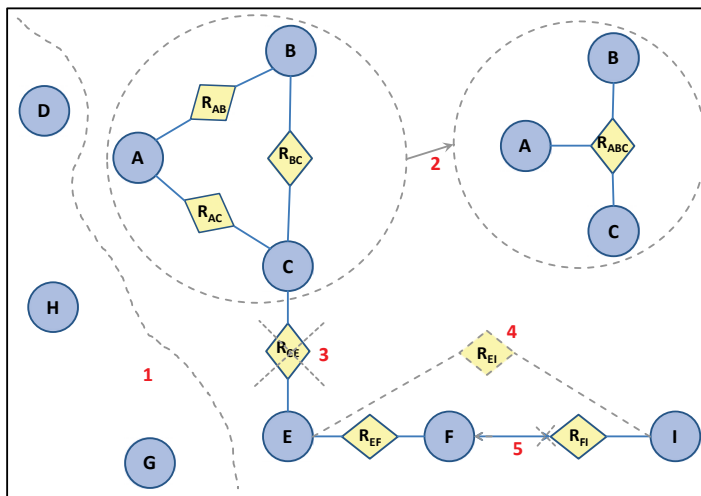


Abbildung 7-13: Möglichkeiten struktureller Optimierung

Optimierung der Verarbeitung: Im Fokus dieses Teilaspekts steht vor allem die Erzeugung einer möglichst effizienten, an Struktur und Ausprägung des jeweiligen Instanzenmodells angepassten Verarbeitungsstrategie. Dabei können sowohl vorab ermittelbare statische als auch sich im Laufe der Verarbeitung ergebende dynamische Informationen zum Tragen kommen. Sind,

⁴⁸ Hierfür bieten sich u. a. Relationstypen-reine Zyklen an (dabei werden die Inhalte mehrerer Relationen gleichen Typs zu jeweils einer neuen Relation zusammengefasst), insofern eine konsistente Zusammenführung ihrer Inhalte und Wirkungsrichtungen möglich ist.

⁴⁹ Ein mögliches, wenn auch triviales Beispiel dafür wäre, wenn R_{CE} (Abbildung 7-13) eine extensionale Relation ist und in ihrer einzigen logischen Regel die Relationswertemengen identisch mit den jeweiligen Grundwertemengen der Merkmale C und E sind.

über die vorgegebenen Wirkungsrichtungen der Relationen hinaus, mehrere alternative Wege bei der Propagation durch ein Merkmalnetz möglich, so ergibt sich Optimierungspotential. Hierbei bietet es sich bei der Inferenz an, potentiell zum Einsatz kommende Heuristiken durch die Ableitung hierfür notwendiger Informationen zu ermöglichen. Heuristiken, wie sie bei [BHS07], [GRS10] und [RuNo12] aufgeführt werden, benötigen beispielsweise Informationen über die Elemente mit den größten Ausprägungsmengen (*least-constrained*, *minimal-conflict*) und mit den größten Einschränkungen (*most-constrained*). Auch der Vernetzungsgrad von Merkmalen (*minimal-width*, *maximum-cardinality*, *maximum-degree*) kann eine wesentliche Information für die Gestaltung der Verarbeitungsstrategie darstellen und mittels geeigneter Formalisierungen (z. B. Adjazenz-, Inzidenzmatrix) oder Verfahren (z. B. ANP) abgeleitet werden. Einen weiteren relevanten Gesichtspunkt stellen mögliche Zielkonflikte (Konkurrenz)⁵⁰ zwischen verschiedenen Merkmalen oder Merkmalausprägungen, insbesondere beim Zusammenwirken im Rahmen von Relationen, dar. Zielkonflikte werden durch die spezifische Charakteristik am Konflikt beteiligter Partner hervorgerufen. Faktoren dafür sind:

- unterschiedliche Ausprägungsaussagen (Minimal-, Maximal-, Nominalwert)
- unterschiedliche Aussageziele (Zusicherung ↔ Anforderung)
- antiproportionales Verhältnis beschrieben durch den Relationsinhalt (z. B.: $A=1/B$)

Entsprechende Faktoren müssen jeweils ermittelt und die sich aus ihrem Zusammenwirken ergebenden Konsequenzen analysiert und berücksichtigt werden.

Insgesamt ist eine Analysierbarkeit der Modellierung gegeben. Insbesondere der einfache Modellcharakter begünstigt eine Formalisierung und die darauf basierende Anwendung geeigneter Methoden (→ Anforderung Ie). Die in diesem Abschnitt skizzierten Aspekte und möglichen Maßnahmen fokussieren dabei hauptsächlich auf die Analyse der Instanzenmodelle. Prinzipiell ist jedoch auch eine PZL-übergreifende Analyse auf Funktionenebene durch die geeignete Aggregation und Auswertung PZL-spezifischer Analyseergebnisse denkbar (z. B. bezüglich der Funktions-globalen Relevanz eines Merkmals oder bezüglich der Qualität der Diskriminierung verschiedener Instanzenmodelle voneinander).

7.5 Verarbeitung

Die Wissensverarbeitung (nachfolgend kurz: Verarbeitung) – oder Inferenz – dient im Allgemeinen dazu, von bestehendem (und geeignet repräsentiertem) Wissen auf neues Wissen zu schließen und trägt damit zur Generierung von Problemlösungen bei. Eingebettet in das Konzept dieser Arbeit, soll die Inferenz hier die geeignete Verarbeitung der modellierten Wissensinhalte (→ 7.3) ermöglichen, so dass daraus neues Wissen und Entscheidungen abgeleitet werden können. Konkret bedeutet dies die automatisierte Bewertung modellierter PZL hinsichtlich ihrer Eignung, bezogen auf individuelle Anwendungs- und Problemfälle. Auf diese Weise kann die Entscheidungsfindung bei der Auswahl geeigneter PZL und somit auch indirekt bei der Auswahl geeigneter TR unterstützt werden.

Wie schon bei der Wissensrepräsentation, stellt auch bei der Wissensverarbeitung der spezielle Charakter des hier notwendigen Wissens die Hauptherausforderung dar: die Multidimensionalität, die Heterogenität und die Vernetzung der abgebildeten Merkmalräume. Nach der Konzeption einer geeigneten Repräsentation in den vorangegangenen Abschnitten muss dieser

⁵⁰ Vor allem Eigenschaften technischer Systeme konkurrieren häufig miteinander. Dabei wird durch die Verbesserung einer Eigenschaft eine andere Eigenschaft verschlechtert. Zur Identifizierung und quantitativen Beurteilung solcher Zielkonflikte existieren bisher noch keine mathematisch formalisierten Methoden [Wal12].

Herausforderung auch von der Verarbeitung, unter Beachtung der in Abschnitt 7.2 beschriebenen Randbedingungen, adäquat begegnet werden. Ausgehend von diesem Ziel, stellt der vorliegende Abschnitt die Verarbeitung im Rahmen des Konzepts dieser Arbeit vor. Nach einem Überblick über die Arbeitsweise und die Besonderheiten der entwickelten Inferenzkomponente und den Ablauf der Verarbeitung werden die notwendigen Verarbeitungsschritte und ihre Mechanismen erläutert.

7.5.1 Überblick

Ausgangslage für die Verarbeitung ist das durch den Experten modellierte Wissen über die Lösungsräume von PZL auf der einen Seite sowie die Gestaltung des Problemraums im Rahmen der Problemraumspezifikation auf der anderen Seite. Bei der Wissensmodellierung wird durch den Experten für jede PZL ein Instanzenmodell angelegt und ausgestaltet (\rightarrow 7.3.4), welches den Lösungsraum der jeweiligen PZL repräsentiert (Merkmalnetz). Die Spezifikation des Problemraums erfolgt durch die Festlegung von Anforderungen und Bedingungen, beispielsweise durch den Anwender für ein individuelles PE, für das ein oder mehrere geeignete PZL gesucht werden. Bei der Wissensverarbeitung wird nun jede PZL mit ihrem Lösungsraum individuell und separat gegenüber dem Problemraum ausgewertet. Analog dazu werden dann sequentiell alle weiteren modellierten PZL mit ihrem jeweiligen Lösungsraum gegenüber dem spezifizierten Problemraum ausgewertet. Dadurch lässt sich die nachfolgende Betrachtung der Inferenz auf ein einzelnes Paar von Lösungs- und Problemraum reduzieren.

Die im Rahmen des vorliegenden Konzepts entwickelte Wissensverarbeitung findet in vier aufeinander folgenden Verarbeitungsschritten statt. In jedem dieser Schritte werden jeweils geeignete algorithmische Mechanismen genutzt, um das repräsentierte Wissen sukzessive weiterzuverarbeiten. Die durch diese Mechanismen gezielt verursachten Veränderungen⁵¹ der Wissensinhalte wirken sich auch auf die Gestaltung des Lösungsraums der betroffenen PZL aus. Abbildung 7-14 gibt hierzu einen Überblick über die konzipierten Verarbeitungsschritte, über die in diesen jeweils genutzten Mechanismen und über die Auswirkungen auf den Lösungsraum. Ergänzend veranschaulicht Abbildung 7-15 die Wirkung der Verarbeitungsschritte anhand eines beispielhaften, schematischen Lösungsraums für einen einfachen, zweidimensionalen Fall – die Kennzeichnung der Lösungsräume entspricht der in Abbildung 7-14 bereits verwendeten. Die grundsätzlichen Inhalte und Ziele der Verarbeitungsschritte werden im Folgenden kurz erläutert. Auf Details zu den einzelnen Verarbeitungsschritten und die jeweils genutzten Mechanismen geht Abschnitt 7.5.2 ein.

Im ersten Verarbeitungsschritt erfolgt eine Aufbereitung der Wissensbasisinhalte unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Informationen über Problem- und Lösungsraum. Anregungen dazu liefert Abschnitt 7.4.2. Ziel ist es hierbei, eine für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte optimale Ausgangslage (z. B. hinsichtlich Konsistenz und Ermöglichung einer effizienten Inferenz) zu schaffen. Betrachtet man den durch das Instanzenmodell der PZL repräsentierten Lösungsraum mit seinen Merkmalen und ihren spezifizierten Ausprägungen, ohne Berücksichtigung ggf. modellierter Abhängigkeiten (Relationen), wird der Lösungsraum durch die Grundwertemengen (\mathcal{C}) der beteiligten Merkmale gebildet (Abbildung 7-14, Abbildung 7-15, a). Berücksichtigt man die modellierten Relationen, ergibt sich ein davon abweichender (deformierter) Lösungsraum (b). Dieser Lösungsraum repräsentiert die

⁵¹ Die hier im Rahmen der Wissensverarbeitung angesprochenen Veränderungen und Manipulationen der Wissensinhalte wirken sich auf ein zur Verarbeitung genutztes Abbild der Wissensbasis aus. Die ursprünglich von Experten gestalteten Wissensinhalte bleiben erhalten.

Eigenschaften der PZL und deren Abhängigkeiten untereinander und stellt auf Seiten der PZL die Ausgangssituation für die Inferenz dar.

Im zweiten Verarbeitungsschritt geht es darum, die durch den Anwender zur Verfügung gestellte Problemraumspezifikation zu nutzen, um den Lösungsraum zielgerichtet zu reduzieren. Lösungsraumanteile, die nicht effektiv zur Erfüllung des Problemraums beitragen können (da ihre Ausprägung und/oder ihre Lage für die Erfüllung ungünstig sind), können dadurch bereits entfernt werden – ihre weitere Betrachtung kann somit entfallen. Dieses Vorgehen hilft die spätere Menge entstehender Ergebnisse sowie folgende algorithmische Aufwände problemadäquat zu begrenzen. Durch diese Reduktion ergibt sich der resultierende Gesamtlösungsraum (c), der jedoch immer noch innere Abhängigkeiten und dadurch eine gewisse kombinatorische Vielfalt in sich enthält. Dies bedeutet, dass nicht alle Grenzen des resultierenden Gesamtlösungsraums gleichzeitig garantiert und damit für die Bewertung hinsichtlich der Problemraumspezifikation herangezogen werden können.

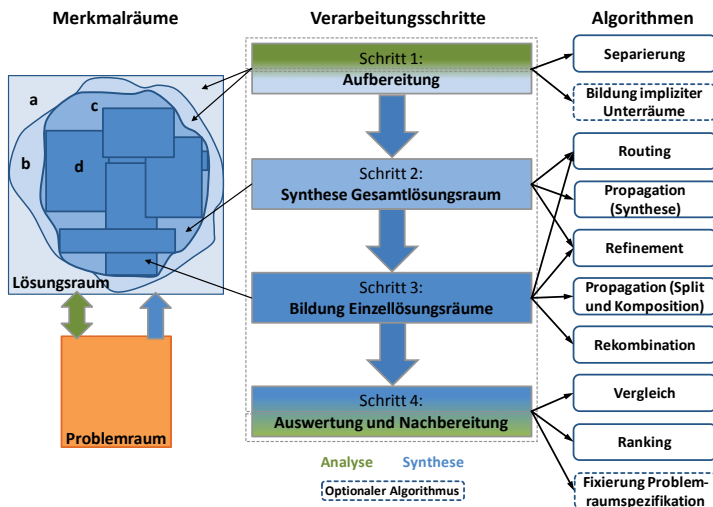


Abbildung 7-14: Schritte der Wissensverarbeitung⁵²

Um eine endgültige Eignungsbewertung der PZL vornehmen zu können, müssen die noch vorhandenen inneren Abhängigkeiten aufgelöst werden. Dazu wird der resultierende Gesamtlösungsraum (c) im dritten Verarbeitungsschritt soweit aufgespalten, dass die dadurch entstehenden Unterräume (d) in sich selbst keine Abhängigkeiten mehr aufweisen. Diese im Folgenden als Einzellösungsräume bezeichneten Unterräume des resultierenden Gesamtlösungsraums können wie unabhängige Lösungsräume betrachtet und behandelt werden. D. h. die durch den jeweiligen Einzellösungsraum beschriebenen Grenzen können in allen Dimensionen gleichzeitig garantiert werden. Dieses Vorgehen erleichtert die weitere Verarbeitung und macht die Ableitung eindeutiger Aussagen hinsichtlich der Erfüllung der Problemraumspezifikation

⁵² Die Größenverhältnisse zwischen Lösungs- und Problemraum sind abhängig von der Ausgestaltung des Lösungsraums (Modellierung) sowie der individuellen Spezifizierung des Problemraums (spezifischer Problemfall) und lassen sich daher nicht aus der hier rein schematischen Darstellung ableiten. Die schematisierte Deformation der Lösungsräume b und c ist dem Vorkommen multi-dimensionaler, innerer Abhängigkeiten geschuldet – diese kommen auf Seiten des Problemraums nicht vor, da der Problemraum im Rahmen des vorliegenden Konzepts ohne Relationen betrachtet wird (→ 7.2.5).

möglich. Einzellösungsräume repräsentieren in ihrer Gesamtheit den resultierenden Gesamtlösungsraum der PZL.

Im vierten Verarbeitungsschritt werden die gewonnenen Einzellösungsräume (d) schließlich über den Vergleich mit dem spezifizierten Problemraum für eine Auswertung und Ergebnisbildung genutzt. Die entsprechenden Resultate werden aufbereitet und dem Anwender geeignet zur Verfügung gestellt. In dem im äußersten rechten Teil von Abbildung 7-15 gezeigten Beispiel würden demnach die Einzellösungsräume d1 und d2 jeweils einzeln mit dem Problemraum verglichen. Erkennbar ist, dass keiner von beiden hier dargestellten Einzellösungsräumen die Problemraumspezifikation erfüllen kann. Dies lässt auf die Nichteignung der beispielhaft repräsentierten PZL schließen.

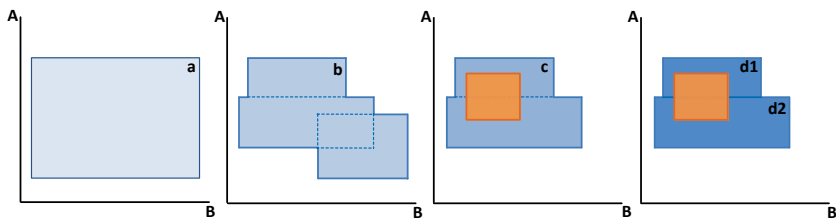


Abbildung 7-15: Gestaltung des Lösungsraums durch die Verarbeitungsschritte⁵³

In Anlehnung an die in Abschnitt 6.1 vorgestellten Aufgabentypen sind die Inhalte von Schritt 1 bis 3 synthetischen Charakters, abgesehen von einer ersten auf Analyse beruhenden Aufbereitung. Der letzte Verarbeitungsschritt ist, von einer Nachbereitung ausgenommen, dagegen analytisch geprägt. Abbildung 7-14 stellt diese Unterscheidung farblich heraus.

Ergänzend zu den Darstellungen und zur Vorbereitung der in Abschnitt 7.5.2 folgenden Betrachtung der Verarbeitungsschritte soll abschließend folgende Besonderheit aufgeführt werden: Bezugnehmend auf die zur Konzeptentwicklung und -beschreibung genutzte, abstrakte räumliche Vorstellung von Problem- und Lösungsraum (z. B. in Abbildung 7-3, Abbildung 7-14, Abbildung 7-15) und deren Gegenüberstellung für die Eignungsbewertung der PZL muss eine Relativierung vorgenommen werden. Das intuitive Verständnis, dass der Lösungsraum den Problemraum im Falle einer Eignung der PZL vollständig umschließt, trifft nur zu, sofern die PZL (Lösungsraum) nur Zusicherungen und das PE (Problemraum) nur Anforderungen beschreiben. Da auf einem Merkmalsträger die Aussageziele der beschreibenden Merkmale jedoch durchaus heterogen verteilt sein können (\rightarrow 7.2.2) und in praktischen Anwendungsfällen auch meistens sind (siehe hierzu die Anwendungsbeispiele in Kapitel 9), trifft diese idealtypische Vorstellung nicht immer zu. Sie beschränkt sich auf diejenigen Merkmaldimensionen, bei denen der Lösungsraum zusichert und der Problemraum anfordert. In allen anderen Merkmaldimensionen ist dann das Verständnis genau entgegengesetzt (der Problemraum muss den Lösungsraum enthalten, damit die Problemraumspezifikation in diesen Merkmaldimensionen erfüllt wird). Die bisher genutzte, eher intuitive, Betrachtung soll jedoch im Rahmen einer vereinfachten Darstellung und zur prinzipiellen Veranschaulichung auch im Weiteren verwendet werden. Betroffen von dieser

⁵³ Durch die Simplifizierung dieses Anschauungsbeispiels wird der gezeigte Lösungsraum maßgeblich durch die extensionale Relation (R_e) zwischen den beiden Merkmalen A und B gestaltet. Die hier bei der Spaltung des resultierenden Gesamtlösungsraums (c) entstehenden Einzellösungsräume (d1, d2) resultieren daher aus den durch die R_e repräsentierten Unterräumen (in den mittleren beiden Teilabbildungen angedeutet). Auch eine vertikale Schnittbildung der Einzellösungsräume wäre demnach bei entsprechend anderer Spezifikation der Relation möglich.

Vereinfachung sind auch die bereits und im Folgenden genutzten Formulierungen über den Lösungsraum. Diese sind darauf bezogen, dass die Merkmale des Lösungsraums das Aussageziel „Zusicherung“ repräsentieren. Im Sinne der generischen Präferenz (→ 7.2.2) bedeutet jedoch beispielsweise die Formulierung „Reduktion“ nur im Fall des Aussageziels „Zusicherung“ eine tatsächliche Verkleinerung des Lösungsraums (im Falle einer „Anforderung“ wäre das Verständnis entsprechend umgekehrt). Um die Formulierung bei mehreren verschiedenen Aussagezielen innerhalb eines Merkmalraums (z. B. Lösungsraum der PZL) nicht auf Merkmalebene ständig zu wechseln, wird auch hier bei der Darstellung mit der beschriebenen Vereinfachung gearbeitet. Das vorliegende Konzept sowie die darin enthaltenen Verarbeitungsschritte und ihre Mechanismen sind jedoch von diesen vereinfachten Betrachtungen unbenommen. Auf algorithmischer Ebene können alle Fälle gemischter Aussageziele verarbeitet werden.

7.5.2 Verarbeitungsschritte

Wie bereits in den Abschnitten 6.4 und 7.3.1 dargestellt, sind die Ansätze für die hier benötigte Wissensverarbeitung primär in den Repräsentationsformen Constraints und Regeln zu suchen. Gerade die Operation auf Wertebereichen (Mengen) und die Reduktion des Lösungsraums durch die Auswertung bestehender Abhängigkeiten und Restriktionen (Relationen) liegen nahe am klassischen Aufgabengebiet der Constraint-Probleme. Die Besonderheiten der im Rahmen des Konzepts benötigten und entwickelten hybriden Wissensrepräsentation sorgen dafür, dass eine Verwendung beispielsweise reiner Constraint-Algorithmen nicht zielführend und sinnvoll ist. Zu nennen sind hierfür u. a. das gemeinsame Vorkommen gerichteter und ungerichteter Relationen, die in Zwischenschritten der Verarbeitung bewusst in Kauf genommene Werteinkonsistenz⁵⁴, die mögliche Vergrößerung von Merkmalwertebereichen⁵⁵, die Existenz disjunktiv verbundener Ausdrücke (in extensionalen Relationen (\mathcal{R}_e), → 7.2.3) und die starke Heterogenität der verbundenen Merkmaldimensionen. Trotz allem ist eine Orientierung an den grundsätzlichen Mechanismen und Prinzipien (z. B. die Nutzung spezieller Heuristiken → 7.4.2) aus dem Bereich der constraint- bzw. regelbasierten Repräsentationstechniken hilfreich und zielführend. Dies gilt insbesondere bei verarbeitungsrelevanten Teilproblemen, deren Ähnlichkeit und Schnittmengen zu diesen Repräsentationen eine entsprechende Anlehnung erlaubt. Die in Abbildung 7-14 aufgeführten Mechanismen können daher auch als generische, prinzipielle Teilaufgabenstellungen gesehen werden, die jeweils durch geeignete Algorithmen (ggf. an spezifische Besonderheiten adaptiert) bewältigt werden müssen.

Bei der folgenden Darstellung der einzelnen Verarbeitungsschritte und der jeweils zur merkmalsbasierten Wissensverarbeitung genutzten Mechanismen, wird auf den Zweck und die prinzipielle Funktionsweise der entsprechenden Algorithmen fokussiert, nicht jedoch auf deren Darstellung in implementierungsrelevanter Detailtiefe. Wie Abbildung 7-14 andeutet, werden einige Algorithmen in mehreren Verarbeitungsschritten genutzt. Treten schrittsspezifische Besonderheiten hinsichtlich der Funktionsweise und der Nutzung der Algorithmen auf, so werden diese an den jeweiligen Stellen ergänzend erläutert. Um das Verständnis bei der Darstellung der Verarbeitungsschritte nicht unnötig mit eingeschobenen Besonderheiten und ergänzenden Erklärungen zu stören, werden diese als Anmerkungen am Ende jedes Schrittes aufgeführt.

⁵⁴ In Constraint-Problemen wird stets ein lokal oder global konsistenter Zustand angestrebt.

⁵⁵ Abgesehen vom Backtracking ist bei Constraint-Problemen immer eine Reduktion der (Variablen-)Wertebereiche anzustreben. Durch die Besonderheit verschiedener Aussageziele kann es bei Anforderungen hier auch zur sinnvollen und erlaubten Vergrößerung entsprechender Wertebereiche kommen.

Schritt 1: Aufbereitung

Ziel dieses Schrittes ist es, unter Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen (Problem- und Lösungsraum) eine Aufbereitung hinsichtlich der Aspekte Konsistenz und Optimierung vorzunehmen sowie darüber hinaus Informationen für die weitere Verarbeitung und die Erklärungsfähigkeit abzuleiten. Abschnitt 7.4 stellt dazu grundsätzliche Möglichkeiten und Ansätze vor, welche hier nicht weiter vertieft werden.

Ein Mechanismus, der an dieser Stelle Erwähnung finden soll, ist die **Separierung** (Abbildung 7-13, Nr. 1). Dabei wird analysiert, welche Teile des Instanzenmodells entkoppelt, also unabhängig voneinander betrachtet und behandelt werden können. Die darauf basierende Trennung des Instanzenmodells hilft, die maximal notwendige Multidimensionalität bei der Verarbeitung zu begrenzen und die notwendigen Verarbeitungsaufwände auf die komplexeren Anteile des Instanzenmodells zu konzentrieren. Dadurch muss nur so viel Komplexität (zusammenhängende Modellteile) auf einmal verarbeitet werden, wie unbedingt notwendig. Abbildung 7-16 zeigt hierzu beispielhaft ein Instanzenmodell, das den Lösungsraum der zugehörigen PZL auf Basis von sechs Merkmalen – also sechsdimensional – beschreibt. Separiert man jedoch die voneinander unabhängigen Teile des Instanzenmodells, wird klar, dass die höchste zu behandelnde Komplexität in diesem Fall lediglich dreidimensional (Abbildung 7-16, Teil I) ist. Bei den folgenden Schritten 2 und 3 zur Verarbeitung des Instanzenmodells können somit sequentiell alle drei Teile separat voneinander behandelt werden⁵⁶. Unabhängige Merkmale (Teil III), sozusagen eindimensionale Teile des Instanzenmodells, sind für diese Verarbeitungsschritte überhaupt nicht von Bedeutung. Erst im Zuge der Rekombination am Ende von Schritt 3 müssen alle Teile wieder in der Gesamtheit des Instanzenmodells betrachtet werden.

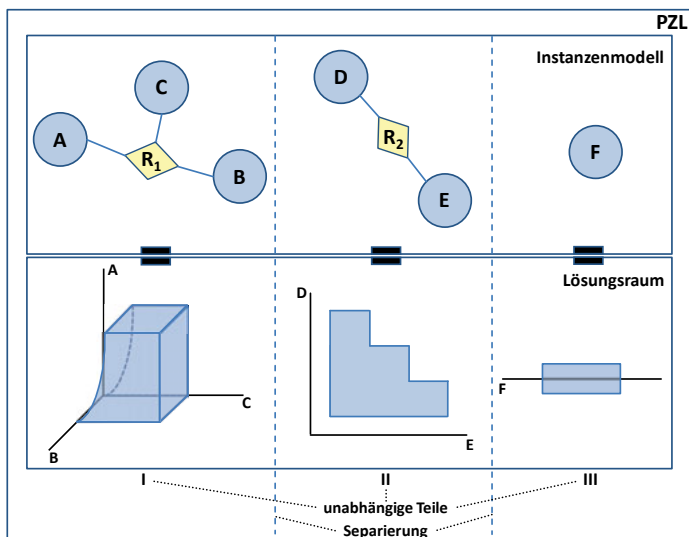


Abbildung 7-16: Teile des Instanzenmodells und entsprechend repräsentierte Unterräume des Lösungsraums

⁵⁶ Die Verarbeitungsschritte 2 und 3 finden, bis zum Mechanismus der Rekombination in Schritt 3, grundsätzlich für jedes Netzwerk (Abbildung 7-16, Teile I und II) getrennt statt. Daher wird die Betrachtung der Verarbeitungsschritte 2 und 3 (bis zur Rekombination) auf die Verarbeitung von jeweils einem Netzwerk beschränkt.

Ein unterstützender Mechanismus, der ergänzend im Zuge der Aufbereitung zum Einsatz kommen kann, betrifft die **Bildung impliziter (Lösungs-)Unterräume**. Er ermöglicht eine alternative Interpretation und Auswertung von \mathcal{R}_c und erweitert damit die Abbildungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten dieses Relationstyps. Der entsprechende Algorithmus wird am Ende von Abschnitt 7.5.2 näher erläutert.

Anmerkungen: Werden einzelne Teile des Instanzenmodells für sich betrachtet (Separierung), so bezieht sich die Betrachtung gleichzeitig auf den jeweils repräsentierten Teil des Lösungsraums. Dieser Teil bildet einen Unterraum des Lösungsraums des Instanzenmodells, der (analog zu den Teilen des Instanzenmodells) aufgrund der Separierung unabhängig von den anderen betrachtet werden kann. Dieser Unterraum erstreckt sich, seinem Instanzenmodellteil entsprechend, nur über die jeweils relevanten und zusammenhängenden Dimensionen (Merkmale innerhalb eines Netzwerks). Abbildung 7-16 stellt hierzu beispielhaft die Teile des Instanzenmodells und die korrespondierenden Unterräume des Lösungsraums dar. Werden aus größeren Netzwerken während der Verarbeitung sogar nur einzelne Relationen auf einmal betrachtet, so bildet der dann betrachtete Lösungsraum wiederum einen Unterraum des durch das Netzwerk repräsentierten Lösungsraums (zusammengesetzt aus den Dimensionen aller an der Relation beteiligter Merkmale). Die entsprechende Terminologie der Lösungsräume (z. B. Gesamtlösungsraum, resultierender Gesamtlösungsraum, Einzellösungsraum) bezieht sich daher in der folgenden Beschreibung der Verarbeitungsschritte nicht global auf die PZL, sondern lokal auf den jeweils betrachteten Unterraum. Die getroffenen Aussagen gelten ebenso für den Problemraum. Auch bei diesem werden an jeder Stelle der Verarbeitung nur die gerade relevanten Dimensionen (Merkmale), also nur ein Unterraum des gesamten Problemraums, betrachtet.

Schritt 2: Synthese des resultierenden Gesamtlösungsraums

Ziel dieses Verarbeitungsschrittes ist die Synthese eines resultierenden Gesamtlösungsraums (Abbildung 7-14, c) unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Informationen aus Problem- und Lösungsraum. Insofern möglich, findet in diesem Zuge eine Vereinfachung und Reduktion des Gesamtlösungsraums auf den zur Erfüllung der Problemraumspezifikation relevanten Anteil statt. Dazu wird durch das jeweilige Netzwerk des Instanzenmodells propagiert und unter Anwendung und Verarbeitung von abgebildeten Merkmal- und Relationsinformationen der Lösungsraum synthetisiert. Nach einer allgemeinen, abstrakten Darstellung der Funktionsweise der genutzten Mechanismen wird an einem vereinfachten Beispiel die prinzipielle Arbeitsweise dieses Verarbeitungsschrittes verdeutlicht.

Für die Propagation müssen sämtliche im Netzwerk vorhandenen Relationen und Merkmale berücksichtigt werden. Die Ableitung eines Weges bzw. einer Verarbeitungsreihenfolge durch das Netzwerk wird im Folgenden als **Routing** bezeichnet. Sobald es mehrere mögliche Wege durch das Netzwerk gibt, müssen diese ermittelt und mit Hilfe einer Routing-Strategie ein möglichst günstiger Weg gefunden werden⁵⁷. Potentielle Einflussfaktoren für die Weggestaltung sind dabei problemfallspezifische Faktoren, wie mögliche anwenderbestimmte Präferenzen⁵⁸ von Merkmalen oder auch Art und Vorhandensein von Problemraumspezifikationen⁵⁹. Domänenspezifische, wissensbasisbestimmte Faktoren sind dagegen die modellierten Wirkungsrichtungen der Relationen, Vernetzungsgrade der Merkmale sowie merkmal- und

⁵⁷ Dabei ist auch die Wahl eines Startpunktes (erste zu bearbeitende Relation) bereits Aufgabe des Routings.

⁵⁸ Z. B. durch Festlegung einer Priorisierung oder Gewichtung. Dies bringt oft einen sehr subjektiven Einfluss mit sich und sollte daher, insofern überhaupt sinnvoll und notwendig, fallabhängig vom Anwender spezifiziert werden.

⁵⁹ Diese Informationen helfen den Lösungsraum einzuschränken und sollten daher frühzeitig in der Propagation berücksichtigt werden.

relationenspezifische Charakteristika und Inhalte. Eine Routingstrategie kann sich beispielsweise an einer oder der Kombination mehrerer etablierter Heuristiken (\rightarrow 7.4.2) aus dem Bereich der Constraint-Theorie (\rightarrow 6.3.6) oder auch regelbasierter Verfahren (\rightarrow 6.3.5) orientieren. Das Routing spielt eine tragende Rolle für die Propagation sowohl in Schritt 2 als auch in Schritt 3. Es vermeidet eine starre, globale (z. B. feste Verarbeitungsreihenfolge bei allen PZL einer Funktion) Verarbeitung und realisiert eine PZL-individuelle Strategie, die sich objektiv an den spezifischen Charakteristika des repräsentierenden Instanzenmodells und den Besonderheiten des Anwendungsfalles orientiert. Dabei ist eine Einflussnahme bzw. Steuerbarkeit sowohl durch den Anwender als auch durch den Experten gewährleistet, wie die aufgeführten Einflussfaktoren zeigen. Damit wird insbesondere den Aspekten aus Anforderung Id Rechnung getragen.

Bei der **Propagation (Synthese)** wird das jeweilige Netzwerk gemäß eines durch das Routing vorgegebenen Weges durchschritten. Dabei werden die Relationen entlang des Weges ausgewertet (ähnlich der Ausführung von Constraints bei Constraint-Problemen, \rightarrow 6.3.6) und darauf basierend die Ausprägungen der an der jeweiligen Relation beteiligten Merkmale gezielt manipuliert. Somit kann mit fortschreitender Propagation eine sukzessive Reduktion des Lösungsraums, wo sinnvoll und möglich, erreicht werden. Beide Relationstypen (\rightarrow 7.2.3) unterscheiden sich grundsätzlich bei der Verarbeitung im Rahmen der Propagation.

Extensionale Relationen R_e sind eine explizite Repräsentation disjunktiv zueinander stehender Unterräume (Relationswertemengen R der beteiligten Merkmale) des Lösungsraums (\rightarrow 7.2.3). Zusammen bilden diese Unterräume vor der Verarbeitung (Propagation) der Relation den möglichen Gesamtlösungsraum (Grundwertemengen G der beteiligten Merkmale) bezogen auf die Dimensionen der an der Relation beteiligten Merkmale. Das Ziel der problemangepassten (bezogen auf die Problemraumspezifikation) Reduktion des Gesamtlösungsraums kann lokal auf der Ebene der R_e durch Entfernung oder Anpassung dieser von ihr repräsentierten Unterräume erreicht werden. Abbildung 7-17 stellt die Verarbeitung am Beispiel einer 4-wertigen R_e dar. Im Rahmen einer lokalen Bewertung wird geprüft, welche der Unterräume die vorhandene Problemraumspezifikation am besten (in möglichst vielen der relevanten Dimensionen) erfüllen. Pro Relationsteilnehmer⁶⁰ wird festgestellt ob die korrespondierende Ausprägung der Problemraumspezifikation erfüllt⁶¹ (= 1) oder nicht erfüllt (= 0) wird, anschließend werden die Bewertungen aufsummiert. Alle Unterräume mit der höchsten Bewertung werden in der Relation behalten, alle anderen verworfen (in Abbildung 7-17 werden beispielsweise die Unterräume 1, 2 und 4 verworfen). Die verbleibenden Unterräume repräsentieren nun in ihrer Gesamtheit mit ihren Relationsmengen (R) den neuen, resultierenden Gesamtlösungsraum. Die Grundwertemengen (G) der beteiligten Merkmale werden darauf angepasst (reduziert). Damit wurde der ursprüngliche Gesamtlösungsraum bezogen auf die beteiligten Merkmale auf den resultierenden Gesamtlösungsraum reduziert⁶² (im Beispiel von Abbildung 7-17 auf die Ausmaße von Unterraum 3).

Die modellierte Wirkungsrichtung des jeweiligen Relationsteilnehmers bestimmt bei der Verarbeitung der R_e , ob sein Ausprägungswert in die Bewertung der repräsentierten Unterräume

⁶⁰ Da Ausprägungen eines Merkmals unabhängig und separat voneinander in Relationen mit anderen Ausprägungen wirken können, wird hier im Folgenden allgemein von Relationsteilnehmer statt von Merkmal gesprochen (z. B. kann A_{\min} Relationsteilnehmer sein).

⁶¹ Erfüllung der Problemraumspezifikation, heißt dass die Anforderung durch eine geeignete Zusicherung erfüllt wird (\rightarrow 7.2.2). Hierbei ist nicht relevant, ob das PE (Problemraum) anfordert und die PZL (Lösungsraum) zusichert oder umgekehrt.

⁶² Die hier erreichte Reduzierung muss nicht den resultierenden Gesamtlösungsraum am Ende des Verarbeitungsschrittes 2 darstellen. Weitere Reduzierungen können im Rahmen der weiteren Propagation (andere Relationen) und/oder des Refinement erfolgen.

einbezogen wird⁶³. Im Beispiel von Abbildung 7-17 wird der Relationsteilnehmer B_{\max} aufgrund seiner spezifizierten Wirkungsrichtung (rechts oben in der Abbildung) nicht bei der Bewertung berücksichtigt (ausgegraute Spalte in der Tabelle von Abbildung 7-17). Für A_{\max} wiederum liegt keine Problemraumspezifikation vor (Problemraum ist diesbezüglich unbestimmt). Die korrespondierende Grenze der Unterräume ist daher dem Problemraum gegenüber hinsichtlich A_{\max} nicht bewertbar und damit für die Bewertung nicht relevant. Anhang H.2 stellt den Algorithmus für die Verarbeitung von R_e schematisch dar.

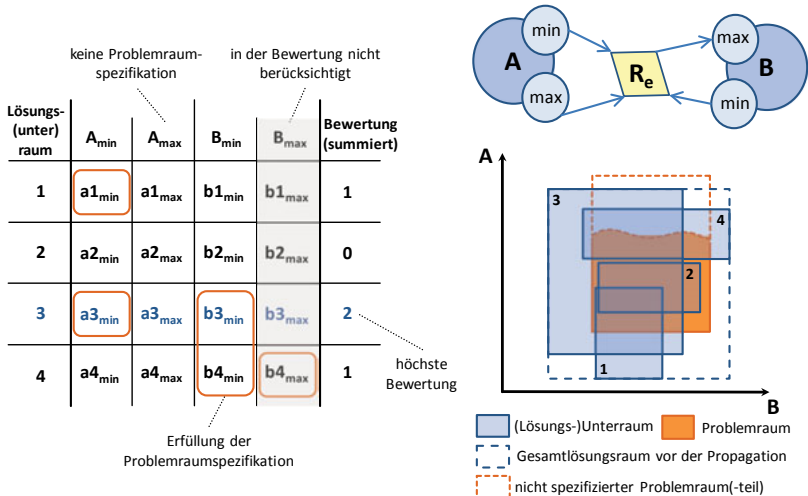


Abbildung 7-17: Propagation (Synthese) extensionaler Relationen (R_e)

Funktionale Relationen (R_f) drücken die Beziehung zwischen ihren Teilnehmern über eine symbolische Abbildungsvorschrift aus (\rightarrow 7.2.3). Bei der Verarbeitung der Relation im Rahmen der Propagation wird diese Abbildungsvorschrift für einen Relationsteilnehmer mit Hilfe konkret vorliegender Ausprägungswerte der anderen Relationsteilnehmer ausgewertet – ähnlich der Auflösung einer Gleichung nach jeweils einer Unbekannten. Mit dem so abgeleiteten Wert jeweils eines Relationsteilnehmers wird die sich gemäß der Abbildungsvorschrift ergebende minimale oder maximale (je nach Ausprägungsaussage des Relationsteilnehmers) Grenze des Lösungsraums in dessen Dimension ermittelt („Unbekannte“). Grundsätzlich bringen die anderen Relationsteilnehmer dazu ihren eigenen Ausprägungswert (aus Grundwertemenge \mathcal{G}) in die Abbildungsvorschrift ein („Bekannte“). Um die Ausprägungen des individuell spezifizierten Problemfalles zu berücksichtigen, bringt jeder Relationsteilnehmer zusätzlich den korrespondierenden Wert der Problemraumspezifikation ein. Treten zwischen den Relationsteilnehmern resultierende Zielkonflikte auf, müssen zudem die Ausprägungen mit entgegengesetzter Ausprägungsaussage (entgegengesetzte Grenze von \mathcal{G} und korrespondierende Ausprägung der Problemraumspezifikation) einbezogen werden. Nur so können in diesen Fällen

⁶³ Aufgrund der so abgebildeten Kausalität kann hier eine Analogie zur Schlussfolgerungsrichtung regelbasierter oder logischer Repräsentationen gesehen werden. Die Wirkungsrichtung bestimmt in diesem Sinne, welche Teilnehmer die Prämisse und welche die Konklusion darstellen.

alle sinnvollen und auch die optimalsten Lösungen gefunden werden⁶⁴. Damit ergeben sich in der Regel mehrere⁶⁵ Lösungen für den abgeleiteten Relationsteilnehmer. Da mitunter bei der Auswertung der Abbildungsvorschrift invalide Lösungen entstehen können, müssen alle entstehenden Lösungen einer R_f auf Validität geprüft werden. Lösungen, die nicht sinnvolle mathematische Ausdrücke (z. B. Division durch Null) darstellen oder außerhalb der Definitions- oder aktuellen Grundwertemenge liegen, werden verworfen. Aus den verbleibenden validen Lösungen wird die optimalste Lösung (im Sinne der Ausprägungsaussage und der Präferenzrichtung des Relationsteilnehmers) ausgewählt – sie ersetzt im Folgenden den bisherigen Ausprägungswert des Relationsteilnehmers (neue \mathcal{O}). Da der so ausgewählte Wert nur höchstens dem Wert der bisherigen Ausprägung (ursprüngliche \mathcal{O}) entsprechen darf, ist damit die Möglichkeit der Reduktion der sich ergebenden neuen Grundwertemenge und damit des Lösungsraums in der Dimension des Relationsteilnehmers gegeben. Die Auswertung der Abbildungsvorschrift wird anschließend, abhängig von deren jeweiliger Wirkungsrichtung, für weitere Relationsteilnehmer der R_f analog durchgeführt. Damit die Reihenfolge bei der Auswertung der einzelnen Relationsteilnehmer ohne Einfluss auf das Ergebnis bleibt, geht jeder Relationsteilnehmer mit seinen zu Beginn der Propagation der Relation vorhandenen Ausprägungswerten (\mathcal{O} vor der Propagation der Relation) in die Abbildungsvorschrift ein. Anhang H.3 stellt den Algorithmus für die Verarbeitung von R_f schematisch dar.

Die modellierte Wirkungsrichtung des jeweiligen Relationsteilnehmers bestimmt bei R_f , ob sein Ausprägungswert für die Ableitung von Ausprägungen anderer Teilnehmer einbezogen und/oder ob er selbst über die Abbildungsvorschrift durch die Ausprägungen der anderen Teilnehmer beeinflusst wird. Somit entscheidet die Wirkungsrichtung bei R_f wie auch bei R_e aktiv über die Mitwirkung des Relationsteilnehmers am Ergebnis der Relationsverarbeitung und beeinflusst damit auch dessen Relevanz. Anhang I gibt für beide Relationstypen einen Überblick über die möglichen Wirkungsrichtungskombinationen und ihre Bedeutung sowie mögliche Inkonsistenzen.

Im Verlauf der Propagation durch das Netzwerk werden, wie beschrieben, bei jeder stattfindenden Verarbeitung einer Relation (R_e , R_f) lokale Änderungen bei deren Relationsteilnehmern (Merkmalausprägungen) bewirkt. Diese Änderungen stellen dann wiederum die Ausgangswerte für die Auswertung einer benachbarten Relation dar. So werden die Änderungen sukzessive durch das Netzwerk propagiert und die Grundwertemengen \mathcal{O} der Merkmale des Netzwerks geändert. Durch die strenge Einhaltung der Mengenhierarchie (\rightarrow 7.2.4) werden die Grundwertemengen dabei immer kleiner (maximal gleichbleibend) – der Lösungsraum wird somit reduziert (resultierender Gesamtlösungsraum).

Durch den beschriebenen Propagationsprozess wird jede Relation entlang des vom Routing vorgegebenen Weges genau einmal ausgewertet. Auf diese Weise ggf. hervorgerufene Änderungen der Grundwertemengen der Merkmale werden dabei nur in Propagationsrichtung („nach vorn“) weitergegeben. Mögliche Änderungen, die sich auch auf bereits bearbeitete Merkmale im zurückliegenden Propagationsweg auswirken würden, werden so nicht erfasst. Befindet sich ein Relationsteilnehmer beispielsweise in zwei verschiedenen Relationen, so wird

⁶⁴ Zielkonflikte bedeuten hier, dass die Relationsteilnehmer in gegenseitiger Konkurrenz um die Optimierung des Lösungsraums in ihrer jeweils eigenen Dimension stehen (individuelles Ziel jedes Relationsteilnehmers). Nur wenn die Konkurrenten dabei auch für sie selbst suboptimale Lösungen einbringen, können über die Anwendung der Abbildungsvorschrift die optimalsten Lösungen für die anderen Relationsteilnehmer und damit auch für den gesamten Lösungsraum gefunden werden. Faktoren für Zielkonflikte werden in Abschnitt 7.4.2 aufgeführt und müssen vor allem im Zusammenwirken für die Auswertung berücksichtigt werden, wie Anhang H.3 zeigt.

⁶⁵ Sowohl pro aufgestellter Gleichung (Abbildungsvorschrift) als auch ggf. bei Entstehung mehrerer Lösungen einer Gleichung (z.B. $A=B^2$).

die bei der Auswertung der zweiten Relation erzeugte Änderung seiner Ausprägung (und damit der \mathcal{G} des Merkmals) nicht mehr in Bezug auf ihre möglichen Auswirkungen auf die erste Relation und deren restliche Relationsteilnehmer betrachtet. In Folge dieser unberücksichtigten Änderungsauswirkungen kann das Potential zur Reduktion des Lösungsraums nur suboptimal und unvollständig ausgeschöpft werden. Zudem sind die Resultate der Propagation damit stark vom propagierten Weg abhängig und die Aktualität der propagierten Änderungen ist innerhalb des Netzwerkes inhomogen. Um diese Effekte auszugleichen, wird nach der Propagation das **Refinement** durchgeführt. Dafür wird bereits während der Propagation eine Liste von Relationsteilnehmern erstellt, deren Ausprägung durch die Auswertung mindestens einer zweiten Relation verändert wurde. Beim Refinement werden die von den nachträglich geänderten Teilnehmern betroffenen Relationen gezielt erneut propagiert und wiederum relevante Änderungsauswirkungen registriert. Der iterative Algorithmus konvergiert durch die sukzessive Verringerung der Änderungsauswirkungen. Für die Auswertung der Relationen selbst können wieder die in Anhang H.2 und H.3 dargestellten Algorithmen der Propagation verwendet werden. Die Auswirkung einer Änderung wird immer dann gedämpft, wenn die Änderung eines oder mehrerer Teilnehmer der Relation keine Auswirkung auf die anderen Teilnehmer der Relation hat (dies ist vor allem bei \mathcal{R}_c durch die diskreten, separaten Unterräume wahrscheinlich). Durch das Refinement werden Rückwirkungen im Netzwerk vollständig erfasst und solange weitergegeben bis sich ein Zustand einstellt, bei dem die Grundwertemengen (\mathcal{G}) der beteiligten Merkmale den jeweils lokalen Auswertungen der Relationen entsprechen. Durch die schleifenlose, vorwärtsgerichtete⁶⁶ Abarbeitung der Netzwerke bei der Propagation, der sukzessiven Reduktion der Lösungsräume sowie der Beschränkung auf die Berücksichtigung echter Änderungen⁶⁷ beim Refinement, sind auch Zyklen innerhalb der Netzwerke unproblematisch verarbeitbar.

Das Ergebnis des Verarbeitungsschrittes 2 ist an dieser Stelle erreicht. Es wurde ein resultierender Gesamtlösungsraum synthetisiert, der die grundsätzlichen Einsatzgrenzen und -möglichkeiten der jeweiligen PZL verkörpert, ohne die noch existierenden inneren Abhängigkeiten komplett aufgelöst zu haben. Prinzipiell vergleichbar ist die Vorstellung dieses Lösungsraums mit den von [ZAF02] dargestellten Einsatzbereichen (→ Abbildung 3-5). Bereits an dieser Stelle kann theoretisch eine Aussage über die Nichteignung der PZL (allerdings nicht über deren Eignung!) auf Basis des resultierenden Gesamtlösungsraums abgeleitet werden. Kann die Problemraum-spezifikation nicht durch den Gesamtlösungsraum erfüllt werden, so ist eine spätere Erfüllung durch Einzellösungsräume ausgeschlossen.

Beispiel: Abbildung 7-18 und Abbildung 7-19 verdeutlichen die in diesem Verarbeitungsschritt vorgestellten Mechanismen an einem einfachen⁶⁸ Beispiel. Abbildung 7-18 zeigt hierzu die Ausgangssituation von Verarbeitungsschritt 2. Es liegt ein Netzwerk aus vier Merkmalen (A, B, C, D) und drei Relationen ($\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_3$) vor. Dieses Netzwerk ist Bestandteil eines Instanzenmodells. Jedes Merkmal ist hinsichtlich seiner Definitionsmenge ($\mathcal{D}_{A,B,C,D}$) und seiner Grundwertemenge ($\mathcal{G}_{A,B,C,D}$) spezifiziert⁶⁹, wie im oberen Teil von Abbildung 7-18 aufgeführt. \mathcal{R}_1

⁶⁶ Bereits [NAZ89] konstatiert, dass in vorwärtsverketteten, regelbasierten Systemen Zirkularität kein Problem darstellt.

⁶⁷ Dieses Prinzip der Refraktion gibt es u. a. bei regelbasierten Systemen. Danach „[...] dürfen Regeln nicht zum wiederholten Male über dieselben Daten angewendet werden.“ [HAU14].

⁶⁸ Um die prinzipielle Arbeitsweise der vorgestellten Mechanismen zu verdeutlichen, wird hier bewusst auf ein überschaubares Beispiel zurückgegriffen. Praktische, aber auch theoretische Beispiele können wesentlich komplexer sein – beispielsweise bedingt durch eine größere Anzahl beteiligter Merkmale, stärkere Vernetzungsgrade der Merkmale und höherwertige Relationen, größere Heterogenität der auftretenden Merkmaldimensionen, umfangreichere und kompliziertere Relationsinhalte (mehr Unterräume, anspruchsvollere funktionale Ausdrücke), Zyklen, fehlende Problemraumspezifikationen.

⁶⁹ Alle spezifizierten Inhalte sind hier zur besseren Verständlichkeit in Form konkreter Ausprägungswerte dargestellt. Die Verwendung von Einheiten ist für das Verständnis nicht relevant – es wird daher im Beispiel auf diese verzichtet.

und R_2 sind als extensionale (\mathcal{R}_e) und R_3 ist als funktionale (\mathcal{R}_f) Relation modelliert. Unterhalb der Relationen werden jeweils ihre Relationsinhalte dargestellt und darunter die repräsentierten Lösungsräume sowie der jeweils zugehörige Teil der Problemraumspezifikation visualisiert.

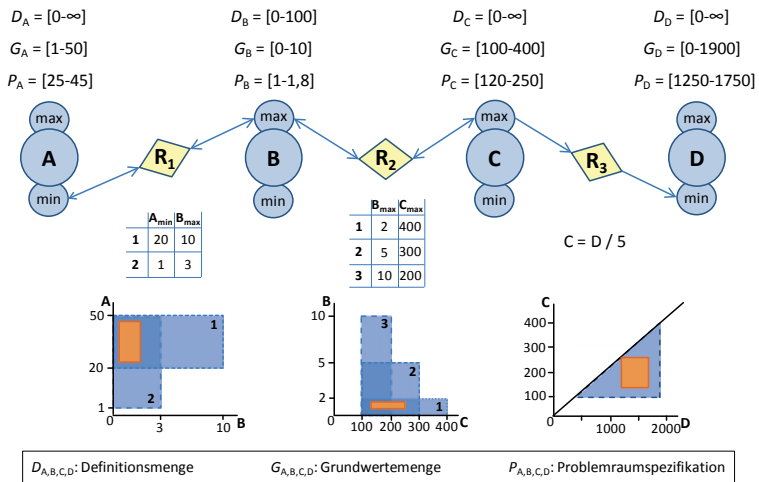


Abbildung 7-18: Beispielhaftes Netzwerk eines Instanzenmodells als Ausgangslage für die Verarbeitung

Abbildung 7-19 stellt nun die vom Ausgangszustand (Abbildung 7-18) ausgehende Anwendung der notwendigen Mechanismen in Verarbeitungsschritt 2 am Beispiel vor. Für das Routing wird in diesem einfachen Fall beispielhaft die Reihenfolge R_1 , R_2 , R_3 (in Abbildung 7-18 von links nach rechts) gewählt.

Bei der Propagation von R_1 wird gemäß der beschriebenen Propagation von \mathcal{R}_e verfahren. In einer lokalen Bewertung wird die Eignung der zwei hier repräsentierten Unterräume (1, 2) hinsichtlich der Erfüllung der Problemraumspezifikation festgestellt. Da beide Relationsteilnehmer mit einer bidirektionalen Wirkrichtung (siehe Anhang I) spezifiziert sind, wird jede Merkmaldimension bei dieser Bewertung berücksichtigt. Wie beim Vergleich der Problemraumspezifikation mit den in der Relation spezifizierten (Lösungs-)Unterräumen (Abbildung 7-18, unten links) zu erkennen ist, erfüllen beide Unterräume in jeder betroffenen Merkmaldimension die Problemraumspezifikation. Da die Bewertung beider Unterräume somit gleich hoch ist, ist eine Reduktion des Lösungsraums durch die Entfernung eines Unterraums hier nicht sinnvoll. Wie Abbildung 7-19 darstellt, bewirkt die Propagation von R_1 daher in diesem Beispiel keine Veränderung des Lösungsraums (Grundwertemenge G bleibt für die Merkmale A und B gleich).

Die Bewertung im Rahmen der folgenden Propagation von R_2 ergibt eine gleich hohe Bewertung für die Unterräume 1 und 2 (Erfüllung in der Dimension von B und von C) sowie eine schlechtere Bewertung für Unterraum 3 (Erfüllung nur in der Dimension von B). Daher wird Unterraum 3 im Sinne der problemangepassten Lösungsraumreduktion entfernt. Die Anpassung der Grundwertemenge berücksichtigt dies, wirkt sich jedoch in diesem Beispiel nur auf G_B (Anpassung von $[0-10]$ auf $[0-5]$) aus.

1. Propagationsschritt (R_1):

	A_{\min}	B_{\max}
1	20	10
2	1	3

2. Propagationsschritt (R_2):

	B_{\max}	C_{\max}
1	2	400
2	5	300

3. Propagationsschritt (R_3):

$$\begin{aligned} D_{\min 1} &= 5 * C_{\min} = 500 \\ D_{\min 2} &= 5 * C_{\min} = 600 \\ D_{\min 3} &= 5 * C_{\max} = 2000 \\ D_{\min 4} &= 5 * C_{\max} = 1250 \end{aligned}$$

Refinement (R_1):**Ergebnis (resultierender Gesamtlösungsraum):**

$$G_A = [1-50]$$

$$G_B = [0-5]$$

$$G_C = [100-400]$$

$$G_D = [500-1900]$$

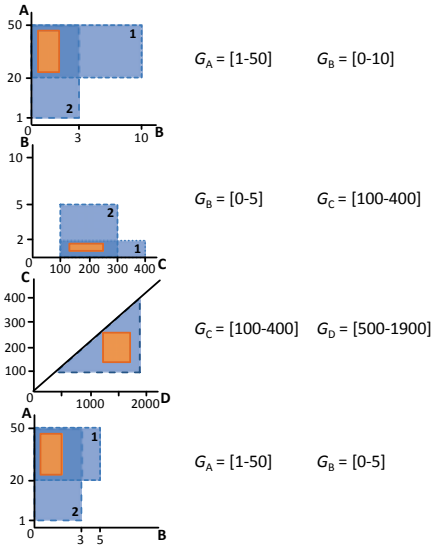


Abbildung 7-19: Mechanismen im Verarbeitungsschritt 2 am Beispiel

Für die Propagation von R_3 muss der durch die Relation abgebildete funktionale Ausdruck für die Relationsteilnehmer jeweils ausgewertet werden. Die im abgebildeten Beispiel spezifizierten Wirkungsrichtungen von R_3 geben dabei hier vor, dass einzig nach dem Relationsteilnehmer D_{\min} (Minimalwert von D) ausgewertet wird (siehe Anhang I). Dafür muss der andere Relationsteilnehmer C_{\max} Werte in die Abbildungsvorschrift einbringen. Hierfür wird sein Ausprägungswert (C_{\max}) und der korrespondierende Wert der Problemraumspezifikation ($P_{C_{\max}}$) genutzt. Zusätzlich werden der Minimalwert von C (C_{\min}) sowie dessen korrespondierende Problemraumspezifikation ($P_{C_{\min}}$) eingebracht⁷⁰. Damit ergeben sich insgesamt vier Gleichungen (Abbildung 7-19) mit jeweils einer Lösung. Die dritte Lösung (2000) fällt durch die Validitätsprüfung, da sie G_C ([0-1900]) verletzt – diese Lösung kann daher nicht weiter berücksichtigt werden. Die anderen drei Lösungen (500, 600, 1250) sind grundsätzlich valide. Im Sinne der Ausprägungsaussage (hier: Minimalwert) und der Präferenzrichtung (hier: Zusicherung) wird unter diesen Lösungen die optimalste Lösung (500) ausgewählt. Die Grundwertemenge des abgeleiteten Merkmals D (G_D) wird anschließend auf Basis dieser Lösung angepasst (von [0-1900] auf [500-1900]) – Abbildung 7-19 visualisiert den neuen Lösungsraum, wobei sich die Anpassung von G_D hier nicht bemerkbar macht.

Bei der Propagation von R_2 wurde G_B angepasst. Da diese Änderung im rückwärtigen Bereich der Propagationsrichtung liegt, wurde diese Änderung noch nicht hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf R_1 und damit auf das Merkmal A berücksichtigt. Im Rahmen des Refinement muss daher R_1 erneut propagiert werden. Bei der Propagation von R_1 mit den angepassten Ausprägungswerten von Merkmal B (visualisiert in Abbildung 7-19) stellt sich heraus, dass die Änderungen keinen

⁷⁰ Der Zielkonflikt im hier gezeigten Beispiel wird durch die unterschiedlichen Ausprägungsaussagen (min <-> max) der Relationsteilnehmer C_{\max} und D_{\min} verursacht.

Einfluss auf die Erfüllung der Problemraumspezifikation durch beide vorhandenen Unterräume (1, 2) der Relation haben. Beide Unterräume werden daher gleich hoch bewertet. Eine weitere Reduktion durch Entfernung eines Unterraums und damit eine Anpassung von \mathcal{C}_A und/oder \mathcal{C}_B ist somit nicht gegeben. Mit dem Abschluss des Refinement ist auch der Verarbeitungsschritt 2 abgeschlossen. Es liegt nun der resultierende Gesamtlösungsraum vor, der sich aus den angepassten Grundwertemengen ($\mathcal{C}_{A,B,C,D}$) der beteiligten Merkmale bildet (Abbildung 7-19, unten).

Anmerkungen: Da bei der Propagation, wie auch bei den anderen Mechanismen innerhalb der Verarbeitungsschritte, u. a. mit den Grenzpunkten der Lösungsräume (Intervallgrenzen bei Skalen mit innerer Ordnung, \rightarrow 7.2.1) gearbeitet wird, ist jeweils Stetigkeit und mindestens einfache Monotonie⁷¹ zwischen diesen Grenzpunkten Voraussetzung. Dies muss im Rahmen der Konsistenzprüfung (\rightarrow 7.4.1) sichergestellt sein.

Theoretisch kann die Propagation völlig ohne Einbeziehung einer Problemraumspezifikation erfolgen. Diese Unabhängigkeit ermöglicht auch den Umgang mit unvollständigen Informationen (\rightarrow Anforderung Ib). Die Problemraumspezifikation enthält jedoch für die Synthese wertvolle Informationen, da sie die Spezifika und Besonderheiten des individuellen Anwendungs- und Problemfalles widerspiegelt und damit einen relevanten Betrachtungs- und Arbeitsbereich im multidimensionalen Merkmalraum vorgibt. Soweit vorhanden, werden diese Informationen deshalb nahezu in die gesamte Verarbeitung eingebunden. Dies geht auch aus den jeweiligen Beschreibungen und Algorithmen hervor.

Bei der Propagation in Schritt 2 treten zwei scheinbar gegensätzliche Aspekte auf: zum einen soll der Lösungsraum, soweit wie sinnvoll möglich, reduziert werden, zum anderen soll der Lösungsraum im Rahmen dieser Möglichkeiten aber so optimal (im Sinne der generischen Präferenz jedes Merkmals) wie möglich bleiben. Um beiden Aspekten gerecht zu werden, wird in eindeutigen Situationen reduziert und in allen anderen Situationen auf eine Reduktion verzichtet, um nicht frühzeitige und ggf. ungerechtfertigte Entscheidungen zu treffen. Insbesondere bei unbekannten Problemraumspezifikationen kann damit ein größtmöglicher Spielraum aufrechterhalten werden. Abbildung 7-17 verdeutlicht das Prinzip beispielhaft für \mathcal{R}_e . In der dargestellten Situation ist die Entscheidung aufgrund der lokalen Bewertung eindeutig. Daher wird der Unterraum 3 weiterverwendet. Würde der Teilnehmer B_{\max} jedoch im Ranking berücksichtigt, so ergäbe sich für Unterraum 4 eine gleich hohe Bewertung hinsichtlich der Erfüllung der Problemraumspezifikation. In diesem Fall würden beide Unterräume beibehalten und die Grundwertemenge der beteiligten Merkmale würde auf die Menge reduziert werden, die durch beide Unterräume gemeinsam aufgespannt wird (statt nur auf den Unterraum 3) – die Reduktion wäre damit geringer. Ähnlich verhält es sich, wenn keine Problemraumspezifikation vorliegt oder kein einziger Unterraum diese erfüllt. In beiden Fällen werden alle Unterräume weiter betrachtet. Bei \mathcal{R}_f wird die Optimierung der Lösungsräume durch die Ermittlung der Extremwerte für den jeweils abgeleiteten Relationsteilnehmer sowie die Auswahl der optimalsten Lösung (unter mehreren verfügbaren Lösungen) erreicht. Eine Reduktion kann hier durch die Entfernung nichtvalider Lösungen stattfinden. Das bei beiden Relationstypen verwendete Prinzip folgt der *Least-Commitment-Strategie*, nach der Entscheidungen bis zum spätestmöglichen Zeitpunkt hinausgezögert werden [BRI99]. Damit lässt sich unter anderem Backtracking vermeiden,

⁷¹ Diese Bedingung schließt nicht die Behandlung von nichtmonotonen Abbildungen a priori (z. B. quadratische Funktionen) aus. Jedoch muss in solchen Fällen sichergestellt sein, dass auf monotonen Abschnitten gearbeitet wird bzw. nicht-monotone Fälle z. B. durch die geschilderte Validitätsprüfung von der Betrachtung ausgeschlossen werden (beispielsweise ein negatives Längemaß als Lösung).

mögliche Spielräume bzw. Freiheitsgrade bleiben erhalten und Zielkonflikte können aufgeschoben werden, bis sie tatsächlich gelöst werden müssen. Dies ist erst bei der Herstellung von Einzellösungsräumen in Verarbeitungsschritt 3 notwendig.

Schritt 3: Bildung der Einzellösungsräume

Der nach Schritt 2 verbleibende resultierende Gesamtlösungsraum suggeriert über seine Außengrenzen (gebildet durch die aktuellen Grundwertemengen der beteiligten Merkmale) Ausmaße, die unter Beachtung der noch vorhandenen inneren Abhängigkeiten nicht für alle Dimensionen dieser Merkmale gleichzeitig garantiert werden können. Für einen direkten Vergleich mit dem Problemraum kann der resultierende Gesamtlösungsraum daher nicht genutzt werden. Gleichmaßen kann auf dieser Basis noch keine sichere Aussage über die Eignung der PZL (Lösungsraum) hinsichtlich der individuellen Problemraumspezifikation getroffen werden. Daher wird in Schritt 3 die Aufspaltung des resultierenden Gesamtlösungsraums in Einzellösungsräume vorgenommen, die keine inneren Abhängigkeiten mehr aufweisen. Die Einzellösungsräume repräsentieren dann jeweils gültige Kombinationen an Eigenschaften der PZL. Daher können sie jeweils als eigenständige Lösungsräume die PZL repräsentieren und für den direkten Vergleich mit der Problemraumspezifikation genutzt werden. Nach einer allgemeinen, abstrakten Darstellung der Funktionsweise der genutzten Mechanismen wird an dem bereits in Schritt 2 genutzten vereinfachten Beispiel die prinzipielle Arbeitsweise dieses Verarbeitungsschrittes verdeutlicht.

Die Propagation durch das jeweilige Netzwerk erfolgt auch in Verarbeitungsschritt 3 wieder nach einem vom **Routing** entworfenen Weg. Für das Routing gelten dabei die bereits für Schritt 2 getroffenen Aussagen. Die für die Auswahl des Weges bestimmenden Faktoren und ihre Auswirkungen können sich jedoch zum Routing in Schritt 2 unterscheiden, da nun auch die Ergebnisse aus dem vorherigen Schritt und die aktuelle Situation des Lösungsraums (aktuelle Grundwertemengen und Relationsinhalte) mit einbezogen werden können. Dadurch bieten sich ggf. abweichende Routingstrategien an bzw. sind sinnvoller. Auf diese Unterschiede soll hier nicht näher eingegangen werden.

Auch im Verarbeitungsschritt 3 wird das Netzwerk im Rahmen der **Propagation (Split und Komposition)** komplett durchschritten und jede Relation einmal (ohne Wiederholung) verarbeitet. Abweichend von der Propagation (Synthese) in Schritt 2 liegt der Fokus hier jedoch darauf, jede Relation in einzelne, konsistente Einzellösungsräume zu spalten (Split) und die entstandenen Einzellösungsräume wieder jeweils mit den neu entstehenden Einzellösungsräumen (Split) der nächsten Relation zu verknüpfen (Komposition). Die beiden beteiligten Mechanismen Split und Komposition werden im Rahmen der Propagation wechselseitig ausgeführt, wobei immer mit dem Split begonnen wird. Die Komposition ist nur notwendig, wenn das Netzwerk aus mehr als einer Relation besteht – also bei einer Verkettung.

Beim **Split** von \mathcal{R}_e wird der resultierende Gesamtlösungsraum in die einzelnen (nach Schritt 2 noch vorhandenen) repräsentierten (Lösungs-)Unterräume aufgespalten. Dadurch entstehen eigenständige Einzellösungsräume und die Relation wird aufgelöst. Die Grundwertemengen \mathcal{C} der Merkmale der beteiligten Relationsteilnehmer werden danach an die jeweiligen Grenzen dieser Einzellösungsräume angepasst. Jeder Einzellösungsraum wird nun repräsentiert durch die an der aufgelösten Relation beteiligten Merkmale und deren jeweils angepasster \mathcal{C}^{72} . Würde ein

⁷² Es gibt sozusagen nun mehrere Versionen (so viele wie Einzellösungsräume) der beteiligten Merkmale mit unterschiedlichen \mathcal{C} .

Netzwerk beispielsweise nur aus einer \mathcal{R}_e bestehen, ergäbe dies für das gesamte Netzwerk so viele Einzellösungsräume, wie noch vorhandene Unterräume durch die Relation repräsentiert wurden.

\mathcal{R}_f werden beim Split ähnlich verarbeitet, wie in Schritt 2 (\rightarrow Algorithmus in Anhang H.3). Der einzige Unterschied besteht darin, dass bei mehreren verschiedenen Lösungen für einen Relationsteilnehmer (siehe vier Gleichungen im Beispiel von Abbildung 7-19) nicht mehr nur die optimalste Lösung weiterverfolgt wird, sondern jede einzelne valide Lösung. Jede dieser Lösungen bildet einen Einzellösungsraum aus sich selbst (abgeleiteter Wert des Relationsteilnehmers) und den zugehörigen Ausprägungswerten der anderen Relationsteilnehmer, die zu der abgeleiteten Lösung geführt haben. Die Grundwertemengen \mathcal{G} der beteiligten Merkmale werden jeweils an diese Werte angepasst.

Sind im Netzwerk weitere Relationen über mindestens einen an der gesplitteten Relation beteiligten Relationsteilnehmer verkettet, so wird (je nach Routing) die nächste Relation aufgespalten. Beim verbindenden Relationsteilnehmer zur nächsten Relation (im Beispiel aus Abbildung 7-18, B_{\max}) muss dabei die ggf. durch die Aufspaltung der ersten Relation geänderte Grundwertemenge des zugehörigen Merkmals (im Beispiel aus Abbildung 7-18, B) beachtet werden. Diese aktuelle Grundwertemenge ist Basis für die Aufspaltung der nächsten Relation⁷³.

Die beim Split dieser nächsten Relation entstehenden Einzellösungsräume müssen anschließend mit den bereits existierenden Einzellösungsräumen verknüpft werden – hier kommt der Mechanismus der **Komposition** zum Einsatz. Grundsätzlich gilt dabei, dass jeder bisher existierende Einzellösungsraum (auch wenn dieser sich bereits aus mehreren Einzellösungsräumen zusammensetzt) mit jedem neuen Einzellösungsraum der als nächstes ausgewerteten Relation zusammengeführt werden muss. Die Komposition findet immer am Relationsteilnehmer statt, der beide vorher existierenden Relationen verbunden hat. Dabei werden die Ausprägungswerte der zu verbindenden Einzellösungsräume bezogen auf den Relationsteilnehmer durch Schnittmengenbildung zwischen den Ausprägungswerten harmonisiert⁷⁴. Bei der Verknüpfung der Einzellösungsräume zweier Relationen können auch neue Einzellösungsräume entstehen, die redundant⁷⁵ zu anderen der entstandenen Einzellösungsräume sind⁷⁶. Dies muss frühzeitig nach jeder Komposition geprüft und ggf. vorhandene redundante Einzellösungsräume müssen beseitigt werden.

Abbildung 7-20 veranschaulicht die Verknüpfung von Einzellösungsräumen anhand der Komposition zweier \mathcal{R}_e . Im dargestellten Beispiel werden dabei die Einzellösungsräume in den Dimensionen von X und Y (entstanden aus der Aufspaltung der Relation \mathcal{R}_1) mit den Einzellösungsräumen einer weiteren Relation in den Dimensionen von Y und Z (entstanden aus der Aufspaltung der Relation \mathcal{R}_2) verknüpft. Durch die Verknüpfung über Schnittmengenbildung und anschließender Entfernung redundanter Einzellösungsräume entstehen hier im Beispiel fünf nichtredundante Einzellösungsräume (von neun möglichen Kombinationen der Einzellösungsräume) in den Dimensionen von X, Y und Z.

⁷³ Auf diese Weise werden auch in Verarbeitungsschritt 3 die Änderungen durch das Netzwerk propagiert.

⁷⁴ Durch diese Harmonisierung wird auch die Kommutativität bei der Auswertung der Relationen gesichert.

⁷⁵ Als redundante Merkmalräume werden hier, wie auch im restlichen Teil dieser Arbeit, Merkmalräume verstanden, die von mindestens einem anderen betrachteten Merkmalraum (gilt nicht für den Vergleich von Lösungs- und Problemraum) vollständig dominiert werden. Ein Merkmalraum dominiert einen anderen, wenn er im Sinne der jeweiligen generischen Präferenz in jeder einzelnen Dimension optimaler oder gleich optimal ist als der dominierte Merkmalraum. Eine Redundanz zwischen zwei Merkmalräumen bezieht sich immer auf eine konkrete Anzahl von Dimensionen.

⁷⁶ Diese Redundanz kann durch die Schnittmengenbildung bei der Komposition entstehen, auch wenn die Einzellösungsräume der jeweiligen Relation untereinander nichtredundant waren.

Durch die Komposition von vorhandenen Einzellösungsräumen, mit den bei einer weiteren Relation entstandenen Einzellösungsräumen, entstehen zusammengesetzte Einzellösungsräume in den Dimensionen der bei beiden Relationen insgesamt beteiligten Merkmale. Diese zusammengesetzten Einzellösungsräume sind nun die Ausgangsbasis für ggf. weitere Kompositionen innerhalb des Netzwerkes. Der Vorgang wird solange fortgesetzt, bis das Netzwerk vollständig propagiert ist und nur noch Einzellösungsräume vorliegen, die sämtliche Dimensionen der am Netzwerk beteiligten Merkmale umfassen.

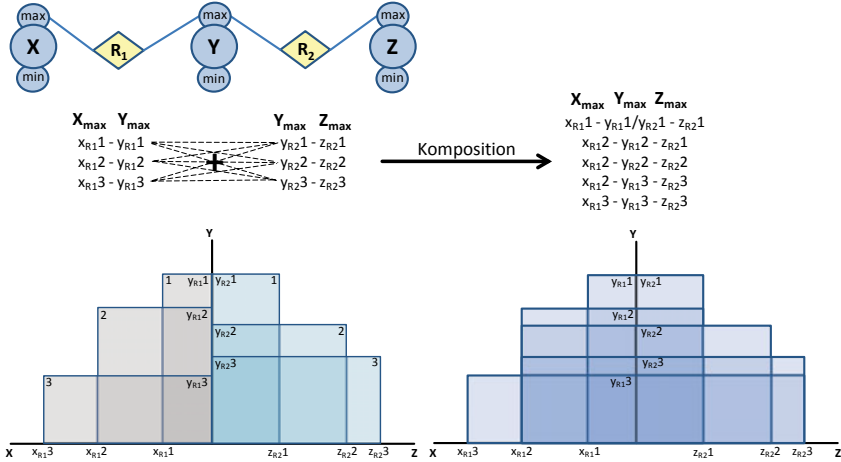
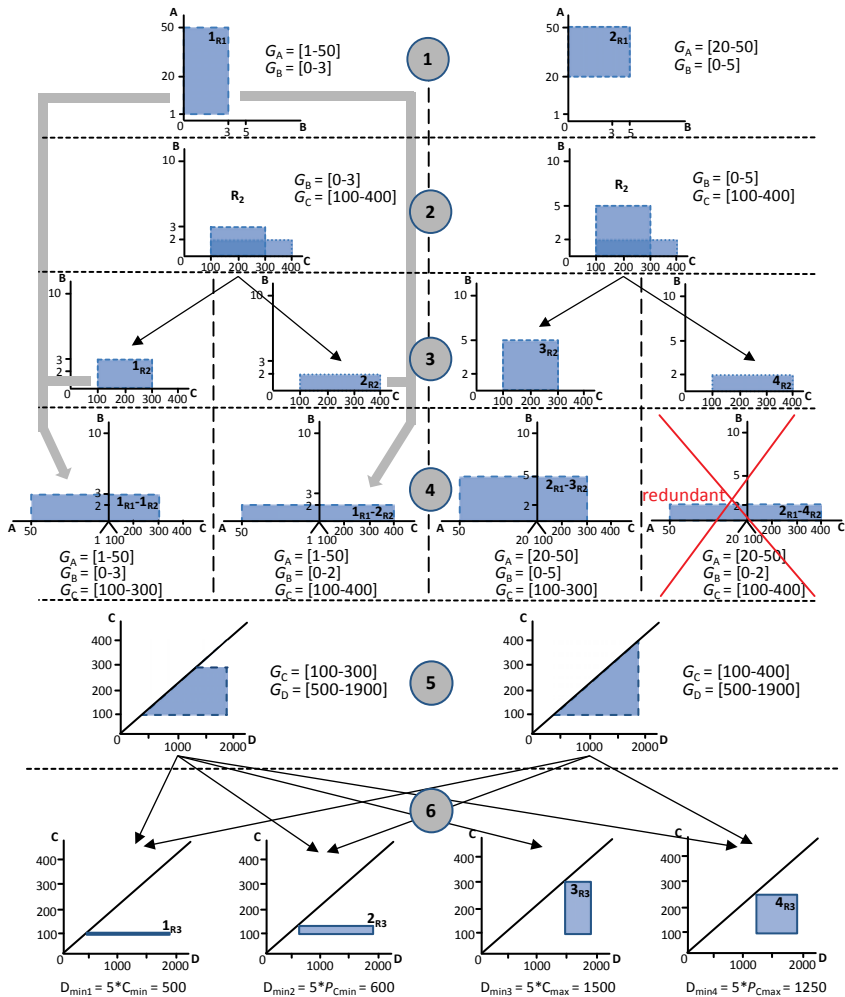


Abbildung 7-20: Komposition der Einzellösungsräume zweier extensionaler Relationen (R_e)

Aus den gleichen Gründen wie bereits in Schritt 2 können durch nicht berücksichtigte, rückwärtige Änderungsauswirkungen auch bei den Einzellösungsräumen noch Inkonsistenzen nach der Propagation bestehen. Das notwendige **Refinement** findet analog zu dem in Schritt 2 statt, hier jedoch separat für jeden Einzellösungsraum.

Seit der Separation in Schritt 1 bis zu diesem Punkt im Verarbeitungsprozess werden die einzelnen Netzwerke eines Instanzenmodells jeweils einzeln betrachtet und verarbeitet. Im Zuge der **Rekombination** werden die Einzellösungsräume der Netzwerke nun miteinander zu Einzellösungsräumen des Gesamtlösungsraums des Instanzenmodells kombiniert. Da die Netzwerke unabhängig voneinander sind, ergibt sich die Vielfachheit der Einzellösungsräume des Instanzenmodells daher aus dem Kreuzprodukt der Vielfachheiten innerhalb der einzelnen Netzwerke (Einzellösungsräume Netzwerk 1 x Einzellösungsräume Netzwerk 2 x ...). Durch die Sicherstellung der Redundanzfreiheit der Einzellösungsräume eines Netzwerkes untereinander während der bisherigen Verarbeitung, ergeben sich auch zwischen den Einzellösungsräumen des Instanzenmodells keine Redundanzen.

Beispiel: Abbildung 7-21 setzt das bereits in Verarbeitungsschritt 2 (Abbildung 7-18) begonnene Beispiel fort und stellt die Mechanismen des Verarbeitungsschrittes 3 und ihre Auswirkungen auf den Lösungsraum dar. Ausgangspunkt ist der resultierende Gesamtlösungsraum, beschrieben durch die Grundwertemengen \mathcal{G} der Merkmale des Netzwerks nach Verarbeitungsschritt 2 ($\mathcal{G}_{A,B,C,D}$) dargestellt in Abbildung 7-19 (unten). Der hier beispielhaft gewählte Weg der Propagation (Routing) entspricht dem bereits in Schritt 2 genutzten.



Einzellösungsräume des Netzwerks:

	G_A	G_B	G_C	G_D	
$1_{R1} \cdot 1_{R2} \cdot 1_{R3}$	[1-50]	[0-3]	[100-100]	[500-1900]	
$1_{R1} \cdot 1_{R2} \cdot 2_{R3}$	[1-50]	[0-3]	[100-120]	[600-1900]	
$1_{R1} \cdot 1_{R2} \cdot 3_{R3}$	[1-50]	[0-3]	[100-300]	[1500-1900]	
$1_{R1} \cdot 1_{R2} \cdot 4_{R3}$	[1-50]	[0-3]	[100-250]	[1250-1900]	
$1_{R1} \cdot 2_{R2} \cdot 1_{R3}$	[1-50]	[0-2]	[100-100]	[500-1900]	Redundanz
$1_{R1} \cdot 2_{R2} \cdot 2_{R3}$	[1-50]	[0-2]	[100-120]	[600-1900]	Redundanz
$1_{R1} \cdot 2_{R2} \cdot 4_{R3}$	[1-50]	[0-2]	[100-250]	[1250-1900]	Redundanz
$2_{R1} \cdot 3_{R2} \cdot 1_{R3}$	[20-50]	[0-5]	[100-100]	[500-1900]	
$2_{R1} \cdot 3_{R2} \cdot 2_{R3}$	[20-50]	[0-5]	[100-120]	[600-1900]	
$2_{R1} \cdot 3_{R2} \cdot 3_{R3}$	[20-50]	[0-5]	[100-300]	[1500-1900]	
$2_{R1} \cdot 3_{R2} \cdot 4_{R3}$	[20-50]	[0-5]	[100-250]	[1250-1900]	

Abbildung 7-21: Mechanismen in Verarbeitungsschritt 3 am Beispiel

Zunächst wird der Split von R_1 gemäß der bereits beschriebenen Vorgehensweise (Split einer R_c) durchgeführt. Dabei entstehen zwei Einzellösungsräume (1_{R_1} , 2_{R_1}) aus den vorherigen Unterräumen der Relation (Abbildung 7-21, Nr. 1). Die jeweiligen neuen Grundwertemengen der Einzellösungsräume entsprechen den Ausmaßen dieser Unterräume (Nr. 1). Die Anpassung der Grundwertemenge in der Dimension von B muss nun in der ebenfalls mit B verbundenen Relation R_2 berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 7-21, Nr. 2 dargestellt ist, wird dabei jeder Einzellösungsraum separat betrachtet. Verfolgt man den Weg jedes individuellen Einzellösungsraums weiter, zeigt sich, dass sich durch 1_{R_1} eine Änderung der Grundwertemenge in B von [0-5] zu [0-3] ergibt, die sich auf R_2 auswirkt. 2_{R_1} wiederum ändert die Grundwertemenge hinsichtlich B nicht und hat damit keine Auswirkungen auf R_2 (Nr. 2). Beim folgenden Split von R_2 (Nr. 3) wird wie auch schon bei R_1 verfahren (Split einer R_c). Es entstehen dabei jeweils zwei neue Einzellösungsräume (1_{R_2} , 2_{R_2} bzw. 3_{R_2} , 4_{R_2}) in den Dimensionen B und C.

Bei der sich anschließenden Komposition werden die Einzellösungsräume 1_{R_1} und 2_{R_1} jeweils mit den zugehörigen Einzellösungsräumen der ehemaligen Relation R_2 verknüpft. Es entstehen vier zusammengesetzte Einzellösungsräume (Nr. 4). Bei der Erzeugung des zusammengesetzten Einzellösungsraums $1_{R_1-2_{R_2}}$ wird im Zuge der Schnittmengenbildung bei der Komposition die ursprüngliche Grundwertemenge G_B von [0-3] auf [0-2] reduziert. Beim zusammengesetzten Einzellösungsraum $2_{R_1-4_{R_2}}$ ist die Situation ähnlich. Hier wird G_B von [0-5] auf [0-2] reduziert. Durch diese Reduktion in der Dimension von B, wird $2_{R_1-4_{R_2}}$ jedoch redundant zu $1_{R_1-2_{R_2}}$, da dieser $2_{R_1-4_{R_2}}$ vollständig enthält⁷⁷. Daher kann $2_{R_1-4_{R_2}}$ als Einzellösungsraum entfernt werden und wird nicht weiter betrachtet.

Die nun vorliegenden zusammengesetzten Einzellösungsräume haben eine unterschiedliche Grundwertemenge in Dimension von C. $1_{R_1-2_{R_2}}$ hat eine G_C von [100-400] und damit keine Auswirkungen auf R_3 (da sich für die Relation nichts ändert). Die anderen beiden Einzellösungsräume haben eine G_C von [100-300]. Dadurch muss auch dieser Fall berücksichtigt und R_3 entsprechend angepasst werden (Nr. 5).

Beide Fälle von R_3 werden im Folgenden aufgespalten (Split einer R_f). Durch die Auswertung der Abbildungsvorschrift von R_3 mit den zur Ableitung von D_{\min} jeweils verwendeten Werten für den anderen Relationsteilnehmer C_{\max} (C_{\min} , C_{\max} , $P_{C\min}$, $P_{C\max}$) ergeben sich in den Fällen mit $G_C = [100-300]$ vier Lösungen (Nr. 6) für den Relationsteilnehmer D_{\min} und damit vier Einzellösungsräume (1_{R_3} , 2_{R_3} , 3_{R_3} , 4_{R_3}). Bei dem mit $G_B = [100-400]$ betrachteten Fall der Relation ergeben sich drei Lösungen und damit drei Einzellösungsräume, die mit denen der anderen Fälle identisch sind (1_{R_3} , 2_{R_3} , 4_{R_3}). Durch die Dopplung werden sie in Abbildung 7-21 nicht extra dargestellt. Zudem ergibt sich hier eine Lösung ($D_{\min} = 5 * C_{\max} = 2000$, mit $C_{\max} = 400$), die außerhalb von G_D liegt und daher nicht valide ist. Auch hierzu wird der entsprechende Einzellösungsraum nicht dargestellt.

Die Komposition der drei bereits existierenden Einzellösungsräume ($1_{R_1-1_{R_2}}$, $1_{R_1-2_{R_2}}$, $1_{R_1-3_{R_2}}$) mit den vier (bei $G_C = [100-300]$) bzw. drei (bei $G_C = [100-400]$) neuen Einzellösungsräumen erfolgt wieder über eine Schnittmengenbildung am verbindenden Relationsteilnehmer C_{\max} . Dabei wird jeweils die Schnittmenge zwischen dem Wert von C_{\max} im vorhandenen Einzellösungsraum (beispielsweise 300 in $1_{R_1-1_{R_2}}$) und dem Wert von C_{\max} im zu verknüpfenden neuen

⁷⁷ Man beachte, dass die abgebildete Skala in der Dimension A bei $2_{R_1-4_{R_2}}$ erst ab $A = 20$ beginnt ($G_A = [20-50]$), während sie bei $1_{R_1-2_{R_2}}$ bereits bei $A = 1$ beginnt ($G_A = [1-50]$). Dieser Unterschied in der Darstellung der Skalen wurde gewählt, damit durch die Zusammenführung der Lösungsräume an der Skala des Merkmals B (vertikale Achse) der sich ergebende zusammengesetzte Einzellösungsraum anschaulich wird.

Einzellösungsraum (beispielsweise 120 in 2_{R3}) gebildet. Diese Schnittmenge ergibt dann das C_{\max} im zusammengesetzten Einzellösungsraum (beispielsweise $1_{R1}-1_{R2}-2_{R3}$). Als Resultat entstehen elf (= vier für $1_{R1}-1_{R2}$ + drei für $1_{R1}-2_{R2}$ + vier für $1_{R1}-3_{R2}$) zusammengesetzte Einzellösungsräume für das im Beispiel beschriebene Netzwerk (Nr. 7). Infolge der bei der Komposition vorgenommenen Ersetzung von C_{\max} , entstehen Redundanzen innerhalb der zusammengesetzten Einzellösungsräume (z. B. $1_{R1}-2_{R2}-1_{R3}$ ist redundant zu $1_{R1}-1_{R2}-1_{R3}$). Wie Abbildung 7-21, Nr. 7 zeigt, entstehen im Beispiel hier drei redundante Einzellösungsräume, die nicht weiter betrachtet werden müssen. Es verbleiben acht Einzellösungsräume, die als eigenständige Lösungsräume den durch das Netzwerk beschriebenen Anteil des Gesamtlösungsraums repräsentieren.

Anmerkungen: Nach dem Split der jeweiligen Relation ist in Form der nichtredundanten Einzellösungsräume sichergestellt, dass alle Zielkonflikte, die nicht bereits durch Schritt 2 gelöst werden konnten, durch die Aufspaltung, als eine Art von Fallunterscheidung, aufgelöst wurden.

Schritt 4: Auswertung und Nachbereitung

Die im Verarbeitungsschritt 3 erzeugten Einzellösungsräume besitzen keine inneren Abhängigkeiten mehr – sie können daher als eigenständige Lösungsräume direkt dem Problemraum gegenübergestellt bzw. mit der Problemraumspezifikation verglichen werden. Da sie in Ihrer Gesamtheit den Lösungsraum der PZL repräsentieren, kann durch den Vergleich der Einzellösungsräume mit der Problemspezifikation die Eignung der PZL für den entsprechenden Anwendungs- bzw. Problemfall festgestellt und bewertet werden. Inhalt des finalen Verarbeitungsschrittes ist daher dieser Vergleich und die Ableitung einer Eignungsbewertung sowie die Aufbereitung der Ergebnisse für die Ergebnispräsentation und -erklärung gegenüber dem Anwender. In Anknüpfung zu den vorangegangenen Verarbeitungsschritten wird die Erklärung der Mechanismen nach einer allgemeinen Darstellung durch ein konkretes Beispiel ergänzt.

Durch die endgültige Auflösung der inneren Abhängigkeiten der Einzellösungsräume können diese als voneinander unabhängige Vektoren im multidimensionalen Merkmalraum betrachtet werden. Dies macht eine direkte Gegenüberstellung jeweils eines Einzellösungsraums mit dem Problemraum und die Nutzung von Proximitätsmaßen möglich. Proximitätsmaße sind Metriken für den Vergleich zweier Vektoren und die Ableitung einer Bewertung hinsichtlich deren Ähnlichkeit bzw. Distanz. Ein kurzer Überblick hinsichtlich bekannter Proximitätsmaße und Möglichkeiten sowie eine kritische Betrachtung dieser werden am Ende von Schritt 4 gegeben.

Im Einklang mit den in Abschnitt 4.3 geforderten Konzepteigenschaften lässt sich für die Wahl einer geeigneten Vergleichs- bzw. Bewertungsmetrik insbesondere aus den Anforderungen Ic, Ie und If die Forderung nach einer Skalenniveau-übergreifenden, möglichst einfachen und nachvollziehbaren Bewertungsmöglichkeit mit hoher Objektivität und Anwendungs-unabhängigkeit ableiten. Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften und unter Betrachtung der diesen entgegenstehenden Nachteilen der verfügbaren Proximitätsmaße bzw. angepassten Vorgehensweisen wird eine Bewertungsmetrik in Anlehnung an die Hamming-Distanz gewählt. Die Hamming-Distanz⁷⁸ ist eine binäre Metrik (Übereinstimmung: Distanz = 0, Nicht-übereinstimmung: Distanz = 1). Sie kann hier Skalenniveau-übergreifend genutzt werden, da sie auf dem niedrigsten vorkommenden Skalenniveau beruht. Dieses einfache Proximitätsmaß berücksichtigt nicht die individuelle Güte der ausprägungsspezifischen Erfüllung oder Nichterfüllung und führt keine Vermischung (durch Aggregation) verschiedener Maßstäbe durch.

⁷⁸ Siehe auch z. B. bei [DRE91].

Darüber hinaus ist die Hamming-Distanz nicht durch subjektive Faktoren verfälscht, bringt keine Annahmen in die Bewertung ein und hat damit ein hohes Maß an Objektivität gegenüber allen beteiligten Dimensionen des Merkmalraums. Für das hier entwickelte Konzept und die damit behandelten Problemstellungen ist diese Bewertungsmetrik daher geeignet⁷⁹.

Im Rahmen des vorliegenden Konzepts wird von Erfüllung gesprochen, wenn die zugesicherte Ausprägungsmenge die angeforderte Ausprägungsmenge vollständig enthält ($A_{\text{Anf}} \subseteq A_{\text{Zus}} \rightarrow 7.2.2$). Diese Betrachtung muss für jede Merkmalausprägung spezifisch vorgenommen werden (d. h., dass beispielsweise für ein rational skaliertes Merkmal A die Merkmalausprägungen A_{min} und A_{max} jeweils mit der entsprechend korrespondierenden Ausprägung der Problemraumspezifikation verglichen werden müssen). In Anlehnung an die gewählte Metrik wird somit bei einer Erfüllung eine Hamming-Distanz = 0 angenommen. Liegt keine bzw. eine unvollständige Erfüllung vor, so beträgt die Hamming-Distanz = 1. Die Gesamtbewertung eines Einzellösungsraums (über alle Merkmale und ihre Ausprägungen) ergibt sich aus der Aggregation der Einzeldistanzen (jeweils eine Ausprägung):

$$\Delta(\text{Problemraum}, \text{Lösungsraum}) = \sum_{i=1}^i D \quad \begin{array}{l} D(\text{Distanz}) = 0, \text{ wenn } A_{i\text{Anf}} \subseteq A_{i\text{Zus}} \text{ und} \\ D = 1, \text{ wenn } A_{i\text{Anf}} \supset A_{i\text{Zus}} \\ i = \text{Merkmalausprägung} \end{array}$$

Beträgt die Gesamtbewertung eines Einzellösungsraums größer Null, so ist der Einzellösungsraum für die Erfüllung der Problemraumspezifikation nicht geeignet. Lässt sich beim Vergleich der Problemraumspezifikation mit den Einzellösungsräumen einer PZL mindestens ein Einzellösungsraum finden, der eine Gesamtbewertung gleich Null hat, so kann diese PZL als geeignet betrachtet werden, die Problemraumspezifikation zu erfüllen. Ist dies nicht der Fall, so kann eine definitive Nichteignung der PZL festgestellt werden. Fehlen für den Vergleich relevante Teile der Problemraumspezifikation (Merkmalausprägungen), so wird dadurch zwar die Distanz nicht erhöht, jedoch kann auch keine Aussage über die eindeutige Eignung für dieses Merkmal, somit für den betroffenen Einzellösungsraum und damit auch für die zugehörige PZL getroffen werden. Der Anwender wird darauf in solchen Fällen gezielt durch die Erklärungskomponente hingewiesen. Die vergleichende Gegenüberstellung von Problemraumspezifikation und Einzellösungsräumen wird für alle vorhandenen Einzellösungsräume durchgeführt⁸⁰.

Neben der reinen Bewertung der Einzellösungsräume und damit der PZL bezüglich ihrer Eignung, ist die Ergebnisaufbereitung und -präsentation ein abschließender, wichtiger Arbeitsschritt, um die Verständlichkeit, Nachvollziehbarkeit und damit auch Nutzbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen (\rightarrow Anforderung IIb). Ziel ist dabei der Brückenschlag vom repräsentierten Expertenwissen über die Ergebnisfindung zur Ergebnisdarstellung. Dies beinhaltet über die Eignungsbewertung hinaus die Ableitung und Analyse PZL-spezifischer Informationen. Zu nennende Aspekte sind im Rahmen der Ergebnisaufbereitung unter anderem die Identifikation fehlender, irrelevanter, relevanter und kritischer Faktoren (Merkmalsausprägungen) der PZL und ihre Auswirkungen auf die Ergebnisbildung. Ebenfalls relevant ist das Aufzeigen von Spielräumen (Potential zur Erfüllung noch höherer Anforderungen) und Lösungsalternativen und der sich daraus ergebenden Möglichkeiten sowohl zur Modifizierung der Problemraumspezifikation (um beispielsweise die

⁷⁹ Um im Bedarfsfall anderen Zielen und Anforderungen gerecht werden zu können und die Verarbeitung an diese anzupassen, wird die Bewertungsmetrik hier als ein optional modifizierbarer oder austauschbarer Bestandteil der Verarbeitung betrachtet.

⁸⁰ Im Gegensatz zu klassischen Constraint-Anwendungen (z. B. bei [BR199]) reicht es nicht aus, eine gültige Einzellösung zu finden. Der Wert für die Entscheidungsfindung des Anwenders ergibt sich sowohl aus den Einzellösungen, als auch aus ihrer Gesamtheit (resultierender Gesamtlösungsraum). Gerade durch das Zusammenspiel beider Informationsquellen wird die umfassende Einordnung und Einschätzung der Lösung bzw. der Eignungsbewertung ermöglicht – sowohl auf Ebene der Funktion als auch auf Ebene der PZL, wie Kapitel 8 zeigt.

Eignung der PZL zu erreichen) als auch ggf. zur Anpassung der PZL. Darüber hinaus sinnvoll ist die Visualisierung sowohl der Einzellösungsräume als auch des resultierenden Gesamtlösungsraums im Verhältnis zueinander und im Bezug zum spezifizierten Problemraum und letztlich auch das zur Verfügung stellen von zusätzlichen Informationen und Erklärungen. Auf die jeweils konkrete Umsetzung dieser Aspekte wird in Kapitel 8 eingegangen.

Da in Verarbeitungsschritt 3 sehr viele Einzellösungsräume entstehen können, ist es sinnvoll, diese vor der Bereitstellung im Rahmen der abschließenden Ergebnispräsentation und -erklärung zu filtern. Darunter soll hier jedoch nicht das Verwerfen von Lösungen, sondern vielmehr die skalierbare Fokussierung auf die relevantesten Lösungen verstanden werden. Dafür sollen vornehmlich die Einzellösungsräume ausgewählt werden, die der Problemraumspezifikation am nächsten kommen bzw. am meisten Potential zur Erfüllung dieser besitzen. Aus diesem Grund werden die Einzellösungsräume einem **Ranking** unterzogen. Hierbei wird ein kaskadiertes Ranking angewendet: In der ersten Stufe wird die bereits zur Eignungsprüfung genutzte Hamming-Distanz genutzt. Die Distanzwerte der Einzellösungsräume ergeben bereits ein Ranking in Bezug auf die Problemraumspezifikation. Eine weitere Differenzierung von Einzellösungsräumen mit gleichen Rankingwerten ist somit jedoch noch nicht möglich⁸¹. Da sich die Güte einer Lösung oft erst im Vergleich mit anderen zeigt [HAB12], werden für die zweite Stufe des Rankings die Einzellösungsräume jeweils paarweise miteinander verglichen und damit ins Verhältnis zueinander gesetzt. Dabei wird die relative Dominanz der Einzellösungsräume im Vergleich zu den anderen bestimmt. Dominant ist eine Ausprägung dann, wenn sie im Sinne der generischen Präferenz ihres Merkmals optimaler (oder gleich optimal) ist als die mit ihr Vergleichene.

$$\text{Ranking 2. Stufe} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^i d$$

n = Anzahl Einzellösungsräume; i = Merkmalausprägungen;
d (Dominanz) = 0 (wenn eigene Ausprägung von der Ausprägung des anderen Einzellösungsraums dominiert wird), d = 1 (wenn eigene Ausprägung die Ausprägung des anderen Einzellösungsraums dominiert)

Mit diesem Dominanzranking kann eine größtmögliche Differenzierung der Einzellösungsräume auf Basis einer objektiven Betrachtung über alle Merkmale erreicht werden, ohne Skalenniveauübergreifende Aggregationen vornehmen zu müssen. Dadurch können die Nachteile (fehlende Berücksichtigung der merkmalspezifischen Erfüllungsqualität) eines rein auf der Hamming-Distanz beruhenden Rankings ausgeglichen werden. Neben der vorrangig bewerteten Erfüllung (Ranking 1. Stufe) geht dadurch auch die Qualität der Erfüllung oder Nichterfüllung in das Ranking ein⁸².

Eine darüber hinausgehende und optionale Erweiterungsmöglichkeit hinsichtlich der Ergebnisaufbereitung bietet die **Fixierung der Problemraumspezifikation**. Zweck und Funktionsweise dieses Mechanismus werden am Ende von Abschnitt 7.5.2 im Rahmen der dort aufgeführten ergänzenden und optionalen Verarbeitungsmechanismen vorgestellt.

Beispiel: Am bereits in Schritt 2 und Schritt 3 genutzten Beispiel, werden im Folgenden die Mechanismen aus Verarbeitungsschritt 4 erläutert. Zur Eignungsbewertung der modellierten PZL

⁸¹ Einzellösungsräume mit der gleichen Rankingbewertung im Hinblick auf die Problemraumspezifikation können merkmalspezifisch trotzdem sehr unterschiedliche Ausprägungswerte und damit eine mitunter qualitativ oder quantitativ stark differierende Eignung hinsichtlich der merkmalspezifischen Problemraumspezifikation besitzen.

⁸² Beispielweise haben einzelne Einzellösungsräume mehr Potential bzw. Spielraum zur Erfüllung einer merkmalspezifischen Problemraumspezifikation als andere. Solche Einzellösungsräume werden gegenüber Einzellösungsräumen bevorzugt, die zwar auch die Problemraumspezifikation erfüllen, jedoch weniger weiteren Spielraum besitzen. Dieses Mehr an Spielraum gegenüber der Problemraumspezifikation ist vor allem vorteilhaft, wenn der spezifische Anwendungs- bzw. Problemfall Freiheitsgrade aufweist, d. h. die Problemraumspezifikation teilweise oder ganz unbekannt ist bzw. nicht feststeht.

hinsichtlich der Problemraumspezifikation werden alle Einzellösungsräume gegenüber dieser Problemraumspezifikation mittels Vergleich ausgewertet. Abbildung 7-22 zeigt hierzu den Vergleich eines ausgewählten Einzellösungsraums mit der Problemraumspezifikation in allen Dimensionen der betrachteten Merkmale. Beim Vergleich wird für jede Ausprägung festgestellt, ob die Ausprägungsmenge mit dem Aussageziel *Zusicherung* die Ausprägungsmenge mit dem Aussageziel *Anforderung* enthält ($A_{\text{Anf}} \subseteq A_{\text{Zus}}$). Aus diesem Vergleich wird die jeweilige Hamming-Distanz für die Ausprägung abgeleitet. Die Aggregation aller einzelnen Distanzen gibt die Hamming-Distanz für den Einzellösungsraum. Im dargestellten Beispiel zeigt die Hamming-Distanz = 0, dass der Einzellösungsraum die Problemraumspezifikation vollständig erfüllt. Daraus kann bereits geschlossen werden, dass die PZL geeignet ist.

Für eine spätere umfassende Ergebniserklärung und die Darstellung der Möglichkeiten des Lösungsraums werden auch die übrigen Einzellösungsräume entsprechend ausgewertet (→ Abbildung 7-23). Zusätzlich werden zu diesem Zweck die Einzellösungsräume einem Ranking unterzogen. In der ersten Rankingstufe werden die bereits ermittelten Hamming-Distanzen genutzt. Je höher der Erfüllungsgrad hinsichtlich der Problemraumspezifikation, desto besser werden die Einzellösungsräume gerankt.

Vergleich/Auswertung:

Merkmal(-raumdimension):

Problemraumspezifikation: A [25-45] B [1-1,8] C [120-250] D (Anforderung) [1250-1750]

Einzellösungsraum (1_{R1} - 1_{R2} - 4_{R3}): [1-50] [0-3] [100-250] [1250-1900] (Zusicherung)

Hamming-Distanz:

0 0 0 0 0 0

$\Sigma = 0$

Einzellösungsraum erfüllt die Problemraumspezifikation

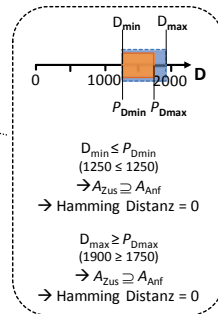


Abbildung 7-22: Auswertung von Einzellösungsräumen durch den Vergleich mit der Problemraumspezifikation

Aus diesem Vergleich wird die jeweilige Hamming-Distanz für die Ausprägung abgeleitet. Die Aggregation aller einzelnen Distanzen gibt die Hamming-Distanz für den Einzellösungsraum. Im dargestellten Beispiel zeigt die Hamming-Distanz = 0, dass der Einzellösungsraum die Problemraumspezifikation vollständig erfüllt. Daraus kann bereits geschlossen werden, dass die PZL geeignet ist. Für eine spätere umfassende Ergebniserklärung und die Darstellung der Möglichkeiten des Lösungsraums werden auch die übrigen Einzellösungsräume entsprechend ausgewertet. Zusätzlich werden zu diesem Zweck die Einzellösungsräume einem Ranking unterzogen. In der ersten Rankingstufe werden die bereits ermittelten Hamming-Distanzen genutzt. Je höher der Erfüllungsgrad hinsichtlich der Problemraumspezifikation, desto besser werden die Einzellösungsräume gerankt. Im Beispiel in Abbildung 7-23 werden daher die beiden Einzellösungsräume mit der Hamming-Distanz = 0 am besten gerankt (auf dem gleichen Rang 1). Alle weiteren Einzellösungsräume mit der Hamming-Distanz = 1 folgen (alle Rang 2). Eine Differenzierung innerhalb des jeweils gleichen Ranges (Ranking erster Stufe) kann durch das Ranking der zweiten Stufe erreicht werden. Dazu wird jeder Einzellösungsraum jedem anderen Einzellösungsraum des gleichen Ranges (Ranking erster Stufe) gegenübergestellt. Es wird für jede seiner Merkmalausprägungen einzeln geprüft, ob diese dominant gegenüber der entsprechenden

Ausprägung des anderen Einzellösungsraums ist. Die Aggregation der einzelnen Werte ergibt einen Gesamtwert für den Einzellösungsraum. Je höher diese Gesamtwerte sind, desto höher ist der Rang des Einzellösungsraums innerhalb der Einzellösungsräume mit dem gleichen Rang der ersten Rankingstufe.

Ranking:

1. Stufe:

(Hamming-Distanz)

		Merkmal(/-raumdimension)				Σ	Ranking
		A	B	C	D		
Einzellösungsräume:	$1_{R1}-1_{R2}-4_{R3}$	0 0	0 0	0 0	0 0	0	1
	$2_{R1}-3_{R2}-4_{R3}$	0 0	0 0	0 0	0 0	0	1
	$1_{R1}-1_{R2}-1_{R3}$	0 0	0 0	0 1	0 0	1	2
	$1_{R1}-1_{R2}-2_{R3}$	0 0	0 0	0 1	0 0	1	2
	$1_{R1}-1_{R2}-3_{R3}$	0 0	0 0	0 0	1 0	1	2
	$2_{R1}-3_{R2}-1_{R3}$	0 0	0 0	0 1	0 0	1	2
	$2_{R1}-3_{R2}-2_{R3}$	0 0	0 0	0 1	0 0	1	2
	$2_{R1}-3_{R2}-3_{R3}$	0 0	0 0	0 0	1 0	1	2

2. Stufe:

(relative Dominanz)

$1_{R1}-1_{R2}-1_{R3}$ [1-50] [0-3] [100-100] [500-1900]

gegenüber:

$1_{R1}-1_{R2}-2_{R3}$ [1-50] [0-3] [100-120] [600-1900]

$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

$$\Sigma = 7$$

Gegenüber:	$1_{R1}-1_{R2}-1_{R3}$	$1_{R1}-1_{R2}-2_{R3}$	$1_{R1}-1_{R2}-3_{R3}$	$2_{R1}-3_{R2}-1_{R3}$	$2_{R1}-3_{R2}-2_{R3}$	$2_{R1}-3_{R2}-3_{R3}$	Zeilen- Σ
$1_{R1}-1_{R2}-1_{R3}$	-	7	7	7	7	7	35
$1_{R1}-1_{R2}-2_{R3}$	7	-	7	7	7	7	35
$1_{R1}-1_{R2}-3_{R3}$	7	7	-	7	7	7	35
$2_{R1}-3_{R2}-1_{R3}$	7	7	7	-	7	7	35
$2_{R1}-3_{R2}-2_{R3}$	7	7	7	7	-	7	35
$2_{R1}-3_{R2}-3_{R3}$	7	7	7	7	7	-	35

Abbildung 7-23: Ranking der Einzellösungsräume

Der Einfachheit des hier verwendeten Beispiels geschuldet, ergeben sich für die Einzellösungsräume des Ranges 2 (in der ersten Rankingstufe) hier die gleichen Gesamtwerte hinsichtlich der zweiten Rankingstufe. Somit ist für dieses spezifische Beispiel keine über die erste Rankingstufe hinausgehende Differenzierung möglich. Eine weitere Differenzierung kann jedoch mit dem optionalen Mechanismus zur Fixierung der Problemraumspezifikation erreicht werden, der am Ende von Abschnitt 7.5.2 näher erläutert wird.

Anmerkungen: Für den Vergleich zweier Vektoren im Merkmalraum werden Proximitätsmaße bzw. Metriken verwendet, die eine Aussage über die Distanz bzw. die Ähnlichkeit beider zueinander ableiten lassen. Für die einzelnen Skalenniveaus wurden vielfältige Möglichkeiten für quantitative (z. B. *euklidische Distanz*, *Minkowski- oder Mahalanobis-Distanz*) und qualitative Skalen (z. B. *Tanimoto*-, *Jaccard*-, *Kulczynski*-, *Dice-Koeffizient*) entwickelt, wie u. a. [OPi80], [REi91B], [BRA96], [MÜH12] beschreiben. Jedes dieser Proximitätsmaße eignet sich jeweils für einen in sich homogen skalierten Merkmalraum. Wie bereits [OPi80], [REi91B], [DRE91], [BRA96], [GEM98] und [ERB13] aufzeigen, existiert jedoch für die Behandlung von Merkmalräumen heterogener Skalierung kein adäquates Proximitätsmaß. Neben der ausschließlichen Fokussierung auf ausgewählte Skalenniveaus wie beispielsweise bei [MES07] und [ERB13], läuft die Behandlung heterogener Merkmalräume in bestehenden Ansätzen immer auf die Anwendung einer oder mehrerer der folgenden Vorgehensweisen hinaus: Beim Treffen von Annahmen oder

Setzen willkürlicher Randbedingungen (z. B. Äquidistanzannahme bei ordinalen Skalen) werden starre Bedingungen vorausgesetzt oder festgelegt. Bei der Homogenisierung der Raumdimensionen über die Transformation von Skalen (Quasimetrisierung, Dichotomisierung) kommt es zur Inkaufnahme von Informationsgewinnen oder -verlusten. Die Aggregation von separat gebildeten Proximitätsmaßen einzelner Merkmalraumteile bewirkt die mitunter unzulässige Vermischung von Aussagequalitäten und wird in der Literatur als kritisch bewertet [OP180], [RE191B], [HAB12]. Bei der Separierung der Merkmalräume in jeweils skalenniveauhomogene Teile und der getrennten Verarbeitung (vgl. [DRE91]) dieser, kommt es zur Auflösung des Skalenniveau-übergreifenden Konzeptcharakters und zur unvermeidlichen Gewichtung einzelner Skalenniveaus.

Ergänzende und optionale Verarbeitungsmechanismen

Neben den beschriebenen Mechanismen bei der Wissensverarbeitung gibt es zwei weitere, die jedoch als optional und ergänzend zu den obligatorischen Mechanismen zu verstehen sind. Beide finden an den entsprechenden Stellen innerhalb der Verarbeitungsschritte bereits Erwähnung und werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Bildung impliziter (Lösungs-)Unterräume: Bereits in Abschnitt 7.2.3 wird angedeutet, dass bei den durch extensionale Relationen R_c repräsentierten (Lösungs-)Unterräumen zwei verschiedene Interpretationen der Repräsentation möglich sind. Im „Standardfall“ werden die explizit repräsentierten Unterräume als eigenständige, zueinander disjunktive (\cup) Lösungsräume in den Dimensionen der an der Relation beteiligten Merkmale interpretiert (\rightarrow Abbildung 7-7). Treten Problemräume auf, die zwar in der Gesamtheit sich berührender oder überlappender Unterräume (zusammengesetzter Lösungsraum in Abbildung 7-24, links) liegen, jedoch in keinem einzelnen Unterraum vollständig (Problemraum PR_2 in Abbildung 7-24, links), so gilt die zugehörige Problemraumspezifikationen als nicht erfüllbar durch die Möglichkeiten der durch die Relation repräsentierten (Lösungs-)Unterräume. In manchen problem- oder anwendungsspezifischen Fällen kann es jedoch sinnvoll sein⁸³, dass die durch die Relation repräsentierten Unterräume als ein gesamter, zusammengesetzter Lösungsraum interpretiert werden. Damit würden die einzelnen Unterräume als konjunktiv (\cap) zueinander verstanden und der in Abbildung 7-24, links dargestellte Problemraum PR_2 wäre erfüllbar. Um diese alternative (implizite) Interpretation zu ermöglichen und gleichzeitig die (einfache) Algorithmik zur Auswertung von R_c nutzen zu können, müssen aus den vorhandenen, explizit repräsentierten Unterräumen (explizite Unterräume) weitere (implizite Unterräume) abgeleitet werden⁸⁴.

Ein impliziter Unterraum kann immer nur zwischen zwei (oder mehreren) sich überlappenden bzw. berührenden expliziten Unterräumen gebildet werden. Die Bildung impliziter Unterräume beruht auf dem Prinzip, dass von den an der Schnittmenge zwischen den expliziten Unterräumen beteiligten Dimensionen eine Dimension in den Grenzen des zusammengesetzten Lösungsraums optimiert werden kann. Diese Optimierung bedeutet dabei eine Vergrößerung oder Verkleinerung innerhalb der Dimension in Abhängigkeit der generischen Präferenz des für die Dimension verantwortlichen Merkmals (bei Aussageziel „Zusicherung“ demnach vergrößert). Abbildung 7-24, Mitte zeigt dies für einen einfachen zweidimensionalen Fall mit zwei expliziten

⁸³ Soll die Modellierung bewusst genutzt werden um einen komplexeren Lösungsraum abzubilden, der sich aus mehreren einfachen Unterräumen zusammensetzt. Somit können beispielsweise Fähigkeits- und Einsatzbereiche repräsentiert und ausgewertet werden, welche sich nicht durch einen einfachen Lösungsraum abbilden lassen (die in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-5 schematisch aufgeführten Einsatzbereiche liefern mögliche Beispiele für den zweidimensionalen Fall).

⁸⁴ Im Verständnis regelbasierter Verfahren wird durch diesen Algorithmus aus gegebenem Wissen (explizit) neues zusätzliches Wissen (implizit) abgeleitet.

Lösungsräumen. Wie erkennbar ist, optimiert iUR_1 in der Dimension B und iUR_2 in der Dimension A (hier beide Merkmale mit Aussageziel „Zusicherung“).

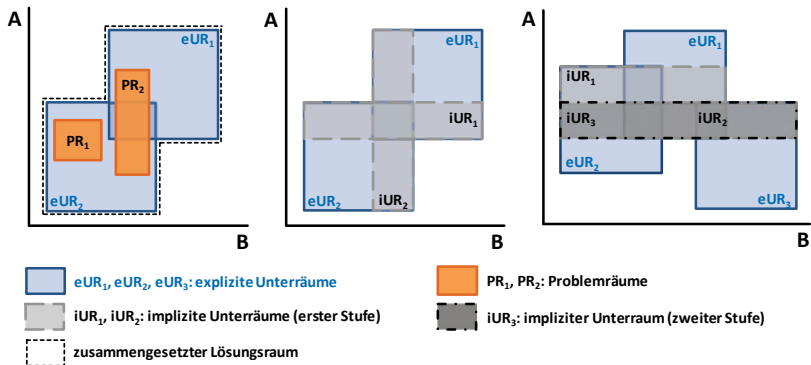


Abbildung 7-24: Ableitung impliziter (Lösungs-)Unterräume

Sollen implizite Unterräume zwischen mehr als zwei expliziten Unterräumen (Abbildung 7-24, rechts) erstellt werden, so werden zuerst die expliziten Unterräume jeweils paarweise betrachtet und implizite Unterräume abgeleitet. In Abbildung 7-24, rechts werden beispielsweise iUR_1 aus eUR_1 und eUR_2 sowie iUR_2 aus eUR_1 und eUR_3 gebildet. Die neu gebildeten impliziten Unterräume werden dann in den folgenden rekursiven Schritten des Mechanismus wie explizite Unterräume behandelt. Der rekursive Algorithmus leitet somit wiederum neue implizite Unterräume aus den nun vorhandenen Unterräumen ab. So entstehen implizite Unterräume höherer Stufen (iUR_3 aus iUR_1 und iUR_2). Dadurch können dann indirekt auch implizite Unterräume, zwischen sich nicht berührenden oder überlappenden, expliziten Unterräumen (eUR_2 und eUR_3), abgeleitet werden. In jeder Rekursionsstufe werden redundante Unterräume entfernt – dies kann sowohl explizite als auch implizite Unterräume betreffen. Somit bleiben nur Unterräume übrig, die mindestens für die Repräsentation des zusammengesetzten Lösungsraums benötigt werden. Abbruchbedingung ist das Erreichen eines Zustandes, in dem sich durch eine erneute rekursive Ausführung keine neuen, nicht redundanten Unterräume mehr ergeben. Nach Abschluss des Algorithmus stehen die neu erzeugten Unterräume für die weiteren Schritte der Wissensverarbeitung zur Verfügung. Eine Differenzierung zwischen impliziten und expliziten Unterräumen ist dann nicht mehr notwendig.

Besondere Herausforderungen für den Algorithmus sind die Verarbeitung von komplexen, zusammengesetzten Lösungsräumen aus vielen einzelnen expliziten Unterräumen, die Generalisierung auf höherdimensionale Fälle, die Berücksichtigung verschiedener Skalenniveaus, Ausprägungsaussagen und Aussageziele in ihrem heterogen kombinierten Auftreten und Zusammenwirken. Anhang H.1 stellt den Ablauf des Algorithmus schematisch dar. Der Algorithmus zur Bildung impliziter (Lösungs-)Unterräume kann optional vom Anwender genutzt werden, um bewusst eine alternative Interpretation bei der Auswertung von R_c zu erreichen bzw. zu ermöglichen. Wo notwendig, kann dadurch eine umfassendere Ausnutzung des Gesamtlösungsraums sowohl für die Ergebnisbildung als auch für die Erklärungsfähigkeit ermöglicht werden. Dabei können auch komplexere, zusammengesetzte Lösungsräume mit „Lücken“ (→ Abbildung 7-24, rechts) ausgewertet werden.

Anmerkungen: Die durch den hier vorgestellten Algorithmus ermöglichte (implizite) Interpretation und Auswertung von \mathcal{R}_e steht im Gegensatz zu der in Abschnitt 7.2.3 beschriebenen (expliziten) Betrachtung („Standardfall“). Beide Betrachtungsweisen besitzen ihre Existenzberechtigung sowie Relevanz und müssen daher abgebildet werden können. Die Wahl der Betrachtungsweise hängt stark davon ab, welches Wissen in die Modellierung der Wissensinhalte einfließt und welche Intention der Ersteller des Instanzenmodells verfolgt. Dies lässt sich auf das abstrakte Verständnis und die sich daraus ergebende vielfältige Abbildungs- und Ausdrucksfähigkeit von PZL zurückführen (→ 4.2). Im „Standardfall“ werden alle explizit modellierten und spezifizierten Unterräume der \mathcal{R}_e jeweils für sich einzeln und disjunktiv (\cup) zueinander interpretiert. Anwendung findet dieser Fall, wenn die \mathcal{R}_e ganz bewusst mehrere alternative Varianten von Unterräumen, d. h. mehrere mögliche Kombinationen von Eigenschaften (bezogen auf die an der \mathcal{R}_e beteiligten Merkmale) abbilden soll. Dies ist sinnvoll bei Anwendungsfällen, bei denen der Fähigkeitsbereich der PZL z. B. aus Marktverfügbarkeiten oder gar in Anlehnung an existierende TR hergeleitet wird bzw. dieses Wissen abbilden soll (beispielsweise wenn Durchflussmessgeräte nur in bestimmten Kombinationen von Nenndruck und Nennweite angeboten werden – hierbei muss jede Kombination eigenständig die Problemraumspezifikation erfüllen können, damit die PZL als entsprechend geeignet bewertet werden kann).

Bei der alternativen (impliziten) Interpretation der \mathcal{R}_e bilden alle explizit modellierten und spezifizierten Unterräume der \mathcal{R}_e einen zusammenhängenden Lösungsraum, der nur bezüglich seiner äußeren Grenzen betrachtet wird. Diese Interpretation ist sinnvoll, wenn bei der Wissensmodellierung ganz gezielt der Fähigkeitsbereich der PZL modelliert werden soll. Beispielsweise, wenn Wissen aus dem Bereich der allgemeinen Fachliteratur (z. B. Lösungsprinzipien der Durchflussmessung), welches losgelöst von konkretem Wissen über Marktverfügbarkeiten und Wissen über konkrete TR ist, akquiriert und zur Modellierung verwendet wird. Reichen einzelne einfache (2-dimensional: „rechteckige“) Unterräume dabei nicht aus um einen komplexeren Lösungsraum abzubilden, kann der Lösungsraum aus vielen kleinen Unterräumen zusammengesetzt und dann auch zusammenhängend betrachtet werden. Die Unterräume werden hierbei nur als Mittel zur Bildung eines zusammengesetzten Lösungsraums genutzt und nicht weiter im Einzelnen betrachtet. Dadurch werden auch Lücken und „konkave“ Lösungsraumgrenzen abbild- und verarbeitbar (Abbildung 3-1 und Abbildung 3-5 zeigen jeweils sogenannte „Einsatzbereiche“ von Prinzipien und Bauformen – entsprechende Lösungsräume könnten beispielsweise mit Hilfe der alternativen (impliziten) Interpretation behandelt werden).

Das vorliegende Konzept und die zugehörigen Verarbeitungsmechanismen ermöglichen und unterstützen beide Interpretationen von \mathcal{R}_e . Welche der beiden Betrachtungsweisen dabei als „Standardfall“ betrachtet wird ist daher nicht weiter relevant. Wichtig ist vielmehr, dass die für den jeweiligen Anwendungsfall und das spezifische Anwendungsbeispiel adäquate Betrachtungsweise gewählt und bereits im Rahmen der Modellierung festgelegt wird.

Fixierung der Problemraumspezifikation: Dieser Mechanismus unterstützt die Ergebnisaufbereitung. Er basiert darauf, dass der Anwender für eine oder mehrere einzelne Merkmalausprägungen der Problemraumspezifikation explizit bestätigt, dass eine Übererfüllung seiner spezifizierten Anforderungen und Bedingungen nicht benötigt oder gar nicht erwünscht ist (Ausprägungen werden fixiert). Diese zusätzliche Information ermöglicht die weitere Differenzierung (im Sinne eines Rankings oder einer Filterung der erzeugten Einzellösungsräume in Verarbeitungsschritt 4. Dahingehend werden Einzellösungsräume bevorzugt (höheres

Ranking), die fixierte Ausprägungen der Problemraumspezifikation erfüllen, jedoch hinsichtlich dieser Ausprägungen weniger darüber hinausgehendes (bei diesen Ausprägungen nicht benötigtes) Potential bzw. weniger Spielraum besitzen als andere Einzellösungsräume. Es wird davon ausgegangen, dass solche bevorzugten Einzellösungsräume wiederum bezüglich anderer bekannter (jedoch nicht fixierter) oder unbekannter Ausprägungen der Problemraumspezifikation ein dort benötigtes oder erwünschtes höheres Potential bzw. einen höheren Spielraum besitzen⁸⁵. Abbildung 7-25 zeigt schematisch das beabsichtigte Prinzip. Dargestellt ist ein Problemraum, bei dem nur die Ausmaße hinsichtlich der Ausprägungen B_{\min} und B_{\max} spezifiziert sind. Die Spezifikation hinsichtlich der Dimension A fehlt völlig (z. B. keine Angaben durch den Anwender). Durch die Fixierung der Ausprägung der Problemraumspezifikation bezüglich B_{\max} ($P_{B_{\max}}$) ergibt sich bei den drei dargestellten Einzellösungsräumen jeweils ein Spielraum über die Erfüllung dieser geforderten Ausprägung hinaus. Der Einzellösungsraum mit dem geringsten Spielraum (Nr. 1 in Abbildung 7-25) in Bezug auf die fixierte Ausprägung besitzt gleichzeitig den größten Spielraum hinsichtlich der nichtspezifizierten Teile des Problemraums. Dies ermöglicht dem Einzellösungsraum eine größere Toleranz hinsichtlich der (noch) nicht bekannten Problemraumspezifikation in der Dimension von Merkmal A. Er wird daher gegenüber den anderen beiden Einzellösungsräumen bevorzugt.

Ein entsprechender Algorithmus, der diese Grundidee umsetzt, ist in Anhang H.4 schematisch abgebildet. Die besondere Herausforderung ist hierbei die simultane Fixierung mehrerer Ausprägungen verschiedener Merkmale. Eine Fixierung von vorhandenen Ausprägungen der Problemraumspezifikation ist nur sinnvoll bei Ausprägungen von Merkmalen, die nicht passiv, die relevant (keine „don't care“-Inhalte), die abhängig und die nicht pseudoabhängig⁸⁶ sind. Diese Bedingungen müssen vor dem Anbieten der Fixierung (gegenüber dem Anwender) geprüft werden.

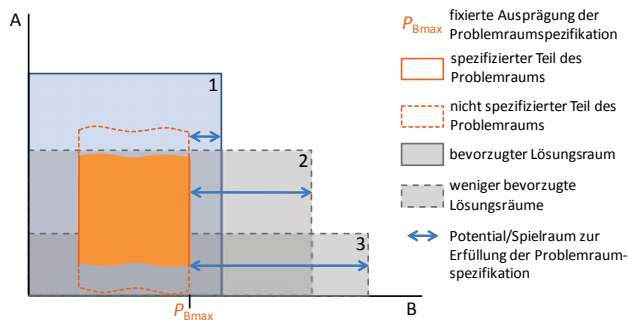


Abbildung 7-25: Fixierung von Ausprägungen der Problemraumspezifikation

Als weiterer Nutzeffekt der Fixierung ergibt sich eine 3. Stufe des kaskadierten Rankings, wobei diese methodisch wie die 2. Stufe gebildet wird, jedoch nur auf der Basis von Ausprägungen deren korrespondierende Ausprägung der Problemraumspezifikation fixiert ist. Somit bildet das gesamte Ranking für die Einzellösungsräume dann die folgende kaskadierte Priorisierung ab:

⁸⁵ Es ist anzunehmen, dass Einzellösungsräume, die in einigen Ausprägungen stark dominant sind, hinsichtlich anderer Ausprägungen eher weniger dominant sind – nur so ist eine Koexistenz mehrerer, nichtredunderter Einzellösungsräume überhaupt möglich.

⁸⁶ Pseudoabhängig sind Ausprägungswerte, die zwar eine Abhängigkeit über eine Relation besitzen, bei denen aber im Laufe der Verarbeitung jegliche Varianz verloren gegangen ist (z. B. durch die Reduktion des Lösungsraums) – d. h. die Ausprägungen der Einzellösungsräume unterscheiden sich nicht.

1. Erfüllung der Ausprägungen der Problemraumspezifikation
2. größtes Potential bzw. größter Spielraum bezüglich nicht fixierter oder nichtspezifizierter Ausprägungen der Problemraumspezifikation
3. größtes Potential bzw. größter Spielraum bezüglich fixierter Ausprägungen der Problemraumspezifikation.

7.6 Methodik

Konzepte und Modelle sind, gleich wie der Umgang mit ihnen, selten vollständig selbsterklärend. Zudem muss sich die Nützlichkeit eines Konzepts vor allem auch in seiner Anwendbarkeit zeigen. Der folgende Abschnitt stellt deshalb eine Methodik vor, die die Anwendung des entwickelten Konzepts unterstützen und absichern soll. Da die Aspekte Formalisierung und Wissensverarbeitung bzw. -auswertung automatisiert ablaufen, liegt der Fokus der Methodik auf der Aufbereitung und Repräsentation des Expertenwissens. Die Methodik orientiert sich somit hauptsächlich an der entwickelten Modellierung (→ 7.3), wie sich an der Übersichtsdarstellung in Abbildung 7-26 erkennen lässt, aber auch an den gewonnenen Erfahrungen bei der Anwendung an konkreten Problemstellungen (→ 9). Das beschriebene Vorgehen ist jedoch von spezifischen Anwendungsfällen abstrahiert und daher domänen-, anwendungsfall- sowie implementierungs-unabhängig.

Im Rahmen einer kompakten Beschreibung werden im Folgenden Besonderheiten zu den einzelnen Schritten erläutert bzw. Hinweise für die Anwendung gegeben. In Fällen, in denen detaillierte Inhalte zur Ausgestaltung bereits in vorhergehenden Abschnitten besprochen wurden, wird sich auf einen entsprechenden Verweis beschränkt. Bei der nachfolgenden Beschreibung der Methodik wird zwar prinzipiell von einer Neuerstellung von Wissensinhalten ausgegangen, jedoch ist die Vorgehensweise gleichfalls als roter Faden bei Modifikationen und Ergänzungen selbiger geeignet. Die Methodik beschreibt eine empfohlene Vorgehensweise mit aufeinander aufbauenden Schritten. Bei der Bearbeitung der Schritte II. a), II. b) und II. c) ist jedoch auch eine abweichende Reihenfolge zwischen diesen möglich und kann im konkreten Anwendungsfall Sinn ergeben.

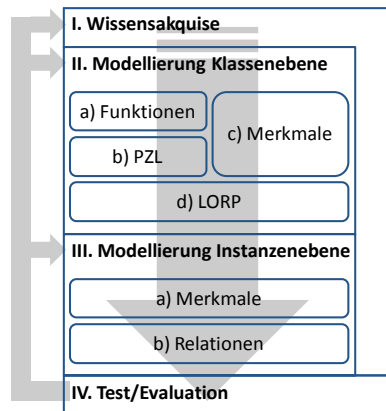


Abbildung 7-26: Methodik zur Konzeptanwendung

I. Wissensakquise

Voraussetzung einer effizienten Modellierung ist eine umfassende und zielgerichtete Wissensakquise. Für die domänenspezifischen, aber auch -übergreifenden Inhalte kann grundsätzlich das gesamte Spektrum verfügbarer Wissensquellen (→ 3.1) genutzt werden. Eine wie in Abschnitt 4.1.2 geforderte Wissensgrundlage ist jedoch hinsichtlich einer effizienten Sammlung und Aufbereitung des Wissens aufgrund der aufgeführten Vorteile vorzuziehen. Obwohl die Wissensakquise idealerweise den Ausgangspunkt zur Konzeptanwendung darstellt, können sich auch im weiteren Verlauf, während der Modellierung, neue Notwendigkeiten diesbezüglich ergeben.

II. a) Definition der Funktion(en)

Funktionen werden als oberstes Element der PZL-Bibliothek (→ 7.3.3) definiert, indem sie mit Hilfe der entsprechenden Attribute (→ 7.3.2) beschrieben werden. Als allgemeine Orientierung für die Semantik und die Abgrenzung einer Funktion sollen die in Abschnitt 4.1.1 aufgeführte Definition und die zugehörigen Beispiele sowie die in Abschnitt 7.1 vorgenommene Einordnung zwischen PE und PZL dienen. Für die domänenspezifische inhaltliche Ausgestaltung werden im Idealfall etablierte Ordnungssysteme und Standards (→ 5.2, → 7.3.2) herangezogen.

II. b) Definition der PZL

Für jede definierte Funktion werden eine oder mehrere PZL angelegt und durch Beschreibung mittels verfügbarer Attribute (→ 7.3.2) definiert. Orientierung für das Verständnis und die Ausgestaltung von PZL sollen auch hier die in Abschnitt 4.1.1 formulierte Definition sowie die Beispiele und Erläuterungen geben. Die konkrete Ausgestaltung der Attribute verlangt eine klare, voneinander abgrenzbare Semantik. Diese sollte durch Domänenexperten erstellt und mit existierenden Standards (→ 5.2, → 7.3.2) harmonisiert werden. Bei der Modellierung der PZL kann, ähnlich wie bei Ontologien (vgl. [STU11]), das *Grundprinzip von Ockhams Razor* als Anhaltspunkt dienen, welches dem *Prinzip der Parsimonie* (Sparsamkeitsprinzip) folgt: So wenige eindeutig voneinander unterscheidbare PZL wie möglich, so viele wie nötig. Auf der einen Seite muss dabei das Lösungsspektrum der Domäne möglichst vollständig abgebildet werden, auf der anderen Seite sollten sich die modellierten PZL später zumindest über die Ausprägungen ihrer Merkmale gegeneinander diskriminieren lassen⁸⁷. Je höher die Individualität einer einzelnen Lösung (PZL), desto höher die Lösungsvielfalt und desto höher das Potential geeignete Lösungen für verschiedene Anwendungsfälle zu finden.

II. c) Definition der Merkmale

Im Merkmallexikon werden Merkmale als Grundbausteine für die Beschreibung der Eigenschaften der PZL definiert. Ihre individuelle Beschreibung erfolgt über die entsprechenden Attribute (→ 7.3.2). Die unter Abschnitt 5.2 aufgeführten Standards stellen auch hier einen Anhaltspunkt bzw. eine konkrete Referenzbasis für die Festlegung und Beschreibung der Merkmale dar. Ähnlich wie bei Funktionen und PZL, bieten etablierte Attributinhalt (beispielsweise Bezeichnung, Definition) bereits allein durch ihren Wiedererkennungswert einen hohen semantischen Wert. Bei der Ausgestaltung der Merkmalbeschreibung muss sichergestellt werden, dass aus dieser die Bedeutung des Merkmals eindeutig hervorgeht [EPP11B]. Zudem sollte dabei der Abstraktionsgrad so gewählt werden, dass sich sowohl verschiedene Perspektiven darauf abbilden lassen (hier betrifft dies die Perspektiven von PZL und PE und die Interpretationsfähigkeit bezüglich verschiedener Aussageziele) als auch das Merkmal zur Beschreibung aller PZL einer Funktion und möglichst darüber hinaus geeignet ist. Somit kann ein hoher Wiederverwendungsgrad dieser Modellelemente erreicht werden.

Auf Seiten der Werteattribute müssen die allgemeinen Attribute Skalenniveau, Definitionsbereich und mögliche Einheiten (→ 7.3.2) inhaltlich ausgestaltet werden. Das Skalenniveau ist dabei für das Konzept dieser Arbeit von zentraler Bedeutung, wie die Ausführungen der vergangenen Abschnitte zeigen. Das Konzept ermöglicht explizit die freie Wahl und Verwendung aller Skalenniveaus (→ Anforderung Ic). Die Wahl sollte sich daher nach der für die adäquate Erfassung und Abbildung der Eigenschaft benötigten bzw. beabsichtigten Genauigkeit, vor dem

⁸⁷ Wenn sich beispielsweise die PZL „Schwebekörper Metall“ und „Schwebekörper Glas“ nicht sinnvoll diskriminieren lassen, da sie sich bezüglich ihrer Ausprägungen nicht differenzieren, dann sollte nur die PZL „Schwebekörper“ modelliert werden.

Hintergrund allgemein anerkannter Gesichtspunkte (vgl. [OP180], [REI91B], [POEP94], [SCH08A]), richten. Suboptimale Transformationen (→ 3.2.5, 4.3.1) sind nicht notwendig. Grundsätzlich kann jedoch gesagt werden, dass für die Abbildung einer Eigenschaft als Merkmal, sofern gerechtfertigt, immer ein möglichst hohes Skalenniveau anzustreben ist. Je höher das Skalenniveau, desto mehr mathematische und logische Operationen sind erlaubt, desto differenzierter kann mit und auf den Ausprägungen operiert werden und umso eher sind ggf. standardisierte und anerkannte Skalen (z. B. Temperaturskala) als Referenz verfügbar. Zudem sind funktionale Relationen nur bei quantitativer (also höherwertiger) Skalierung modellierbar (→ 7.2.3).

II. d) Zusammenstellung der LORP

Die Auswahl von relevanten Merkmalen und deren Zuordnung zur Funktion bedeutet die Bildung der funktionsspezifischen LORP. Dabei ist nicht entscheidend, ob dieser Zuordnung die Modellierung der benötigten Merkmale (Schritt IIc) vorausgegangen ist oder auf bereits im Merkmallexikon existierende zurückgegriffen wird. Die Bestimmung von Merkmalen zur LORP entspricht der Formulierung von Auswahlkriterien zur Bildung der Vergleichsbasis zwischen PZL und PE (→ 7.1). Die Zusammenstellung der LORP wird weniger durch formale, theoretische, als eher durch praktische Gesichtspunkte bestimmt. Die Menge relevanter Merkmale ergibt sich grundsätzlich aus der Obermenge der für die jeweils beteiligten PZL einer Funktion relevanten Merkmale. Dabei wird nicht die Menge der zur Beschreibung einer PZL insgesamt möglichen Merkmale, sondern die Teilmenge der für Bewertung und Auswahl unter bestimmten Aspekten (z. B. technologische Einsetzbarkeit, → 4.1.1) relevanten Merkmale (→ 5.3.1) betrachtet. Zusätzlich sollten die Merkmale der LORP auch hinsichtlich folgender Gesichtspunkte zusammengestellt werden:

- Möglichst umfassende Merkmalmenge, um alle bewertungsrelevanten Spezifika einer PZL abbilden zu können (eine hohe Zahl an Merkmalen erhöht die Möglichkeit einer eindeutigen Charakterisierung einzelner PZL und damit das Diskriminierungspotential zwischen diesen). Dabei muss nicht zwingend jedes Merkmal für jede PZL relevant sein.
- Für die gewählten Merkmale sollte möglichst auf beiden Vergleichsseiten (PZL, PE) die prinzipielle Verfügbarkeit von Informationen zur Spezifikation gegeben sein (→ 4.1.1). Dabei ist nicht der spezifische Anwendungsfall entscheidend.
- Jedes einzelne gewählte Merkmal sollte zur Diskriminierung der PZL untereinander geeignet sein und beitragen. Daher sollten sich die Relevanz und/oder die spätere Ausprägung des Merkmals bei den einzelnen PZL möglichst stark unterscheiden (Ein Merkmal, welches bei allen PZL irrelevant ist, ist beispielsweise für die Eignungsprüfung völlig obsolet).

Nach der Zusammenstellung der LORP einer Funktion müssen für deren Merkmale noch die Attribute spezifiziert werden, deren Konkretisierung im Rahmen des Merkmallexikons noch keinen Sinn gemacht bzw. noch keine Grundlage gehabt hätte, die aber PZL-übergreifend verwendet werden müssen. Die zwei hier relevanten Attribute sind das „Aussageziel“ und die „passive Verwendung“.

Die von [MER11] vorgeschlagene Heuristik für die Bestimmung des Aussageziels basiert eher auf intuitiver Auslegung, die sich aus der Semantik des Merkmals und seines Merkmalträgers ergeben muss. Wie in [MER11] bereits festgestellt wird, ist das jeweilige Aussageziel jedoch auf diese Weise nicht immer eindeutig ableitbar – individuell unterschiedliche Auslegungen sind möglich. Aufgrund dieser Unsicherheit und unter Berücksichtigung der formulierten Festlegungen für das Konzept (→ 7.2.2) soll hier eine Heuristik Verwendung finden, die in letzter Konsequenz nicht

abhängig von der Semantik von Merkmal und Merkmalsträger ist. Eine Orientierung für die Spezifizierung des Aussageziels können die in Abschnitt 7.2.2 formulierten Interpretationen der Aussageziele geben, ausschlaggebend ist jedoch die Ableitung aus dem grundsätzlichen Ziel der Anforderungserfüllung (Halbordnung zwischen \mathcal{A}_{Anf} und \mathcal{A}_{Zus}) und der daraus folgenden generischen Präferenz der Aussageziele:

- Zusicherung, wenn eine mengentechnisch größere Ausprägung des Merkmals günstiger hinsichtlich der Anforderungserfüllung ist.
- Anforderung, wenn eine mengentechnisch kleinere Ausprägung des Merkmals günstiger hinsichtlich der Anforderungserfüllung ist.

Aufgrund der Komplementarität⁸⁸ der Aussageziele von PE und PZL sollten für die Entscheidung der Zuordnung beide Merkmalsträger in Beziehung zueinander betrachtet werden. Anhang M.2 liefert Beispiele für die Zuordnung der Aussageziele in einem praktischen Anwendungsfall. Aus den evaluierten Anwendungsfällen (→ 9) geht hervor, dass in den meisten Fällen Zusicherungen auf Seiten der PZL zu finden sind und nur in wenigen Fällen eine Umkehrung dieser Verteilung auftritt.

Durch das Attribut „passive Verwendung“ wird spezifiziert, ob das Merkmal des Lösungsraums (PZL) als passives Merkmal verwendet werden soll oder nicht. Abschnitt 7.2.5 erläutert die Besonderheit passiver Merkmale und gibt Hinweise hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten. Für die Spezifizierung ist keine allgemeingültige Heuristik formulierbar, jedoch sollte berücksichtigt werden, dass passive Merkmale nur im Rahmen von Relationen sinnvoll wirken können.

III. a) Spezifizierung der Merkmale der PZL

Nach der Modellierung der Klassenebene liegt der Fokus auf der Gestaltung der PZL als individuelle Instanzenmodelle (→ 7.3.4) auf Basis der Bausteine der Klassenebene. Dabei werden die Merkmale der LORP für die PZL mit spezifischen Ausprägungen (Ausprägungswert, Ausprägungsaussage, ggf. Einheit, Erklärungen) konkretisiert und somit ihre Grundwertemenge festgelegt. Die Nutzung des „*-Operators (→ 7.2.1, 7.2.2) kann hier dazu dienen, irrelevante Merkmalausprägungen auszudrücken. Abschnitt 7.3.4 erläutert die Ausgestaltung der Merkmale auf Instanzenebene unter Wahrung der Konsistenz.

III. b) Spezifizierung der Relationen der PZL

Nach der Spezifizierung der Merkmale werden die Relationen der Instanzenmodelle definiert und über ihre Attribute beschrieben. Im Rahmen der Beantwortung folgender Fragen können die Attribute spezifiziert und die jeweils gewünschten Beziehungen repräsentiert werden:

- Welche Relationsteilnehmer stehen miteinander in Beziehung? (Relationsteilnehmer)
- Wie kann die Beziehung am besten ausgedrückt werden? (Relationstyp, Relationsinhalt)
- Gibt es zu berücksichtigende Kausalitäten oder Präferenzen und wie flexibel soll/darf die Auswertung sein? (Wirkungsrichtungen)
- Speziell für \mathcal{R}_c : Wie soll der Relationsinhalt interpretiert werden – explizit oder implizit? (Interpretations-/Betrachtungsweise)⁸⁹

⁸⁸ Mit der Festlegung des Aussageziels für den Lösungsraum wird indirekt auch die Festlegung für das Aussageziel des Merkmals im Problemraum getroffen, da beide komplementär zueinander sein müssen (→ 7.2.2).

⁸⁹ Der Wissensersteller kann diesen Aspekt mit Hilfe der konzeptumsetzenden Werkzeuge (→ 8) spezifizieren und nutzen. Da die Interpretations-/Betrachtungsweise eher eine rein verarbeitungsrelevante Information betrifft und zudem für die Verarbeitung optional ist, wurde dieser Aspekt hier nicht explizit als Attribut auf Metaebene (→ 7.3.2) vorgesehen. Eine entsprechende Erweiterung des Metamodells hinsichtlich der Entität Relation ist jedoch ohne Weiteres möglich.

Die Abschnitte 7.2.3, 7.3.4 und 7.5.2 geben dazu allgemeine Erläuterungen sowie Hinweise für die Ausgestaltung und Wirkungsweise der Relationen.

IV. Test und Evaluation

Am Ende einer Modellierungsphase muss das erstellte Modell getestet werden. Hierbei sollte neben der Konsistenzprüfung vor allem die Validität der Ergebnisse bewertet werden, d. h. die Prüfung, ob der beabsichtigte Wissensinhalt und seine Aussagen sich auch in praktischen Anwendungsfällen adäquat bestätigen lassen. Die Testergebnisse können dann für die Verbesserung der Modellierung wieder an den entsprechenden Stellen im Prozess einfließen.

Bei der Evaluierung anhand ausgewählter Anwendungsfälle (\rightarrow 9) hat sich gezeigt, dass eine iterative Ausführung der beschriebenen Vorgehensweise unter sukzessiver Anpassung und Detaillierung des Modells die besten Ergebnisse erzielt. Einzelne PZL mit wenigen Merkmalen und wenigen, einfachen Relationen sind als Startmodell ausreichend. In iterativen Schritten werden dann nach und nach mehr Merkmale und Relationen zur Beschreibung hinzugezogen und die Ergebnisse getestet. Idealerweise erfolgt der Modellierungsanteil (II, III) softwaregestützt, so dass eine entsprechende Aufbereitung (Visualisierung) und Konsistenzprüfung die Qualität des Modells sicherstellt und gleichzeitig den Aufwand zur Erstellung verringert. Eine entsprechende Implementierung wird in Kapitel 8 vorgestellt.

7.7 Integration

Für eine einfache und möglichst automatisierte Verwendung des entwickelten Konzepts ist dessen Einbettung in bestehende Prozesse und Systeme bzw. die Kooperation mit diesen essentiell (\rightarrow Anforderungen IIIa und IIIb). Der folgende Abschnitt zeigt daher eine Möglichkeit und damit das Potential zur Integration der wissensbasierten Auswahl von PZL in das durchgängige Engineering automatisierter Prozessanlagen auf. Dabei werden für die vor- und nachgelagerte Informationsverarbeitung bereits existierende, etablierte Standards zur Beschreibung von Anlagenhierarchie und Semantik genutzt. Die dafür verwendeten Standards und deren Modelle werden im Folgenden kurz vorgestellt. Nach der sich anschließenden Skizzierung der Grundidee dieses Integrationsansatzes werden dessen Integrationsschritte und -inhalte erläutert. Für eine detaillierte und ausführliche Betrachtung der Thematik sei an dieser Stelle auf [RAF15*] verwiesen. Die hier dargestellten Sachverhalte beziehen sich vorwiegend auf diese Quelle.

CAEX (Computer Aided Engineering Exchange) ist ein in [IEC 62424] standardisiertes, werkzeug- und herstellernerutrales sowie offenes Datenformat. Es definiert ein objektorientiertes Metamodell und besitzt eine XML-basierte Notation. CAEX dient zur Speicherung statischer Objektstrukturen und damit zur Repräsentation beispielsweise hierarchischer Anlagenstrukturmodelle. CAEX zielt auf eine Zusammenführung von Planungsdaten und ermöglicht eine gewerkeübergreifende Zusammenarbeit. Als informationelles Rückgrat des Anlagenlebenszyklus erlaubt es den algorithmischen Zugang zu vernetzten Planungsdaten. CAEX stellt das Dachformat⁹⁰ von AML (Automation Markup Language) dar – einem XML-Schema-basierten, standardisierten Datenformat zum Datenaustausch zwischen verschiedenen Planungswerkzeugen in der Planung sowohl fertigungs- als auch prozesstechnischer Anlagen. Nicht zuletzt aufgrund der Eigenschaften und Ziele von CAEX haben sich beide Datenformate inzwischen stark verbreitet und ihre praktische Anwendbarkeit durch viele erfolgreiche Anwendungen sowohl im

⁹⁰ AML konkretisiert die Anwendung von CAEX [DRM109] und ergänzt um die Integration weiterer Datenformate zur Beschreibung und Ablage von Geometrie und Kinematik (COLLADA) sowie von Verhalten (PLCOPEN XML).

akademischen wie auch im industriellen Bereich untermauert. Beispiele dafür zeigen u. a. [RGF08], [RGF09], [DRA10], [FNM+12], [PFR+15] auf.

Das CAEX-Datenmodell besteht im Wesentlichen aus vier Bestandteilen zur Abbildung seiner Kernkonzepte: eine Instanzhierarchie und drei Bibliotheken. In der *Instanzhierarchie* werden die Anlagenobjekte („Internal Elements“) topologisch zur Anlagenstruktur komponiert. Die Instanzhierarchie stellt damit den Kern der Anlagenstrukturbeschreibung dar. Die enthaltenen Objekte referenzieren auf die Elemente der Bibliotheken. In der *Rollenklassenbibliothek* werden mit Hilfe von „Rollen“ allgemeine Informationen zur Semantik von Anlagenelementen abgelegt. Als symbolische Platzhalter zur Beschreibung abstrakter Funktionalität geben die Rollen dem Anlagenelement eine rechnerinterpretierbare Bedeutung, unabhängig von dessen technischer Realisierung. In der *SystemUnit-Klassen-Bibliothek* werden herstellersistem spezifische Objekte (beispielsweise TR aus einem Produktkatalog) abgelegt um damit die konkrete technische Realisierung von Anlagenentitäten (z. B. „Roboter XY“ der Firma „AB“) modellieren zu können. Die *Schnittstellenbibliothek* enthält und definiert Klassen von Schnittstellen für Verbindungen zur Abbildung von Informations-, Energie- und Stoffflüssen zwischen Anlagenobjekten. Für weitergehende Informationen zu CAEX und AML wird auf [IEC 62424] und [DRA10] verwiesen.

Als Quelle zur Gewinnung und Einbeziehung standardisierter Semantiken wird im Rahmen des hier entwickelten Integrationsansatzes *eCI@ss* herangezogen. Das Klassifikationssystem wird in Abschnitt 5.2 vorgestellt. Ausführlichere Betrachtungen finden sich in den dort angegebenen Referenzen.

Mit dem Integrationsansatz werden zwei sich gegenseitig ergänzende Nutzeffekte verfolgt. Zum einen werden bereits vorhandene Informationen aus dem Planungsprozess gezielt für die wissensbasierte Auswahl gewonnen und genutzt. Zum anderen wird der Planungsprozess wiederum mit den Ergebnissen aus der wissensbasierten Auswahl gespeist und profitiert somit von diesen Informationen. Der Integrationsansatz hat daher sowohl die Akquise und Ableitung von Daten aus dem Anlagenstrukturmodell als auch die geeignete Modifizierung und Anreicherung des Anlagenstrukturmodells zum Inhalt. Beide Aspekte werden durch die Einbeziehung standardisierter Semantik unterstützt. Durch die Arbeit mit und auf dem Anlagenstrukturmodell bleiben die Informationen unmittelbar im Planungsprozess, eine nahtlose Integration der wissensbasierten Auswahl ist möglich und eine (Weiter-)Verwendung der Planungsdokumente bleibt uneingeschränkt.

Die Nutzung von Anlagenstrukturmodellen in CAEX für den Integrationsansatz basiert darauf, dass in den CAEX-Konzepten Analogien zu Kernbegriffen des Konzepts dieser Arbeit hergestellt werden können. Die in der Instanzhierarchie modellierten Anlagenobjekte können als PE betrachtet werden. Bei der Planung einer verfahrenstechnischen Anlage können beispielsweise PLT-Stellen als Anlagenobjekte modelliert und über Attribute (vgl. Merkmale) beschrieben und spezifiziert werden. Für die Abbildung von Funktionen und PZL ist das *Rollenkonzept* von CAEX entscheidend. Der Zweck der Rollen in CAEX ist die Abbildung abstrakter Semantik unter funktionalen Gesichtspunkten, die ein anwendungsfall- und realisierungsunabhängiges Modellieren erlaubt. Dieses Verständnis kommt der in Abschnitt 4.1.1 definierten Deutung der Begriffe Funktion und PZL nahe. Die beliebig formulierbare Abstraktionstiefe der Rollen mit Hilfe von Hierarchisierung und den damit verbundenen Vererbungsmechanismen eignet sich, um sowohl die Funktion als Rolle sehr hoher Abstraktion und die PZL als Rolle(n) niedrigerer Abstraktion (Konkretisierung der Funktionsrolle) zu repräsentieren. Rollen können in CAEX auch über Attribute beschrieben werden und somit die LORP abbilden. Im semantischen Gegensatz zur

Rolle kann die SystemUnit-Klasse gesehen werden, die zur Repräsentation von TR geeignet ist. Da jedoch die Auswahl von PZL und nicht die Auswahl von TR Kern dieser Arbeit ist, liegt für den Integrationsansatz hauptsächlich die Nutzung der Instanzhierarchie in Verbindung mit der Rollenklassenbibliothek nahe.

In Konkretisierung der oben aufgeführten Grundgedanken muss der Integrationsansatz die Gewinnung von Planungsinformationen aus der im laufenden Planungsprozess spezifizierten Instanzhierarchie beinhalten. Im Weiteren müssen die aus der wissensbasierten Auswahl gewonnenen Ergebnisse unter Verwendung des Rollenkonzepts von CAEX dazu genutzt werden, eine realisierungsneutrale semantische Konkretisierung vorzunehmen (beispielsweise die Konkretisierung von einer Funktion zu einer PZL), d. h. abstraktere Rollen wissensbasiert durch konkretere zu ersetzen. Damit kann eine informationelle Anreicherung der Planungsdaten im Engineering-Workflow erreicht werden. Im Gegensatz zur unmittelbaren Zuordnung von SystemUnit-Klassen zur Instanzhierarchie bleibt dieser Ansatz funktionsorientiert und damit hersteller- und produktunabhängig. Abbildung 7-27 zeigt die Grundidee des Konzepts zur Integration der wissensbasierten Auswahl in den Planungsprozess schematisch.

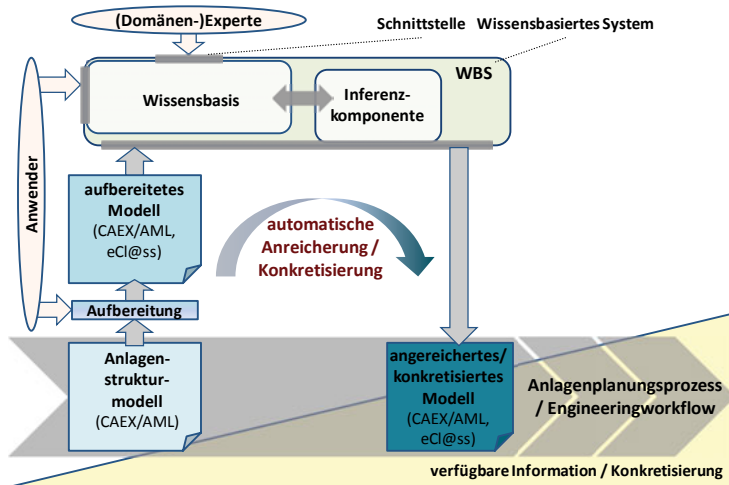


Abbildung 7-27: Integration der wissensbasierten Auswahl in den Anlagenplanungsprozess (nach [RAF15*])

Die Ausgangslage stellt ein in CAEX beschriebenes Strukturmodell einer Anlage dar. Ein solches Modell kann von CAE-Werkzeugen mit objektorientiertem Informationsmodell prinzipiell ausgeleitet werden. Das CAEX-Modell enthält in seiner Instanzhierarchie die relevanten PE. In Abbildung 7-28 wird dazu beispielhaft die PLT-Stelle „FIC 202“ (Durchflussmessung mit Anzeige und selbsttätiger Regelung) dargestellt.

1. Vorbereitung des Anlagenstrukturmodells

Ein erster Schritt ist die Vorbereitung der Rollenbibliothek. Rollenbibliotheken sind projekt- und anwendungsfallübergreifend innerhalb einer Domäne wiederverwendbar. Existiert noch keine Rollenbibliothek, so muss diese angelegt und ausgestaltet werden, wie Abbildung 7-28, (a) beispielhaft veranschaulicht. Die abstrakte Rolle „Flow“ enthält weniger abstrakte Rollen (z. B. „Oval Gear Flowmeter“). Für die Repräsentation des Konzepts dieser Arbeit werden prinzipiell nur zwei Abstraktionsebenen benötigt. Bei Bedarf können jedoch auch spezifischere oder

abstraktere Rollen (in Abbildung 7-28 „Measurement“) beliebig modelliert werden. Ein Import von standardisierten Klassen aus Klassifikationssystemen wie eCl@ss kann vorgenommen werden, wie [LSG+14] beschreibt. Abbildung 7-28, (b) deutet die semantische Integration der beiden untersten Klassifikationsebenen (\rightarrow 5.2) von eCl@ss an. Im Folgenden werden CAEX-Attribute verwendet, um die einzelnen Rollen semantisch zu beschreiben (vgl. Attribute \rightarrow 7.3.2). Für die Festlegung der Merkmale werden ebenfalls Attribute, jedoch ohne spezifizierte Ausprägung, genutzt (c). Im Sinne der LORP bietet es sich hierzu an, nur die abstrakte Rolle der Funktion mit diesen Attributen zu beschreiben, da selbige an die konkreteren Rollen vererbt werden. Für beide Attributverwendungen gibt es die Möglichkeit der semantischen Integration durch die Verwendung standardisierter Merkmale bzw. die Referenz auf diese, wie Abbildung 7-28, (d) andeutet. Die Rollenbibliothek entspricht damit der PZL-Bibliothek (\rightarrow 7.3.3).

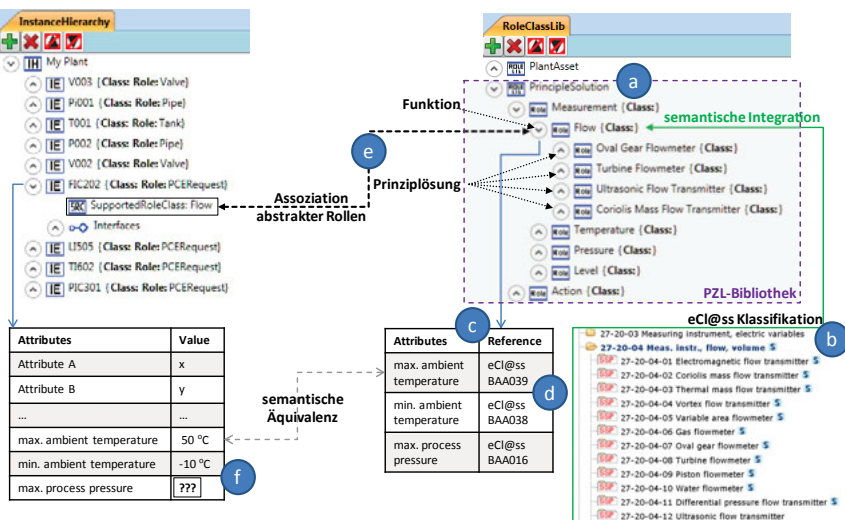


Abbildung 7-28: Aufbereitung des CAEX-Anlagenstrukturmodells (nach [RAF15*])

Ein weiterer Schritt ist die Vorbereitung der Instanzhierarchie. Dabei werden die relevanten und zu bearbeitenden PE mit semantisch passenden Rollenklassen assoziiert (e). Hier bietet es sich an, abstrakte Rollen auf Ebene der Funktion⁹¹ zu wählen, die der gewünschten Funktion(alität) des PE entsprechen. Im gezeigten Beispiel von Abbildung 7-28 wird dem PE „FIC 202“ entsprechend die Rolle „Flow“ zugeordnet. Bei Nutzung standardisierter Beschreibungen der PE (z. B. Notation der PLT-Funktionen/-Aufgaben nach [IEC 62424]) ist eine algorithmisch gestützte und damit automatische Durchführung der Rollenassoziation möglich.

Idealerweise sind die zu bearbeitenden PE bereits spezifiziert (im Laufe des bisherigen Planungsprozesses), d. h. individuelle Anforderungen und Bedingungen sind mittels Attributen (vgl. Merkmale) konkret beschrieben. Ist dies nicht der Fall oder sind Ergänzungen notwendig,

⁹¹ Grundsätzlich ist die Assoziation von Rollen jeder Abstraktionsebene der modellierten Rollenklassenbibliothek möglich. Sinnvoll ist es, die gewählte Abstraktionsebene adäquat zum Konkretisierungsgrad des Planungsprozesses zu wählen. Sind bereits viele Informationen verfügbar oder gar planerische Vorentscheidungen gefallen, können mitunter bereits konkretere Rollen assoziiert werden.

werden die PE selbst (vgl. Attribute) und ihre individuellen Anforderungen und Bedingungen mittels CAEX-Attributen (vgl. Merkmale) konkret beschrieben (f). Entscheidend ist, dass die hier verwendeten Attribute zur Repräsentation von Merkmalen semantisch und syntaktisch äquivalent zu den in der Rollenklassenbibliothek genutzten Attributen (LORP) sind. Die Verwendung von Referenzen auf gleiche semantische Standards (z. B. eCl@ss) hilft dies sicherzustellen. Die Äquivalenz kann dann rein syntaktisch (gleiche Identifizierung) algorithmisch geprüft werden.

2. Import und Wissensbasierte Verarbeitung

Nach dem Import des CAEX-Anlagenstrukturmodells über eine geeignete Schnittstelle werden die Spezifikationen aller PE den zur Beschreibung der Funktion bzw. PZL benötigten Merkmalen (LORP) – in CAEX als Rollenattribute festgelegt – gegenübergestellt. Der Anwender hat nun die Möglichkeit über das wissensbasierte System die von diesem identifizierten Spezifikationslücken zu schließen und ggf. weitere verarbeitungsspezifische Einstellungen (z. B. Ausschluss bestimmter Merkmale oder PZL) vorzunehmen. Anschließend erfolgt die Verarbeitung der PE-Spezifikationen in Verbindung mit den in der Wissensbasis modellierten Inhalten, gemäß dem im Rahmen dieses Kapitels beschriebenen Konzept. Die den abstrakten Rollen (Funktion) laut Rollenklassenbibliothek bzw. PZL-Bibliothek zugeordneten konkreteren Rollen (PZL) werden hinsichtlich der jeweiligen PE-Spezifikation analysiert.

3. Anreicherung des Anlagenstrukturmodells

Vor dem Export des CAEX-Anlagenstrukturmodells wird dieses mit den im WBS erzeugten Ergebnissen informationell angereichert. Im Rahmen der Anreicherung sind u. a. folgende Möglichkeiten gegeben:

- Ergänzung der Anlagenobjekte des CAEX-Modells (PE) um die zusätzlich hinzugefügten Spezifikationsinformationen (Nr. 1 in Abbildung 7-29).
- Assoziierung der in der wissensbasierten Auswertung ermittelten geeigneten Rollenklassen⁹² (PZL) zu jedem PE und Ersatz der bis dahin assoziierten abstrakten Rollenklassen (Nr. 2). Die Information über Zugehörigkeit konkreterer Rollen zu abstrakteren bleibt durch die Vererbungshierarchie der Rollenklassenbibliothek implizit erhalten.
- Ablage detaillierterer Informationen über die geeigneten PZL im jeweiligen PE. Dazu werden zusätzliche Attribute für diese PZL angelegt und über Subattribute mit den PZL-spezifischen Ausprägungen (z. B. Einsatzgrenzen) beschrieben (Nr. 3).
- Weitergehende Informationen des Auswerteprozesses zur besseren Einschätzung und Erklärung des Ergebnisses können als externe Referenz abgelegt werden (Nr. 4). In [RAF15*] werden hierzu konkrete Beispiele genannt.

Im Ergebnis der Anwendung des beschriebenen Integrationsansatzes wurden grobe Rollenklassen wissensbasiert konkretisiert. Dieser Vorgang kann zu jedem Zeitpunkt der Planung und damit auf Basis verschiedener Informations- und Konkretisierungsstände durchgeführt bzw. wiederholt werden (z. B. wenn sich Informationen geändert haben oder neue Informationen verfügbar sind). Die wissensbasierte Konkretisierung ermöglicht als weiteren optionalen Schritt auch die automatisierbare Zuordnung von konkreten TR aus der SystemUnit-Klassen-Bibliothek (sofern diesen SystemUnit-Klassen vorher bereits semantisch adäquate Rollen zugewiesen wurden) zu PE.

⁹² Die Assoziation von mehreren Rollen (geeignete PZL) ist möglich und explizit gewünscht, um Informationen über alternative Lösungsmöglichkeiten abbilden und für den Planungsprozess erhalten zu können.

Der Integrationsansatz erschließt, über die manuelle Informationsakquise und die Nutzung von Planungsdokumenten wie beispielsweise Merkmalleisten (→ 5.4.1) hinaus, mit CAEX eine verfügbare und geeignete Informationsquelle für die wissensbasierte Auswahl von PZL. Durch die Nutzung vorhandener, anerkannter Standards und durch die bruchfreie Einbettung der wissensbasierten Auswahl kann ein gesteigerter Automatisierungsgrad bei der Unterstützung des Planungsprozesses erreicht werden. Dies ist insbesondere bei großen Anlagen mit mehreren tausend PE von Bedeutung. Zudem wird die aufwändige und fehlerträchtige Dateneingabe minimiert, womit Effizienz und Qualität steigen. Unter Nutzung der CAEX-Konzepte wird ein implementierungs- und herstellerunabhängiger, funktionsorientierter Ansatz verfolgt, der es ermöglicht, verschiedene Lösungsoptionen im Planungsprozess einzubeziehen. Hinsichtlich der sukzessiven Informationsstand-adaquaten Konkretisierung der Anlagenbeschreibung lassen sich die Ziele des Konzepts dieser Arbeit und die Konzepte von CAEX ideal vereinen und die iterative Vorgehensweise in der Anlagenplanung unterstützen. Anforderung IIIb kann damit erfüllt werden.

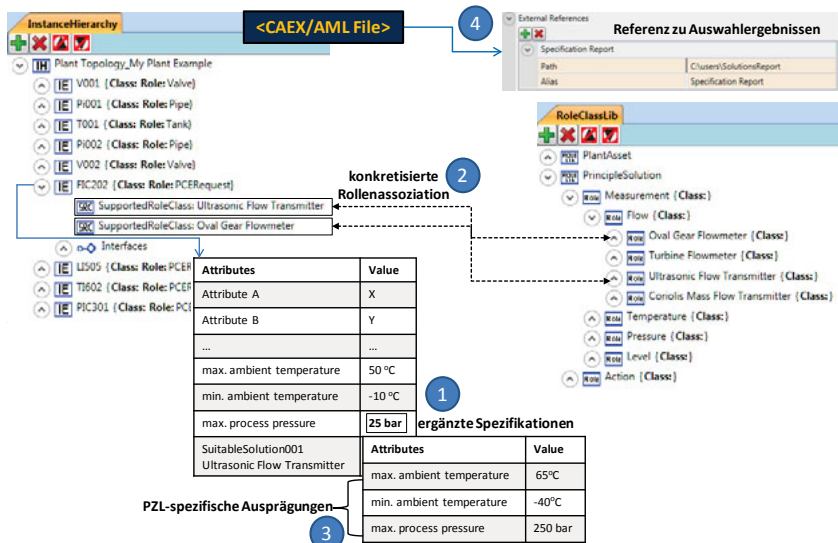


Abbildung 7-29: Anreicherung des CAEX-Anlagenstrukturmodells (nach [RAF15*])

8 Implementierung

Um eine „[...] automatisierte Unterstützung bei der praktischen Arbeit mit Prozessen, Methoden, Konzepten und Notationen [...]“ [EBE12] zu erhalten, ihren Einsatz zu forcieren und den korrekten Umgang mit ihnen zu erzwingen, sind Werkzeuge notwendig [EBE12]. Oft werden durch Werkzeuge, als angepasste Schnittstellen zum menschlichen Anwender, überhaupt erst der zielgerichtete Einsatz und das Verständnis, z. B. für abstrakte, formalisierte Modelle und Konzepte, ermöglicht. Zur Evaluation der praktischen Anwendbarkeit und Problemlösungsfähigkeit sowie zum Einsatz in konkreten Anwendungsfällen wurde daher auch das in dieser Arbeit entwickelte Konzept geeignet implementiert. Nach einem kurzen Überblick über die entwickelten Softwarewerkzeuge und ihr Zusammenwirken in Abschnitt 8.1 ist das Ziel der Abschnitte 8.2 und 8.3 die Vorstellung der Werkzeuge hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Funktionalität.

8.1 Überblick

Grundsätzlich gibt es vielfältige Möglichkeiten der Implementierung und werkzeugtechnischen Ausgestaltung für die Umsetzung des vorgestellten Konzepts. Da keine Werkzeuge und Komponenten verfügbar sind, die sich a priori für eine direkte Implementierung des Konzepts eignen, wurden entsprechende Werkzeuge im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Für die beabsichtigte, zielgerichtete Nutzung von Expertenwissen im Engineering-Workflow bzw. Anlagenplanungsprozess wurde die in Abbildung 8-1 gezeigte Werkzeugkette umgesetzt. Diese besteht im Wesentlichen aus zwei Softwarewerkzeugen: ein *Wissenseditor* zur Erstellung und Pflege der Wissensbasis durch den (Domänen-)Experten und ein *Werkzeug zur wissensbasierten Auswahl von PZL*, welches das durch die Wissensverarbeitung abgeleitete Wissen für den Anwender im Planungsprozess zur Verfügung stellt. Beide Werkzeuge stellen in ihrer Gesamtheit und ihrem Zusammenwirken das WBS dar.

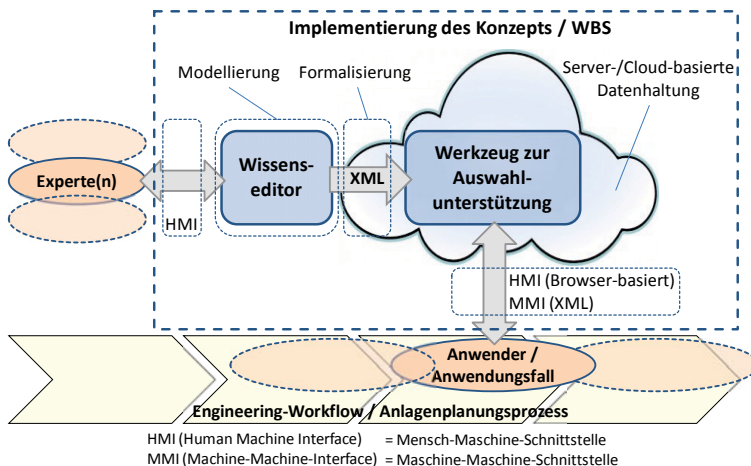


Abbildung 8-1: Überblick und Einordnung der Konzeptimplementierung

Für die Kommunikation und den Datenaustausch zwischen dem Wissenseditor und dem Werkzeug zur Auswahlunterstützung sowie die persistente, ortsunabhängige Datenhaltung der

Wissensinhalte wird das modellierte Klassen- und Instanzenwissen (das Metamodell ist im Datenmodell beider Werkzeuge integriert) geeignet formalisiert.

Für die Formalisierung als rechnerverarbeitbare Repräsentation wird die Metasprache *XML* genutzt, die sich im Engineering der Automatisierungstechnik sehr schnell verbreitet [DRA08] und dort für die strukturierte Ablage von Informationen bewährt hat, wie unter anderem [WRM+10] aufführt. XML als offener, plattformunabhängiger, internationaler Standard (vgl. [W3C XML]) ermöglicht, wegen seiner einfachen und klaren Syntax, durch einen generischen Aufbau mit frei definierbaren Strukturelementen die Anpassung an spezifische Problemstellungen. Zudem existiert eine Vielzahl verfügbarer Softwarekomponenten zur Bearbeitung und Betrachtung von XML.

Für die zwischen den beiden Softwarewerkzeugen notwendige Kommunikation wird eine eigens für die Anforderungen dieser Arbeit angepasste Formalisierung verwendet. Dabei werden die Wissensinhalte der Klassen- und Instanzebene jeweils getrennt voneinander repräsentiert, wie in Anhang J jeweils beispielhaft anhand eines Ausschnittes zu sehen ist. Für die Validierung dieser XML-Formalisierungen wurden zudem zugehörige XML-Schemata erstellt. Anhang K zeigt dies ebenfalls ausschnittsweise. Die Integration standardisierter XML-Derivate (z. B. *MathML* [SAN03]) in die verwendeten XML-Formate ist prinzipiell möglich, wurde hier jedoch nicht implementiert, da die Formalisierung nicht im Fokus dieser Arbeit steht. Die externe Kommunikation, d. h. mit Systemen außerhalb des WBS, wird über geeignete Schnittstellen (z. B. *eCI@ss*-Merkmalleisten, *CAEX*) realisiert, welche ebenfalls auf Basis von XML implementiert wurden. Dadurch kann die Anbindung und Einbettung hinsichtlich etablierter Systeme und Standards ermöglicht und sichergestellt werden.

Die Implementierung der Werkzeugkette erfolgte unter Beachtung funktionaler und nichtfunktionaler Anforderungen, welche zusammen mit Expertengremien erarbeitet und aufgestellt wurden. Diese Anforderungen gehen über die in Abschnitt 4.3 formulierten Konzeptanforderungen hinaus bzw. detaillieren diese implementierungsspezifisch. Im Zuge dessen wurden u. a. auch Kriterien und Grundsätze der allgemeinen Softwareentwicklung, wie beispielsweise in [DIN EN ISO 9241-110] und [ISO/IEC 25000] beschrieben, berücksichtigt. Auf das detaillierte Lastenheft für die Softwareerstellung wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Obwohl auch Erfahrungen und Notwendigkeiten aus den evaluierten Anwendungsfällen (→ 9) in die Werkzeugentwicklung eingeflossen sind, wurde auf eine anwendungsfallunabhängige, generische Verwendbarkeit ein ebenso hoher Anspruch gelegt wie bei der Konzeptentwicklung selbst.

8.2 Wissenseditor

Der Wissenseditor ermöglicht als softwarebasiertes Werkzeug die Erstellung, Pflege und Prüfung der Wissensinhalte und unterstützt damit sowohl die Wissensmodellierung als auch indirekt die strukturierte Wissensakquise. Dies schließt die Bereitstellung geeigneter Möglichkeiten für die Betrachtung, die Bearbeitung und die Formalisierung der Wissensinhalte ein. Im Regelfall verfügen die nutzenden Experten zwar über fachliche, anwendungsfall- oder domänenbezogene Expertise, jedoch nicht über Expertise hinsichtlich der Wissensrepräsentation. Vor diesem Hintergrund ist eine möglichst einfache und intuitive Darstellung sowie Bedienung notwendig, die sich an der entwickelten Methodik orientiert und die Anwendung dieser sowohl forciert als auch unterstützt. Zudem fördert eine klar aufgebaute Bibliotheksstruktur die Wiederverwendung angelegter Wissensinhalte. Als wichtige Kernfunktionalität ist schließlich die Konsistenzprüfung

und -sicherung (→ 7.4) zu betrachten, welche hilft, frühzeitig bei der Wissenserstellung Probleme zu erkennen und für die Wissensverarbeitung konsistente Wissensinhalte sicherzustellen.

Die Implementierung des Wissenseditors wurde auf Basis der .NET-Plattform als stand-alone Desktop-Anwendung durchgeführt. Maßgeblich wurden dabei Bibliotheken der Software NSHAPE genutzt und eingebettet. NSHAPE ist ein komponentenbasiertes, open source programming framework zur aktiven Erstellung und Bearbeitung von Diagrammen.

Abbildung 8-2 zeigt die Anwendungsoberfläche, welche einen dreigeteilten Aufbau besitzt. Zur Bearbeitung der Klassenebene dient der linke untere Arbeitsbereich (Nr. 1), während der linke obere Teil zur Bearbeitung und Verwaltung (Nr. 2) und der rechte Arbeitsbereich zur Visualisierung (Nr. 3) von Inhalten der Instanzenebene genutzt wird. Ein Import bereits formalisiert vorliegender Wissensinhalte und deren weitere Bearbeitung ist ebenso möglich wie die komplette Neuerstellung von Klassen- und Instanzenebene.

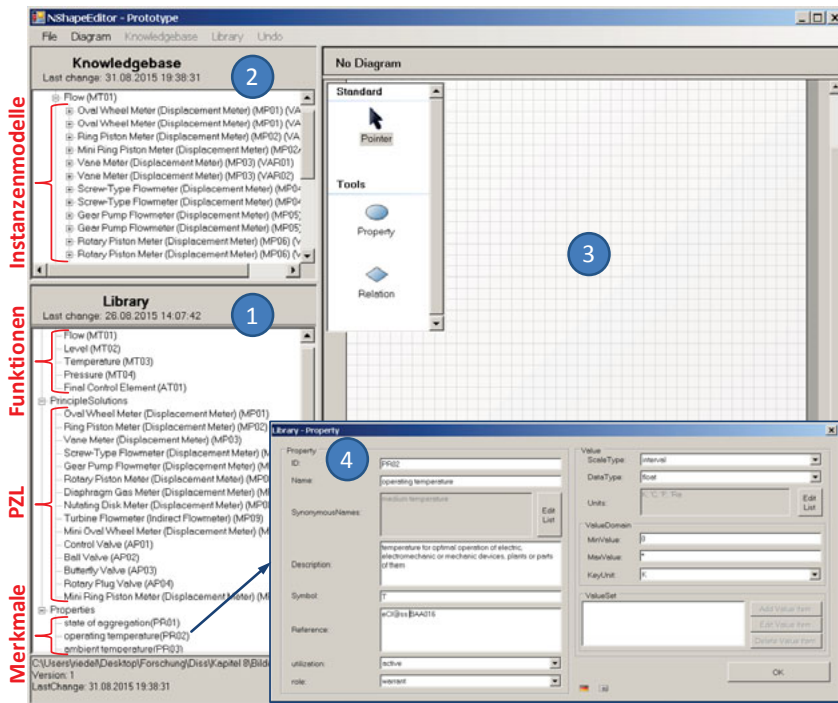


Abbildung 8-2: Arbeitsbereiche und Modellierung der Klassenebene mit dem Wissenseditor

Im linken unteren Arbeitsbereich (Nr. 1) erfolgen alle Arbeitsschritte der entwickelten Methodik (→ 7.6), die die Modellierung der Klassenebene betreffen. Wie Abbildung 8-2 darstellt, werden hier die definierten Klassen angezeigt, die im Weiteren als Bausteine für die Modellierung der Instanzenebene zur Verfügung stehen. Über Eingabemasken können Funktionen, PZL und Merkmale entsprechend definiert und spezifiziert werden. Abbildung 8-2, Nr. 4 zeigt beispielhaft eine Maske zur Spezifikation allgemeiner Merkmalattribute für das Merkmal

„Prozesstemperatur“. Auch die LORP wird in diesem Arbeitsbereich (Nr. 1) des Werkzeuges über die Eingabemaske der jeweiligen Funktion festgelegt.

Aufbauend auf den vorgenommenen Beschreibungen der Klassenebene können im linken oberen Arbeitsbereich die Definition und der Aufbau der Instanzenmodelle erfolgen. In Abbildung 8-3, Nr. 2 sind beispielhaft angelegte PZL der Funktion „Durchflussmessung“ zu sehen. Wie Abbildung 8-3 verdeutlicht, findet die konkrete Modellierung der Instanzenmodelle hauptsächlich im rechten Arbeitsbereich (Nr. 1) statt. Dort können u. a. über eine „Drag&Drop“-Funktionalität (Nr. 2) Merkmale und Relationen hinzugefügt, entfernt, verbunden und bearbeitet werden. Die Bearbeitung bezieht sich auf die Spezifikation der jeweiligen Elementattribute. Abbildung 8-3, Nr. 3 zeigt hierzu beispielhaft eine Eingabemaske zur Spezifikation einer Relation. Es können Identifikation (a), Relationstyp (b), ergänzende Beschreibungen (c), Relationspartner (d), Wirkungsrichtungen (e), funktionale (f) oder extensionale (g) Relationsinhalte und die implizite Interpretation (h) (\rightarrow 7.5.2) festgelegt werden.

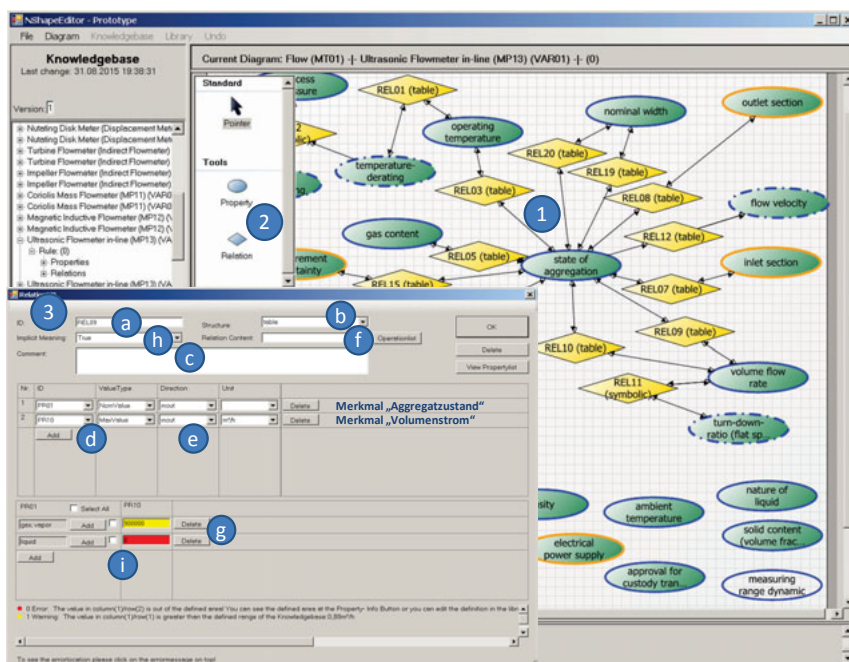


Abbildung 8-3: Modellierung der Instanzenebene mit dem Wissenseditor

Ein Schwerpunkt der Unterstützung bei der Modellierung der Instanzenmodelle liegt in der visuellen Aufbereitung der modellierten Inhalte. Die Bedeutung und Vorteile einer graphischen Aufbereitung und Darstellung, insbesondere netzartiger, zusammenhängender Wissensinhalte, wurden bereits im Rahmen von Anforderung IIa und in Abschnitt 7.3.4 erläutert. Abbildung 8-3, Nr. 1 zeigt beispielhaft im Wissenseditor umgesetzte Visualisierungen von Instanzenmodellen. Dabei fließen spezifische Charakteristika und inhaltliche Ausgestaltung der Modellentitäten in deren graphische Darstellung ein. Die Art der Elementumrandung weist beispielsweise auf eine passive Verwendung (Strichlinie) des Merkmals hin, während die Umrandungsfarbe das

Aussageziel visualisiert (blau: Zusicherung, orange: Anforderung). Elemente ohne farbliche Füllung wurden beim Bearbeiten so spezifiziert, dass ihr Inhalt theoretisch keine Auswirkungen mehr auf die Eignungsprüfung hat (Irrelevanz des Merkmals) – dies kann beispielsweise aus der Verwendung des „*-Operators resultieren. Im Weiteren wird auch eine Anordnung der Modellentitäten nach verschiedenen Gesichtspunkten unterstützt.

Im Wissenseditor erstellte oder bearbeitete Modelle können, getrennt nach Klassen- und Instanzenebene, aus diesem ausgeleitet werden, wobei die bereits beschriebene Formalisierung im XML-Format stattfindet.

Eine zentrale, wenn auch durch die Implementierung eher im Hintergrund wirkende Funktionalität des Wissenseditors stellt die Konsistenzprüfung und -sicherung dar. Die implementierte Funktionalität setzt die in Abschnitt 7.4 formulierten Ansätze und Ansprüche um. Die Durchführung der Konsistenzprüfung und -sicherung findet parallel während der Modellbearbeitung statt und manifestiert sich hauptsächlich in folgenden Bereichen des Wissenseditors:

- Prüfung zu importierender und exportierender Modellteile durch Validierung gegen das jeweilige Schema (im Format *XSD* (eXtensible Schema Definition), → Anhang K).
- Dynamische Gestaltung der Oberfläche und der Eingabemöglichkeiten (z. B. Forcierung oder Beschränkung von Auswahlmöglichkeiten).
- Prüfung spezifizierter Inhalte bei Eingabe gegen Modellvorgaben bzw. bereits festgelegte Inhalte.
- Spezifische Prüfalgorithmen im Hintergrund, die vor allem die strukturelle Konsistenz bei der Gestaltung der Instanzenmodelle prüfen und sicherstellen.

Die Konsistenzprüfung und -sicherung manifestiert sich dabei, neben der Vorgabe des HMI, in Warnungen, Fehlermeldungen (→ Abbildung 8-3, i) oder im Anbieten korrigierender Eingriffe.

8.3 Werkzeug zur Auswahlunterstützung

Das Werkzeug zur Auswahlunterstützung verwendet die durch den Wissenseditor bereitgestellten Wissensinhalte aus Klassen- und Instanzenebene (Wissensbasis). Es ermöglicht zudem die Einbringung problemfallspezifischen Wissens (Faktenbasis) und führt auf Basis der somit vorliegenden Wissensinhalte von PZL und PE die Wissensverarbeitung durch. Die Ergebnisse der auf diese Weise ermöglichten Eignungsprüfung und -bewertung der PZL für das jeweilige PE werden aufbereitet und dem Anwender im Planungsprozess indirekt (über Mensch-Maschine-Schnittstelle) oder direkt (z. B. gemäß Integrationsansatz, → 7.7) zur Verfügung gestellt. Das Werkzeug zur Auswahlunterstützung leitet damit neues Wissen aus dem vorhandenen Wissen ab und unterstützt den Planungsprozess automatisiert bei der Auswahl von PZL und damit indirekt bei der Auswahl von TR. Es stellt die abstrakten Komponenten Wissensverarbeitung, Erklärung und Dialog eines WBS dar.

Das Softwarewerkzeug wurde als *Server-(Thin)Client*-Anwendung auf Basis einer *MVC* (Model-View-Controller)-Architektur implementiert. Aufgesetzt auf das offene Framework *DJANGO* und unter Verwendung von *PYTHON* als Backend-Sprache wurden verschiedene Software-Bibliotheken u. a. für die XML-Bearbeitung, die PDF-Ausleitung, die Visualisierung und algebraische Berechnungen integriert. Für die Realisierung der Oberflächengestaltung und der dynamischen Visualisierung kamen vor allem die Techniken *HTML5*, *JAVASCRIPT*, *JQUERY* und *CSS* zum Einsatz. Die Architektur des implementierten Werkzeuges bietet die Möglichkeit, die rechenintensive Wissensverarbeitung und -aufbereitung zentralisiert serverseitig durchzuführen

und gleichzeitig die darstellungsfokussierten Inhalte und Dialoge der Anwendungsoberfläche dezentral und lokal auf dem Rechner des Anwenders (Client) über handelsübliche *Webbrowser* anzubieten. Diese Arbeitsteilung und Informationslogistik ermöglicht einen flexiblen, plattform-unabhängigen Einsatz des Werkzeuges und ermöglicht eine ortsunabhängige Verfügbarkeit von Engineeringinformationen (Anforderung Ilc).

Das Bedienungskonzept der Software besteht aus fünf thematischen und organisatorischen Bedienebenen, die jeweils als Dialogseite ausgeführt werden. Oberfläche und Bedienelemente sind dabei in Anlehnung an die gängige Praxis webbasierter Anwendungen gestaltet und ermöglichen so einen intuitiven Zugang zum Werkzeug. Auf jeder Bedienebene ist eine Umschaltung der Anzeigesprache (Abbildung 8-4, Nr. 1) sowie eine Navigation zwischen verschiedenen Fallbeispielen (Nr. 2) möglich. Auf den *ersten beiden Bedienebenen* steht die Wahl der Funktion bzw. die Wahl der zugehörigen PZL im Fokus. Die beiden repräsentierenden Dialogfenster veranschaulichen damit die Struktur der PZL-Bibliothek und ermöglichen die Steuerung der Anzahl der für die Auswertung in Betracht zu ziehenden PZL. Zudem besteht die Möglichkeit zum Abruf erklärender semantischer Informationen der Klassenebene (z. B. Beschreibung einer spezifischen PZL).



Abbildung 8-4: Dritte Bedienebene des Werkzeuges zur Auswahlunterstützung

Wie Abbildung 8-4 zeigt, liegt der Schwerpunkt der *dritten Bedienebene* auf der Spezifikation des PE. Im oberen Bereich (Nr. 3) kann das PE bezeichnet und ggf. näher beschrieben werden, während im darunter liegenden Bereich (Nr. 4) die einzelnen Merkmale mittels Ausprägungswerten spezifiziert werden. Die Eingabemaske wird dabei dynamisch in Abhängigkeit von den Charakteristika (z. B. Skalenniveau, verfügbare Einheiten) der beteiligten Merkmale erzeugt. Eingaben des Anwenders werden geprüft, und auf vorkommende Inkonsistenzen und Fehler (z. B. Verletzung des Definitionsbereichs) wird hingewiesen (Nr. 5). Der Anwender ist dabei völlig frei hinsichtlich der Reihenfolge oder Vollständigkeit seiner Dateneingabe. Auch der Ausschluss von Merkmalen für die spätere Verarbeitung und Ergebnisbildung durch explizite Abwahl (Nr. 6) ist möglich. Ähnlich zu den vorhergehenden Bedienebenen können auch hier zusätzliche,

beschreibende Informationen direkt aus dem Merkmallexikon abgerufen werden (Nr. 7). Durch die Realisierung einer eCI@ss-Schnittstelle können konforme ML (im XML-Format) in die Software eingelesen und die dort enthaltenen Planungsdaten bei Bedarf zur kompletten Akquise oder zur Ergänzung manuell eingegebener Daten in das WBS importiert werden. Abbildung 8-4, Nr. 8 zeigt den zugehörigen Dialogbereich, in welchem der Anwender über die in der ML verfügbaren Planungsdaten informiert und ein selektiver oder gesammelter Import dieser Daten angeboten wird.

Nach Aktivierung des Auswertevorgangs durch den Anwender wird im rechten Bereich (Nr. 9) ein Kurzüberblick des Ergebnisses dargestellt. Die in Betracht gezogenen PZL werden dabei mit Hilfe eines dreiteiligen Farbschemas klassifiziert: grün für „geeignet“ (die PZL erfüllt die Spezifikation des PE mit ihren Bedingungen und Anforderungen vollständig), orange für „eventuell geeignet“ (die Spezifikation des PE für eine eindeutige Aussage zur Eignung ist unzureichend) und rot für „nicht geeignet“ (mindestens ein Teil der Spezifikation des PE (z. B. eine einzelne Merkmalausprägung) wird nicht erfüllt). Bereits an dieser Stelle kann eine Ausleitung des Ergebnisses erfolgen. Dazu wurde eine PDF-Schnittstelle implementiert. Zur Dokumentation des Auswertevorgangs kann über diese ein Ergebnisbericht erzeugt werden, der u. a. eine Übersicht über die Funktion, sowohl die verwendeten als auch die ausgeschlossenen PZL und Merkmale, über die spezifizierten Daten und das Ergebnis enthält.

Das Ziel der *vierten Bedienebene* ist der erweiterte Ergebnisüberblick und -vergleich. In diesem Sinn wird eine kompakte Übersicht angezeigt, auf der die einzelnen PZL und ihre Lösungsräume im Hinblick auf die Spezifikation des PE betrachtet und gegenübergestellt werden können. Den Aufbau und die Darstellung dieser Bedienebene veranschaulicht Abbildung 8-5 an einem Ausschnitt. Erkennbar ist die Zweiteilung der Darstellungsbereiche, optisch getrennt durch die horizontale Auflistung der Merkmale (Nr. 1), die den Darstellungsbereich in merkmalspezifische Spalten organisiert. Der Abruf klassenspezifischer Merkmalinformationen ist an dieser Stelle möglich.

Im Bereich unterhalb der aufgelisteten Merkmale werden die PZL zeilenweise abgebildet (Nr. 2). Durch das graphische Aufklappen einzelner PZL (hier: „Balgengaszähler (Diaphragm Gas Meter)“, „Zahnradzähler (Gear Pump Flowmeter)“, „Magnetisch Induktive Durchflussmessung (Magnetic Inductive Flowmeter)“) kommen die Ausprägungswerte ihres Lösungsraums zum Vorschein (Nr. 3). Hierbei ist zu bemerken, dass es sich bei diesen Ausprägungswerten um die Werte des resultierenden Gesamtlösungsraums, also die Obermenge der Einzellösungsräume der PZL handelt. Die Ausprägungswerte werden entsprechend dem bereits erwähnten Farbschema eingefärbt (wobei erfüllende Ausprägungswerte hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht grün eingefärbt wurden). Die zum Ergebnisüberblick der dritten Bedienebene analoge Gesamtbewertung der PZL äußert sich jeweils in der Einfärbung des linken Bedienelements (Nr. 4). Zusätzlich wird eine differenzierte Auswertung der Erfüllungsgrade der Merkmale der jeweiligen PZL angezeigt und farblich hinterlegt. Abbildung 8-5, Nr. 4 zeigt hier beispielhaft, dass für den „Flügelradzähler (Impeller Flowmeter)“ zwei von 32 Merkmalen kritisch sind, d. h. die Spezifikation des PE nicht erfüllen, während bei der „Magnetisch Induktiven Durchflussmessung“ ein Merkmal nicht ausreichend spezifiziert ist. Diese Auswertung vermittelt einen schnellen, quantitativen Eindruck, welcher Anteil der Merkmale einer PZL jeweils erfüllt, eventuell erfüllt oder nicht erfüllt ist⁹³. Eine ähnliche quantitative Auswertung wird spaltenweise auch für die

⁹³ Ein Ranking zwischen den PZL ist prinzipiell möglich, wurde jedoch aus Gründen der Anforderungsspezifikation nicht implementiert. Die Reihenfolge der PZL-Darstellungen ist daher nicht qualitativ wertend.

Merkmale geliefert (Nr. 5) und ermöglicht eine erste Einschätzung des Konfliktpotentials der einzelnen Merkmale. So ist in Abbildung 8-5 beispielsweise zu sehen, dass der „Prozessdruck“ (process pressure) bei drei von sieben PZL problematisch ist, d. h. gegenüber der PE-Spezifikation zur Nichteignung dieser PZL beiträgt. Beim Merkmal „elektrische Leitfähigkeit“ (electric conductance) fällt auf, dass die Nichtspezifikation des Minimalwertes nur bei einer einzigen PZL („Magnetisch Induktive Durchflussmessung“) zu „eventuell geeignet“ führt, für alle anderen PZL ist das Merkmal irrelevant.

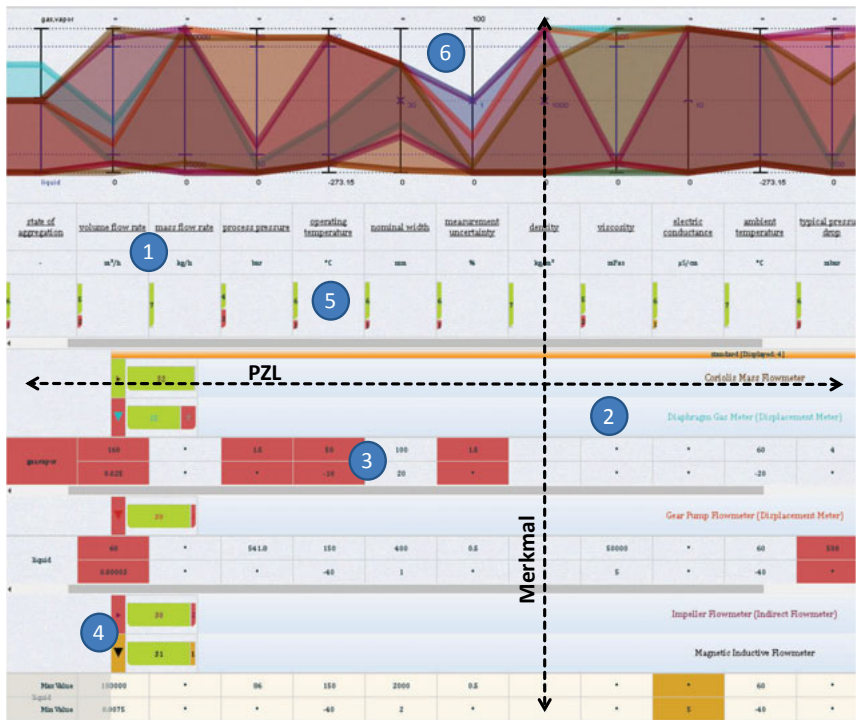


Abbildung 8-5: Vierte Bedienebene des Werkzeuges zur Auswahlunterstützung

Eine visuelle Aufbereitung der im unteren Bereich der Bedienebene dargestellten Inhalte findet sich im Bereich oberhalb der horizontal aufgelisteten Merkmale (Nr. 6). Die grundsätzliche Herausforderung ist hierbei der multidimensionale und heterogene Charakter der darzustellenden Lösungsräume. Die realisierte Darstellungsweise basiert auf merkmalspezifischen Skalen (schwarz), welche den Definitionsbereich der Merkmale abbilden und den jeweils auf diesen befindlichen Skalen (blau), welche den Wertebereich der Problemraumspezifikation repräsentieren. Auf diese beiden Skalen werden die Ausprägungen der Lösungsräume der vom Anwender ausgewählten PZL projiziert und jeweils als zusammenhängendes, farbiges Lösungsraumband dargestellt. Die Lösungsraumbänder werden dynamisch an die merkmalspezifische Skalierung von Problemraum und Definitionsbereich angepasst und relativ zu den optisch statischen Skalen dargestellt. Somit wird eine visuelle Durchgängigkeit der Lösungsräume auch bei wechselnden Skalenniveaus und Skalenumfängen erreicht. Diese Darstellungsweise

ermöglicht dem Anwender einen anschaulichen Überblick sowohl über das Verhältnis zwischen Problem- und Lösungsraum als auch über das Verhältnis der Lösungsräume verschiedener PZL zueinander.

Werden weitergehende Informationen zu einer spezifischen PZL und Details zum individuellen Aufbau ihres resultierenden Gesamtlösungsraums sowie zur Ergebnisbildung benötigt, kann der Anwender schließlich in die *fünfte Bedienebene* wechseln. Der informationelle Fokus dieser Bedienebene liegt ganz auf der vom Anwender ausgewählten PZL, während sich der Aufbau dieser Bedienebene hinsichtlich seiner Aufteilung und der spalten- und zeilenweisen Organisation ergonomisch an der vorherigen Bedienebene orientiert, wie Abbildung 8-6 an einem Ausschnitt aufzeigt. Die horizontale Auflistung der relevanten Merkmale (Nr. 1) bildet sowohl die Trennung als auch die gemeinsame Grundlage des unteren Datenbereichs und des oberen Visualisierungsbereichs. Für die einzeln aufgeführten Merkmale können hier über die klassenspezifischen Informationen hinaus auch abgelegte instanzenspezifische Informationen abgerufen werden, deren Gültigkeit auf die hier abgebildete PZL begrenzt ist.

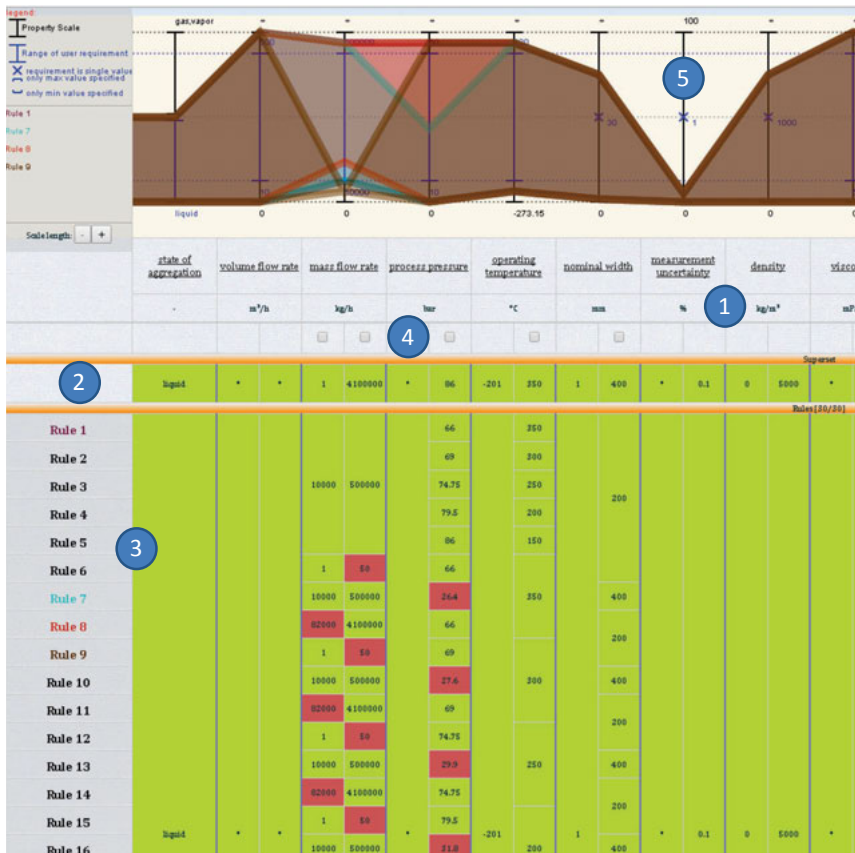


Abbildung 8-6: Fünfte Bedienebene des Werkzeuges zur Auswahlunterstützung

Im unteren Bereich sind die Ausprägungswerte des resultierenden Gesamtlösungsraums (Nr. 2) und die Ausprägungswerte⁹⁴ der den Gesamtlösungsraum aufspannenden Einzellösungsräume (Nr. 3) aufgeführt. Die durch auftretende Relationen verursachten und als unabhängig voneinander zu betrachtenden Einzellösungsräume werden zeilenweise dargestellt, wobei ihre Reihenfolge gemäß dem kaskadierten Ranking (→ 7.5.2) bestimmt wird (oberste Einzellösungsräume haben bestes Ranking). Die Färbung einzelner Ausprägungswerte erfolgt nach dem beschriebenen Farbschema. Zur Filterung der Einzellösungsräume und Reduzierung der angezeigten Anzahl dieser ist die Fixierung von Problemraumspezifikationen (→ 7.5.2) einzelner Merkmale möglich (Nr. 4). Abbildung 8-6 macht deutlich, dass für diese Fixierung nur ausgewählte Merkmale gemäß den in Abschnitt 7.5.2 aufgeführten Kriterien in Frage kommen.

Im oberen Bereich der Bedienebene (Nr. 5) findet sich der von Bedienebene 4 bekannte Visualisierungsansatz wieder. Relativ zu den durch den Definitionsbereich und die Problemraumspezifikation gebildeten Skalen können resultierender Gesamtlösungsraum und Einzellösungsräume in Form farbiger Lösungsraumbänder graphisch dargestellt werden. Der somit u. a. ermöglichte Vergleich verschiedener Einzellösungsräume gibt eine anschauliche Vorstellung von der durch Relationen verursachten Kombinatorik der Einzellösungsräume, wie Abbildung 8-6 zeigt. Eine Differenzierung der zur Gesamtlösung beitragenden Einzellösungsräume und damit eine detaillierte Auswertung und Einschätzung der Ergebnisbildung für die spezifische PZL wird somit ermöglicht. Die Kritikalität, aber auch die Spielräume einzelner Merkmale in Bezug auf die PE-Spezifikation können quantifiziert werden.

Zur besseren Darstellung und Veranschaulichung sowie Untersuchung des Instanzenmodells wurde darüber hinaus eine Visualisierung der Wissensbasis, ähnlich zu der bereits vorgestellten Darstellung des Wissenseditors, realisiert. Zudem wurde in Ansätzen eine Visualisierung von Lösungsräumen im zweidimensionalen Bereich zur detaillierten Betrachtung einzelner Merkmalbeziehungen umgesetzt.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Werkzeugkette ist mit vorliegender Arbeit im Umfang der beschriebenen Funktionalität bereits technisch einsatzfähig. Ein prototypisches Hosting des Werkzeuges zur Auswahlunterstützung wurde realisiert und wird mit Unterstützung des VDI (Verein Deutscher Ingenieure) durchgeführt.

⁹⁴ Gleiche Ausprägungswerte werden optisch zusammengefasst dargestellt. Daher befinden sich in manchen Zeilen scheinbar keine Werte.

9 Evaluation

Zur Ermittlung von Validität sowie Leistungsfähigkeit des entwickelten Konzepts und der implementierten Umsetzung ist eine entsprechende Evaluation notwendig. Grundsätzlich ist eine theoretische Evaluation von Konzepten und Anwendungen von WBS aufgrund des fehlenden Maßstabes schwierig [TRI11]. Eine praktische Möglichkeit stellt jedoch die konkrete Anwendung auf reale Problemfälle dar. Dabei müssen die resultierenden Ergebnisse kontextspezifisch von Experten mit Kenntnissen des jeweiligen Anwendungsgebietes beurteilt werden. So können Gültigkeit und Plausibilität der durch das implementierte Konzept ermöglichten Ergebnisse inhaltlich geprüft und beurteilt werden.

Das Konzept und die zugehörige Implementierung wurden daher bereits während der Entwicklungsphase und auch danach anhand von drei Anwendungsfällen mit jeweils verschiedenen Fallbeispielen kontinuierlich evaluiert. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird der Anwendungsfall „Durchflussmessung“ als spezifisches Beispiel der Prozesssensorik in der Anlagenplanung besprochen. Aufgrund seiner Komplexität eignet sich der Anwendungsfall als Leitbeispiel und wird daher ausführlicher erläutert. In den folgenden beiden Abschnitten werden mit „Stellgeräte“ und „Antriebe“ zwei weitere Anwendungsfälle behandelt, die die problemlose Anwendbarkeit von Konzept und umsetzenden Softwarewerkzeugen auch auf den Bereich der Prozessaktuatorik zeigen. Da sich die grundlegenden Vorgehensweisen und die Konzeptanwendung jedoch ähneln, wird hier auf eine vertiefte Beschreibung verzichtet und sich auf eine kurze Darstellung der jeweiligen Besonderheiten der beiden Anwendungsfälle beschränkt.

9.1 Anwendungsfall „Durchflussmessung“

9.1.1 Hintergrund und Ausgangssituation

Das Messen strömender Medien ist eine im industriellen Betrieb omnipräsente und essentielle Aufgabenstellung. Produktion, Verteilung, Bilanzierung und Abrechnung sowie Prozesssteuerung werden in allen denkbaren Industriebereichen (z. B. Nahrungsmittel-, chemischen und petrochemischen Industrie, der Grundstoffindustrie, der Energieerzeugung und -versorgung, der Wasseraufbereitung und Abwassertechnik sowie der medizinischen und der pharmazeutischen Industrie) auf Basis der Durchflussmessung von Fluiden, Schüttgütern, Stäuben und Pasten realisiert. Besonders in der verfahrenstechnischen Industrie ist die Durchflussmessung daher von fundamentaler Bedeutung [STR04] und aus Sicht der Automatisierung dort eine der wichtigsten und zentralen PLT-Aufgaben [BRU08A]. Ein wirtschaftliches, qualitätsorientiertes, sicheres und rechtskonformes Betreiben verfahrenstechnischer Anlagen ist ohne eine spezifikationsgerechte Messung von Durchflüssen nicht möglich.

Um den Herausforderungen zu begegnen, wird ein großes Spektrum physikalischer Prinzipien zur Durchflussmessung genutzt, welches sich in einer Vielzahl⁹⁵ verschiedenster Messprinzipien und -verfahren, jeweils mit individuellen Vorzügen und Nachteilen, niederschlägt. Einen Einblick in diese Vielfalt liefert Anhang B.1. Umso herausfordernder ist die Auswahl geeigneter Verfahren und darüber hinaus geeigneter TR für die individuelle Kombination verschiedenster zu beachtender Bedingungen, Einflüsse und Anforderungen eines Anwendungsfalles. Die Durchführung der Durchflussmessung wird daher nicht umsonst als eine schwierige [REA05] oder gar als die diffizilste der klassischen Messaufgaben [STR04] bewertet. Eine weitere inhaltliche Vertiefung zur Durchflussmessung wird an dieser Stelle nicht vorgenommen. Darüber

⁹⁵ [HESc09] spricht von über 30, [REA05] sogar von 120 verschiedenen Messverfahren und -prinzipien.

hinausgehende Erläuterungen und Beschreibungen von Durchflussmessung im Allgemeinen und verschiedenen Messverfahren im Einzelnen finden sich z. B. bei [STR04], [THO05], [BRU08A], [HESC09], [FGH+11@], [BRGR15].

Eine Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Verfahren für die Durchflussmessung gibt die [VDI 2644]. Die eigens zu dieser Richtlinie entwickelte Software enthält das entsprechende Wissen, ist jedoch aufgrund der nicht aktualisierbaren Wissensinhalte und anderer Einschränkungen aus heutiger Perspektive weder zeitgemäß noch sinnvoll einsetzbar (→ 3.2.2). Aufgrund der nach wie vor unverminderten Notwendigkeit einer Wissensbasis für die Unterstützung der Auswahl begann der GMA FA 2.40 als richtlinienerstellendes Expertengremium ab 2009 erneut, aktuelles Wissen über Durchflussmessverfahren kontinuierlich zusammenzutragen und konsensual aufzubereiten. Das akquirierte Wissen ist in unterschiedliche Messverfahren organisiert, bei denen für verschiedene Auswahlkriterien die jeweils für diese Kriterien individuellen Einsatzgrenzen spezifiziert werden. Formal manifestiert sich das Wissen in einer zweidimensionalen Tabelle (Matrix) mit 25 verschiedenen Verfahren und 35 Auswahlkriterien. Anhang L zeigt einen Ausschnitt aus der Wissenstabelle, anhand dessen bereits die Multidimensionalität und die starke Heterogenität der Wissensinhalte erkennbar werden. Sowohl bei der Pflege als auch bei der Anwendung des Wissens wurden dabei folgende gravierende Probleme und Einschränkungen deutlich:

- Unübersichtlichkeit und unkomfortable Handhabbarkeit der Wissensdarstellung
- Ungleichmäßige oder gar fehlende Formalisierung und Einheitlichkeit der Wissensinhalte
- Abbildung von Abhängigkeiten nur rudimentär oder gar nicht möglich
- Konsistenz der Wissensinhalte schwer oder gar nicht überprüfbar

Auf Basis derartig vorliegender Wissensinhalte und ihrer Defizite ist eine automatisierte Verarbeitung und Auswahlunterstützung ohne eine vorherige Aufbereitung der Wissensinhalte nicht möglich.

9.1.2 Durchführung und Ergebnis

Aus der geschilderten Problematik dieses Anwendungsfalles lässt sich die Forderung ableiten, die vorliegenden Wissensinhalte nach der entwickelten Methodik (→ 7.6) in eine konzeptkonforme Modellierung (→ 7.3) zu überführen und mit Hilfe geeigneter Verarbeitungsmechanismen (→ 7.5) und der entwickelten Softwarewerkzeuge (→ 8) eine rechnergestützte Pflege und Verarbeitung dieser Wissensinhalte zu ermöglichen.

Die entsprechende Herangehensweise und Bewältigung der dem Anwendungsfall innewohnenden Herausforderungen stellt der vorliegende Abschnitt anhand konkreter Beispiele dar. Die Anzahl möglicher Varianten und Kombinationen der Modellierung ist theoretisch sehr groß. Aufgrund der dadurch ohnehin notwendigen Vereinfachung der Darstellung beschränkt diese sich auf praxisnahe Beispiele mit nichtfiktiven Inhalten, welche einen Eindruck für die Anwendbarkeit und die prinzipiellen Möglichkeiten des entwickelten Konzepts vermitteln.

Da bei diesem Anwendungsfall bereits umfangreiche Wissensinhalte durch das Expertengremium GMA FA 2.40 vorliegen, beschränkt sich der Arbeitsschritt der Wissensakquise (Methodik Schritt I) auf die Aufbereitung der Inhalte und eine iterative und ergänzende oder auch korrektive Wissensakquise, welche den Modellierungsprozess begleitet.

Die Modellierung von Klassen- und Instanzenebene findet softwaregestützt mit Hilfe des Wissenseditors (→ 8.2) statt. Für die Gestaltung der Klassenebene wird in der PZL-Bibliothek

zuerst die Funktion (Schritt II.a) „Durchflussmessung“ definiert und mit entsprechend beschreibender Semantik versehen. Darauf folgend werden die PZL der Funktion festgelegt (Schritt II.b). Sie werden hier genutzt, um die Messverfahren und -prinzipien abzubilden. Die Festlegung der PZL orientiert sich an den vom Expertengremium differenzierten Messverfahren. Anhang M.1 gibt einen Überblick über diese. Wie zu erkennen ist, werden in die Unterscheidung teilweise auch spezielle Bauformen einbezogen. Der Abstraktionsgrad des Modellelements PZL lässt dies zu. Die PZL werden eindeutig beschrieben und semantisch spezifiziert. Dabei ist eine starke Orientierung an die auch im Standard eCl@ss vorhandenen Klassen gegeben, wie Anhang M.1 zeigt.

Durchflussmessungen müssen teilweise ein sehr großes Spektrum an Einsatzbereichen abdecken. Die geforderte Leistungsfähigkeit der Messdurchführung kann daher stark variieren. Der Auszug aus der Wissenstabelle (Anhang L) macht dies beispielhaft deutlich. Um dieser Varianz gerecht zu werden und besser zwischen Standardanwendungen und Anwendungen unter extremen Anforderungen (High-End) differenzieren zu können, werden, wo notwendig, jeweils zwei verschiedene Varianten der betroffenen PZL unterschieden und modelliert. Diese Vorgehensweise hilft, die Lösungsräume von Standardfällen nicht durch extreme, aber seltene und nur unter bestimmten Bedingungen mögliche Einsatzgrenzen zu verfälschen und erleichtert den Konsensfindungsprozess bei der Wissensakquise und -modellierung.

Die Definition und Beschreibung der Merkmale (Schritt II.c) erfolgt im Merkmalexikon und bildet alle vom Expertengremium als relevant betrachteten Auswahlkriterien ab. Neben der Wahl einer merkmalsadäquaten Skalierung (Skalenniveau) werden mögliche Ausprägungen, Definitionsbereiche und Einheiten festgelegt. Zudem erfolgt die Spezifizierung der semantischen Attribute und, wo möglich, die Referenzierung auf Standards wie eCl@ss. Anhang M.2 gibt einen Überblick über die für die Funktion „Durchflussmessung“ festgelegten Merkmale und ihre Charakterisierung. Auf die Ausgestaltung der semantischen Attribute wird dort und an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Nach der grundsätzlichen Beschreibung werden die Merkmale der Funktion zugeordnet (LORP) und die auf Funktionenebene relevanten Attribute spezifiziert (Schritt II.d), wie Anhang M.2 darstellt.

Im Folgenden schließt sich die Erstellung eines spezifischen Instanzenmodells für jede PZL an. Die Ausgestaltung eines Instanzenmodells kann, insbesondere bei der Durchflussmessung, sehr individuell ausfallen, so dass sich die PZL in ihrer Wissensbasisstruktur mitunter stark unterscheiden. Aufgrund der begrenzten Darstellungsmöglichkeiten im Rahmen dieses Kapitels wird die Darstellung der Modellierung der Instanzenmodelle an dieser Stelle auf ein Hauptbeispiel beschränkt. Da sich jedoch nicht alle Besonderheiten und Möglichkeiten an einem Beispiel umfassend zeigen lassen, werden im Weiteren ergänzend ausgewählte Aspekte und Besonderheiten anderer PZL bzw. alternative Modellierungen angesprochen.

Als Hauptbeispiel dient hier das Instanzenmodell der PZL „Ultraschall-Durchflussmessung (inline)“. Die relevanten Merkmale werden dem Instanzenmodell hinzugefügt und danach in ihren Merkmalausprägungen spezifiziert (Schritt III.a). Dazu werden die vom Expertengremium für diese PZL festgelegten Umfänge (z. B. minimal und maximal mögliche Werte) als Ausprägungen angelegt und somit die Grundwertemenge des Merkmals bestimmt (z. B. Prozesstemperatur: -200 – 280 °C, Prozessdruck: 0 – 250 bar). Ergänzend werden PZL-spezifische Beschreibungen und Kommentare zu den Merkmalausprägungen hinzugefügt. Im letzten Schritt der Modellierung werden die Relationen angelegt und inhaltlich ausgestaltet (Schritt III.b).

Bevor auf ausgewählte Strukturen des entstandenen Instanzenmodells von „Ultraschall-Durchflussmessung (in-line)“ eingegangen wird, veranschaulicht Abbildung 9-1 dieses in seiner Gesamtheit als Merkmalnetz. Wie zu erkennen ist, bildet ein großer Teil der Merkmale ein zusammenhängendes Netzwerk im oberen Bereich der Visualisierung. Die restlichen modellierten Merkmale sind unabhängig voneinander und werden alleinstehend im unteren Bereich der Visualisierung dargestellt (zu bemerken ist hierbei, dass für die PZL völlig irrelevante Merkmale, wie z. B. „elektrische Leitfähigkeit“, nicht dargestellt werden).

Abbildung 9-1 macht die zentrale Bedeutung des Merkmals „Aggregatzustand (state of aggregation)“ für die hier behandelte PZL deutlich. Dieses ist durch Relationen mit zahlreichen anderen Merkmalen vernetzt. Während der Aggregatzustand sich über eine extensionale Relation (Abbildung 9-1, Relation 03) lediglich auf den Maximalwert der Prozesstemperatur auswirkt (Gas: 250 °C, Flüssigkeit: 180 °C), ist er hinsichtlich des Merkmals „Nennweite (nominal width)“ sowohl mit dem Maximalwert (Gas: 1000 mm, Flüssigkeit: 3000 mm) als auch mit dem Minimalwert (Gas: 50 mm, Flüssigkeit: 25 mm) verknüpft – hier modelliert durch zwei getrennte extensionale Relationen (Relation 20, Relation 19).

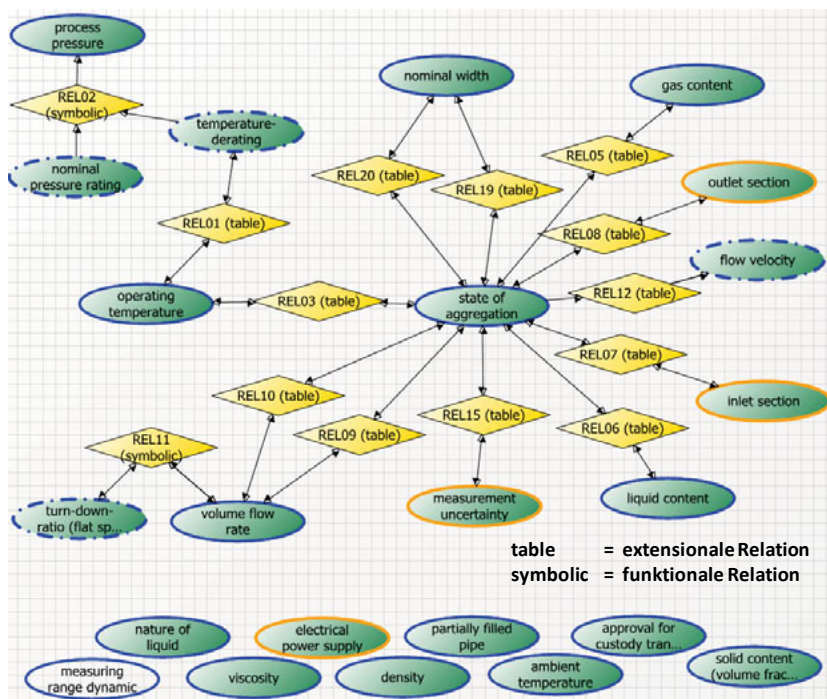


Abbildung 9-1: Instanzenmodell der PZL "Ultraschall-Durchflussmessung (in-line)"

Ähnlich wie bei der Nennweite wird auch beim Volumenstrom die Begrenzung beider Ausprägungen durch den Aggregatzustand mitbestimmt (Relation 09, Relation 10). Bei der Anwendung des Verfahrens ist jedoch nicht jede beliebige Messspanne des Volumenstromes realisierbar. Daher muss zudem das Verhältnis zwischen minimalem und maximalem Volumenstrom begrenzt werden. Die Modellierung dieses Zusammenhangs erfolgt über eine

funktionale Relation (Relation 11). Die Relationsteilnehmer sind der Minimal- (C) und der Maximalwert (B) des „Volumenstromes (volume flow rate)“ und der Maximalwert des „Turn-Down (turn-down-ratio)“⁹⁶ (A), welche über den Relationsinhalt " $C * A - B = 0$ " verbunden werden. Der Turn-Down bringt durch seine Merkmalausprägung ein vorgegebenes maximales Verhältnis von minimaler und maximaler Ausprägung des Volumenstromes ein. Das Merkmal selbst ist jedoch passiv, d. h. es werden keine PE-Spezifikationen hinsichtlich des Turn-Down durch den Anwender formuliert.

Einen weiteren zu betrachtenden Teil der Netzwerkstruktur bildet der Zusammenhang zwischen Nenndruck, Prozessdruck, dem Temperatur-Derating und der Prozesstemperatur (diese ist wiederum mit dem Aggregatzustand verbunden). Diese Modellierung spiegelt die temperaturabhängige Verminderung des Nenndrucks auf den zulässigen Prozessdruck wieder. Dieser werkstoffabhängige Zusammenhang spielt beim Zusammenspiel von Druck und Temperatur in Rohrleitungen und an Flanschen eine besondere Rolle, muss auch hier beachtet werden und wird in Anhang N beispielhaft für den in dieser PZL verwendeten Werkstoff X2CrNiMo17-12-2 dargestellt. Das „Temperatur-Derating“ wird hierfür als dimensionslose, passive Hilfsgröße modelliert und stellt den Verminderungsfaktor der Werkstofffestigkeit, normiert zwischen null und eins dar. Die extensionale Relation (Relation 01) bildet den Zusammenhang zwischen der „Prozesstemperatur (process temperature)“ und dem entsprechenden Verminderungsfaktor, mangels analytischer Beschreibung, über einzelne Stützpunkte (u. a. 20 °C: 1; 50 °C: 0,9625; 100 °C: 0,9475) in der benötigten Auflösung ab. Die funktionale Relation (Relation 02) schließlich stellt den Zusammenhang zwischen „Nenndruck (nominal pressure rating)“ (C) bei Normtemperatur von 20 °C und zulässigem „Prozessdruck“ (A) über den Verminderungsfaktor des „Temperatur-Derating“ (B) her (Relationsinhalt: " $B * C - A = 0$ "). Da der Nenndruck selbst als reine Referenzgröße nicht für die Eignungsbewertung der PZL verwendet wird (d. h. das PE wird nicht hinsichtlich Nenndruck spezifiziert), wurde dieser bereits bei der Zusammenstellung der LORP auf Klassenebene als passives Merkmal modelliert. Um die explizite Kausalität innerhalb dieses Zusammenhanges auszudrücken, werden die Wirkungsrichtungen entsprechend spezifiziert. Der ursprünglich omnidirektionale Relationsinhalt darf daher ausschließlich in der Form " $C = A / B$ " ausgewertet werden, womit der Prozessdruck über diese Relation nur beeinflusst wird und keine Auswirkungen auf die beiden anderen Teilnehmer hat.

Das Instanzenmodell der PZL wird nach Fertigstellung, ggf. zusammen mit den modellierten Wissensinhalten anderer PZL, zur Behandlung konkreter Problemfälle (PE-Spezifikationen) formalisiert aus dem Wissenseditor ausgeleitet und dem Werkzeug zur Auswahlunterstützung verfügbar gemacht. Softwarebasiert erfolgt die Spezifikation des PE (→ Abbildung 8-4). Die Möglichkeit des Imports vorliegender PE-Informationen ist dabei durch die integrierte eCI@ss-Schnittstelle möglich. In den evaluierten Fällen konnten somit aus dem CAE-Werkzeug ProDOK[®] ausgeleitete Merkmalleisten für die automatisierte Akquise von PE-Spezifikationen genutzt und bis zu 60 %⁹⁷ der Ausprägungen aller relevanten Merkmale aus jeweils einer Merkmalleiste gewonnen werden. Anhang O führt eine beispielhafte Spezifikation auf und gibt Hinweise bezüglich der jeweils merkmalspezifischen Importierbarkeit.

⁹⁶ Als Turn-Down(-Ratio) wird das Verhältnis zwischen einem minimalen und einem maximalen Durchfluss (Massen- oder Volumenstrom) bezeichnet, bei dem noch mit einer festgelegten Messgenauigkeit gearbeitet werden kann. Der Turn-Down charakterisiert damit die relative Messspanne.

⁹⁷ Eine Erhöhung dieses Anteiles kann entweder durch eine weitere Intensivierung der Verwendung standardisierter Merkmale bzw. Referenzierung auf in eCI@ss vorhandene Merkmale oder durch eine in den Standard hineingetragene Erweiterung des Umfangs an verfügbaren Merkmalen erreicht werden.

Das Werkzeug zur Auswahlunterstützung führt die Inferenz auf Basis der PE-Spezifikation und den in der Wissensbasis hinterlegten Inhalten (Instanzenmodelle) durch. Die Ergebnisse der Wissensverarbeitung werden für die betrachteten PZL visualisiert (→ Abbildung 8-5), und darüber hinaus wird eine detaillierte Auswertung und Darstellung für die jeweils ausgewählte PZL geliefert. Abbildung 9-2 zeigt einen Zusammchnitt der entsprechenden graphischen Aufbereitung für das hier besprochene Hauptbeispiel „Ultraschall-Durchflussmessung (in-line)“ im Zusammenhang mit der in Anhang O aufgeführten PE-Spezifikation.

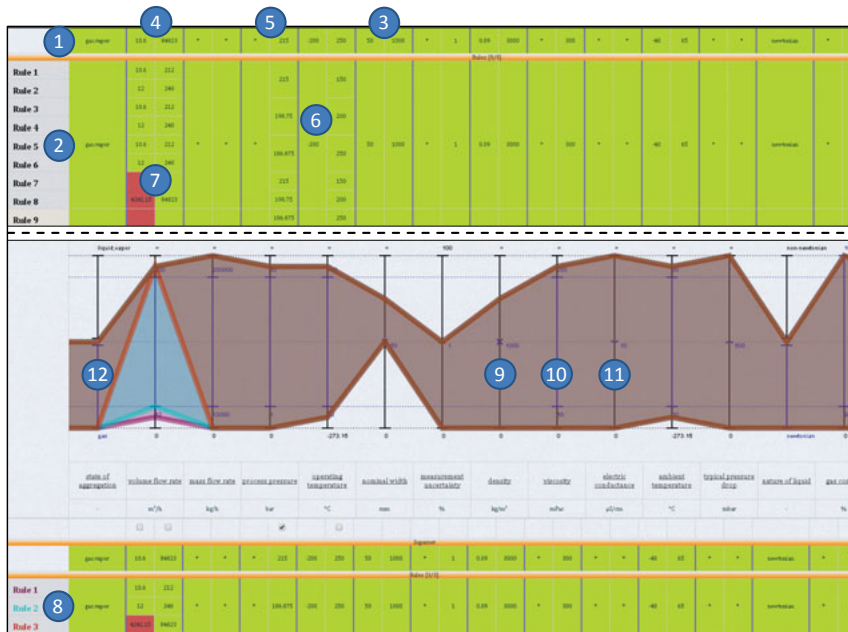


Abbildung 9-2: Detaillierte Ergebnisaufbereitung und -darstellung der Auswertung der PZL "Ultraschall-Durchflussmessung (in-line)"

Im oberen Teil der Abbildung 9-2 sind die Ergebnisse des resultierenden Gesamtlösungsraums (Nr. 1) und der neun Einzellösungsräume (Nr. 2) zu sehen. Bereits bei Betrachtung des resultierenden Gesamtlösungsraums der PZL lassen sich einige Auswirkungen der modellierten und zuvor besprochenen Zusammenhänge erkennen. Der Einfluss des Aggregatzustandes hat sich auf die Lösungsraumbildung verschiedener Merkmale ausgewirkt. Durch die Spezifizierung von „Gas“ als Aggregatzustand des Prozessmediums ist der Lösungsraum bezüglich der Nennweite auf 50–1000 mm (Nr. 3) und bezüglich des Volumenstromes auf 10,6–84823 m³/h (Nr. 4) begrenzt. Die Auswirkungen bezüglich der Minderung des Prozessdrucks in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur sind daran zu erkennen, dass der maximal mögliche Prozessdruck auf 215 bar reduziert wurde (Nr. 5) – eine Minderung, die sich auf die spezifizierte maximale Prozesstemperatur von 150 °C bezieht (der maximale Nenndruck dieser PZL beträgt 250 bar). Der Zusammenhang zwischen Prozessdruck und -temperatur wird auch dadurch deutlich, dass Einzellösungsräume angezeigt werden, deren maximale Prozesstemperatur über den spezifizierten Wert hinausgehen (Nr. 6). Die korrespondierenden Prozessdrücke der jeweiligen Einzellösungs-

räume zeigen, dass trotz weiterer Druckminderung der geforderte maximale Prozessdruck auch bei höheren Prozesstemperaturen weiterhin gewährleistet werden kann. Dem Anwender wird damit gezeigt, dass gegenüber der PE-Spezifikation gewisse Spielräume hinsichtlich der Obergrenze dieses Merkmals vorhanden sind.

Bei den Ausprägungen der Einzellösungsräume hinsichtlich des Volumenstromes wird der Einfluss des passiven Merkmals Turn-Down ersichtlich. Innerhalb der hauptsächlich vom Aggregatzustand begrenzten Einsatzgrenzen der PZL sind hier theoretisch unendlich viele Wertebereiche unter Beachtung des maximalen Turn-Down (hier 1:20) möglich. Für eine endliche und dem spezifischen Anwendungsfall entsprechenden Ergebnisentwicklung und -darstellung wird hier eine Wissensverarbeitung am Arbeitspunkt bzw. -bereich durchgeführt, der durch die PE-Spezifikation vorgegeben wird. Wie in Abbildung 9-2, Nr. 7 zu sehen ist, werden ausgehend vom geforderten Minimalwert des Volumenstromes (12 m/h^3) die durch den Turn-Down maximal möglichen Volumenströme abgeleitet (240 m/h^3). Zusätzlich werden die möglichen Spielräume der Ausprägungen aus den oberen und unteren Grenzwerten des resultierenden Gesamtlösungsraums abgeleitet ($10,6 - 212 \text{ m/h}^3$, $4241,15 - 84823 \text{ m/h}^3$).

Die Anzahl der angezeigten Einzellösungsräume kann durch eine Fixierung von PE-Spezifikationen gezielt reduziert werden. Im unteren Teil von Abbildung 9-2 ist das Resultat einer solchen Reduzierung dargestellt (Nr. 8). Für vier verschiedene Merkmalausprägungen ist im abgebildeten Beispiel überhaupt nur eine Fixierung sinnvoll möglich (Voraussetzungen für eine Fixierung werden in Abschnitt 7.5.2 genannt). Die hier ausgewählte Fixierung des maximalen Prozessdrucks sorgt dafür, dass auf Einzellösungsräume reduziert wird, bei denen die Verbesserung anderer Merkmalausprägungen gegenüber einem möglichst hohen zulässigen Prozessdruck der Vorrang gegeben wird. Einzellösungsräume mit einem maximalen Prozessdruck von 186,875 bar erfüllen die PE-Spezifikation hinsichtlich dieses Merkmals auf jeden Fall, bieten jedoch bezüglich der zulässigen maximalen Prozesstemperatur von 250°C wesentlich mehr Spielraum gegenüber der PE-Spezifikation als Einzellösungsräume mit höheren maximalen Prozessdrücken. Deshalb wird die Gesamtmenge der Einzellösungsräume auf die hier abgebildeten reduziert, deren Lösungsräume im mittleren Teil von Abbildung 9-2 visualisiert werden. Zu erkennen ist hierbei, wie der im heterogenen Merkmalraum durch Punkte (Nr. 9), Intervalle (Nr. 10), einseitige Grenzen (Nr. 11) oder diskrete Werte (Nr. 12) spezifizierte Problemraum des PE von den Lösungsräumen der Einzellösungsräume der PZL umfasst wird.

Neben dem behandelten Hauptbeispiel macht der Blick auf andere PZL deutlich, welche Unterschiede in der Erstellung der Instanzenmodelle bestehen können, die sowohl aus inhärenten Einflüssen der PZL selbst, aber auch aus einer abweichenden Betrachtung oder Schwerpunktsetzung bei der Modellierung resultieren können.

Das Instanzenmodell der PZL „Coriolis-(Masse-)Durchflussmessung“ beispielsweise wird in Anhang N.1 dargestellt. Erkennbar ist hier, dass sich durch die Unabhängigkeit der Prozesstemperatur vom Aggregatzustand zwei eigenständige Netzwerke bilden. Der bereits im Hauptbeispiel aufgezeigte Zusammenhang zur Abbildung der temperaturabhängigen Verminderung des Prozessdrucks wird hier noch um eine Abhängigkeit zwischen dem Nenndruck (also dem Ausgangswert für die Druckverminderung) und der Nennweite erweitert. Die dafür zuständige extensionale Relation (Relation 04) bildet das typische Verhältnis zwischen den jeweiligen Maximalwerten von Nenndruck und Nennweite ab. Abbildung 9-3 veranschaulicht den zugehörigen stufenförmigen Lösungsraum, welcher hier relativ einfach gestaltet ist und durch weitere Wertepaare detaillierter ausmodelliert werden kann. Je höher der erreichbare Nenndruck

ist, desto kleiner ist die zulässige Nennweite. In die Modellierung dieses Zusammenhanges gehen primär der Einfluss der mechanischen Festigkeit von Messrohren und zum anderen auch die daraus resultierende Marktverfügbarkeit tatsächlich vorhandener TR ein. Ein weiterer markanter Modellierungsaspekt ist die Verwendung des Massestromes als Merkmal anstelle des Volumenstromes, da die PZL primär zur Messung von Masseströmen ausgelegt ist. Der Massestrom wird hier analog zum Volumenstrom im Hauptbeispiel in seinen Grenzen vom Aggregatzustand und vom Turn-Down bestimmt.

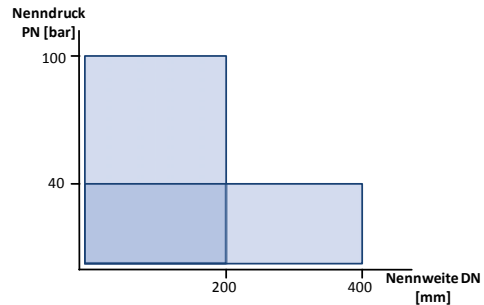


Abbildung 9-3: Durch die Relation zwischen Nenndruck und Nennweite gebildeter Lösungsraum

Bei der Betrachtung der PZL „Wirbelzähler“, deren Instanzenmodell in Anhang N.2 dargestellt ist, fällt vor allem die komplexere Einbindung des Turn-Down im Vergleich zum Hauptbeispiel auf. Hier wird eine zusätzliche Abhängigkeit des Turn-Down sowohl zum Aggregatzustand als auch zur Nennweite modelliert. Dabei wird der Turn-Down als passives Merkmal klar von diesen beiden Merkmalen unidirektional bestimmt, wie die Festlegung der Wirkungsrichtungen an der zugehörigen Relation (Relation 10) zeigt. Bei der Auswertung dieser dreiwertigen Relation bedeutet dies, gemäß dem in Abschnitt 7.5.2 beschriebenen Verarbeitungsmechanismus, dass die lokale Bewertung der Lösungsräume allein zwischen Nennweite und Aggregatzustand durchgeführt und der Turn-Down auf Basis dieses Ergebnisses bestimmt wird.

Eine weitere und alternative Modellierung soll abschließend am Beispiel der „Magnetisch Induktiven Durchflussmessung“ angesprochen werden. Anhang N.3 stellt das entsprechende Instanzenmodell der PZL dar.

Im Hauptbeispiel und den anderen Beispielen ist die Strömungsgeschwindigkeit als Merkmal nur schwach eingebunden. Sie wird jeweils vom Aggregatzustand in ihren Grenzen bestimmt (Wirkungsrichtung) und dient als passives Merkmal in dieser Verwendung lediglich zur Anzeige von Werten im Erklärungsteil und damit zur Überprüfung durch den Anwender. Im Beispiel der „Magnetisch Induktiven Durchflussmessung“ hingegen geht die Strömungsgeschwindigkeit über den Zusammenhang $\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot DN^2} - \bar{v} = 0$ (Relation 07) ein und kann dank der bidirektionalen Wirkungsrichtungen wechselseitig mit den Merkmalen Nenndurchmesser und Volumenstrom interagieren⁹⁸. Auf diese Weise können Ausprägungen der Strömungsgeschwindigkeit (z. B. als physikalische oder technische notwendige Grenzwerte) aktiv als Randbedingungen in die Entscheidungsfindung eingebracht werden. Darüber hinaus hat diese Modellierung auch Vorteile hinsichtlich der Behandlung des Aspekts der Messunsicherheit. Dies soll im Folgenden kurz beschrieben werden.

Bei vielen PZL der Durchflussmessung ist die Unsicherheit der Messung abhängig vom gemessenen Durchfluss. Diese Abhängigkeit äußert sich in Form einer Fehlerkurve (auch „Fehlertrompete“), wie sie Abbildung 9-4 veranschaulicht.

⁹⁸ Gegebene oder abgeleitete Werte der Strömungsgeschwindigkeit können somit genutzt werden, um wieder aktiv Werte anderer, in Relation stehender, Merkmale abzuleiten oder Rückschlüsse auf deren Grenzen zu bilden.

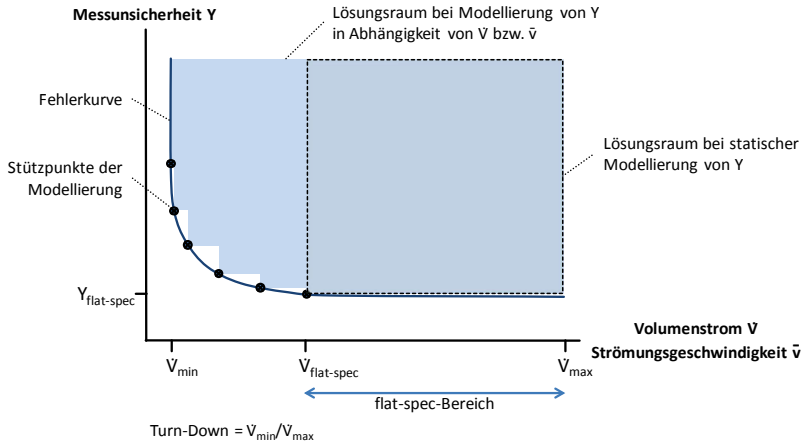


Abbildung 9-4: Möglichkeiten der Modellierung zur Abbildung der Fehlerkurve

In den bisher aufgeführten Beispielen wurde die Messunsicherheit als eine eher statische Größe behandelt (abgesehen von der Abhängigkeit zum Aggregatzustand), als deren Grenzwert typischerweise die Messunsicherheit angegeben wird, ab der sich die Fehlerkurve in einem nahezu linearen Verlauf befindet (sogenannter „flat-spec-Bereich“). Folglich muss der als unabhängig davon modellierte Volumenstrom dann ebenfalls auf den bei dieser Messunsicherheit minimal messbaren Wert begrenzt werden ($\bar{V}_{\text{flat-spec}}$). Es ergibt sich der in Abbildung 9-4 gezeigte rechteckige Lösungsraum. Im Beispiel der „Magnetisch Induktiven Durchflussmessung“ wird im Gegensatz dazu jedoch die Strömungsgeschwindigkeit, als Nennweiten-unabhängiger Vertreter des Volumenstromes, genutzt, um die typische Fehlerkurve abzubilden. Dazu repräsentiert eine extensionale Relation (Relation 12) zwischen Messunsicherheit und Strömungsgeschwindigkeit, ähnlich wie bei bereits beschriebenen Druckminderungskurve, die Stützstellen der Fehlerkurve in der notwendigen Auflösung. Durch diese Art der Modellierung kann eine wesentlich detailliertere und umfassendere Abbildung in Abhängigkeit von einer sich dynamisch aus den Betriebszuständen ergebenden Strömungsgeschwindigkeit realisiert werden. Abbildung 9-4 zeigt, wie zudem eine deutlich bessere Ausnutzung des Lösungsraums oberhalb der Fehlerkurve erreicht wird. Dies ermöglicht beispielsweise, dass Anforderungen (PE-Spezifikation) hinsichtlich niedrigerer Volumenströme ($< \bar{V}_{\text{flat-spec}}$) nicht automatisch die Eignung der PZL ausschließen, sondern in Abhängigkeit von einer im konkreten Anwendungsfall vorliegenden Strömungsgeschwindigkeit entschieden wird.

Bei der umfassenden Modellierung aller PZL der Funktion „Durchflussmessung“ wird klar, dass sehr viele Möglichkeiten der Modellierung zur Verfügung stehen, um die gewünschten Eigenschaften der jeweiligen PZL abzubilden. Auch wenn die Instanzenmodelle prinzipiell individuell betrachtet und geprüft werden müssen, können oftmals Modellierungsansätze oder sogar ganze Modellteile einer PZL in den Instanzenmodellen anderer wiederverwendet werden. Häufig wiederkehrende Modellstrukturen sind dabei meist auf physikalische Grundgesetze und andere Anwendungsfall-inhärente Zusammenhänge zurückzuführen. Beispiele hierfür sind u. a. die Verminderung des Prozessdrucks mit der Prozesstemperatur, der Einfluss des Turn-Down auf den Durchfluss oder bei mechanischen Verfahren beispielsweise der Einfluss der Viskosität auf die Messunsicherheit. Die teilweise Wiederverwendung hilft hier, sowohl die Effizienz der

Modellierungsarbeit zu steigern als auch ähnliche Sachverhalte und Modellaspekte ähnlich zu betrachten und zu behandeln.

Bei der Durchführung von Wissensakquise und -modellierung konnten durch die feste Struktur des Konzepts, die Leitlinie der Methodik sowie die begleitende Werkzeugunterstützung viele zuvor nicht bekannte oder nicht bewusste Problematiken erst entdeckt und expliziert werden. Über die bereits erwähnten grundsätzlichen Probleme der Wissensgrundlage (→ 9.1.1, Anhang L) dieses Anwendungsfalles hinaus wurden insbesondere inhaltliche Fragestellungen sowie Unklarheiten der Betrachtungsweise und Interpretation erkennbar und damit behandelbar. Beispielfhaft seien hier die Folgenden aufgeführt:

- Differenzierung bzw. Diskriminierung von PZL und von Merkmalen
- Interpretation und Wahl von Bezugsbedingungen (z. B. Interpretation unter Betriebs- oder unter Referenzbedingungen)
- Wahl adäquater Skalierung sowie Homogenisierung der Skalierung innerhalb von Merkmalen
- Hinterfragen scheinbarer Unabhängigkeiten zwischen Merkmalen
- Eindeutigkeit von Aussagen und Ausprägungen
- Formalisierung und Klassifizierung informeller Wissensinhalte

Bedingt durch die aufgeführten Herausforderungen sowie durch die Charakteristik eines Konsensbildungsprozesses, unterlag die Modellierung im Rahmen dieser Evaluation einem stark iterativen Vorgehen. Eine solche Vorgehensweise wird von der Methodik ausdrücklich gefordert und von Konzept und Werkzeugen unterstützt und bildet gleichzeitig die Basis für die weitere Wissenspflege und -aktualisierung.

Im Rahmen der Evaluation anhand des Anwendungsfalles „Durchflussmessung“ wurden schließlich zahlreiche praxisnahe Fallbeispiele mit der Wissensbasis aller modellierten PZL softwarebasiert durchgeführt und die Ergebnisse durch die Experten des GMA FA 2.40 geprüft und bewertet. Als Referenz galt dabei die Entscheidung bzw. Bewertung, welche die Experten ohne Softwareunterstützung in Bezug auf die vorliegenden PE-Spezifikationen treffen würden bzw. trafen. Abschließend konnte die durchgängige Übereinstimmung der softwareseitig und der von Experten erarbeiteten Resultate bestätigt werden. In einigen Fällen kam es mit Hilfe der Auswahlsoftware sogar zu unerwarteten Ergebnissen, die sich bei detaillierter Nachprüfung jedoch als inhaltlich korrekt erwiesen und damit sogar das Wissen der Experten ergänzten. Durch die automatisierte Erzielung erwartungskonformer Ergebnisse für die betrachteten Fallbeispiele der Durchflussmessung kann die Evaluierung im Rahmen dieses Anwendungsfalles als erfolgreich betrachtet werden.

9.2 Anwendungsfall „Antriebe“

9.2.1 Hintergrund und Ausgangssituation

Antriebe sind in Prozessanlagen, aber auch darüber hinaus (z. B. in fertigungstechnischen Anlagen), von wesentlicher Bedeutung im Rahmen der jeweils benötigten Aktorik. Antriebe sind als Akteure der Anlagenfeldebene zugehörig und bilden dort einen wichtigen Teil der automatisierungstechnischen Ressourcen (→ 2.3). Sie dienen grundsätzlich der Bewegungserzeugung (z. B. Hub-, Schwenk-, Dreh- oder Linearbewegungen) und der Realisierung unterschiedlicher Bewegungsabläufe, angetrieben von verschiedensten Hilfsenergien (z. B. elektrisch, pneumatisch, hydraulisch). Innerhalb von Prozessanlagen werden Antriebe hauptsächlich für die Prozessregelung in Form von Prozessgrößenbeeinflussung (z. B. als

Pumpen, Lüfter, Ventilatoren, Förderbänder, Anlagen- und Ventilantriebe) eingesetzt. Sowohl in Prozessanlagen als auch in anderen Anlagenformen (z. B. Fertigungs- oder Logistikanlagen) ist zudem die Bewegungsführung, beispielsweise zur Positionierung oder zum Transport, eine bedeutende Aufgabe der Antriebe. Der vielfältig geartete Bedarf an Antriebslösungen hat im Laufe der technischen Entwicklung unterschiedlichste Formen, Wirkungsprinzipien und Umsetzungsmöglichkeiten von Antrieben hervorgebracht.

Ähnlich wie bei dem vorherigen Anwendungsfall wird die Ausgangslage des Anwendungsfalles „Antriebe“ durch ein Expertengremium bestimmt. Der GMA FA 4.17 „Energieeffizienz in Antrieben der Montage- und Handhabungstechnik“ setzt sich aus Vertretern von Herstellern und Anwendern entsprechender Technologien sowie aus akademischen Vertretern zusammen. Ziel der gemeinsamen Arbeit war und ist es, Wissen über die Auswahl von Antriebslösungen und dafür relevante Randbedingungen zusammenzutragen. Dieses Wissen soll in die noch zu erarbeitende Richtlinie VDI 3548 einfließen. Die durch den GMA FA 4.17 behandelten Inhalte und Anwendungen adressieren nicht explizit die Prozessindustrie. Damit und gerade deshalb eignet sich dieser Anwendungsfall als Beispiel, welches zeigt, dass eine leichte Übertragbarkeit und Anwendbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit auch gegeben sind, wenn die behandelten Wissensinhalte und deren Anwendung jenseits der thematischen Grenzen der Prozessindustrie liegen.

Das vom GMA FA 4.17 akquirierte und konsensual vereinigte Wissen ist derzeit in tabellarischer Form zusammengefasst. Die Tabelle besteht in einer Dimension aus den für die Eignungsbewertung relevanten technischen und auch wirtschaftlichen Kriterien und in der anderen Dimension aus den differenzierten Antriebslösungen. Der Tabelleninhalt beschreibt die Eignungsbereiche der Antriebslösungen anhand der Auswahlkriterien. Wie Anhang P darstellt, wird die Eignung der Antriebslösungen bezüglich der entsprechend verfügbaren Kriterienausprägungen jeweils hinsichtlich einer dreistufigen Metrik („nicht geeignet“/ „bedingt geeignet“/ „geeignet“) klassifiziert.

9.2.2 Durchführung und Ergebnis

Auch in diesem Anwendungsfall war es sowohl Herausforderung als auch Ziel, die existierenden, domänenspezifischen Wissensinhalte gemäß des entwickelten Konzepts unter Beachtung der zugehörigen Methodik und unter Zuhilfenahme der implementierten Werkzeuge zu modellieren und schließlich softwarebasiert anhand realer Fallbeispiele auszuwerten. Das Vorgehen erfolgte nach den in Abschnitt 7.6 beschriebenen Schritten. Neben der Funktion „Antrieb“ wurden die zugehörigen Antriebslösungen als PZL und die notwendigen Auswahlkriterien als Merkmale modelliert. Es folgte die Zuordnung der relevanten Merkmale (LORP) zur Funktion, die auf Klassenebene notwendige Inhaltsspezifikation der Modellelemente sowie die Ausgestaltung der PZL-Instanzenmodelle. Auf die gemäß Methodik durchgeführten Schritte soll hier nicht mehr ausführlich eingegangen, sondern einzig die Beleuchtung einiger Besonderheiten dieses Anwendungsfalles und seiner Wissensgrundlage vorgenommen werden.

Viele der aufgeführten Auswahlkriterien sind scheinbar quantitativer Natur, da ihre Ausprägungen sich zahlenmäßig ausdrücken lassen. Bei näherer Betrachtung wird jedoch die im Folgenden beschriebene Problematik⁹⁹ bei der Modellierung deutlich. Obwohl grundsätzlich ein möglichst hohes Skalenniveau anzustreben ist (→ 7.6), fallen bei der Untersuchung der Kriterien-

⁹⁹ Die angesprochene Problematik wurde bei der Bearbeitung des Anwendungsfalles „Antriebe“ deutlich. Ihr Auftreten ist jedoch nicht abhängig von diesem spezifischen Anwendungsfall, sondern durch die hier vorliegende Ausgangssituation der Wissensinhalte bedingt.

ausprägungen mehrere Anomalien auf, die einer Skalierung auf höherem Niveau im Wege stehen. Überlappungen von Ausprägungsinhalten (z. B. beim Kriterium „Verfahrzeit“: < 1 s, 1-2 s, < 2 s, 2-3 s, 2-5 s) sind problematisch, besonders, wenn verschiedene Ausprägungen gleichzeitig für einen Lösungsraum zutreffen. Hier müsste dann individuell interpretiert werden. Angaben halboffener Intervalle (z. B. > 5000 mm) sind problematisch, weil entsprechende Ausprägungen theoretisch bei unendlich großen Definitionsbereichen der Merkmale auch unendliche Ausprägung besitzen und schwer sinnvoll eingrenzbar sind. Unter gewissen Annahmen und spezifischen Interpretationen ist zwar die Modellierung solcher Fälle mit quantitativer Skalierung (z. B. Rationalskala) möglich, aufgrund der aufgeführten Problematik wurden in den betroffenen Fällen diese scheinbar quantitativen Kriterien jedoch als qualitative Merkmale mit ordinaler Skalierung abgebildet.

Bei Betrachtung der tabellarischen Wissensgrundlage fällt auf, dass neben einem deklarierten Ausprägungsbereich, bei dem die jeweilige Antriebslösung „geeignet“ ist, auch einen Bereich gibt, in dem diese nur „bedingt geeignet“ ist. Diese Abstufung der Eignung ist so direkt im entwickelten Konzept nicht vorgesehen, da der Lösungsraum im Konzeptverständnis immer den „geeignet“-Bereich beschreibt und alles außerhalb des abgebildeten Lösungsraums als „nicht geeignet“ gilt. Um das in der Tabelle enthaltene Wissen dennoch adäquat abzubilden, werden für jede Antriebslösung zwei verschiedene Varianten der PZL definiert. Dabei wird analog zur bereits im Anwendungsfall „Durchflussmessung“ verwendeten Modellierung der verschiedenen Leistungsniveaus verfahren. Im Fall der „Antriebe“ wird dabei folgender Ansatz zugrunde gelegt: Die PZL „geeignet“ besitzt einen höheren Eignungsgrad und daher ein strengeres Lösungsraumverständnis – es werden daher nur die Ausprägungen hinzugerechnet, die als „geeignet“ klassifiziert sind. Die PZL „bedingt geeignet“ jedoch enthält sowohl die als „geeignet“ als auch die als „bedingt geeignet“ klassifizierten Ausprägungen – der resultierende Lösungsraum hat daher größeres Potential PE-Spezifikationen zu erfüllen (er ist „größer“ und schließt den Lösungsraum „geeignet“ ein). Anhang P zeigt schematisch die Lösungsräume beider PZL am Beispiel. Die Nichterfüllung der PE-Spezifikationen führt in beiden Fällen somit zu „nicht geeignet“ und die Erfüllung jeweils zu „geeignet“ bzw. „bedingt geeignet“. Damit sind alle Eignungsfälle im Verständnis der Wissensgrundlage repräsentierbar.

Abschließend kann festgestellt werden, dass auch das zusammengetragene Wissen dieses Anwendungsfalles mittels Konzept, Methodik und Werkzeugen modelliert und darauf basierend angewendet werden konnte. Aufgeführte Besonderheiten und Herausforderungen wurden entsprechend behandelt (Skalierung, Lösungsräume) und im Rahmen der Modellierung umgesetzt. Ähnlich wie bei den anderen Anwendungsfällen wurden durch die strukturierte Wissensaufbereitung inhaltliche Fehler und Lücken deutlich und konnten so frühzeitig beseitigt werden. Die dynamische Anpassung der Werkzeugoberfläche an die Inhalte des Anwendungsfalles gestattete die unmittelbare und umfassende Nutzung der Werkzeuge ohne eine domänenspezifische Anpassung. Die Ergebnisse der Wissensverarbeitung im Rahmen unterschiedlicher, konkreter Fallbeispiele wurden von den Experten als erwartungskonform und korrekt beurteilt. Die softwaregestützte Bewertung liefert, aus Sicht der Experten, hinsichtlich der Auswahl geeigneter Antriebslösungen aufgrund der komfortablen, fehlerarmen, automatisierbaren und dadurch effizienteren Durchführbarkeit einen großen Vorteil gegenüber der manuellen Nutzung der Wissensgrundlage, die meist mit einer aufwändigen Suche und Interpretation der Wissensinhalte verbunden ist.

9.3 Anwendungsfall „Stellgeräte“

9.3.1 Hintergrund und Ausgangssituation

Stellgeräte stellen als Vertreter der Prozessaktuatorik einen wichtigen Teil der TR der Anlagen-Feldebene (→ 2.3) dar. Mit Hilfe des Stellens wird der in der Anlage betriebene Prozess durch die Veränderung von Stoff- oder Energieströmen beeinflusst [MAI15] (z. B. Regelung von Durchflüssen, Temperaturen und Drücken). Die dazu genutzten Ventile und Klappen stellen daher als Stellgeräte bedeutende Elemente der Anlagentechnik dar. Durch den Kontakt mit strömenden Stoffen und die Einwirkung auf diese gibt es bei der Betrachtung eine nicht unbeträchtliche Ähnlichkeit, hinsichtlich der zu berücksichtigenden Aspekte, zur Durchflussmessung. Auch bei den Stellgeräten müssen vor allem mechanische und strömungsmechanische Bedingungen sowie Eigenschaften des strömenden Mediums beachtet werden. Die korrekte Spezifikation und Auswahl von Stellgeräten hat große Bedeutung für das bestimmungsgemäße Betreiben der gesamten Prozesstechnik. Fehlentscheidungen bei der Auswahl haben gravierende Folgen, worauf [DIN EN 60534-7] und [KIE15] hinweisen. Da differenzierte Berechnungsverfahren und Auslegungen insbesondere in frühen Planungsphasen mit ggf. unvollständigen Informationen oft nicht möglich sind [DIN EN 60534-7], kann auch hier die Auswahl von PZL einen entscheidenden Beitrag leisten.

Den allgemeinen und speziellen Herausforderungen bei der Auswahl sowie beim Einsatz von Stellgeräten widmen sich die Expertengremien GMA FA 4.14 „Stellgeräte für strömende Stoffe“ und NAMUR AK 3.4 „Stellgeräte“. Besetzt mit Vertretern von Hersteller- und Anwenderseite sowie der Akademie verkörpern diese Gremien spezifisches, aber auch konsensual vereinigtes, aktuelles Wissen dieser Domäne. Im Gegensatz zu den anderen beiden besprochenen Anwendungsfällen liegen keine konkreten, aufbereiteten Wissenssammlungen vor, sondern eine Verteilung der Wissensinhalte in diversen Standards, Richtlinien, Normen und als Wissen und Erfahrungen der Experten selbst (→ 3.1).

9.3.2 Durchführung und Ergebnis

Für die Evaluation von Konzept und Umsetzung war auch in diesem Anwendungsfall das Ziel durch die geeignete Modellierung der domänenspezifischen Wissensinhalte und die anschließende Wissensverarbeitung sowie die erfolgreiche Behandlung spezifischer Fallbeispiele gegeben.

Besondere Herausforderung war hierbei die unbestimmte Ausgangssituation ohne vorhandene, konkrete Wissensgrundlage. Da jedoch durch Konzept und Methodik sowohl die prinzipiellen Modellinhalte als auch die Vorgehensweise gegeben waren, konnte zusammen mit den Domänenexperten eine sukzessive Wissensakquise und Modellierung durchgeführt werden. Im Ergebnis wurden nahezu 40 verschiedene Verfahren und Bauformen als PZL für die Funktion „Stellen“ identifiziert und differenziert (→ Anhang Q.1). Für die Bewertung der PZL konnten 25 unterschiedliche Merkmale definiert und modelliert werden (→ Anhang Q.2).

Als weitere Besonderheit bei der Behandlung des Anwendungsfalles stellt sich die Wiederverwendbarkeit struktureller und teilweise sogar inhaltlicher Anteile des Wissensmodells des Anwendungsfalles „Durchflussmessung“ heraus. Durch die erwähnte Ähnlichkeit zwischen beiden Anwendungsfällen (strömende Stoffe) können große Teile der im Merkmallexikon definierten und bereits für die Durchflussmessung genutzten Merkmale wiederverwendet werden. Anhang Q.2 macht die markante Schnittmenge beider Anwendungsfälle deutlich, womit die Möglichkeit der domänenübergreifenden Wiederverwendung (→ 7.3.1) von Teilen der Klassenebene, in Form des Merkmallexikons, praktisch bestätigt wird. Im Fall der Funktion

„Stellen“ kann somit die Modellierung von nahezu 50 % der benötigten Merkmale entfallen. Auch die Modellierung der Instanzenebene kann vom Prinzip der Wiederverwendung profitieren. Durch die große Ähnlichkeit beider Anwendungsfälle hinsichtlich physikalisch-technischer Grundlagen und Randbedingungen können auch zum Teil bereits im Anwendungsfall „Durchflussmessung“ verwendete Strukturen und Teile der dort erstellten Instanzenmodelle übertragen werden (unter individueller Anpassung). Ein typisches Beispiel dafür ist der bereits in Abschnitt 9.1.2 beschriebene Zusammenhang zwischen der Prozesstemperatur des strömenden Mediums und dem gleichzeitig zulässigen Prozessdruck. Die Wiederverwendung entsprechender Modellteile wird durch den Wissenseditor werkzeugtechnisch unterstützt. Der Aspekt der Variantenbildung hinsichtlich verschiedener durch die Lösungsräume abzubildender Leistungsniveaus der PZL hat sich bereits bei der Modellierung des Anwendungsfalles „Durchflussmessung“ bewährt. Da auch beim „Stellen“ der Bedarf einer solchen Differenzierung festgestellt werden konnte, wird dieser Aspekt daher auch in hier vorliegendem Anwendungsfall im gleichen Verständnis berücksichtigt und umgesetzt.

Abschließend betrachtet, erwiesen sich das Konzept und die zugehörige Methodik als zielführend, um auch unter den beschriebenen Voraussetzungen dieses Anwendungsfalles eine effektive und unter Berücksichtigung des hohen Wiederverwendungsanteils darüber hinaus eine effiziente Modellierung durchzuführen. Zum Testen der erstellten Wissensmodelle und zur Evaluierung von Konzept und Implementierung wurden verschiedene spezifische Fallbeispiele in Form praxisrelevanter PE-Spezifikationen mit Hilfe des Werkzeuges zur Auswahlunterstützung bearbeitet und die Ergebnisse durch die Experten beider Gremien bewertet. Eine Übereinstimmung der Ergebnisse mit durch die Experten erarbeiteten bzw. von diesen erwarteten Ergebnissen konnte festgestellt werden und die Resultate konnten daher als korrekt bewertet werden.

9.4 Auswertung

Im Rahmen der Evaluation wurden drei verschiedene Anwendungsfälle betrachtet. Das jeweils relevante Wissen wurde akquiriert, aufbereitet und modelliert. Die so erstellten Wissensbasen wurden anschließend softwaregestützt für die Behandlung anwendungsfallspezifischer, konkreter und praxisrelevanter Fallbeispiele eingesetzt. Die Ergebnisse der Problemfallauswertungen wurden abschließend durch die entsprechenden Domänenexperten analysiert und im Vergleich mit deren Problemlösefähigkeit bewertet. Durch die Evaluation konnte auf diese Weise untersucht und gezeigt werden, ob und wie sich der Einsatz des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepts, der zugehörigen Methodik und der implementierten Werkzeuge bei der Lösung praktischer Anwendungsfälle bewährt. Bei der Gegenüberstellung der Evaluationsergebnisse mit den in Abschnitt 4.3 aufgestellten Anforderungen wird deutlich, dass diese erfolgreich erfüllt werden können. Darüber hinaus können weitere Nutzeffekte bei der praktischen Bearbeitung der Anwendungsfälle festgestellt werden. Im Folgenden soll zusammenfassend hierauf eingegangen werden.

Die Repräsentation von Wissen über PZL kann durch die im Rahmen der Konzeptentwicklung entworfene Modellierung, unter Beachtung der Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften der PZL, skalenniveauadäquat und -übergreifend gewährleistet werden (Anforderung Ia, Ic). Die Modellierung erlaubt eine aus wenigen, einfachen Modellelementen aufgebaute Wissensabbildung (Anforderung Ie). Diese Einfachheit der Modellstruktur sowie der Methodik ermöglicht insbesondere in der Evaluierung ein schnelles, gemeinsames Verständnis aller Beteiligten und fördert, als gemeinsame Arbeits- und Diskussionsgrundlage, den Konsens-

findungsprozess innerhalb der beteiligten Experten. Im Zusammenhang mit der vorgeschlagenen Methodik ermöglicht das Konzept einen strukturierten und geführten, sukzessiven Aufbau der Wissensinhalte mit abnehmender Abstraktion und zunehmender Problemindividualität. Dadurch wird sowohl die Explizierung der Wissensinhalte unterstützt und forciert als auch ein hohes Problemverständnis der Anwender erreicht. Die Fehlersuche und frühzeitige Fehlervermeidung innerhalb des modellierten Wissens wird sowohl durch die Einfachheit des Wissensmodells als auch durch die intuitive Repräsentation sowie Visualisierung gefördert und zusätzlich softwarebasiert durch Mechanismen zur Konsistenzprüfung unterstützt (Anforderung IIa). Die Möglichkeit der Verifikation sichert die Modellierung zusätzlich ab und unterstützt gleichermaßen einen iterativen Prozess der Wissensabbildung, ggf. unter Rücknahme von Entscheidungen oder bei der Identifikation beispielsweise fehlerhafter Annahmen. Dies ermöglicht die sukzessive Gestaltung der Wissensbasis, unabhängig davon, ob bereits umfangreiche Wissensgrundlagen existieren (→ 9.1, 9.2) oder parallel aufgebaut werden müssen (→ 9.3). Trotz der Verwendung einfacher Bausteine stießen die Möglichkeiten zur Modellierung des notwendigen Wissens, im Rahmen der durchgeführten Anwendungsfälle und Beispiele, nicht an ihre Grenzen.

Die Verarbeitung des repräsentierten Wissens zu neuem abgeleitetem Wissen ist, selbst unter Berücksichtigung besonderer Wissenscharakteristika (z. B. gerichtete Beziehungen, n-stellige Abhängigkeiten), durchführbar (Anforderung Ia). Dabei ist der Umgang mit unvollständigen Informationen (Anforderung Ib) unproblematisch und die Verarbeitung flexibel und gezielt steuerbar (Anforderung Id), beispielsweise durch die Wirkungsrichtungen der Relationsteilnehmer. Die Ergebnispräsentation ermöglicht sowohl eine Einschätzung der Verarbeitungsergebnisse als auch eine Beurteilung von Spielräumen und Alternativen und lässt somit die Einordnung und Weiterverwendung des abgeleiteten Wissens zu (Anforderung IIb).

Die sowohl für die Repräsentation als auch für die Verarbeitung der Wissensinhalte entwickelten Werkzeuge ermöglichen eine plattform- und ortsunabhängige Verfügbarkeit des repräsentierten, aber auch des abgeleiteten Engineeringwissens (Anforderung IIc). Sowohl die intuitive, leicht zugängliche Gestaltung der implementierten Werkzeuge als auch die durch diese ermöglichte visuelle Aufbereitung ermöglichen ein Verständnis und eine Bedienbarkeit auch durch Anwender, ohne Anforderungen an deren Kenntnisse der Wissensrepräsentation und -verarbeitung selbst (Anforderung IIa, IIb). Die Repräsentation der PZL-Eigenschaften durch Merkmale als einheitlich strukturierte Informationsträger wird realisiert und die Referenzierung und Nutzung von etablierten Standards ermöglicht (Anforderung IIIa). Die Fähigkeit zur Integration in den durchgängigen Engineeringprozess bei der Anlagenplanung wird in Abschnitt 7.7 konzeptionell gezeigt und im Rahmen der Evaluierung unter Nutzung standardisierter Merkmalleisten nachgewiesen (Anforderung IIIb).

Durch den erfolgreichen Einsatz in verschiedenen Anwendungsfällen macht insbesondere die Evaluation die generische, domänenübergreifende Anwendbarkeit sowohl von Konzept als auch Implementierung deutlich (Anforderung If). Die bewusste Einfachheit von Konzept und Konzeptanwendung sowie der mehrschichtige Modellaufbau bewirken eine weitestgehende Abstraktion der Anwendungsfälle, so dass eine Übertragbarkeit leicht gegeben ist. Durch diese Abstraktion können auch verschiedene Anwendungsfälle prinzipiell ähnlich betrachtet und behandelt werden. Die Anwendbarkeit und Einsetzbarkeit von Konzept und Werkzeugen ist daher nicht auf einen Anwendungsfall beschränkt und ein Einsatz jenseits der Planung verfahrenstechnischer Anlagen durchaus denkbar. Die im Zuge dessen ebenfalls erreichbare anwendungsfall- und teilweise domänenübergreifende Wiederverwendung von Teilen der

Klassenebene sowie Strukturen und Inhalten der Instanzenebene ermöglicht eine große Effizienz bei der Bewältigung konkreter Aufgabenstellungen (Anforderung If).

Insgesamt zeigen die Erfahrungen beim praktischen Einsatz sowie die mit Hilfe von verschiedenen Domänenexperten erzielten Evaluationsergebnisse ausdrücklich die Machbarkeit einer Unterstützung bei der Auswahl technischer Ressourcen mit Hilfe des entwickelten Konzepts und der werkzeugtechnischen Umsetzung. Die Erfüllung aller in Abschnitt 4.3 aufgestellten Anforderungen konnte erfolgreich gezeigt werden. Da diese Anforderungen bewusst aus den Defiziten des Status Quo und der existierenden Ansätze abgeleitet wurden, kann ihre Erfüllung gleichwohl als Beweis für die Vorteilhaftigkeit der Entwicklungsergebnisse im Rahmen der vorliegenden Arbeit gesehen werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Im Engineering verfahrenstechnischer Anlagen, mit besonderem Fokus auf der Automatisierungstechnik, treffen steigende Anlagen- und Gerätekomplexität kombiniert mit einer stark wachsenden Anzahl technischer Lösungsmöglichkeiten auf einen ständig zunehmenden Kosten- und Zeitdruck in einer anspruchsvollen, globalen Wettbewerbssituation. Diese Problematik gilt insbesondere für die im Engineering der Automatisierungstechnik einbezogene Aufgabenstellung der Auswahl geeigneter technischer Ressourcen in der Feldebene. Diese Aufgabenstellung stellt aufgrund der Häufigkeit ihrer Durchführung, aufgrund der Bedeutung der technischen Ressourcen für die Wirtschaftlichkeit und Qualität des Anlagenbetriebs und wegen des mit der Auswahl verbundenen Fehlriskos einen bedeutenden Kostenfaktor und -hebel für das Engineering und die gesamte Anlagenplanung dar. Gleichwohl ist die Auswahl geeigneter technischer Ressourcen, unter Berücksichtigung spezifischer Bedingungen und Anforderungen des Einsatzortes sowie des Anwenders, sehr komplex. Das Potential zur Effizienzsteigerung des Engineerings, unter gleichzeitiger Beherrschung zunehmender Komplexität, bieten Methoden und Werkzeuge, welche das Engineering durch die Automatisierung von Prozessen und Aufgaben unterstützen. In diesem Sinne ist es erklärtes Ziel vorliegender Arbeit, einen Beitrag zur Unterstützung der Auswahl technischer Ressourcen zu leisten.

Nach einer Einordnung der Engineeringaufgabe und der Analyse der mit ihr verbundenen grundsätzlichen Herausforderungen wurden verfügbare Möglichkeiten zur Akquise des notwendigen (Experten-)Wissens sowie Ansätze und praktizierte Vorgehensweisen zu dessen Verarbeitung untersucht. So zeigt die heutige Praxis der Auswahl technischer Ressourcen, dass die verfügbaren Wissensquellen eine starke Heterogenität aufweisen. Dies stellt eine wesentliche Herausforderung bei der gezielten, softwarebasierten Unterstützung dar. Zudem bieten die untersuchten Forschungsansätze und Werkzeuge mit ihrer problem- oder domänenspezifischen, meist produktorientierten Ausrichtung eine unzureichende Abbildungsfähigkeit des Wissens und eine geringe Flexibilität bei seiner Verarbeitung.

Aus dem erfassten Handlungs- und Verbesserungsbedarf heraus wurden drei Eckpfeiler als Basis für die Entwicklung eines Konzepts zur (softwarebasierten) Unterstützung des Auswahlprozesses definiert und beschrieben:

- Die Nutzung von abstrakten, funktionsorientierten und produktneutralen Prinzipzlösungen im Rahmen eines vorgelagerten Auswahlsschrittes.
- Die Verwendung von Experten-Konsenswissen als Wissensgrundlage.
- Der Einsatz wissensbasierter Methoden zur rechnergestützten Auswahl geeigneter Lösungen.

Die Notwendigkeit zur Abbildung multidimensionaler, heterogener und vernetzter Merkmalsräume, die vor allem aus der Verwendung von Prinzipzlösungen resultiert, wurde dargestellt, und die damit verbundenen Herausforderungen wurden analysiert. Basierend auf diesen Herausforderungen und den Defiziten des Status Quo wurde als Maßstab für das zu erstellende Konzept im Folgenden ein Anforderungskatalog erarbeitet, der die Hauptaspekte der Wissensabbildung und -verarbeitung sowie der Schnittstellen zum Menschen und zu rechnergestützten Systemen berücksichtigt.

Um aktuelle Erkenntnisse und Ergebnisse aus Wissenschaft und Technik in die Konzepterstellung einzubeziehen, wurden in zwei fachlichen Exkursen Ansätze, Modelle und Methoden sowie ihre Verwendbarkeit im Hinblick auf die Konzepterstellung untersucht. Im ersten Exkurs wurden

Merkmale zur Beschreibung der Eigenschaften technischer Objekte und auf Merkmalen basierende Informationsstrukturen, wie Merkmalleisten und -netze, betrachtet. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass sich vor allem Merkmale grundsätzlich für die Verwendung als strukturierte Informationsträger für das zu erstellende Konzept eignen. Die zugehörigen Merkmalstandards und -systematiken sind zur Orientierung oder sogar als Referenz sinnvoll nutzbar. Die notwendige Abbildung von Abhängigkeiten zwischen Merkmalen kann jedoch durch die existierenden Ansätze nicht abgedeckt werden. Im zweiten Exkurs wurden Möglichkeiten für die wissensbasierte Auswahl und Entscheidung untersucht, mit dem Schwerpunkt auf der Betrachtung wissensbasierter Systeme und verschiedenster Ansätze für die Wissensrepräsentation und -verarbeitung. Auch wenn der Ansatz der wissensbasierten Systeme relativ abstrakt und unspezifisch ist, ließ sich aufgrund der Eigenschaften und Potentiale dieser Systeme ihre Eignung als Grundstruktur für das zu erstellende Konzept konstatieren. Separat betrachtet konnte bei keinem der untersuchten Ansätze für die Repräsentation und Verarbeitung von Wissen eine ausreichende Verwendbarkeit für die Konzepterstellung attestiert werden. Jedoch waren einzelne Aspekte und Mechanismen oder grundsätzliche Prinzipien identifizierbar, die in Kombination miteinander einen Beitrag für die anforderungskonforme Konzepterstellung leisten können.

Für die Konzeptentwicklung als Kern der vorliegenden Arbeit wurde im Folgenden ein theoretisches Fundament in Form definierter Voraussetzungen, Festlegungen und Annahmen erarbeitet. Basierend auf diesem Unterbau konnte ein Modell entworfen werden, welches sich über die drei Abstraktionsebenen der Meta-, Klassen- und Instanzebene erstreckt und die Modellierung sowohl anwendungsfallspezifischer als auch anwendungsfallunabhängiger Wissensinhalte ermöglicht. Das Wissensmodell bietet eine geeignete Voraussetzung für die rechnerbasierte Interpretation und Analyse enthaltener Wissensinhalte. Unter diesem Gesichtspunkt wurden Möglichkeiten zur Konsistenzprüfung und -sicherung sowie zur Optimierung des repräsentierten Wissens und seiner Verarbeitung vorgestellt. Die Verarbeitung des im Modell enthaltenen Wissens zu neuem, davon abgeleitetem Wissen für die Auswahlunterstützung wurde durch verschiedene Verarbeitungsmechanismen realisiert. Diese stehen in mehreren festgelegten Verarbeitungsschritten mit analytischem oder synthetischem Charakter zur Verfügung und wurden ausführlich in Bezug auf ihre Wirkungsweise im Rahmen des entwickelten Konzepts erläutert. Es schloss sich die Erarbeitung einer Methodik an, die anhand einer definierten, strukturierten Vorgehensweise die Nutzung des Konzepts durch den Anwender sowohl unterstützt als auch absichert und so den systematischen Entwurf einer Wissensbasis ermöglicht. Abgerundet wird der konzeptionelle Teil der vorliegenden Arbeit mit der Beschreibung einer Möglichkeit, das entwickelte Konzept in die vor- und nachgelagerte rechnergestützte Informationsverarbeitung einzubetten. Es zeigt sich, dass unter Nutzung etablierter Ansätze zur Anlagenstrukturbeschreibung (hier: CAEX) und Semantik (hier: eC!@ss) eine nahtlose Integration in den Engineeringprozess möglich ist und somit eine Steigerung des Automatisierungsgrades bei der Auswahl erreicht werden kann.

Für den praktischen, rechnergestützten Einsatz des Konzepts wurden zwei Softwarewerkzeuge entwickelt, die in ihrer Funktionalität zusammenwirken. Der Wissenseditor ermöglicht das konzept- und methodenkonforme Erstellen einer Wissensbasis auf Grundlage des Wissensmodells. Durch eine geeignete Visualisierung der Wissensrepräsentation wird die Wissenserstellung und -pflege gefördert. Darüber hinaus wird eine automatische Konsistenzprüfung und -sicherung unterstützt. Das Werkzeug zur Auswahlunterstützung nutzt die im Editor erstellten Wissensinhalte und führt die Wissensverarbeitung im Zusammenhang mit

problemfallspezifischen Informationen durch. Die so gewonnenen Ergebnisse werden aufbereitet und für eine Auswahl- bzw. Entscheidungsunterstützung nutzbar gemacht.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Konzept wurde abschließend unter Verwendung der erstellten Softwarewerkzeuge anhand von drei verschiedenen Anwendungsfällen evaluiert. Zu jedem Anwendungsfall wurde das jeweils notwendige Expertenwissen zusammengetragen, aufbereitet und systematisch nach der entworfenen Methodik modelliert. Die Modellierungsergebnisse wurden als Wissensbasis des entsprechenden Anwendungsfalles auf verschiedene praxisrelevante Fallbeispiele angewendet und die Ergebnisse der Auswahlunterstützung mit den Erwartungen jeweils domänenspezifischer Experten verglichen. Die Auswertung der Ergebnisse der Fallbeispiele ergaben für jeden Anwendungsfall erwartungskonforme Resultate, die von den Experten in ihrer Korrektheit bestätigt wurden. Darüber hinaus konnten positive Effekte durch die Nutzung von Konzept und Implementierung festgestellt werden, da beispielsweise die frühzeitige Erkennung von Fehlern, der systematische und iterative Aufbau der Wissensbasis sowie der Konsensfindungsprozess wesentlich begünstigt wurden. Insgesamt ließ sich durch die Evaluierung an konkreten Problemstellungen sowohl die Anwendbarkeit als auch durch die Erfüllung der aufgestellten Anforderungen die Vorteilhaftigkeit der entwickelten Ergebnisse belegen.

Bereits mit Abschluss der vorliegenden Arbeit und den damit nutzbaren theoretischen und praktischen Ergebnissen ist die Realisierung des folgenden Szenarios möglich:

1. Verschiedene domänenspezifische Experten aggregieren relevantes Wissen und modellieren damit relevante Wissensinhalte, z. B. im Rahmen von Expertengremien.
2. Die Wissensinhalte werden formalisiert auf einer zentralen Plattform eingestellt und softwaregestützt gepflegt.
3. Die Wissensinhalte sind ortsunabhängig verfügbar und können den Anwender bei der Bewältigung der jeweils spezifischen Problemstellung im Engineeringprozess unterstützen.

Auf die dargestellte Weise können benötigte Wissensinhalte dezentral zusammengetragen, zentral gepflegt und verwaltet sowie schließlich dezentral genutzt werden. Implizit vorhandenes Expertenwissen wird damit expliziert und transparent verfügbar. Ein Einsatz gebündelter, qualitativ gesicherter und personell unabhängiger Expertise wird möglich. Durch die Wiederverwendung anwendungsfallunabhängiger Anteile des Wissensmodells und die Flexibilität der Werkzeuge können sich der Nutzen und damit auch die Effizienz von Konzept und Implementierung bei der Ausweitung der abgebildeten Wissensinhalte und -bereiche vervielfachen.

Die vorliegende Arbeit liefert mit der Erstellung eines Anforderungskataloges, eines darauf basierenden Konzepts mit zugehörigem Beschreibungsmittel, Methodik und umsetzender Softwarewerkzeuge einen Ansatz für die Repräsentation und Auswertung von Prinziplösungen auf Basis multidimensionaler, heterogener, vernetzter Merkmalsräume und damit einen Beitrag zur Unterstützung bei der Auswahl technischer Ressourcen. Die Ergebnisse dieser Arbeit fügen sich in den Grundgedanken der „Automatisierung der Automatisierung“ und können so zur Verbesserung der Effizienz im Engineering automatisierter Anlagen beitragen.

10.2 Ausblick

Obwohl das in Abschnitt 10.1 skizzierte Szenario bereits mit Vorliegen dieser Arbeit technisch umgesetzt wurde, muss die Schaffung der notwendigen organisatorischen und technischen Maßnahmen weiter vorangetrieben werden, um die Etablierung in der Praxis zu erreichen. Dazu gehören u. a. die Einrichtung und der gesichert administrierte Betrieb eines Servers durch eine firmenunabhängige, neutrale Instanz (z. B. Verein, Normengemeinschaft) sowie im Weiteren die organisatorische Umsetzung und Absicherung der Wissensakquise und -modellierung in möglichst vielen Expertengremien (u. a. mit klaren Verantwortlichkeiten für die Wissenspflege und z. B. zyklischen Überarbeitungen der Wissensinhalte).

Über die Etablierung des skizzierten Szenarios hinaus eröffnen sich aus dem Ergebnis dieser Arbeit weitere Potentiale und Fragestellungen, die Weiterentwicklungsbedarf und -möglichkeiten implizieren und im Folgenden unter konzeptionellen, funktionellen und anwendungsorientierten Aspekten aufgezeigt werden.

Konzept: Eine konzeptionelle Weiterentwicklung sollte vor allem darauf abzielen derzeitige Einschränkungen zu minimieren und die Möglichkeiten hinsichtlich der Wissensrepräsentation und -verarbeitung durch geeignete Konstrukte und Mechanismen zu erweitern. Der einfache und generische Charakter des entwickelten Konzepts sollte dabei nicht verloren gehen. Die Erhöhung der Ausdrucksmächtigkeit kann u. a. durch die Erweiterung des Umfanges abbildbarer Beziehungen durch Relationen erreicht werden. Hier ist die Abbildung anderer als bisher berücksichtigter mathematischer Zusammenhänge (z. B. Differential-, Ungleichungen) und der logischen Negation zu nennen. Weiterhin sollte untersucht werden, ob Relationen zumindest teilweise auch auf der Ebene der Funktion modelliert werden können und dadurch prinzipiellübergreifende Zusammenhänge¹⁰⁰ dargestellt und durch Referenzierung oder Vererbung effizient genutzt werden können. Das konditionierte Aktivieren und Deaktivieren von Relationen, beispielsweise durch die Möglichkeit Relationen auf Relationen wirken zu lassen, kann die Ausdrucksstärke und Flexibilität der Wissensabbildung durch eine zweite logische Ebene zusätzlich erhöhen. Weiterhin ist eine Untersuchung sinnvoll, unter welchen Bedingungen und mit welchem Nutzeffekt¹⁰¹ die Verwendung von Relationen (inklusive Merkmale in passiver Verwendung) auch im Problemraum sachdienlich ist. Diese Modellentität kann zur Erhöhung der Ausdrucksmächtigkeit beitragen, indem beispielsweise explizite Anwenderpräferenzen oder Aussagen zur spezifischen Konfidenz von Merkmalausprägungen modelliert werden.

Zur Verbesserung der Wissensverarbeitung sollte die Arbeit mit nichtmonotonen und ggf. nichtstetig begrenzten Merkmalräumen ermöglicht werden. Dies kann beispielsweise durch die Untersuchung der Merkmalraumgrenzen auf Extrema und die darauf folgende abschnittsweise Behandlung (ggf. Fallunterscheidung) erreicht werden. Darüber hinaus ist es sinnvoll weitere alternative Mechanismen hinsichtlich ihrer Eignung zur intelligenten Filterung der entstehenden Einzellösungsräume eines Gesamtlösungsraums zu untersuchen. Als Beispiel sei hier der Skyline-Algorithmus genannt (vgl. [ERB13]).

Funktionalität: Über die grundsätzliche Weiterentwicklung der implementierten Werkzeuge hinsichtlich ihrer Performanz sowie ihrer Schnittstellen zum Nutzer und zu anderen maschinellen Systemen hinaus bieten sich vielfältige Möglichkeiten für zusätzliche Funktionalitäten, von denen einige im Folgenden kurz angesprochen werden. Sinnvoll ist eine, über den derzeitigen Stand

¹⁰⁰ Ein Beispiel dafür wären werkstoffbedingte Zusammenhänge wie das Temperatur-Druck-Derating (→ 9.1.2).

¹⁰¹ Z. B. die Ableitung fehlender Anforderungsdaten aus anderen oder die Konsistenzprüfung der Anwenderangaben.

hinausgehende, Unterstützung bei der Modellierung der Instanzenmodelle, beispielsweise durch die Simulation verschiedener Modellierungsvarianten und die darauf basierende automatische Generierung von Vorschlägen¹⁰² für die Strukturierung oder Spezifizierung von Modellteilen. Eine PZL-übergreifende Analyse kann wiederum Unterstützung bieten, indem eine fehlende Diskriminierung von PZL identifiziert und Optionen für die Aufspaltung einer oder die Zusammenlegung mehrerer PZL angeboten und automatisiert unterstützt werden. Eine solche Analyse eröffnet zudem die Möglichkeit Lösungsräume der abgebildeten PZL einer Funktion auf das Vorhandensein grundsätzlich nicht oder schlecht abgedeckter Bereiche zu untersuchen. Derartige Informationen helfen bei der Aufdeckung von übergreifenden Modellierungsfehlern oder -lücken und können darüber hinaus Aufschluss über Entwicklungsbedarfe hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der PZL liefern. Für die Unterstützung beim Aufbau der Wissensbasis sollten Methoden wie „*Machine Learning*“ untersucht werden. Diese können helfen aus ggf. verfügbaren Datensätzen (z. B. in Form standardisierter Merkmalenlisten) Zusammenhänge und Abhängigkeiten abzuleiten und diese für eine automatische Generierung von Wissensbasisinhalten zu nutzen (ggf. sogar mit einstellbarem Konsensgrad der Wissensinhalte).

Anwendung: In Kapitel 9 wurde die Anwendungsfallunabhängigkeit des entwickelten Konzepts und seiner Umsetzung evaluiert und aufgezeigt. Aus dieser generischen Anwendbarkeit erwachsen vielfältige Möglichkeiten für die Anwendung des Konzepts und der Werkzeuge. Die Abstraktion weg vom spezifischen Anwendungsfall ermöglicht die Übertragbarkeit der Auswahlunterstützung auch auf andere Funktionen im Bereich der Anlagenplanung¹⁰³, der Automation und darüber hinaus prinzipiell vielfältiger technischer und auch nichttechnischer Auswahl- und Entscheidungsprobleme. Daher gilt es derartige Anwendungsfälle zu evaluieren und ggf. Rückschlüsse für die Weiterentwicklung zu ziehen oder neue Anwendungsfelder zu erschließen. Die in den bereits behandelten und den ggf. folgenden Anwendungsfällen gesammelten Erfahrungen, in Bezug auf die Wissensmodellierung und die genutzten Semantiken, sollten in die Weiterentwicklung, Ergänzung und Anpassung relevanter Standards (z. B. Klassifikationssysteme, Merkmallexika) einfließen. Damit kann eine Erhöhung der Anteile der nutzbaren standardisierten Semantik und damit eine Verbesserung und Erweiterung der Schnittstellen sowie eine höhere Qualität und Effizienz bei der Erstellung der anwendungsfallunabhängigen Modellteile erreicht werden.

Zusätzliche Möglichkeiten bietet die direkte Integration der Auswahlunterstützung in CAE-Planungswerkzeuge. Die Bedeutung dieser Thematik macht vor allem die Praxis [GE13] deutlich, indem die wissensbasierte Auswahl als eines der wichtigen Weiterentwicklungsthemen für CAE-Werkzeuge formuliert wird. Möglicherweise kann über eine solche Einbettung die vorgelagerte Einbindung der Entscheidungsergebnisse in die dynamische Simulation unter Nutzung von Prozess- und Stoffdaten im Rahmen frühzeitiger Planungsphasen¹⁰⁴ erfolgen. Damit können Entscheidungen vorverlagert bzw. ihre Auswirkungen virtuell abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung des skizzierten Szenarios und des sich daraus ergebenden Potentials erschließt sich ein weiterer Anwendungsbereich: Die Nutzung als Plattform für Management und Transfer der abgebildeten Wissensinhalte. Insbesondere die Nutzung zur Weitergabe und Einführung von domänen- oder anwendungsfallspezifischem Wissen (z. B. für unerfahrenere Mitarbeiter) wird durch den wettbewerbsneutralen, funktionsorientierten Charakter der konsolidierten und geprüften Wissensinhalte begünstigt. Hinsichtlich der immer kürzeren Halbwertszeit von Fachwissen und

¹⁰² Z. B. eine, hinsichtlich spezieller Gesichtspunkte, optimale Spezifizierung der Wirkungsrichtungen.

¹⁰³ Mögliche Systemfunktionen von Anlagen zeigen z. B. auch [HAD14] auf.

¹⁰⁴ Z. B. Vorplanung der Prozessleittechnik oder Basic Design und Process Engineering der verfahrenstechnischen Anlagenplanung.

im Zuge des demografischen Wandels ist eine entsprechende technologische Unterstützung vor allem für den Ingenieur als Wissensarbeiter von großer Relevanz [BSW+09]. Eine entsprechende Weiterentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen an eine solche Verwendung sollte daher untersucht werden.

Insgesamt bilden die aufgezeigten Weiterentwicklungsmöglichkeiten aus den Ergebnissen vorliegender Arbeit sicherlich nur einen Bruchteil des sich ergebenden Potentials. Im Hinblick auf den bereits gegenwärtigen Status von Wissen als Schlüsselressource im Unternehmen [SCH00] sowie als zukünftig bedeutendsten Produktionsfaktor und den bestimmenden Aspekt der Wertschöpfung [LUT11] sind die damit verbundenen Aufwände insbesondere im thematischen Fokus dieser Arbeit, jedoch auch darüber hinaus, eine mehr als gerechtfertigte Investition.

Anhang A Phasen des Anlagen-Engineerings

Insbesondere bei der Neuplanung von Anlagen findet vor der eigentlichen Planung die Durchführung notwendiger Machbarkeitsstudien statt. Hierbei geht es vor allem um die Vorbereitung der Investitionsentscheidung durch Prüfung der Risiken, Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Ermittlung der notwendigen Anlagenkapazitäten [PAS 1059].

Basic Design (BD)

Im BD (auch: Grundlagenermittlung, Vorplanung) steht die Erarbeitung projektspezifischer Verfahrensunterlagen im Mittelpunkt. Grobe Lösungsalternativen für die Verfahren und die technische Umsetzung werden entworfen, bewertet und ein Lösungsvorschlag bzw. grobes Anlagenkonzept abgeleitet [Sch08E].

Process Engineering (PE)

Das PE (auch: Auslegung) dient zur Ausarbeitung, verfahrenstechnischen Umsetzung und Optimierung des im BD entwickelten Konzepts. Dabei werden vor allem die notwendigen Einzelprozesse ausgewählt, entwickelt, verbessert und ausgelegt [Sch08E].

Basic Engineering (BE)

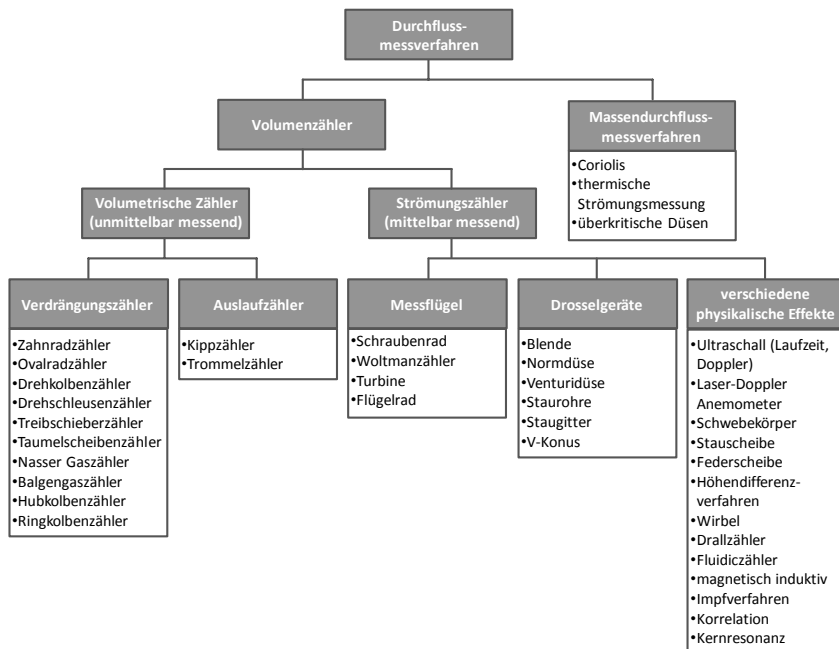
Das BE (auch: Entwurfsplanung) beinhaltet die Erarbeitung eines verbindlichen Gesamtentwurfs. Dazu gehört die Festlegung des Verfahrenskonzepts inklusive verfahrenstechnischer Berechnung und Dimensionierung der Prozessausrüstung [Sch08E]. Ebenfalls enthalten sind in dieser Phase das Durchlaufen der wichtigsten Genehmigungsverfahren, sowie Konzepte für Sicherheit und Umweltschutz (z.B. Lärmschutz, Entsorgung) [PAS 1059]. Das Ergebnis des BE ist die Aufgabendefinition und Vorgabe für die Gewerke der Detailauslegung – damit auch Basis für das PLT-Engineering und die Erarbeitung des PLT-Konzepts.

Detail Engineering (DE)

Eine klare Trennung zwischen DE (auch Ausführungsplanung, Detailplanung) und BE ist in der Realität nicht immer möglich und der Übergangspunkt zwischen beiden Phasen wird in der Literatur durchaus unterschiedlich verortet [Sch08E]. Spätestens im DE sind die noch nicht vorhandenen Ausführungsunterlagen zu erstellen bzw. die bereits existierenden weiter zu spezifizieren. Die Unterlagen müssen von den einzelnen Gewerken und in deren Kooperation, einen für die Anlagendokumentation und für die Beschaffung belastbaren Status und die notwendige Detailtiefe erreichen.

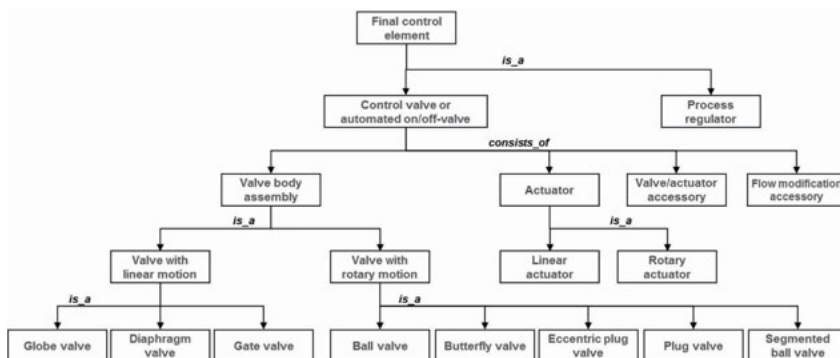
Anhang B Beispielhafte Taxonomien der Sensorik und Aktorik

B.1. Sensorik




Nach [TROB98]

B.2. Aktorik























































[DIN EN 60534-1]

Anhang D Dokumente im PLT-Engineering: PLT-Stellenblatt

1	Geräte Nr.	Tag Nr.	Repère	22-1TIZA 30			1					
2	Anzahl	Number	Nombre	1			0					
3	Gerät	Instrument	Instrument				Rev.					
4	Typ	Model	Modèle	Widerstandsthermometer			0					
5	Bauart	Design	Construction	Pt 100, Typ GA 2501			2					
7	Montageort	Location	Emplacement	Entgaser			0					
8	Anschlüsse	Connections	Raccordments	Flanschhülse, DN25/PN16			2					
9	Material	Material	Matériaux	1.4462 für die Hülse			1					
10	Länge	Length	Dimension	Hülse EL=800mm			2					
11	Meßbereich	Range	Range	0...200 °C			0					
12	Kopf	Head	Tête	Form B aus Alu			2					
13	Umgeb.-temp	Ambient Temp.	Temp. Ambient	30...50°C			2					
17	Schutzart	Protection	Protection	IP54			2					
20	Ex-Schutz	Ex-Protection	Ex-Protection	Exi			0					
21												
22	Zubehör	Optionals	Accessories				Rev.					
23	Typ	Model	Modèle	Meßumformer			0					
24	Bauart	Design	Construction	TZN 128-Ex			2					
25	Länge	Length	Dimension									
26	Meßbereich	Range	Range	-200...+400 °C			1					
28	Typ	Model	Modèle									
29	Bauart	Design	Construction									
30	Meßbereich	Range	Range									
31	Anzeige	Indication	Indication									
32	Genauigkeit	Accuracy	Exactitude									
33	Speisung	Supply	Alimentation	24 VDC			0					
34	Ausgang	Output	Sortie	4...20 mA			0					
35	Alarmer	Alarms	Alarme									
37	Ex-Schutz	Ex-Protection	Ex-Protection	Exi			0					
38												
39	Prozessdaten	Proces Data	Données T.	min.	norm.	max.	Rev.					
40												
41	Temperatur	Temperature	Température		106 °C	165°C	0					
42	Druck	Pressure	Pression	-0,5 bar	0,4 bar	6 bar	2					
43												
44	Druckabfall	Pressuredrop	Perte de charge									
45												
47	Medium	Fluid	Fluide	Wasser / Dampf			0					
48	Spez. Gew.	Spec. gravity	Densité									
49	Viskosität	Viscosity	Viscosité									
50												
51	Lieferant	Contractor	Fournisseur				2					
52	Kunde	Customer	Client				2					
A				Temperaturmess- gerät			Rev.	Dat.	Erst.	Gepr.	Freig.	
B												
C												
				Projekt:								
							Rev		2		Blatt 7/ 11	

PLT-Stellenblatt eines Temperaturmessfühlers [WEB08]

Anhang E Charakteristik verschiedener Quellen zur Wissensakquise

Quelle	Aktualität	Zugänglichkeit/ Zugriffsmöglichkeit	Neutralität/ Allgemeingültigkeit	Formalisierung	Standardisierung	Rechnerverarbeitbarkeit	Beispiele
Naturwissenschaftliche Grundlagenliteratur	 ¹⁰⁵						[Go98], [BoE114]
Technische Fachliteratur							[TroB98], [Bak00], [Bon02], [Str04], [Sil07], [Brü8a], [Hess09], [Cou10], [Boy10], [FGH+11 ¹⁰⁶], [Jm13]
Richtlinien, Normen							[DIN EN 24006], [DIN EN 29104], [VDI 2644], [VDI 3519], [NA 55]
Veröffentlichungen aus Forschung und Entwicklung			 ¹⁰⁶				[RiFu08], [Vot11], [Gil12 ¹⁰⁷], [Weg13]
Marktstudien und Marktübersichten; Fachzeitschriften			 ¹⁰⁷				[Sch02], [Sch04], [Brü8a], [Sch09], [Sch11a ¹⁰⁸], [Sch11b ¹⁰⁸], [Sch12 ¹⁰⁸], [Müh15 ¹⁰⁸]
Datenblätter, Produktkataloge, Prospekte, Herstellerinformationen					 ¹⁰⁸		109
Firmenhandbücher, Standardgerätekten							
Erfahrungswissen aus Planung und Einsatz							zumeist implizit vorhanden und an den Mitarbeiter gebunden
 = stark ausgeprägt  = mittel ausgeprägt  = niedrig ausgeprägt  = Ausprägung nicht vorhanden							

¹⁰⁵ keinen wesentlichen Änderungen unterworfen
¹⁰⁶ ggf. durch Projektpartner bzw. verwendete Technik eingeschränkt
¹⁰⁷ meist nur begrenzter Betrachtungsraum
¹⁰⁸ ggf. in Form von Merkmalen
¹⁰⁹ Aufgrund der Vielzahl verfügbarer, firmenspezifischer Herstellerinformationen und zur Wahrung wissenschaftlicher Neutralität wird an dieser Stelle auf die Aufführung konkreter Beispiele verzichtet.

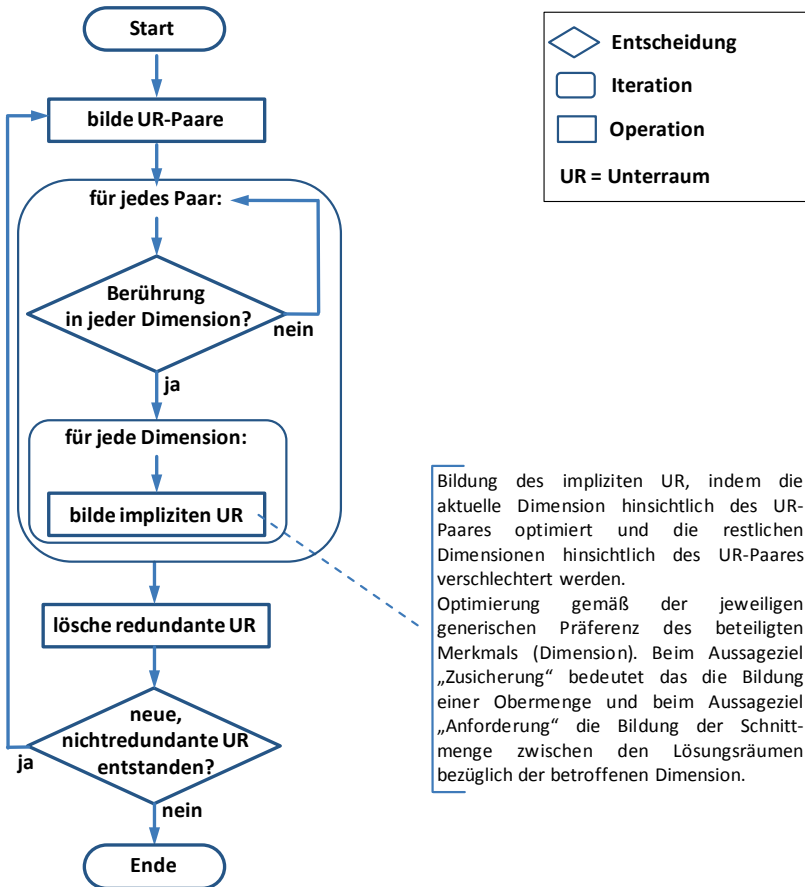
[illegible]

Anhang G Beispielhafte Anwenderschnittstellen von (Online-)Produktkonfiguratoren

[illegible]

Anhang H Algorithmen im Rahmen der Wissensverarbeitung

H.1. Bildung impliziter Unterräume in extensionalen Relationen



Aufwandsabschätzung: Anzahl impliziter Lösungsräume (pro Rekursionsschritt) =

$$\sum_1^{\frac{n!}{(n-k)! \cdot k!}} \text{wenn Berührung in jeder Dimension: } N; \text{sonst: } 0$$

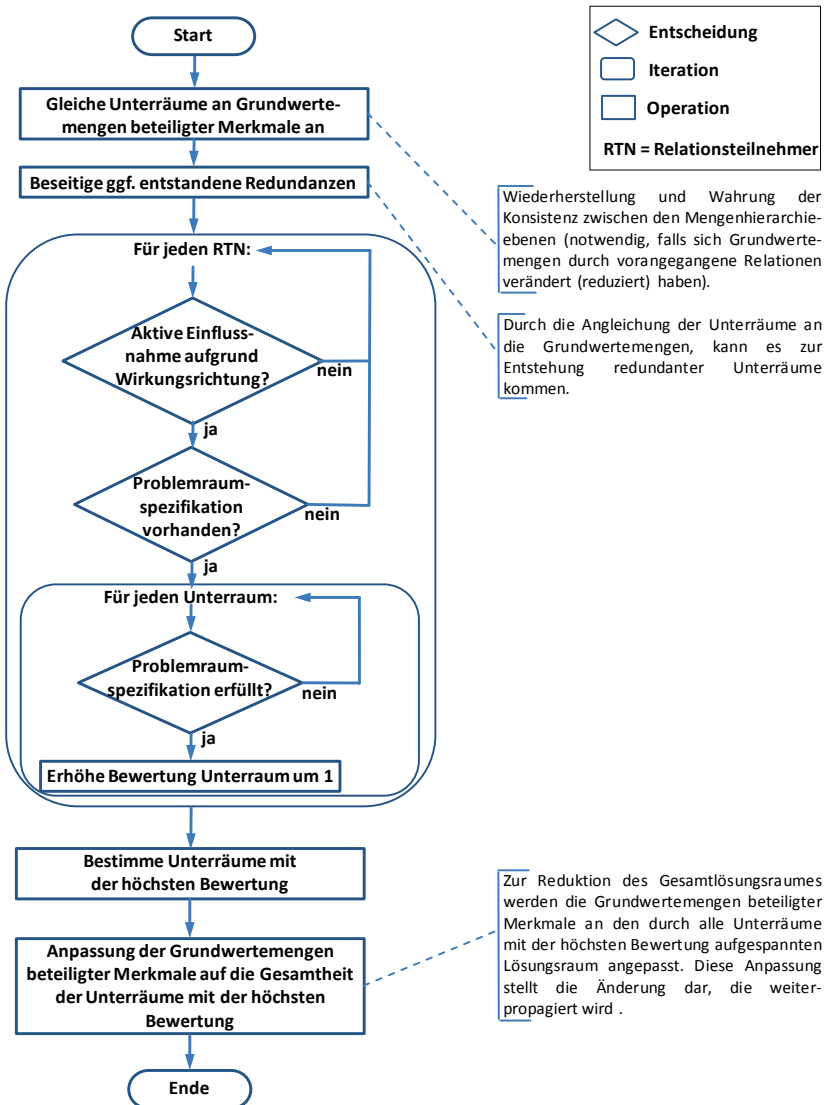
$\frac{n!}{(n-k)! \cdot k!} \rightarrow$ Kombination von Lösungsraumpaaren ohne Wiederholung

n = Anzahl betrachteter Lösungsräume

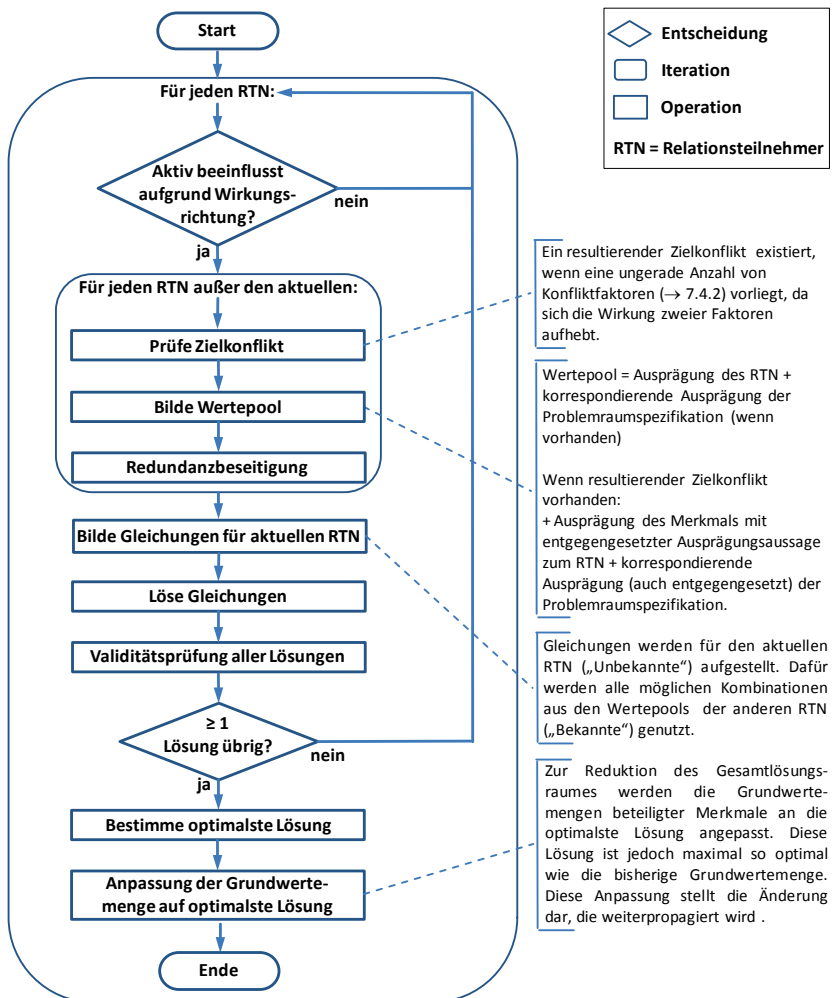
$k = 2$ (Anzahl der jeweils zu kombinierenden Elemente)

N = Anzahl Dimensionen des Merkmalraums (Anzahl der an der Relation beteiligten Merkmale)

H.2. Verarbeitung extensionaler Relationen im Rahmen der Bildung eines resultierenden Gesamtlösungsraums (Verarbeitungsschritt 2)



H.3. Verarbeitung funktionaler Relationen im Rahmen der Bildung eines resultierenden Gesamtlösungsraums (Verarbeitungsschritt 2)

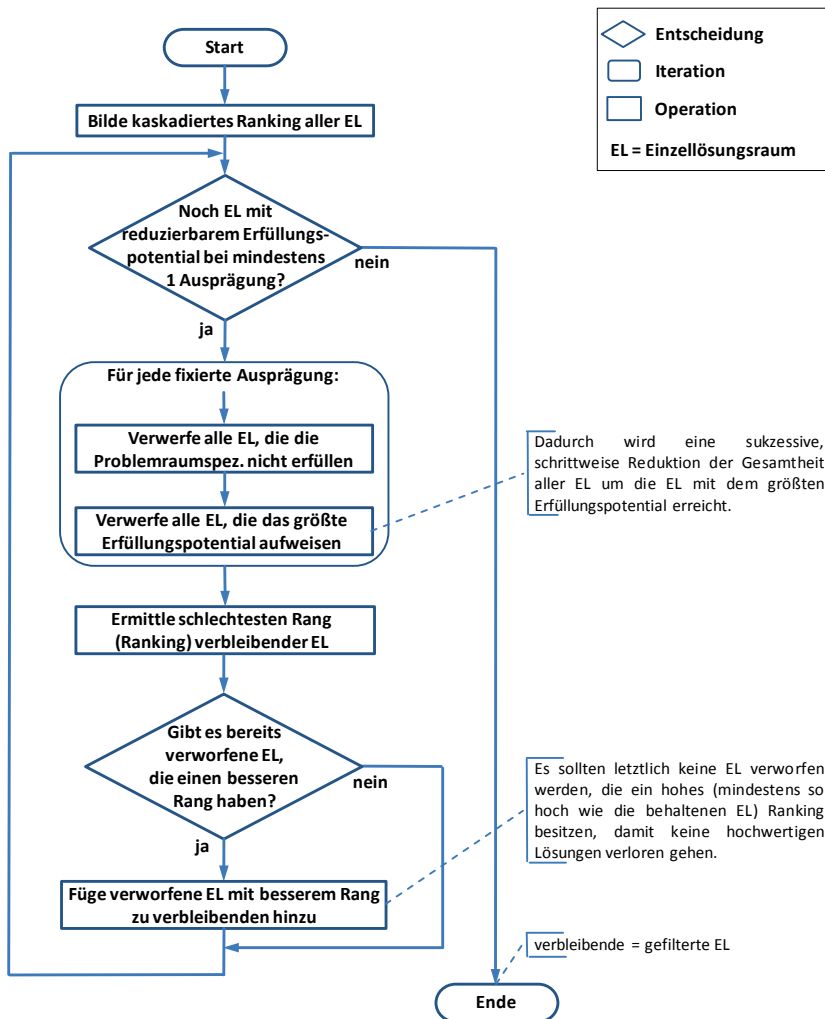


Aufwandsabschätzung: Anzahl aufzustellender Gleichungen pro Relation = $\sum_1^M \prod_1^{N-1} n$

M = Gesamtanzahl aktiv beeinflusster RTN N = Gesamtanzahl der RTN;

n = Anzahl nichtredundanter Werte im Wertepool des RTN (max = 4)

H.4. Filterung der Einzellösungsräume durch Fixierung von Ausprägungen der Problemraumspezifikation



Anhang I Relationstypspezifische (Be)deutung der Wirkungsrichtung

Jeweils dargestellt am Beispiel einer Relation mit 3 Teilnehmern.

Mögliche Ausprägungen des Attributes Wirkungsrichtung sind: „in“, „out“, „inout“ (keine Spezifizierung der Richtung = bidirektionale Deutung).

Extensionale Relationen (R_e)

„in“ → wird zur Konsensbildung herangezogen, aktive Beeinflussung, wird aktiv beeinflusst

„out“ → wird nicht zur Konsensbildung herangezogen, wird aktiv beeinflusst

„inout“ → hier Gleichbehandlung wie „in“

Variation	A	B	C	Konsensbildung
1	in	in	in	A, B, C
2	out	out	out	nicht erlaubt -> Inkonsistenz
3	in	out	out	A
4	in	in	out	A, B

Konsistenzbedingung:

→ mindestens 1 Teilnehmer mit Wirkungsrichtung „in“ pro Relation

Funktionale Relationen (R_f)

„in“ → Teilnehmer stellt Werte zur Verfügung (aktiver Einfluss), wird jedoch selbst nicht abgeleitet

„out“ → Teilnehmer wird abgeleitet, aktiv durch die anderen beeinflusst

„inout“ → Teilnehmer stellt Werte zur Verfügung und wird selbst abgeleitet

Variatio	A	B	C	Ableitung	Wertebereitstellung
1	in	in	in	nicht erlaubt -> Inkonsistenz	
2	out	out	out	nicht erlaubt -> Inkonsistenz	
3	in	out	out	nicht erlaubt -> Inkonsistenz	
4	in	in	out	C	A, B
5	inout	inout	inout	A, B, C	A, B, C
6	inout	inout	in	A, B	A, B, C
7	inout	In	in	A	A, B, C
8	inout	inout	out	A, B, C	A, B
9	inout	out	out	nicht erlaubt -> Inkonsistenz	
10	in	out	inout	B, C	A, C

Konsistenzbedingung:

→ mindestens 1 „out“ oder „inout“ pro Relation

→ n-1 „in“ oder „inout“ pro Relation (n = Anzahl der Teilnehmer)

Anhang J Formalisierung der Modellebenen (XML)

J.1. Klassenebene (Ausschnitt)

<pre> ... <Property ID="PR01" utilization="active" role="warrant"> <Name language="eng">state of aggregation</Name> <Name language="ger">Aggregatzustand</Name> <Description language="eng">form and manifestation of matter</Description> <Description language="ger">Form und Erscheinung von Materie</Description> <Symbol language="eng">/> <Symbol language="ger">/> <SynonymousName language="eng">aggregate state; condition of aggregation</SynonymousName> <SynonymousName language="ger">Aggregat</SynonymousName> <Reference/> <DataType>enum</DataType> <ScaleType>nominal</ScaleType> <ValueSet> <Value Key="1"> <SingleValue language="eng">liquid</SingleValue> <SingleValue language="ger">Flüssigkeit</SingleValue> </Value> <Value Key="2"> <SingleValue language="eng">gas</SingleValue> <SingleValue language="ger">Gas</SingleValue> </Value> <Value Key="3"> <SingleValue language="eng">vapor</SingleValue> <SingleValue language="ger">Dampf</SingleValue> </Value> </ValueSet> </Property> <Property ID="PR02" utilization="active" role="warrant"> <Name language="eng">operating temperature</Name> <Name language="ger">Betriebstemperatur</Name> <Description language="eng">temperature for optimal operation of electric, electromechanic or mechanic devices, plants or parts of them</Description> <Description language="ger">Die Mediumtemperatur ist die Temperatur des zu messenden Fluids am Eintritt in das Messgerät.</Description> <Symbol language="eng">T</Symbol> <Symbol language="ger">T</Symbol> <SynonymousName language="eng">medium temperature</SynonymousName> <SynonymousName language="ger">Mediumtemperatur; Prozesstemperatur</SynonymousName> <Reference/> <DataType>float</DataType> <ScaleType>Interval</ScaleType> <ValueDomain keyunit="K"> <ValueDomainMin>0</ValueDomainMin> <ValueDomainMax>*</ValueDomainMax> </ValueDomain> <Unit>K; °C; °F; °Ra</Unit> </Property> ... <PrincipleSolution ID="MP16A"> <Name language="eng">Mini Variable Area Flowmeter - glas</Name> <Name language="ger">Kleinstschwebekörper - Glas</Name> <Description language="eng">/> <Description language="ger">/> </PrincipleSolution> <PrincipleSolution ID="MP02A"> <Name language="eng">Mini Ring Piston Meter (Displacement Meter)</Name> <Name language="ger">Kleinstkolbenzähler (Verdrängerzähler)</Name> <Description language="eng">/> <Description language="ger">/> </PrincipleSolution> ... <Task ID="MT01"> <Name language="ger">Durchfluss</Name> <Name language="eng">Flow</Name> <Description language="ger">/> <Description language="eng">/> <RelevantProperties>PR01; PR10; PR31; PR04; PR02; PR07; PR11; PR05; PR09; PR06; PR03; PR12; PR14; PR15; PR16; PR17; PR18; PR19; PR20; PR21; PR22; </RelevantProperties> <RelevantPrinciples>MP01; MP02; MP03; MP04; MP05; MP06; MP07; MP08; MP09; MP10; MP11; MP12; MP13; MP14; MP15; MP15A; MP16; MP16A; MP17; MP02A</RelevantPrinciples> </Task> ... </pre>	<p>Merkmale</p> <p>PZL</p> <p>Funktionen</p>
---	---

J.2. Instanzenebene (Ausschnitt)

```

<PrincipleSolution Name="Coriolis Mass Flowmeter" activation="True" ID="MP11" Variant="VAR01">
  ...
  <PropExpr obligation="True" ID="PR01">
    <Name>state of aggregation</Name>
    <NomValue>
      <Value>liquid;gas;vapor</Value>
      <Comment/>
    </NomValue>
  </PropExpr>
  <PropExpr obligation="True" ID="PR02">
    <Name>operating temperature</Name>
    <MinValue>
      <Value>72.15</Value>
      <Comment>limited, costly for big nominal width; limited, costly for big pressure; in ex-zones only up to 233K</Comment>
    </MinValue>
    <MaxValue>
      <Value>623.15</Value>
      <Comment>limited, costly for big nominal width; costly for big pressure</Comment>
    </MaxValue>
    <Unit>K</Unit>
  </PropExpr>
  <PropExpr obligation="True" ID="PR04">
    <Name>process pressure</Name>
    <MinValue>
      <Value>* </Value>
      <Comment>consider the minimum density</Comment>
    </MinValue>
    <MaxValue>
      <Value>10000000</Value>
      <Comment>limited, costly for high temperature</Comment>
    </MaxValue>
    <Unit>Pa</Unit>
  </PropExpr>
  ...
  <RelationExpr ID="REL02" Structure="symbolic">
    <Comment/>
    <RefProperty>
      <RefProp ID="PR04" ValueType="MaxValue">
        <RefPropDirection>out</RefPropDirection>
        <RefPropSymbol>A</RefPropSymbol>
        <RefPropUnit>bar</RefPropUnit>
      </RefProp>
      <RefProp ID="APR01" ValueType="MaxValue">
        <RefPropDirection>in</RefPropDirection>
        <RefPropSymbol>B</RefPropSymbol>
        <RefPropUnit>1</RefPropUnit>
      </RefProp>
      <RefProp ID="PR08" ValueType="MaxValue">
        <RefPropDirection>in</RefPropDirection>
        <RefPropSymbol>C</RefPropSymbol>
        <RefPropUnit>bar</RefPropUnit>
      </RefProp>
    </RefProperty>
    <RelationContent>B * C - A</RelationContent>
  </RelationExpr>
  <RelationExpr ID="REL12" Structure="table" ImplicitMeaning="True">
    <Comment/>
    <RefProperty>
      <RefProp ID="PR01" ValueType="NomValue">
        <RefPropDirection>in</RefPropDirection>
        <RefPropValues>
          <Value ID="1">liquid</Value>
          <Value ID="2">gas; vapor</Value>
        </RefPropValues>
      </RefProp>
      <RefProp ID="APR02" ValueType="MaxValue">
        <RefPropDirection>out</RefPropDirection>
        <RefPropValues>
          <Value ID="1">10</Value>
          <Value ID="2">30</Value>
        </RefPropValues>
        <RefPropUnit>m/s</RefPropUnit>
      </RefProp>
      <RefProp ID="APR02" ValueType="MinValue">
        <RefPropDirection>out</RefPropDirection>
        <RefPropValues>
          <Value ID="1">0.5</Value>
          <Value ID="2">1.7</Value>
        </RefPropValues>
        <RefPropUnit>m/s</RefPropUnit>
      </RefProp>
    </RefProperty>
  </RelationExpr>
  ...

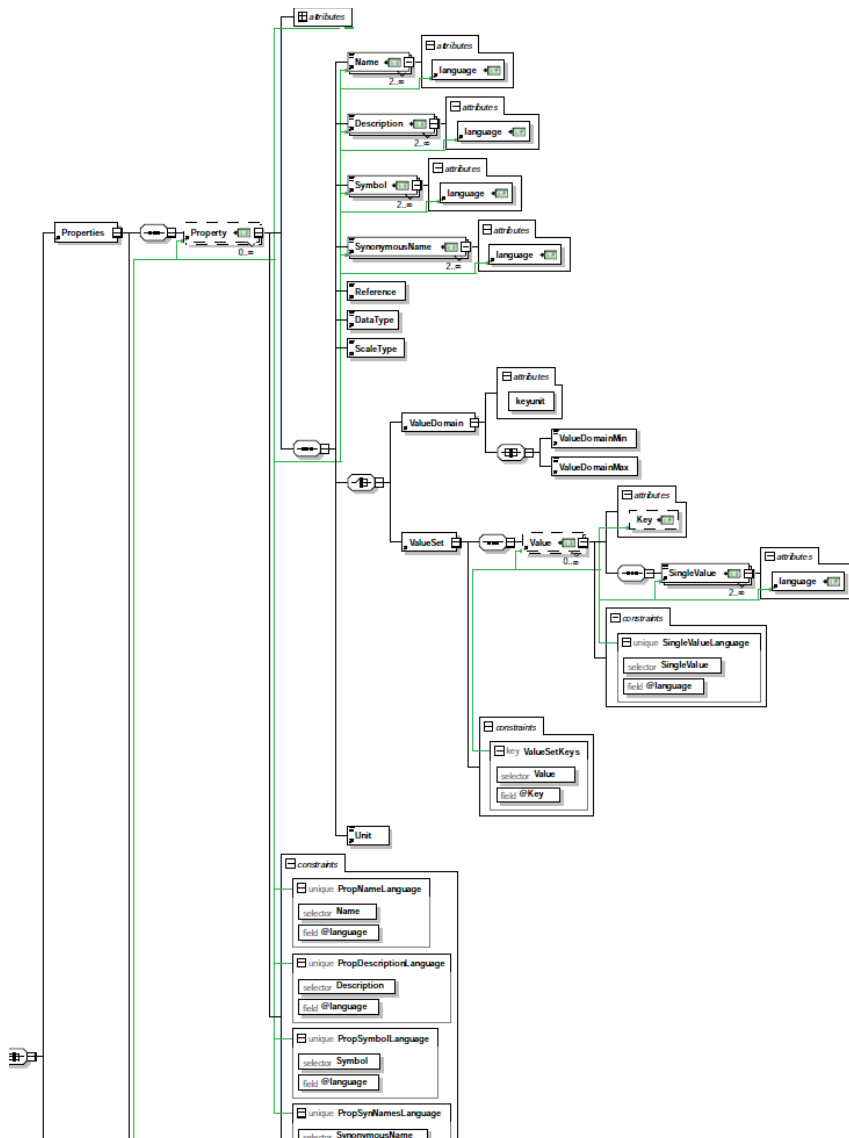
```

Merkmale

Relationen

Anhang K Aufbau des Formalisierungsschemas (XSD)

K.1. Klassenebene (Ausschnitt)



Anhang MDefinition und Spezifikation der Wissens Elemente für den Anwendungsfall „Durchflussmessung“

M.1.PZL der Funktion „Durchflussmessung“ in der PZL-Bibliothek

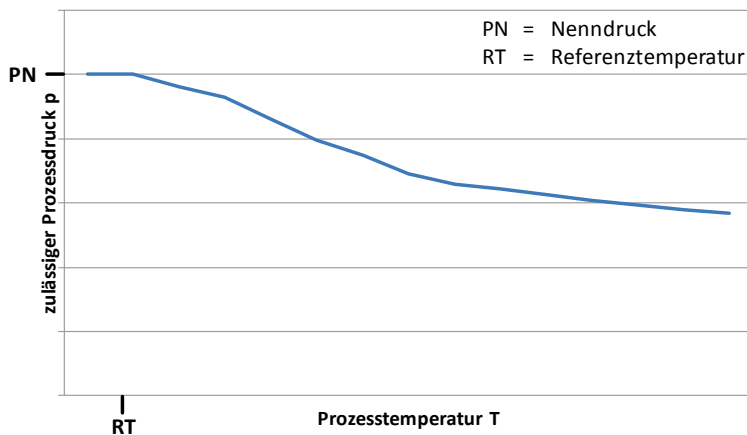
ID	Bezeichnung	eCl@ss-Referenz
MP01	Ovalradzähler (Verdrängerzähler)	27-20-04-07
MP01A	Kleinstovalradzähler (Verdrängerzähler)	
MP02	Ringkolbenzähler (Verdrängerzähler)	27-20-04-09
MP02A	Kleinringkolbenzähler (Verdrängerzähler)	
MP03	Treibschieberzähler (Verdrängerzähler)	
MP04	Schraubenspindelzähler (Verdrängerzähler)	
MP05	Zahnradzähler (Verdrängerzähler)	
MP08	Taumelscheibenzähler (Verdrängerzähler)	
MP06	Drehkolbenzähler (Verdrängerzähler)	
MP07	Balgengaszähler (Verdrängerzähler)	27-20-04-06
MP09	Turbinenradzähler (mittelbare Volumenzähler)	27-20-04-08
MP10	Impellerzähler und Flügelradzähler (mittelbare Volumenzähler)	27-20-04-10
MP11	Coriolis-(Masse-)Durchflussmessung	27-20-04-02
MP12	Magnetisch Induktive Durchflussmessung (MID)	27-20-04-01
MP13	Ultraschall-Durchflussmessung (in-line)	27-20-04-12
MP14	Ultraschall-Durchflussmessung (clamp-on)	27-20-04-12
MP15	Schwebekörper (Metall)	27-20-04-05
MP15A	Kleinstschwebekörper (Metall)	
MP16	Schwebekörper (Glas)	27-20-04-05
MP16A	Kleinstschwebekörper (Glas)	
MP17	Wirbelzähler	27-20-04-04
MP18	Differenzdruckmessung an Blenden	27-20-04-11
MP19	Differenzdruckmessung an genormten Düsen / Venturirohr	27-20-04-11
MP20	Differenzdruckmessung Staudrucksonde	27-20-04-11
MP21	thermische Massedurchflussmessung ab DN15	27-20-04-03

M.2. Spezifizierung der Merkmalattribute in Merkmallexikon und PZL-Bibliothek

Spezifizierung auf Ebene Merkmallexikon					Spezifizierung auf Ebene PZL-Bibliothek (LORP)			
D	Bezeichnung	Skalenniveau	Werte-Satz	Definitionsbereich	Einheit	mögliche Einheiten	passive Verwendung	Aussageziel (auf Seite Wissensbasis)
PR01	Aggregatzustand	nominal	gasförmig, flüssig, dampfförmig	0-∞	-	-	nein	Zusicherung
PR02	Prozesstemperatur	Intervall	-	0-∞	K	K, °F, °C, °Ra	nein	Zusicherung
PR03	Umgebungstemperatur	Intervall	-	0-∞	-	-	nein	Zusicherung
PR04	Prozessdruck	rational	-	0-∞	Pa	Pa, bar, mbar	nein	Zusicherung
PR05	Dichte	rational	-	0-∞	kg/m³	-	nein	Zusicherung
PR06	elektrische Leitfähigkeit	rational	-	0-∞	µS/m	µS/m, S/m	nein	Zusicherung
PR07	Nennweite	rational	-	0-∞	m	mm, cm, dm, m	nein	Zusicherung
PR08	Nenndruck	rational	-	0-∞	Pa	Pa, bar, mbar	ja	Zusicherung
PR09	Viskosität	rational	-	0-∞	mPa·s	mPa·s, Pa·s	nein	Zusicherung
PR10	Volumenstrom	rational	-	0-∞	m³/s	m³/h	nein	Zusicherung
PR11	Messunsicherheit	rational	-	0-∞	1	1	nein	Anforderung
PR12	typischer Druckverlust	rational	-	0-∞	Pa	Pa, bar, mbar	nein	Anforderung
PR14	Art der Flüssigkeit	nominal	-	0-∞	-	-	nein	Zusicherung
PR15	Gasanteil	rational	-	0-100	%	%	nein	Zusicherung
PR16	Flüssigkeitsanteil	rational	-	0-100	%	%	nein	Zusicherung
PR17	Feststoffanteil (Volumenanteil)	rational	-	0-100	%	%	nein	Zusicherung
PR18	Erosion/Abrasion	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR19	Einlaufstrecke	rational	-	0-∞	DN	DN	nein	Anforderung
PR20	Auslaufstrecke	rational	-	0-∞	DN	DN	nein	Anforderung
PR21	Einbaulage	nominal	vertikal, horizontal	-	-	-	nein	Anforderung
PR22	Zulassung für eichamtlichen Verkehr	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR23	bidirektionale Strömung	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR24	Rohrleitungsvibrationen	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR25	Möchten	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR26	Ablagerungen	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR27	Pulsation	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR28	Belag	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR29	teigefülltes Rohr	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR30	Turn-Down-Verhältnis	rational	-	1-∞	1	1	ja	Zusicherung
PR31	Masendurchfluss	rational	-	0-∞	kg/h	g/h, t/h, kg/h, kg/s	nein	Zusicherung
PR32	elektrische Hilfsenergie	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Anforderung
PR33	Messereisdynamik	ordinal	klein (bis 1:5), mittel (bis 1:15), hoch (über 1:15)	-	-	-	nein	Zusicherung
PR34	Durchflussunterbrechung bei Geräteausfall	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR35	Feststoffanteil (Partikelgröße)	rational	-	0-∞	µm	µm, mm	nein	Zusicherung
APR01	Temperatur-Derating	rational	-	0-1	1	1	ja	Zusicherung
APR02	Strömungsgeschwindigkeit	rational	-	0-∞	m/s	m/s	ja	Zusicherung

Anmerkung: Auf die Darstellung der Inhalte der semantischen Attribute wurde hier aus Platz- und Übersichtlichkeitsgründen verzichtet.

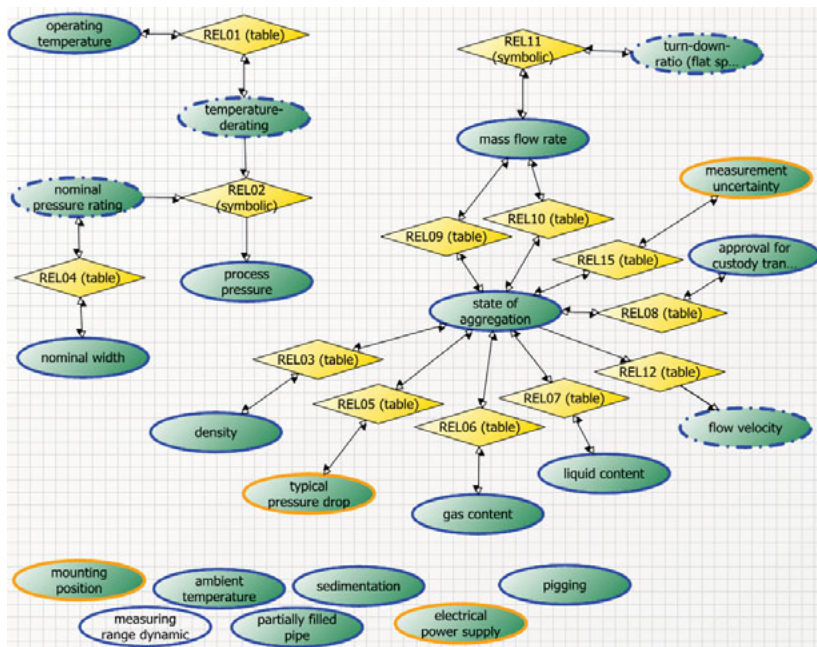
Anhang N Verminderung des zulässigen Prozessdrucks in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur



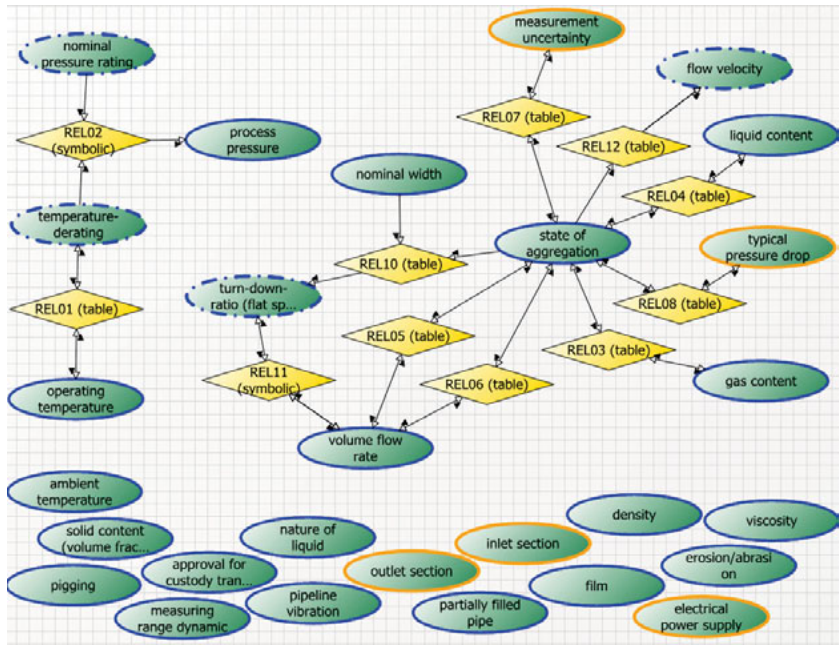
Qualitative Darstellung für den Werkstoff X2CrNiMo17-12-2
(hochlegierter Stahl, Werkstoffnummer: 1.4404)

Anhang O Visualisierte Instanzmodelle von PZL der Funktion „Durchflussmessung“

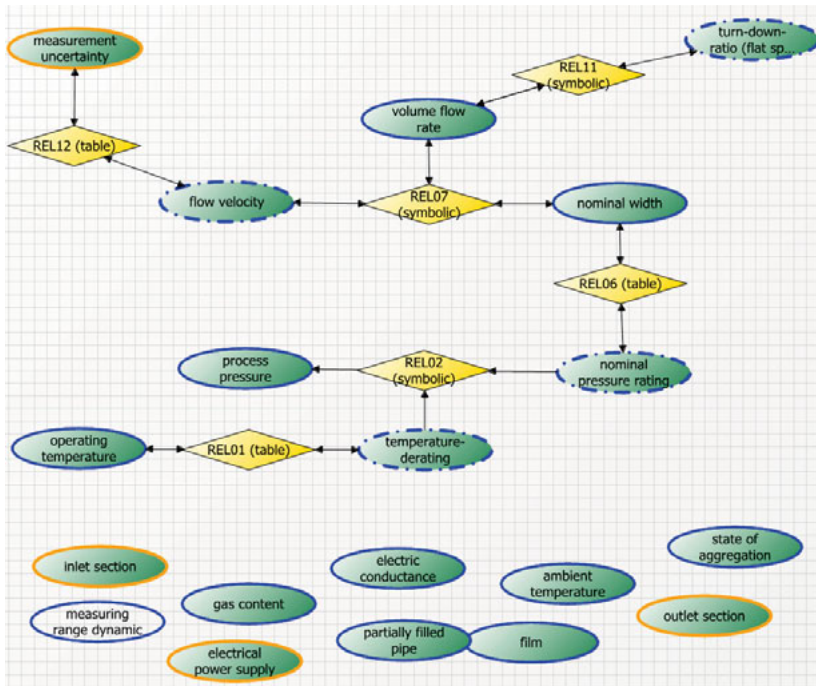
O.1. PZL „Coriolis-(Masse-)Durchflussmessung“



O.2. PZL „Wirbelzähler“



O.3. PZL „Magnetisch Induktive Durchflussmessung“ (alternative Modellierung)



Anhang P Beispielhafte PE-Spezifikation für die Funktion „Durchflussmessung“

Merkmale der LORP	Spezifikation				aus ML importierbar?
	Minimalwert	Nominalwert	Maximalwert	Einheit	
Aggregatzustand		Gas			ja
Prozesstemperatur	50		150	°C	ja
Umgebungstemperatur	20		50	°C	ja
Prozessdruck	1		50	bar	ja
Dichte	1000		1000	kg/m³	ja
elektrische Leitfähigkeit	10			µS/cm	nein
Nennweite	50		50	mm	ja
Viskosität	50		250	mPas	ja
Volumenstrom	12		200	m³/h	ja
Messunsicherheit			1	%	nein
typischer Druckverlust			500	mbar	ja
Art der Flüssigkeit		newtonisch			nein
Gasanteil	99		100	%	ja
Flüssigkeitsanteil	0		1	%	ja
Feststoffanteil (Volumenanteil)	0		2	%	ja
Erosion/Abrasion		nein			nein
Einlaufstrecke	5		10	DN	nein
Auslaufstrecke	5		10	DN	nein
Einbaulage		vertikal			ja
Zulassung für eichamtlichen Verkehr		nein			ja
Bidirektionale Strömung		nein			nein
Rohrleitungsvibrationen		nein			nein
Molchen		nein			ja
Ablagerungen		nein			nein
Pulsation		nein			ja
Belag		nein			nein
teilgefülltes Rohr		nein			nein
Massendurchfluss	12000		200000	kg/h	ja
elektrische Hilfsenergie		ja			ja
Messbereichsdynamik	niedrig		mittel		nein
Durchflussunterbrechung bei Geräteausfall		ja			nein
Feststoffanteil (Partikelgröße)	0		10	µm	nein

Anhang Q Wissensgrundlage des Anwendungsfalles „Antriebe“

	Auswahl	mechanischer Kurvenantrieb	elektrischer Linearmotor- antrieb	elektrischer Zahnriemen- antrieb	elektrischer Spindel- antrieb	elektrischer Zahnstangen- antrieb	pneumatischer Servoantrieb	pneumatisch aktiv gedämpfter Antrieb	pneumatischer Endlagen- antrieb
technische Kriterien									
Hublänge	Verfahrzeit für die Bewegung einer Achse	Lösungsraum „geeignet“			Lösungsraum „bedingt geeignet“				
< 250 mm	< 1 sec 1-2 sec 2-3 sec > 3 sec	2			1 2				
250-500 mm	< 2 sec 2-5 sec 5-10 sec > 10 sec	1	2	2	1 2	1	2	2	2
500-2000 mm	< 3 sec 3-10 sec 10-30 sec > 30 sec				1	2			1 2
2000-5000 mm	3-10 sec 10-30 sec 30-60 sec > 60 sec	0		1	0		0	0	1 2
> 5000 mm									0
Anzahl Positionen	2 3 frei positionierbar	2 1 0	2	2	2	2	2	2	2 1 0
Wiederholgenauigkeit	< 0,01 mm 0,01-0,05 0,05-0,1 0,1-0,5 > 0,5	1 2		0 1 2	2	0 1 2	0 1 2	0 1 2	0 1 2
Antriebs- bzw. Prozesskraft gefordert?	Nein < 10 N 100-200 N 200-1000 N > 1000 N	2 1 0 0	2	2	2	2	2	2	2
Vertikale Haltekraft / Selbsthemmung ohne Bremse gefordert?	Nein Ja	2 2	2	2	2	2	2	2	2
Konstante Verfahrgeschwindigkeit gefordert?	Nein Ja	2 2	2	2	2	2	2	2	2
Hohe Spitzengeschwindigkeit gefordert?	Nein < 0,5 m/s 0,5 - 1 m/s 1 - 3 m/s > 3 m/s	2 2 1	2	2	2	2	2	2	2
Synchrongeschwindigkeit gefordert?	Nein Ja	2 2	2	2	2	2	2	2	2
Minimales Antriebs-Eigengewicht gefordert?	Nein Ja	2 0	2	2	2	2	2	2	2
Minimaler Platzbedarf/Bauraum gefordert?	Nein Ja	2 0	2	2	2	2	2	2	2
Minimale Geräuschentwicklung gefordert?	Nein Ja	2 1	2	2	2	2	2	2	2
Reinraumtauglichkeit gefordert?	Nein Ja	2 1	2	2	2	2	2	2	2
Geringe Schmutzempfindlichkeit gefordert?	Nein Ja	2 1	2	2	2	2	2	2	2
Überlastsicherheit gefordert? (Crashsicherheit)	Nein Ja	2 1	2	2	2	2	2	2	2
Minimale Antriebswärmerzeugung gefordert?	Nein Ja	2 0	2	2	2	2	2	2	2
Explosionssicherheit gefordert?	Nein Ja	2 1	2	2	2	2	2	2	2
wirtschaftliche Kriterien									
Lebensdauer	< 10 Mio Zyklen 10-50 Mio Zyklen 50-100 Mio Zyklen > 100 Mio Zyklen		2	2	2	2	2	2	2
Kostenpriorität	Minimale Investitionskosten Minimale Betriebskosten	0 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 0	1 0	2 0
Vorhandene Personalqualifikation für Inbetriebnahme / Störungsbeseitigung	Eher Mechanik Eher Elektrik	2 0	0 2	1 2	1 2	1 2	1 1	1 0	2 0
Einsatzflexibilität	möglichst hoch keine Einschränkungen	0 2	0 2	1 2	1 2	1 2	2 2	0 2	0 2

0 = nicht geeignet, 1 = bedingt geeignet, 2 = geeignet

Anhang R Definition und Spezifikation der Wissens Elemente für den Anwendungsfall „Stellgeräte“

R.1. PZL der Funktion „Stellgeräte“ in der PZL-Bibliothek

ID	Bezeichnung
AP01	Hubventil (Durchgangsventil) (metallisch)
AP02	Hubventil (Durchgangsventil) (ausgekleidet)
AP03	Hubventil (Eckventil) (metallisch)
AP04	Hubventil (Eckventil) (ausgekleidet)
AP05	Hubventil (Dreiwegeventil) (metallisch)
AP06	Hubventil (Dreiwegeventil) (ausgekleidet)
AP07	Hubventil (Bodenablassventil) (metallisch)
AP08	Hubventil (Bodenablassventil) (ausgekleidet)
AP09	Hubventil (Mikroventil) (metallisch)
AP10	Hubventil (Mikroventil) (ausgekleidet)
AP11	Membranventil (metallisch)
AP12	Membranventil (ausgekleidet)
AP13	Schieber (metallisch)
AP14	Schieber (ausgekleidet)
AP15	Kugelhahn (Durchgang, schwimmend/ungeführt) (metallisch)
AP16	Kugelhahn (Durchgang, schwimmend/ungeführt) (ausgekleidet)
AP17	Kugelhahn (Durchgang, gelagert/geführt) (metallisch)
AP18	Kugelhahn (Durchgang, gelagert/geführt) (ausgekleidet)
AP19	Kugelhahn (Dreiwege, schwimmend/ungeführt) (metallisch)
AP20	Kugelhahn (Dreiwege, schwimmend/ungeführt) (ausgekleidet)
AP21	Kugelhahn (Dreiwege, gelagert/geführt) (metallisch)
AP22	Kugelhahn (Dreiwege, gelagert/geführt) (ausgekleidet)
AP23	Kugelhahn (Bodenablass, schwimmend/ungeführt) (metallisch)
AP24	Kugelhahn (Bodenablass, schwimmend/ungeführt) (ausgekleidet)
AP25	Kugelhahn (Bodenablass, gelagert/geführt) (metallisch)
AP26	Kugelhahn (Bodenablass, gelagert/geführt) (ausgekleidet)
AP27	Klappe (zentrisch) (gummiert)
AP28	Klappe (zentrisch) (metallisch)
AP29	Klappe (zentrisch) (ausgekleidet)
AP30	Klappe (doppelexzentrisch) (metallisch)
AP31	Klappe (doppelexzentrisch) (ausgekleidet)
AP32	Klappe (dreifachexzentrisch)
AP33	Kegelhahn (Durchgang, metallisch)
AP34	Kegelhahn (Durchgang, ausgekleidet)
AP35	Kegelhahn (Dreiwege, metallisch)
AP36	Kegelhahn (Dreiwege, ausgekleidet)
AP37	Drehkegelventil
AP38	Ringkolbenventil (metallisch)
AP39	Ringkolbenventil (ausgekleidet)
AP40	Druckminderer / Sicherheitsventil
AP41	Kondensatableiter
AP42	Rückschlagklappe
AP43	Rückschlagventil

R.2. Spezifizierung der Merkmalattribute in Merkmallexikon und PZL-Bibliothek

Spezifizierung auf Ebene Merkmallexikon					Spezifizierung auf Ebene PZL-Bibliothek (LORP)			
ID	Bezeichnung	Skalenniveau	Werte-Satz	Definitions-bereich	Einheit	mögliche Einheiten	passive Verwendung	Aussageziel (auf Seite Wissensbasis)
PR01	Aggregatzustand	nominal	gasförmig, flüssig, dampfförmig	-	-	-	nein	Zusicherung
PR02	Prozesstemperatur	intervall	-	0-∞	K	K, °F, °Ra	nein	Zusicherung
PR04	Prozessdruck	rational	-	0-∞	Pa	Pa, bar, mbar	nein	Zusicherung
PR05	elektrische Leitfähigkeit	rational	-	0-∞	µS/m	µS/m, S/m	nein	Zusicherung
PR07	Nennweite	rational	-	0-∞	m	mm, cm, dm, m	nein	Zusicherung
PR08	Nenndruck	rational	-	0-∞	Pa	Pa, bar, mbar	ja	Zusicherung
PR10	Volumenstrom	rational	-	0-∞	m³/s	m³/h	nein	Zusicherung
PR18	Erosion/Abstrasion	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA01	bleibender Druckverlust	ordinal	kein, klein, mittel, groß	-	-	-	nein	Anforderung
PRA02	Differenzdruck	rational	-	0-∞	Pa	Pa, bar, mbar	nein	Zusicherung
PRA03	polymerisierend	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA04	Feststoffanteil	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR23	bidirektionale Strömung	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA05	Korrosion	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR25	Molken	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA06	Stellverhältnis	ordinal	1:10, 1:30, 1:50, 1:200	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA07	reduzierbarkeit Schalpegel	ordinal	schlecht, mittel, sehr gut	-	-	-	nein	Zusicherung
PR27	pulsation	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA08	Regelfunktion	ordinal	einfach, gut	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA09	Absperrfunktion	ordinal	schlecht(große Leckage), mittel (mittlere Leckage), sehr gut (blasendicht)	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA10	Kavitation	nominal	ja, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PR31	Masendurchfluss	rational	-	0-∞	kg/h	g/h, t/h, kg/h, kg/s	nein	Zusicherung
PRA11	Flashing	ordinal	sehr gut, gut, nein	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA12	Anschluss	nominal	geränscht, geschweißt, geklemmt, geschraubt	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA13	Durchfluss Kennlinie	nominal	gleichprozentig, linear, auf/zu, natürlich	-	-	-	nein	Zusicherung
PRA14	KVS-Wert	rational	-	0-∞	l	l	nein	Zusicherung
APR01	Temperatur-Derating	rational	-	0-1	1	1	ja	Zusicherung

Merkmalsschnittmenge mit Anwendungsfall „Durchflussmessung“

Literaturverzeichnis

Literatur

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der referenzierten Quellen, die nicht vom Autor stammen. Die Quellen sind mittels [<Kurzbeleg>] gekennzeichnet.

- [AHR10] W. Ahrens: *Eine Gegenüberstellung von VDI/VDE 3682, PROLIST, eCI@ss: Formalisierte Prozessbeschreibung und Branchenstandards*.
atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 52 (9), S. 32–45, 2010.
- [ADK+06] W. Ahrens, H. Drathen, O.L.G. Kroll, P. Zgorzelski: *Standardisierte Merkmale als Schlüssel für den unternehmensweiten Datenaustausch im Engineering-Umfeld*.
In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 9. Tagung*, 2006.
- [ASS97] W. Ahrens, H.-J. Scheurlen, G.-U. Spohr: *Informationsorientierte Leittechnik: Informatikmethoden angewandt auf leittechnische Fragestellungen*.
München [u. a.]: Oldenbourg, 1997.
- [AHS09] W. Ahrens, G.-U. Spohr: *CAE-Systeme für die Planung verfahrens- und leittechnischer Anlagen*. In: Früh, Schaudel, Maier (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. 4. Auflage. München: Oldenbourg, S. 632–677, 2009.
- [AHZ09] W. Ahrens, P. Zgorzelski: *Elektronischer Austausch von Produktdaten im PLT-Engineering*. In: *VDI/VDE: Automation 2009: 10. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2009.
- [ANG+10] A. Alvi, Z. Nabi, D. Greaves, R. Mehmood: *Controlling Real World Pervasive Environments with Knowledge Bases*. In: *Knowledge-based and intelligent information and engineering systems (KES): 14th international conference: proceedings*. S. 576–585. Berlin: Springer, 2010.
- [BAPA04] S. Barai, P.C. Pandey: *Knowledge based expert system approach to instrumentation selection (INSEL)*. Transport Vol. 19 (4), S. 171–176, 2004.
- [BAA07] F. Baader: *The description logic handbook: Theory, implementation, and applications*. 2. Auflage. Cambridge [u. a.]: Cambridge University Press, 2007.
- [BGS09] W. Babel, M. Gerlach, T. Steckenreiter: *Fortschritte in der Sensortechnik entlang der Technologie-Roadmap*.
atp – Automatisierungstechnische Praxis Vol. 51 (1), S. 100–107, 2009.
- [BAK00] R.C. Baker: *Flow measurement handbook: Industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge [u. a.]: Cambridge University Press, 2000.
- [BAMA92] D. Balzer, V. May: *Wissensbasierte Systeme in der Automatisierungstechnik*. München, Wien: Carl-Hanser-Verlag, 1992.
- [BAL11] H. Balzer: *Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*. 3. Auflage. Heidelberg: Springer Spektrum, 2011.

- [BAFe81] A. Barr, E.A. Feigenbaum: *The Handbook of artificial intelligence, volume 1*. Stanford [u. a.]: Heuris TechPress, 1981.
- [BAR11] M. Barth: *Automatisch generierte Simulationsmodelle verfahrenstechnischer Anlagen für den Steuerungstest*. Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011.
- [BASE96] A. Barua, S. Sengupta: *EXSENSEL – A Rule-Based Approach to Selection of Sensors for Process Variables*. Chemical Engineering & Technology Vol. 19, S. 443–447, 1996.
- [BEKE08] C. Beierle, G. Kern-Isberner: *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage, 2008.
- [BLF+05] D.H. Bell, T.J. Lu, N.A. Fleck, S.M. Spearing: *MEMS actuators and sensors: observations on their performance and selection for purpose*. Journal of micromechanics and microengineering, Vol. 15, S. 153–164, 2005.
- [BER01] G. Bernecker: *Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen: Projektmanagement und Fachplanungsfunktionen*. 4. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer, 2001.
- [BFP11] T. Betsch, J. Funke, H. Plessner: *Denken – Urteilen, Entscheiden, Problemlösen: Allgemeine Psychologie für Bachelor*. Berlin [u. a.]: Springer, 2011.
- [BiHo09] T. Bindel, D. Hofmann: *Projektierung von Automatisierungsanlagen: Anschauliche und effiziente Einführung für Ingenieure, Physiker und Informatiker*. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2009.
- [BIR80] H. Birkhofer: *Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte*. Düsseldorf, Technische Universität Braunschweig. Dissertation, 1980.
- [BIR01] R. Birkhofer: *Modellbasierte Beschreibung zur offenen Integration intelligenter Feldgeräte der Automatisierungstechnik*. München: Utz, 2001.
- [BFK+10] R. Birkhofer, G. Feldmeier, J. Kalhoff, Kleedörfer Claus, M. Leidner, R. Mildenerger, M. Mühlhause, J. Niemann, R. Schrieber, J. Wickinger, M. Winzenick, M. Wollschläger: *Life-Cycle-Management für Produkte und Systeme der Automation: Ein Leitfaden des Arbeitskreises Systemaspekte im ZVEI Fachverband Automation*. Frankfurt a. M.: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., 2010.
- [BHS07] I. Boersch, J. Heinsohn, R. Socher-Ambrosius: *Wissensverarbeitung: Eine Einführung in die Künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure*. 2. Auflage. Heidelberg: Springer Spektrum, 2007.
- [BoEL14] W. Bohl, W. Elmendorf: *Technische Strömungslehre: Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik*. 15. Auflage. Würzburg: Vogel, 2014.
- [BoJ06] K. Bojert: *Geräte zwischen Wunsch und Wirklichkeit: Braucht die chemische Industrie noch PLT-Geräte-Prüfstellen?* Prozesstechnik & Automation (P&A Kompendium 2005/2006), S. 32–35, 2006.

- [BON02] K.W. Bonfig: *Technische Durchflussmessung: Unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflussmessverfahren*. 3. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag, 2002.
- [BOY10] W. Boyes: *Instrumentation reference book*. 4. Auflage. Amsterdam [u. a.]: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2010.
- [BRA96] W. Brachinger: *Multivariate statistische Verfahren*. Berlin [u. a.]: de Gruyter, 1996.
- [BRWo07] A. Braune, M. Wollschläger: *Von der Planung bis zum Betrieb – ein steiniger Weg*. Computer & Automation (10), S. 34–38, 2007.
- [BRSc15] M. Brendelberger, T. Scherwies: *Engineering*. In: Früh (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. 5. Auflage. München: Oldenbourg, S. 632–650, 2015.
- [BRi99] A. Brinkop: *Variantenkonstruktion durch Auswertung der Abhängigkeiten zwischen den Konstruktionsbauteilen*. Dissertation. Sankt Augustin: Infix, 1999.
- [BRU08A] A. Brucker: *Durchflussmesstechnik*. München: Oldenbourg, 2008.
- [BRU08B] A. Brucker: *Das PLT-Gerät von morgen*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 50 (2), S. 48–53, 2008.
- [BRGR15] A. Brucker, F. Grunert. In: Früh (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. 5. Auflage. München: Oldenbourg, S. 416–486, 2015.
- [BRUM92] A. Brucker, H. Umbach: *Tendenzen bei der Messung von Durchfluss*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 34 (3), S. 123–127, 1992.
- [BSW+09] H.-J. Bullinger, D. Spath, H.-J. Warnecke, E. Westkämper: *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung*. Berlin [u. a.]: Springer, 2009.
- [CHEG05] C. Cho, P.J. Egbelu: *Design of a web-based integrated material handling system for manufacturing applications*. International Journal of Production Research, Vol. 43 (2), S. 375–403, 2005.
- [CON10] J. Conrad: *Semantische Netze zur Erfassung und Verarbeitung von Informationen und Wissen in der Produktentwicklung*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III, Dissertation. Saarbrücken: LKF, 2010.
- [COU10] J.R. Couper: *Chemical process equipment: Selection and design*. 2. Auflage. Amsterdam, Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2010.
- [CBR91] M.A. Curth, A. Bölscher, B. Raschke: *Entwicklung von Expertensystemen*. München: Carl-Hanser-Verlag, 1991.
- [DMS09] C. Diedrich, M. Mühlhause, N. Suchold: *Automatisierungstechnisches Glossar als semantisches Netz*. In: VDI/VDE: *Automation 2009: 10. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2009.
- [DiBi08] A.C. Dimian, C.S. Bildea: *Chemical process design: Computer-aided case studies*. Weinheim [u. a.]: Wiley-VCH, 2008.

- [DIT07] L.U. Dittmann: *OntoFMEA: Ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. Dissertation. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2007.
- [DÖB10] M. Döbele: *Informationsmodell für die Planung und die Ausschreibung der Automatisierungstechnik in Fertigungsanlagen*. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier, 2010.
- [DRA08] R. Drath: *Die Zukunft des Engineering – Herausforderungen an das Engineering von fertigungs- und verfahrenstechnischen Anlagen*. In: *Tagungsband 2. Karlsruher Leittechnisches Kolloquium*. S. 33–40, 2008.
- [DRA10] R. Drath: *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML: Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA*. Heidelberg [u. a.]: Springer, 2010.
- [DRMi09] R. Drath, V. Miegel: *AutomationML verbindet Werkzeuge der Anlagenplanung*. In: *VDI/VDE: Automation 2009: 10. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2009.
- [DRE91] U. Drebing: *Zur Metrik der Merkmalsbeschreibung für Produktdarstellende Modelle beim Konstruieren*. Braunschweig, Universität Carolo-Wilhelmina, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik. Dissertation, 1991.
- [DKD14] O. Drumm, C. Kleindienst, K. Dickmann: *Bereitstellung von Produktdaten: Eine unterschätzte Herausforderung für den Produkthersteller*. In: *VDI/VDE: Automation 2014: 15. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2014.
- [EBE12] C. Ebert: *Systematisches Requirements Engineering: Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten*. 4. Auflage. Heidelberg [u. a.]: dpunkt, 2012.
- [EdNo00] Y. Edan; S.Y. Nof: *Sensor economy principles and selection procedures*. IIE Transactions, Vol. 32 (3), S. 195–203, 2000.
- [EGB09] C.C. Egbuna: *Electric Actuator Selection Design Aid For Low Cost Automation*. In: *International Conference On Engineering Design (ICED): proceedings*. S. 43–54, 2009.
- [EPP08] U. Eppe: *Begriffliche Grundlagen der leittechnischen Modellwelt: Teil I: Terminologielehre, Systemmodellierung*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 50 (4), S. 83–91, 2008.
- [EPP11A] U. Eppe: *Einfachheit als Konstruktionsprinzip*. In: *VDI/VDE: Automation 2011: 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2011.
- [EPP11B] U. Eppe: *Merkmale als Grundlage der Interoperabilität technischer Systeme*. at – Automatisierungstechnik, Vol. 59 (7), S. 440–450, 2011.
- [ERB13] T. Erbe: *Beitrag zur systematischen Aktor- und Aktorprinzipauswahl im Entwicklungsprozess*. Dissertation. Ilmenau, Deutscher Universitäts-Verlag, 2013.
- [ESW+10] T. Erbe, R. Stroehla, C. Weber, T. Weber: *Decision-aid for actuator selection*. In: *Design 2010: 11th International Design Conference: proceedings*. S. 1503–1512, 2010.
- [ERT09] W. Ertel: *Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2009.

- [FNM+12] S. Faltinski, O. Niggemann, N. Moriz, N. Schetinin: *AutomationML als Grundlage für einen durchgängigen Modellierungs-, Simulations- und Integrationsprozess in der Anlagenplanung*. In: VDI/VDE: *Automation 2012: 13. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2012.
- [FAV04] B. Favre-Bulle: *Automatisierung komplexer Industrieprozesse: Systeme, Verfahren und Informationsmanagement*. 1. Auflage. Wien: Springer, 2004.
- [FAY99] A. Fay: *Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung für die Disposition im Schienenverkehr: Eine Anwendung von Fuzzy-Petrinetzen*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- [FAY05] A. Fay: *Engineering in vernetzten, offenen, durchgängigen Systemen*. at – Automatisierungstechnik, Vol. 53 (4-5), S. 205–210, 2005.
- [FAY09] A. Fay: *Effizientes Engineering komplexer Automationssysteme*. In: E. Schnieder (Hrsg.): *Wird der Verkehr automatisch sicherer? Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge des integrierten Systementwurfs zur Fahrzeug- und Verkehrsautomatisierung*. S. 43–60, 2009.
- [FEL01] M. Felleisen: *Prozessleittechnik für die Verfahrensindustrie*. München: Oldenbourg, 2001.
- [FER04] M. Fernández-López: *Ontological engineering: with examples from the areas of knowledge management, e-commerce and the semantic web*. London [u. a.]: Springer, 2004.
- [FEH+13] T. Frank, K. Eckert, T. Hadlich, A. Fay, C. Diedrich, B. Vogel-Heuser: *Erweiterung des V-Modells für den Entwurf von verteilten Automatisierungssystemen*. at – Automatisierungstechnik Vol. 61 (2), S. 79–91, 2013.
- [FRE91] C. Freksa: *Temporal reasoning based on semi-intervals*. Artificial Intelligence, Vol. 54, S. 199–227, 1991.
- [FRE00] A. Freudenberger: *Prozessmesstechnik*. Würzburg: Vogel, 2000.
- [FRI10] A. Friedl: *Aktuelle Trends in der Automatisierung*. Vortrag im Rahmen der ASQF-Vortragsreihe. Nürnberg: Siemens AG. 2010.
- [FRI02] D. Friedrich: *Integriertes Engineering von automatisierungstechnischen Systemen entlang des gesamten Lebenszyklus*. In: Roller, Schäfer (Hrsg.): *Elektrotechnik CAD: CAE Systeme der dritten Generation*, S. 67–79, 2002.
- [FRAb97] T. Frühwirth, S. Abdennadher: *Constraint-Programmierung: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin [u. a.]: Springer, 1997.
- [GAA10] A. Gaag: *Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung*. München: Verlag. Dr. Hut, 2010.
- [GST14] J. Gausemeier, W. Schäfer, A. Trächtler: *Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme: Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenvertschöpfungsketten*. München: Carl-Hanser-Verlag, 2014.

- [GEI13] A. Geipel-Kern: *Spezialist aus Leidenschaft: PLT-Planungswerkzeug Prodok macht sich fit für die Zukunft*. PROCESS, Vol. 20 (3), S. 68–69, 2013.
- [GEI90] W. Geis: *Ausgewählte Vergleiche regelbasierter Expertensysteme mit konventionellen Verfahren zur betrieblichen Entscheidungsunterstützung*. Nürnberg, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Dissertation, 1990.
- [GEM98] S.-N. Gembrys: *Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen*. Berlin, Technische Universität Berlin. Dissertation, 1998.
- [GEO11] J. George: *Die Blaupause als Innovationsbremse: Standardisierter elektronischer Datenaustausch von der Planung bis zur Instandhaltung mittels des PROLIST-Engineering-Workflows*. In: VDI/VDE: *Automation 2011: 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2011.
- [GEO14A] J. George: *Maschinenlesbare Merkmaleleisten für Prozessautomatisierungsgeräte als Voraussetzung für die Mensch-Maschinen-Kommunikation und Maschinen-Maschinen-Kommunikation für aktuelle und zukünftige Anwendungen*. In: VDI/VDE: *Automation 2014: 15. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2014.
- [GEO14B] J. George: *Der Prolist-Workflow im eClass-Umfeld: Klassen und Merkmaleleisten im Anlagenlebenszyklus*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 56 (1-2), S. 38–46, 2014.
- [GEV00] H.-J. Gevatter: *Automatisierungstechnik*. Berlin [u. a.]: Springer, 2000.
- [GLO01] M. Glora: *Ein Beitrag zur Mehrkriterienoptimierung von Simulationsmodellen und Experimenten*. Cottbus, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen. Dissertation. Aachen: Shaker, 2001.
- [GÖR95] G. Görz: *Einführung in die künstliche Intelligenz*. 2. Auflage. Bonn [u. a.]: Addison-Wesley, 1995.
- [GRS10] G. Görz, C.-R. Rollinger, J. Schneeberger: *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*. 4. Auflage. München: Oldenbourg, 2010.
- [GFF90] G. Gottlob, T. Frühwirth, G. Fleischanderl: *Expertensysteme*. Wien [u. a.]: Springer, 1990.
- [GOT98] G. Gottstein: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*. Berlin [u. a.]: Springer, 1998.
- [GOT89] S. Gottwald: *Mehrwertige Logik: Eine Einführung in Theorie und Anwendungen*. Berlin: Akademie-Verlag, 1989.
- [GRU93] T.R. Gruber: *A translation approach to portable ontology specifications*. Knowledge Acquisition, Vol. 5, S. 199–200, 1993.
- [GUA97] N. Guarina: *Understanding, building, and using ontologies*. International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 46, S. 293–310, 1997.
- [GUL99] V.G. Gundelach, L. Lit: *Moderne Prozessmesstechnik: Ein Kompendium*. Berlin [u. a.]: Springer, 1999.

- [GUHA07] G. Gutermuth, C. Hausmanns: *Kostenstruktur und Untergliederung von Automatisierungsprojekten*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 49 (11), S. 84–91, 2007.
- [HAA07] M. Haas: *Methoden künstlicher Intelligenz: In betriebswirtschaftlichen Anwendungen*. 1. Auflage. Bremen [u. a.]: Salzwasser-Verlag, 2007.
- [HAB12] R. Haberfellner: *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung*. 12. Auflage. Zürich: Orell Füssli, 2012.
- [HAD15] T. Hadlich: *Verwendung von Merkmalen im Engineering von Systemen*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation, 2015.
- [HADi13] T. Hadlich, C. Diedrich: *Using properties in systems engineering*. In: *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Tagungsband der 18. Tagung*, 2013.
- [HADi14] T. Hadlich, C. Diedrich: *Verwendung von Merkmalen für die funktionale Modellierung: Merkmale in frühen Phasen des System-Engineering*. In: *VDI/VDE: Automation 2014: 15. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2014.
- [HAR65] C. Hartshorne (Hrsg.): *Collected papers of Charles Sanders Peirce, Vol. I – VI*. 3. Auflage. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 1965.
- [HAU14] M. Haun: *Cognitive Computing – Steigerung des systemischen Intelligenzprofils*. Berlin [u. a.]: Springer Vieweg, 2014.
- [HEEP03] M. Heeg, U. Epple: *Vergleich und Erweiterung bestehender Klassifikationssysteme und deren Merkmalmodelle*. In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 8. Tagung*. S. 81–96, 2003.
- [HEE05] M. Heeg: *Ein Beitrag zur Modellierung von Merkmalen im Umfeld der Prozessleittechnik*. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
- [HED007] R. Heidel, U. Döbrich: *Normung von elektronischen Produktdaten und Merkmalen in IEC*. atp – Automatisierungstechnische Praxis (Sonderausgabe), S. 38–42, 2007.
- [HKB+94] S. Heipcke, J. Kallrath; M. Bucker; S. Brode: *Optimales Scheduling mit Hilfe von Constraint-Netzen*. In: *G. Barth, A. Günter, B. Neumann (Hrsg.): KI-94 (Anwendungen der Künstlichen Intelligenz, 18. Fachtagung für Künstliche Intelligenz)*, S. 37-52, 1994.
- [HEL03] F.P. Helmus: *Anlagenplanung: Von der Anfrage bis zur Abnahme*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- [HLS07] M. Hepp, J. Leukel, V. Schmitz: *A quantitative analysis of product categorization standards: content, coverage, and maintenance of eCI@ss, UNSPSC, eOTD, and the RosettaNet Technical Dictionary*. Knowledge and Information Systems, Vol. 13 (1), S. 77–114, 2007.
- [HER11] C. Herde: *Efficient solving of large arithmetic constraint systems with complex Boolean structure: Proof engines for the analysis of hybrid discrete-continuous systems*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.

- [HER10] C. Herrmann: *Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Berlin [u. a.]: Springer, 2010.
- [HESc09] S. Hesse, G. Schnell: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion, Ausführung, Anwendung*. 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [HIR99] R. Hirsch: *A Finite Relation Algebra with Undecidable Network Satisfaction Problem*. Logic Journal of the Interest Group in Pure and Applied Logics, Vol. 4 (7), S. 547–554, 1999.
- [Hit08] P. Hitzler: *Semantic web: Grundlagen*. 1. Auflage. Berlin: Springer, 2008.
- [HoWo07] P. Hofstedt, A. Wolf: *Einführung in die Constraint-Programmierung: Grundlagen, Methoden, Sprachen, Anwendungen*. Berlin: Springer, 2007.
- [HSF+13] T. Holm, S. Schröck, A. Fay, T. Jäger, U. Löwen: *Engineering von "Mechatronik und Software" in automatisierten Anlagen: Anforderungen und Stand der Technik*. In: Wagner, Lichter (Hrsg.): *Software Engineering 2013: Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik*. Bonn: Gesellschaft für Informatik (GI-Edition: Proceedings, 215), S. 261–272, 2013.
- [HFA97] J.E. Huber, N.A. Fleck, M.F. Ashby: *The selection of mechanical actuators based on performance indices*. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 453, S. 2185–2205, 1997.
- [HUB76] V. Hubka: *Theorie der Konstruktionsprozesse: Analyse der Konstruktionstätigkeit*. Berlin [u. a.]: Springer, 1976.
- [HUCr96] G.E. Hughes, M.J. Cresswell: *A new introduction to modal logic*. London [u. a.]: Routledge, 1996.
- [HÜSE15] R. Hüppe, F. Seibl: *Marktsituation und Markttrends*. In: Früh (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. 5. Auflage. München: Oldenbourg, S. 2–11, 2015.
- [JJI00] R. Jacobs, W.N. Jansweijer, P. Iedema: *A knowledge based system for reactor selection*. Computers & Chemical Engineering, Vol. 20, S. 165–170, 2000.
- [JAN13] H. Janocha: *Unkonventionelle Akteure: Eine Einführung*. 2. Auflage. München: Oldenbourg, 2013.
- [JAN06] S. Jansen: *Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation, 2006.
- [KAH05] M. Kahlert: *Entwurf eines Prinzipienkatalogs für multidisziplinäre Lösungsansätze*. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
- [KAL98] F. Kallmeyer: *Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme*. Universität Paderborn, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, 1998.
- [KEL00] H. Keller: *Maschinelle Intelligenz: Grundlagen, Lernverfahren, Bausteine intelligenter Systeme*. Braunschweig: Vieweg, 2000.

- [KIE15] J. Kiesbauer: *Ventile*. In: Früh (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. 5. Auflage. München: Oldenbourg, S. 562–593, 2015.
- [KAB+02] R. Klein, F. Anhäuser, M. Burmeister, J. Lamers: *Planungswerkzeuge aus Sicht eines Inhouse-Planers*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 44 (1), S. 46–50, 2002.
- [KOH05] S. Kohlhoff: *Produktentwicklung mit SAP in der Automobilindustrie*. 1. Auflage. Bonn: Galileo Press, 2005.
- [KOL98] R. Koller: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. 4. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer, 1998.
- [KSY10] T. Krauß, S. Schmitz, L. Yu: *Regelbasierte Vollständigkeitsüberprüfung von Automatisierungslösungen*. In: VDI/VDE: *Automation 2010: 11. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2010.
- [KRNo12] S.O. Krumke, H. Noltemeier: *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [KUR92] K. Kurbel: *Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen: Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme*. 2. Auflage. Berlin: Springer, 1992.
- [LAC05] L.W. Lacy: *OWL: Representing information using the web ontology language*. Victoria: Trafford, 2005.
- [LÄCl01] U. Lämmel, J. Cleve: *Lehr- und Übungsbuch künstliche Intelligenz*. München [u. a.]: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2001.
- [LÄCl12] U. Lämmel, J. Cleve: *Künstliche Intelligenz*. 4. Auflage. München: Carl-Hanser-Verlag, 2012.
- [LAN04] R. Langmann (Hrsg.): *Taschenbuch der Automatisierung*. München: Fachbuchverlag Leipzig, 2004.
- [LAG099] R. Lauber, P. Göhner: *Prozessautomatisierung 2: Modellierungskonzepte und Automatisierungsverfahren, Softwarewerkzeuge für den Automatisierungsingenieur, Vorgehensweisen in den Projektphasen bei der Realisierung von Echtzeitsystemen*. Berlin: Springer, 1999.
- [LEO01] U. Leonhardt: *Digitales Produkt: Beispiel einer Integrationsplattform für Technik- und Verkaufsprozesse mittels Informations- und Visualisierungstechnologien*. Düsseldorf, ETH Zürich. Dissertation, 2001.
- [LGH11] L. Libuda, G. Gutermuth, S. Heiss: *Arbeitsabläufe in der Anlagenplanung optimieren: IT-Unterstützung für Engineering Workflows*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 53 (09), S. 40–51, 2011.
- [LIE98] J. Liebowitz (Hrsg.): *The handbook of applied expert systems*. Boca Raton: CRC Press, 1998.

- [LRZ06] U. Lindemann, R. Reichwald, M.F. Zäh: *Individualisierte Produkte-Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. 1. Auflage. Berlin: Springer, 2006.
- [LSG+14] A. Lüder, N. Schmidt, O. Graeser, M. Thron, M. John: *Semantikdefinition durch Integration von Klassifikationssystemen in Entwurfsdaten zum verlustfreien Datenaustausch in Werkzeugketten*. In: VDI/VDE: *Automation 2014: 15. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2014.
- [LUG03] G.F. Luger: *Künstliche Intelligenz: Strategien zur Lösung komplexer Probleme*. 4. Auflage. München: Pearson Studium, 2003.
- [LUN10] J. Lunze: *Künstliche Intelligenz für Ingenieure*. 2. Auflage. München: Oldenbourg, 2010.
- [LUT11] C. Lutz: *Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte. Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme in die Konstruktion*. München, TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften. Dissertation, 2011.
- [MFB05] J.D. Madden, L. Filipozzi, Y. Bar-Cohen: *Web-based actuator selection tool*. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Proceedings*, Vol. 5759, S. 9–15, 2005.
- [MAJA10] C. Maga, N. Jazdi: *An Approach for Modeling Variants of Industrial Automation Systems*. In: *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR): proceedings*, 2010.
- [MAH13] C. Mahler: *Automatisierungsmodule für ein funktionsorientiertes Automatisierungs-engineering*. Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013.
- [MAI15] U. Maier: *Übersicht über Prozessleitfunktionen*. In: Früh (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. 5. Auflage. München: Oldenbourg, S. 76–82, 2015.
- [MSA93] P. Mäkinen, E. Siivola, O. Aumala: *Sensor Selection System*. In: *Proceedings Sensor 93 Kongress*, Vol. 4., S. 185–190, 1993.
- [MWR+12] N. Mathies, G. Wendt, J. Rose, B. Mickan, R. Schupp: *Mengen- und Durchflussmessung strömender Medien: Begrifflichkeiten und Definitionen*. tm – Technisches Messen, Vol. 79 (2), S. 120–128, 2012.
- [MER11] M. Mertens: *Verwaltung und Verarbeitung merkmalsbasierter Informationen: vom Metamodell zur technologischen Realisierung*. Aachen, RWTH Aachen, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik. Dissertation, 2011.
- [ME09] M. Mertens, U. Epple: *Plant Asset Management Functions driven by Property Models*. In: *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Tagungsband der 14. Tagung*, 2009.
- [MBG93] P. Mertens, V. Borkowski, W. Geis: *Betriebliche Expertensystemanwendungen*. Berlin [u. a.]: Springer, 1993.
- [MES07] M. Mess: *Methodenbausteine zur Sensorauswahl und -integration im Maschinenbau*. Dissertation. Tönning [u. a.]: Der Andere Verlag, 2007.

- [MEY02] D. Meyer: *Objektverwaltungskonzept für die operative Prozessleittechnik*. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002.
- [MIN75] M. Minsky: *A framework for representing knowledge*. In: P. Winston (Hrsg.): *The Psychology of Computer Vision*. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [MIN91] M. Minsky: *Logical versus analogical or symbolic versus connectionist or neat versus scruffy*. AI Magazine Vol. 12, S. 34–51, 1991.
- [MÜH12] M. Mühlhause: *Konzept zur durchgängigen Nutzung von Engineeringmodellen der Automation*. Dissertation. Berlin: Logos-Verlag, 2012.
- [MMK+11] M. Mühlhause, A. Michelis, H. Krappe, C. Diedrich: *MERITUM – Flexibles Integrationswerkzeug zur Anwendung standardisierter Beschaffungsvorgänge für Gerätehersteller*. In: VDI/VDE: *Automation 2011: 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2011.
- [MÜL92] I. Müller: *Einsatz von Expertensystemen bei der Projektierung (Planung) von Automatisierungsanlagen*. Leipzig, Technische Hochschule Leipzig, Fakultät Naturwissenschaft und Technik. Dissertation, 1992.
- [MÜL79] R. Müller (Hrsg.): *Projektierung von Automatisierungsanlagen*. 2. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1979.
- [NAZ89] D.L. Nazareth: *Issues in the verification of knowledge in rule-based systems*. International Journal of Man-Machine Studies Vol. 30 (3), S. 255–271, 1989.
- [NEH03] W. Nehrlich: *Diskrete Mathematik*. München: Fachbuchverlag Leipzig, 2003.
- [NOR90] H.N. Norton: *Sensor and transducer selection guide: Fluid Mechanical And Thermal Properties*. Oxford: Elsevier, 1990.
- [OES04] B. Oestereich: *Objektorientierte Softwareentwicklung: Analyse und Design mit der UML 2.0*. 6. Auflage. München [u. a.]: Oldenbourg, 2004.
- [OEM89] J.B. Ong, O.K. Eyada, A.S. Masud: *A Knowledge-Based System For Sensor Selection*. Computers & Industrial Engineering Vol. 17, 1989, S. 85–89.
- [OME92] J.B. Ong, A.S. Masud, O.K. Eyada: *Senses: A Knowledge-Based Sensor Selection System*. Computers & Industrial Engineering Vol. 22, 1992, S. 1–8.
- [OP180] O. Opitz: *Numerische Taxonomie*. Stuttgart [u. a.]: Fischer, 1980.
- [PBD+13] A. Perez-Lopez, R. Blace, M. Dean, M. Fisher, J. Hebler: *Semantic web programming*. Hoboken: Wiley, 2013.
- [PEZE08] M.L. Peters, S. Zelewski: *Der Analytic Network Process (ANP) als Technik zur Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen Kriterien*. WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Vol. 37 (9), S. 475–482, 2008.
- [PoEp94] M. Polke, U. Epple: *Prozessleittechnik: Mit 8 Tabellen*. 2. Auflage. München [u. a.]: Oldenbourg, 1994.

- [PLS+11A] J. Prinz, A. Lüder, N. Suchold, R. Drath: *Design & Engineering – AutomationML: Integriertes Engineering durch die standardisierte Beschreibung mechatronischer Objekte durch Merkmale*. In: VDI/VDE: *Automation 2011: 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2011.
- [PLS+11B] J. Prinz, A. Lüder, N. Suchold, R. Drath: *Beschreibung mechatronischer Objekte durch Merkmale*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 53 (8), S. 62–69, 2011.
- [PUL02] C. Puls: *Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zum Management von Konfigurationswissen in KMU*. Zürich, ETH Zürich. Dissertation, 2002.
- [PFR+15] P. Puntel-Schmidt, A. Fay, W. Riediger, T. Schulte, F. Köslin, S. Diehl: *Validierung von Steuerungscode mit Hilfe automatisch generierter Simulationsmodelle*. at – Automatisierungstechnik, Vol. 63 (2), S. 111–120, 2015.
- [PUP91] F. Puppe: *Einführung in Expertensysteme*. 2. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer, 1991.
- [QUI67] M.R. Quillian: *Word concepts: A theory and simulation of some basic semantic capabilities*. Behavioral Science, Vol. 12, S. 410–430, 1967.
- [QUI68] M.R. Quillian: *Semantic Memory*. In: Minsky (Hrsg.): *Semantic Information Processing*. Cambridge: MIT Press, 1968.
- [REA05] M. Reader-Harris: *Flowmeter Selection and Application*. In: Sydenham, Thorn (Hrsg.): *Handbook of measuring system design*. Chichester: Wiley, S. 1233–1237, 2005.
- [REG05] P.P. Regtien: *Selection of Sensors*. In: Sydenham, Thorn (Hrsg.): *Handbook of measuring system design*. Chichester: Wiley, S. 778–780, 2005.
- [REI10] K. Reichenberger: *Kompodium semantische Netze: Konzepte, Technologie, Modellierung*. Berlin [u. a.]: Springer, 2010.
- [REI91A] U. Reimer: *Einführung in die Wissensrepräsentation: Netzartige und schemabasierte Repräsentationsformate*. Stuttgart: Teubner, 1991.
- [REI91B] G. Reiter: *Nichtmetrische mehrdimensionale Skalierung als Instrument zur Lösung betrieblicher Entscheidungsprobleme*. Berlin, Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Dissertation, 1991.
- [RiFu08] A. Rieder, M. Fuchs: *Neue Entwicklungen in der Coriolis-Einrohrtechnik*. In: *Sensoren und Messsysteme 2008: 14. Fachtagung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 347–356, 2008.
- [RÖP04] O. Röper: *Collaborative Engineering: Kritische Erfolgsfaktoren aus Sicht eines global tätigen Chemie-Anlagenbauers*. In: *Anlagenbau der Zukunft – Collaborative Business: Trends, Strategien, Zukunftsszenarien und Erfahrungsberichte im Anlagenbau: Tagungsband*, S. 33–40, 2004.
- [ROT01] K. Roth: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. 3. Auflage. Berlin: Springer, 2001.
- [RUD06] H. Rudolf: *Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie*. München, Technische Universität München. Dissertation, 2006.

- [RUN11] S. Runde: *Wissensbasierte Engineeringunterstützung in der Automatisierungstechnik am Beispiel der Gebäudeautomation*. Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011.
- [RFS+11] S. Runde, A. Fay, S. Schmitz, U. Epple: *Wissensbasierte Systeme im Engineering der Automatisierungstechnik: Potenziale, Anwendungen, Defizite und zukünftige Herausforderungen*. at – Automatisierungstechnik, Vol. 59 (1), S. 42–49, 2011.
- [RGF08] S. Runde, K. Güttel, A. Fay: *Modellierung mit CAEX in der Fertigungs- und Gebäudeautomatisierungstechnik*. In: VDI/VDE: *Automation 2008: 9. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2008.
- [RGF09] S. Runde, K. Güttel, A. Fay: *Transformation von CAEX-Anlagenplanungsdaten in OWL*. In: VDI/VDE: *Automation 2009: 10. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2009.
- [RuNo12] S.J. Russell, P. Norvig: *Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz*. 3. Auflage. München [u. a.]: Pearson, 2012.
- [SAZA87] E. Sanchez, L.A. Zadeh: *Approximate reasoning in intelligent systems, decision and control*. 1. Auflage. Oxford [u. a.]: Pergamon Press, 1987.
- [SAN03] P. Sandhu: *The MathML handbook*. 1. Auflage. Hingham: Charles River Media, 2003.
- [SAKA00] K. Sattler, W. Kasper: *Verfahrenstechnische Anlagen: Planung, Bau und Betrieb*. Weinheim: Wiley-VCH, 2000.
- [SCH08A] R. Schady: *Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation, 2008.
- [SCH94] S. Schäfer: *Objektorientierte Entwurfsmethoden: Verfahren zum objektorientierten Softwareentwurf im Überblick*. 1. Auflage. Bonn [u. a.]: Addison-Wesley, 1994.
- [SCH08B] D. Schudel: *Prozess-Sensoren schaffen und erhalten Werte in der Prozessindustrie*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 50 (2), S. 38–47, 2008.
- [SCH02] A. Scheuermann: *Einfach Bedien-Bar?: CT-Umfrage ermittelt Trends bei Druckmessgeräten*. Chemie Technik, Vol. 31 (8), S. 44–47, 2002.
- [SCH04] A. Scheuermann: *Markt in Bewegung: CT-Umfrage: Füll- und Grenzstandmessgeräte für Schüttgüter*. Chemie Technik, Vol. 33 (3), S. 64–65, 2004.
- [SCH08C] A. Scheuermann: *Masse In Kingsize: Übersicht Coriolisgeräte mit großen Nennweiten*. Chemie Technik (Kompendium 2008), S. 43–45, 2008.
- [SCH08D] A. Scheuermann: *Berechenbar in die Zukunft: MAV-Konzept auf den Anlagenlebenszyklus erweitert*. Chemie Technik, Vol. 37 (2), S. 28–30, 2008.
- [SCH09] A. Scheuermann: *Betreiber unter Strom: CT-Umfrage Durchflussmessung*. Chemie Technik, Vol. 38 (2), S. 14–18, 2009.
- [SCH92] E. Schiessle: *Sensortechnik und Messwertaufnahme*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel, 1992.

- [SCH08E] T. Schmidberger: *Wissensbasierte Auswertung von Anlagen-Planungsdaten für die Unterstützung des Prozessleittechnik-Ingenieurs: Anwendung einer rollenbasierten Mustersuche*. Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008.
- [SCFA07] T. Schmidberger, A. Fay: *A rule format for industrial plant information reasoning*. In: *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Tagungsband der 12. Tagung*, 2007.
- [SCEp08] S. Schmitz, U. Epple: *Automatisiertes Engineering leittechnischer Funktionen durch integrierte Regeln*. In: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA): Tagungsband der 10. Tagung*. S. 241-252, 2008.
- [SSE09] S. Schmitz, M. Schluetter, U. Epple: *Automation of Automation – definition, components and challenges*. In: *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): Tagungsband der 14. Tagung*, 2009.
- [SCH99] E. Schnieder: *Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*. Braunschweig [u. a.]: Vieweg, 1999.
- [SCH00] G. Schreiber: *Knowledge engineering and management: The CommonKADS methodology*. Cambridge: MIT Press, 2000.
- [SCH12A] N. Schröder: *Satter Aufschwung: Markt für Prozess-Sensorik wächst bis 2016 um rund sechs Prozent pro Jahr: Studie erläutert Analysen und Prognosen für die Zukunft der Sensorik*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 54 (5), S. 12–15, 2012.
- [SCH12B] C. Schulz: *Das Labyrinth der Füllstandmessung*. Prozesstechnik & Automation (4), S. 60–62, 2012.
- [SCH03] U. Schütten: *Konzept eines modulbasierten Engineerings in der Anlagenautomatisierung*. Duisburg – Essen, Universität Duisburg – Essen. Dissertation, 2003.
- [SHF+01] J. Shieh, J. Huber, N. Fleck, M. Ashby: *The Selection Of Sensors*. Progress in Materials Science, Vol. 46, S. 461–504, 2001.
- [SIL07] C.W. de Silva: *Sensors and actuators: Control systems instrumentation*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [SGG10A] R. Singh, K.V. Gernaey, R. Gani: *ICAS-PAT: A Software for design, analysis and validation of PAT systems*. Computers and Chemical Engineering, Vol. 34, S. 1108–1136, 2010.
- [SGG10B] R. Singh, K.V. Gernaey, R. Gani: *An ontological knowledge-based system for the selection of process monitoring and analysis tools*. Computers and Chemical Engineering, Vol. 34, S. 1137–1154, 2010.
- [SON95] R. Sonnenschein: *Ein wissensbasiertes System zur Instrumentierung von Chemieanlagen*. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.

- [SPSP08] C. Spreckelsen, K. Spitzer: *Wissensbasen und Expertensysteme in der Medizin: KI-Ansätze zwischen klinischer Entscheidungsunterstützung und medizinischem Wissensmanagement*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, 2008.
- [SPU97] G. Spur: *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. München: Carl-Hanser-Verlag, 1997.
- [STA07] G. Starke: *Regelbasierte Systeme*. Java-Spektrum (6), S. 36–38, 2007.
- [STO09] W. Stock: *Begriffe und semantische Relationen in der Wissensrepräsentation*. Information Wissenschaft & Praxis, Vol. 60 (8), S. 403–420, 2009.
- [STR08] U. Strauch: *Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie: Konzept eines integrierten Systems zur Abschätzung und Bewertung des Kapitalbedarfes für die Errichtung einer chemischen Anlage*. Berlin, TU Berlin. Dissertation, 2008.
- [STR06] V. Stroh: *Bilanz und Perspektiven des deutschen Industrieanlagenbaus*. In: *Anlagenbau der Zukunft: Wettbewerbsvorteile im Anlagenbau realisieren – Zukunftsszenarien und Erfahrungsberichte: Tagungsband*. S. 11–22, 2006.
- [STR02] G. Strohrmann: *Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse: Eine Einführung für Ingenieure und Techniker*. München: Oldenbourg, 2002.
- [STR04] G. Strohrmann: *Messtechnik im Chemiebetrieb: Einführung in das Messen verfahrenstechnischer Größen: mit Tabellen*. 10. Auflage. München: Oldenbourg, 2004.
- [STR13] M. Strube: *Modellgestützte Modernisierungsplanung industrieller Automatisierungslösungen*. Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013.
- [STU11] H. Stuckenschmidt: *Ontologien: Konzepte, Technologien und Anwendungen*. 2. Auflage. Berlin [u. a.]: Springer, 2011.
- [TAC09] G. Tack: *Constraint Propagation: Models, Techniques, Implementation*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes. Dissertation, 2009.
- [TAU05] T. Tauchnitz: *CIPE oder: Die Zeit ist reif für eine Integration des Prozessentwurfs-, Engineering- und Betreuungsprozesses – Teil 1*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 47 (10), S. 36–43, 2005.
- [TAU13] T. Tauchnitz: *Integriertes Engineering – wann, wenn nicht jetzt!?: Notwendigkeit, Anforderungen und Ansätze*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 55 (1-2), S. 46–53, 2013.
- [THO05] R. Thorn: *Basic Principles of Flow Measurement*. In: Sydenham, Thorn (Hrsg.): *Handbook of measuring system design*. Chichester: Wiley, S. 1248–1255, 2005.
- [TIT03] P. Tittmann: *Graphentheorie*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2003.
- [TROB98] H.-R. Tränkler, E. Obermeier (Hrsg.): *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Berlin [u. a.]: Springer, 1998.

- [TR11] K. Tripathi: *A Review on Knowledge-based Expert System: Concept and Architecture*. International Journal of Computer Applications, S. 21–25, 2011.
- [UZSc12] H. Uzuner, G. Schembecker: *Wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließbildern*. Chemie Ingenieur Technik, Vol. 84 (5), S. 747–761, 2012.
- [VÁM98] T. Vámos: *Knowledge Representation*. In: Liebowitz (Hrsg.): *The handbook of applied expert systems*. Boca Raton: CRC Press, Vol. 3.1, S. 3–22, 1998.
- [VOI11] A. Voigt: *Laser-Doppler-basierte Geschwindigkeitsprofil- und Geschwindigkeitsfeldsensoren für die hochauflösende Untersuchung von Scherschichten*. In: J. Czarske (Hrsg.): *Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik*, Vol. 5. Aachen: Shaker, 2011.
- [WÄL12] M. Wäldele: *Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte: Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmenbasierte Produktentwicklung*. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2012.
- [WAT86] D.A. Waterman: *A guide to expert systems*. 1. Auflage. Reading: Addison-Wesley, 1986.
- [WEB08] K.H. Weber: *Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen*. Berlin [u. a.]: Springer, 2008.
- [WEB14] K.H. Weber: *Engineering verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [WEG13] A. Wegfraß: *Experimentelle Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Lorentzkraft-Anemometrie auf schwach leitfähige Fluide*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation, 2013.
- [WIE04] S. Wiegand: *Knowledge engineering des Managements der Informationssystem-sicherheit: Entwicklung einer Diagnose-Shell zur Unterstützung von Informationssystem-sicherheit*. Essen, Universität Duisburg – Essen, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften. Dissertation, 2004.
- [WWM+11] A. Wiesner, M. Wiedau, W. Marquardt, H. Temmen, H. Richert, F. Anhäuser: *Wissensbasierte Integration von Anlagenplanungsdaten – Semantische Technologien bieten großes Potenzial*. atp – Automatisierungstechnische Praxis Vol 52 (4), S. 48–59, 2010.
- [WRM+10] M. Wollschläger, S. Runde, M. Mühlhause, L. Lindemann, A. Braune: *XML in der Automation – Best Practice*. In: VDI/VDE: *Automation 2010: 11. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*, 2010.
- [ZGo15] P. Zgorzelski: *Merkmalleisten-Technik*. In: Früh (Hrsg.): *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen*. 5. Auflage. München: Oldenbourg, 2015.
- [ZIN06] S. Zinckgraf: *Planung auf Knopfdruck?: CT-Trendbericht: Integriertes Engineering – Hürden auf dem Weg zum automatisierten PLS-Engineering*. Chemie Technik, Vol. 35 (4), S. 14–20, 2006.
- [ZAF02] M. Zupan, M. Ashby, N. Fleck: *Actuator Classification and Selection – The Development of a Database*. Advanced Engineering Materials, Vol. 4 (12), S. 933–940, 2002.

Normen, Richtlinien und Empfehlungen

- [DIN 1301] DIN 1301. *Einheiten*, 2010.
- [DIN 4002] DIN 4002 (Normenreihe). *Merkmale und Geltungsbereiche zum Produktdatenaustausch*, 2007-2013.
- [DIN 4002-1] DIN 4002-1. *Merkmale und Geltungsbereiche zum Produktdatenaustausch – Teil 1: Grundlagen*, 2007.
- [DIN 4002-2] DIN 4002-2. *Merkmale und Geltungsbereiche zum Produktdatenaustausch – Teil 2: Begriffe und konzeptionelles Informationsmodell*, 2007.
- [DIN 6779-13] DIN 6779-13. *Kennzeichnungssystematik für technische Produkte und technische Produktdokumentation – Teil 13: Chemieanlagen*, 2003.
- [DIN 32705] DIN 32705. *Klassifikationssysteme – Erstellung und Weiterentwicklung von Klassifikationssystemen*, 1987.
- [DIN EN 24006] DIN EN 24006. *Durchflußmessung von Fluiden in geschlossenen Leitungen – Begriffe und Formelzeichen*, 1993.
- [DIN 28000] DIN 28000 (Normenreihe). *Chemischer Apparatebau – Dokumentation im Lebensweg von Prozessanlagen*, 2009-2015.
- [DIN 28000-1] DIN 28000-1. *Chemischer Apparatebau – Dokumentation im Lebensweg von Prozessanlagen – Teil 1: Erfassung der grundlegenden und ergänzenden Dokumentation*, 2011.
- [DIN 28000-2] DIN 28000-2. *Chemischer Apparatebau – Dokumentation im Lebensweg von Prozessanlagen – Teil 2: Inhalte der Dokumentation*, 2011.
- [DIN 28000-3] DIN 28000-3. *Chemischer Apparatebau – Dokumentation im Lebensweg von Prozessanlagen – Teil 3: Fließschemata und Anlagenkennzeichnung*, 2009.
- [DIN 28000-4] DIN 28000-4. *Chemischer Apparatebau – Dokumentation im Lebensweg von Prozessanlagen – Teil 4: Graphische Symbole für Armaturen, Rohrleitungen und Stellantriebe*, 2014.
- [DIN EN 29104] DIN EN 29104. *Durchflußmessung von Fluiden in geschlossenen Leitungen; Verfahren zur Beurteilung des Betriebsverhaltens von magnetisch-induktiven Durchflußmeßgeräten für Flüssigkeiten*, 1993.
- [DIN EN 60534-1] DIN EN 60534-1. *Stellventile für die Prozessregelung – Teil 1: Begriffe und allgemeine Betrachtungen*, 2005.
- [DIN EN 60534-7] DIN EN 60534-7. *Stellventile für die Prozessregelung – Teil 7: Datenblatt für Stellventile*, 2011.
- [DIN EN 61082] DIN EN 61082. *Dokumente der Elektrotechnik*, 2015.
- [DIN EN 61360] DIN EN 61360 (Normenreihe). *Standard data element types with associated classification scheme for electric components*, 2004-2005.

- [DIN EN 61360-1] DIN EN 61360-1. *Standard data element types with associated classification scheme for electric components – Part 1: Definitions – Principles and methods*, 2004.
- [DIN EN 61360-2] DIN EN 61360-2. *Standard data element types with associated classification scheme for electric components – Part 2: EXPRESS dictionary schema*, 2004.
- [DIN EN 62382] DIN EN 62382. *Leittechnische Systeme in der verfahrenstechnischen Industrie – PLT-Stellenprüfung*, 2014.
- [DIN EN 81346] DIN EN 81346 (Normenreihe). *Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung*, 2010.
- [DIN EN ISO 9241-13] DIN EN ISO 9241-13. *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 13: Benutzerführung*, 2000.
- [DIN EN ISO 9241-110] DIN EN ISO 9241-110. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*, 2008.
- [DIN EN ISO 10628] DIN EN ISO 10628 (Normenreihe). *Schemata für die chemische und petrochemische Industrie*, 2013-2015.
- [DIN EN ISO 10628-2] DIN EN ISO 10628-2. *Schemata für die chemische und petrochemische Industrie – Teil 2: Graphische Symbole*, 2013.
- [DIN EN ISO 80000] DIN EN ISO 80000. *Größen und Einheiten*, 2013.
- [IEC 61987] IEC 61987 (Normenreihe). *Industrial-process measurement and control – Data structures and elements in process equipment catalogues*, 2006-2012.
- [IEC 61987-1] IEC 61987-1. *Industrial-process measurement and control – Data structures and elements in process equipment catalogues. Part 1: Measuring equipment with analogue and digital output*, 2006.
- [IEC 61987-11] IEC 61987-11. *Industrial-process measurement and control – Data structures and elements in process equipment catalogues. Part 11: List of Properties (LOP) of measuring equipment for electronic data exchange – generic structures*, 2012.
- [IEC 62424] IEC 62424. *Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik – Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen*, 2008.
- [IEC 62264] IEC 62264. *Enterprise-control system integration*, 2013-2016.
- [ISO 10303] ISO 10303 (Normenreihe). *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration – Produktdarstellung und -austausch*, 1994-2016.
- [ISO/IEC 11179] ISO/IEC 11179 (Normenreihe). *Information technology – Metadata registries (MDR)*, 2004-2015.

- [ISO 13584] ISO 13584 (Normenreihe). *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration – Teilebibliothek*, 1998-2014.
- [ISO 13584-26] ISO 13584-26. *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration – Teilebibliothek – Teil 26: Identifikation der Lieferanteninformation*, 2000.
- [ISO 13584-42] ISO 13584-42. *Industrial automation systems and integration – Parts library – Part 42: Description methodology: Methodology for structuring parts families*, 2010.
- [ISO/IEC 25000] ISO/IEC 25000. *System and Software-Engineering – Qualitätskriterien und Bewertung von System- und Softwareprodukten (SQuaRE) – Leitfaden für SQuaRE*, 2014.
- [NA 35] NA 35. *Abwicklung von PLT-Projekten*, 2003.
- [NA 55] NA 55, zurückgezogen. *Vorgaben für PLT-Stellen zur Planung, Errichtung und Instandhaltung*, 1999.
- [NA 62] NA 55. *PLT-Konzept*, 2009.
- [NE 100] NE 100. *Nutzung von Merkmalleisten im PLT-Engineering-Workflow*, 2010.
- [NE 150] NE 150. *Standardisierte NAMUR-Schnittstelle zum Austausch von Engineering-Daten zwischen CAE-System und PCS-Engineering-Werkzeugen*, 2014.
- [PAS 1040-1042] PAS 1040. *Sachmerkmal-Leiste für Maschinen, Apparate und Rohrleitungen in der chemischen Industrie – Teil 1: Grundlagen, Teil 2: Merkmalblöcke, Teil 3: Liste der Maschinen und Apparate, Teil 4: Liste der Teile für Rohrleitungstechnik*, 2004.
PAS 1041: *Sachmerkmal-Leiste für Maschinen, Apparate und Rohrleitungen in der chemischen Industrie – Sachmerkmalleisten für Maschinen und Apparate*, 2004.
PAS 1042: *Sachmerkmal-Leiste für Maschinen, Apparate und Rohrleitungen in der chemischen Industrie – Sachmerkmalleisten für Teile der Rohrleitungstechnik*, 2004.
- [PAS 1059] PAS 1059. *Planung einer verfahrenstechnischen Anlage – Vorgehensmodell und Terminologie*, 2006.
- [UNE-ISO/IEC 9126-1] UNE-ISO/IEC 9126-1. *Software engineering – Product quality – Part 1: Quality model*, 2004.
- [VDI 2206] VDI 2206. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, 2004.
- [VDI 2221] VDI 2221. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, 1993.
- [VDI 2644] VDI 2644. *Auswahl und Einsatz von Durchflussmesseinrichtungen*, 2001.

- [VDI 2889] VDI 2889. *Einsatz wissensbasierter Diagnosemethoden und -systeme in der Instandhaltung*, 1998.
- [VDI 3519] VDI 3519. *Füllstandmesstechnik*, 2012.
- [VDI 4499] VDI 4499 (Richtlinienreihe). *Digitale Fabrik*, 2008-2016.
- [VDI 5200] VDI 5200 (Richtlinienreihe). *Fabrikplanung*, 2011-2016.
- [VDI/VDE 3682] VDI/VDE 3682. *Formalisierte Prozessbeschreibungen*, 2015.
- [VDI/VDE 3694] VDI/VDE 3694. *Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen*, 2014.
- [VDI/VDE 3695-1] VDI/VDE 3695-1. *Engineering von Anlagen – evaluieren und optimieren des Engineerings – Blatt 1: Grundlagen und Vorgehensweise*, 2010.
- [VDI/VDE 3695-5] VDI/VDE 3695-5. *Engineering von Anlagen – evaluieren und optimieren des Engineerings – Blatt 5: Themenfeld Aufbauorganisation*, 2014.
- [W3C XML] W3C Recommendation XML. *Extensible Markup Language (XML) – 1.0 (Fifth Edition)*, 2008.
<http://www.w3.org/TR/REC-xml/> [Abruf: 2016-09-08]

Veröffentlichungen des Autors

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der Veröffentlichungen des Verfassers, die mittels [<Kurzbeleg>*] gekennzeichnet sind.

- [RAF15*] M. Riedel, E. Arroyo, A. Fay: *Knowledge-based Selection of Principle Solutions for Sensors and Actuators based on Standardized Plant Description and Semantic Concepts*.
In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: Tagungsband der 19. Tagung, 2015.
- [RiFa14*] M. Riedel, A. Fay: *Wissensbasierte Auswahl von Prinziplösungen – Geeignete Messverfahren automatisch finden*.
atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 56 (11), S. 52–63.
- [RSF08*] M. Riedel, T. Schmidberger, A. Fay: *Wissensbasierte Auswahl geeigneter Messprinzipien auf der Basis von Merkmalleisten*.
atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 50 (8), S. 44–49.

Studentische Arbeiten

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der studentischen Arbeiten, die vom Autor betreut wurden. Die Quellen sind mittels [<Kurzbeleg>[%]] gekennzeichnet.

- [KIR12[%]] T. Kirchner: *Beschreibung und Charakterisierung EDV-unterstützter Anlagenlebenszyklen: Description and characterization of computer aided plant life cycles*. Hamburg, Masterarbeit, 2012.
- [GAN14[%]] M. Ganbold: *Beschreibung und Systematik der für den Einsatz von Durchflussmessgeräten relevanten physikalischen Gesetzmäßigkeiten: Description and systematization of relevant physical principles for fielding flow measurement devices*. Hamburg, Seminararbeit, 2014.
- [TUR14A[%]] B. Turakiewicz: *Konzeptionierung eines Editors zur Erstellung, Pflege und Prüfung einer graphbasierten Wissensbasis: Conception of an editor for building, maintenance and validation of a graph-based knowledge base*. Hamburg, Studienarbeit, 2014.
- [TUR14B[%]] B. Turakiewicz: *Weiterentwicklung eines Editors zur Erstellung und Pflege einer graphbasierten Wissensbasis unter besonderer Berücksichtigung effizienter Konsistenzprüfung: Advancement of an editor for building and maintenance of a graph-based knowledge base with focus on efficient consistency validation*. Hamburg, Masterarbeit, 2014.

Referenzierte Internetquellen

Dieses Verzeichnis enthält eine Liste der referenzierten Internetquellen. Die Quellen sind mittels [<Kurzbeleg>@] gekennzeichnet.

- [BEL09@] R.V. Belavkin: *Introduction to Expert Systems*. Lecture note 11, BIS 4410, Middlesex University, London, 2009.
<http://www.eis.mdx.ac.uk/staffpages/rvb/teaching/BIS4410/hand11.pdf>
 [Abruf: 2016-09-07]
- [BER94@] T. Berners-Lee: *Universal Resource Identifiers in WWW: A Unifying Syntax for the Expression of Names and Addresses of Objects on the Network as used in the World-Wide Web*. Request for Comments (RFC) 1630, Geneve, 1994.
<http://www.w3.org/Addressing/rfc1630.txt> [Abruf: 2016-09-07]
- [FGH+11@] F. Frenzel; H. Grothey; C. Habersetzer; M. Hiatt; W. Hogrefe; M. Kirchner; G. Lütkepohl; W. Marchewka; U. Mecke; M. Ohm; F. Otto; K.-H. Rackebrandt; D. Sievert; A. Thöne; H. Wegener; F. Buhl; C. Koch; L. Deppe; E. Horlebein; A. Schüssler; U. Pohl; B. Jung; H. Lawrence; F. Lohrenger; G. Rasche; S. Pagano; A. Kaiser; T. Mutongo: *Industrielle Durchflusssmesstechnik: Grundlagen und Praxis*. D184B075U01 Rev. 07.07.2011. ABB Automation Products GmbH, 2010.
https://library.e.abb.com/public/acc2ad20c5184c29c12578c0004b8437/D184B075U01-07-07_2011_secure.pdf [Abruf: 2016-09-10]
- [GGK+09@] A. Gasch, M. Gerlach, U. Kaiser, M. Kloska, M. Maiwald, N. Matalla, W. Morr, R. Panzke, S. Stieler, D. Westerkamp: *Prozess-Sensoren 2015+: Technologie-Roadmap für Prozess-Sensoren in der chemisch-pharmazeutischen Industrie*. VDI/VDE, NAMUR, 2009.
https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/Prozess-Sensoren_2015+.pdf [Abruf: 2016-09-08]
- [GIL12@] A. Gillhuber: *TU-Ilmenau entwickelt neuartiges Durchflussmessprinzip*. elektroniknet.de, 16.05.2012.
<http://www.elektroniknet.de/automation/sonstiges/artikel/88347/>
 [Abruf: 2016-09-11]
- [HAR10@] K. Hartmann: *Einführung in die Expertensystem-Technologie*, 2010.
http://www.hartmann.hs-merseburg.net/uploads/tx_twpublication/XPS-Technologie_.pdf [Abruf: 2016-09-10]
- [KRO14@] KROHNE: *Wissen was läuft: Produktübersicht Durchflusssmesstechnik*.
http://cdn.krohne.com/dlc/CA_OVERVIEW_FLOW_de_150827.pdf
 [Abruf: 2016-09-07]
- [MPP12@] B. Motik; P.F. Patel-Schneider; B. Parsia: *OWL 2 Web Ontology Language: Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)*. W3C Recommendation, 11.12.2012.
<http://www.w3.org/TR/owl2-syntax> [Abruf: 2016-09-06]
- [MÜH15@] S. Mühlkamp: *Wer gibt die Richtung in der Durchflussmessung vor?* PROCESS, 09.04.2015.
<http://www.process.vogel.de/wer-gibt-die-richtung-in-der-durchflussmessung-vor-a-485504/> [Abruf: 2016-09-06]

- [SCH10[@]] A. Scheuermann: *Wie man systematische Fehler beim Aufbau von Sicherheitskreisen vermeidet: Fallstrick SIL-Zertifikat*. Chemie Technik Online, 31.10.2010.
<http://www.chemietechnik.de/wie-man-systematische-fehler-beim-aufbau-von-sicherheitskreisen-vermeidet/> [Abruf: 2016-09-06]
- [SCH11A[@]] A. Scheuermann: *Technik wird Commodity: CT-Umfrage Füll- und Grenzstandmessung: Technik und Entscheidungskriterien – Teil 1*. Chemie Technik Online, 26.09.2011.
<http://www.chemietechnik.de/ct-umfrage-fuell-und-grenzstandmessung-technik-und-entscheidungskriterien-teil-1/> [Abruf: 2016-09-06]
- [SCH11B[@]] A. Scheuermann: *Technik wird Commodity: CT-Umfrage Füll- und Grenzstandmessung: Technik und Entscheidungskriterien – Teil 2*. Chemie Technik Online, 05.11.2011.
<http://www.chemietechnik.de/ct-umfrage-fuell-und-grenzstandmessung-technik-und-entscheidungskriterien-teil-2/> [Abruf: 2016-09-06]
- [SCH12[@]] A. Scheuermann: *Trends in der Füllstandmessung und Prozessinstrumentierung*. Chemie Technik Online, 09.02.2012.
<http://www.chemietechnik.de/trends-in-der-fuellstandmessung-und-prozessinstrumentierung/> [Abruf: 2016-09-06]

Referenzierte Software

JAVASCRIPT	<i>Javascript (Scriptsprache für dynamische Webseiteninhalte)</i>
CSS	<i>Cascading Style Sheets (Formatierungssprache für HTML- und XML-Dokumente):</i> World Wide Web Consortium (W3C). http://www.w3.org/Style/CSS
COLLADA	<i>Collada (COLLABorative Design Activity – XML-basiertes Austauschformat für 3D-Daten):</i> Khronos Group. https://www.khronos.org/collada
DJANGO	<i>Django (web programming framework):</i> Django Software Foundation. https://www.djangoproject.com
HTML5	<i>HTML5 (Hypertext Transfer Markup Language, 5. Fassung):</i> World Wide Web Consortium (W3C). http://www.w3.org/TR/html5
JQUERY	<i>JQuery (Javascript-Bibliothek für HTML-Manipulationen):</i> JQuery Foundation. https://jquery.com
NSHAPE	<i>Nshape (diagramming framework):</i> dataweb GmbH. http://www.dataweb.de/en/products/diagramming.html
PLCOPEN XML	<i>PLCopen XML (XML-Spezifikation für den Austausch von Steuerungsdaten):</i> PLCopen. http://www.plcopen.org
PRODOK	<i>ProDOK (PLT-CAE-Tool):</i> Rösberg. http://www.roesberg.com
PYTHON	<i>Python (höhere, objektorientierte Programmiersprache):</i> Python Software Foundation. https://www.python.org

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Maik Riedel
Geburtsdaten: 12.04.1983 in Schlema

Berufserfahrung

- 09/2015 – 12/2017 **Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw)**, Koblenz
Projektmanager in der Nutzungssteuerung/-leitung
- 04/2012 – 09/2015 **Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität**, Hamburg
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
- 07/2008 – 03/2012 **7. Schnellbootgeschwader**, Rostock/Warnemünde
Wachoffizier/Bootseinsatzoffizier Schnellboote Kl. 143a
- 02/2006 – 12/2006 **Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität**, Hamburg
Wissenschaftliche Hilfskraft
- 07/2005 – 08/2005 **Helmholtz-Zentrum für Material- und Küstenforschung**, Geesthacht
Praktikant
- 07/2004 – 08/2004 **AWEBA Werkzeugbau GmbH**, Aue
Praktikant
- 07/2002 – 06/2008 **Bundeswehr**, bundesweit
Marineoffizier

Ausbildung

- 05/2007 – 03/2009 **Fachbezogene Offiziersausbildung Marine**, Flensburg, Bremerhaven, Hannover, Stralsund, Neustadt i.H., Bad Ems u. a.
- 10/2003 – 04/2007 **Helmut-Schmidt-Universität**, Hamburg
Studium des Maschinenbaus (Vertiefungsrichtung: Automatisierungstechnik)
Abschluss: Diplom-Ingenieur
- 07/2002 – 10/2003 **Offiziersausbildung**, Plön, Parow, Flensburg u. a.
Abschluss: Offizierspatent
- 09/1993 – 06/2002 **Matthes-Enderlein-Gymnasium**, Zwönitz
Berufliches Schulzentrum für Technik Erdmann-Kirchais, Aue
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Online-Buchshop für Ingenieure

■ ■ VDI nachrichten

BUCHSHOP

Online-Shops



**Fachliteratur und mehr -
jetzt bequem online recher-
chieren & bestellen unter:
www.vdi-nachrichten.com/
Der-Shop-im-Ueberblick**



**Täglich aktualisiert:
Neuerscheinungen
VDI-Schriftenreihen**



Im Buchshop von vdi-nachrichten.com finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

VDI-Berichte und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

Fortschritt-Berichte VDI:

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen

Newsletter „Neuerscheinungen“:

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

Autoren-Service:

Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI

Buch- und Medien-Service:

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
 - 2 Fertigungstechnik
 - 3 Verfahrenstechnik
 - 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
 - 6 Energietechnik
 - 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
 - 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
 - 10 Informatik/Kommunikation
 - 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
 - 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
 - 15 Umwelttechnik
 - 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
 - 21 Elektrotechnik
- 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-347020-4