

**Methodik zur Konzeption und Applikation
anwendungsspezifischer Reifegradmodelle
unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Gökhan Akkasoglu
aus Sabanözü (Türkei)

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

Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2013

Vorsitzende des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann
Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll

Zusammenfassung

Reifegradmodelle stellen ein stufenbasiertes Entwicklungsmodell eines spezifischen und quantitativ schwierig zu erfassenden Betrachtungsobjekts (z. B. Prozess, Produkt oder System) dar, um auf Basis qualitativ ausgelegter Indikatoren dessen Reifegradstufe zu ermitteln. Der Reifegrad repräsentiert dabei den Entwicklungsstand zu einem bestimmten Bewertungszeitpunkt. Derzeit verfügbare Reifegradmodelle sind entweder zu generell verfasst oder in ihrem Anwendungsbereich auf bestimmte Betrachtungsobjekte limitiert. Ebenso werden Informationsunsicherheiten wie die linguistische Unschärfe, die der Reifegradbewertung prinzipiell innewohnen, sowohl in bestehenden Reifegradmodellen als auch in den Vorgehensweisen zur Auslegung neuer Reifegradmodelle außen vor gelassen oder unzureichend berücksichtigt.

Aufgrund dieser Defizite wurde eine Methodik zur Auslegung neuer Reifegradmodelle mit einem höheren Bezug zum Betrachtungsobjekt sowie valideren Reifegradaussagen durch die Berücksichtigung der Informationsunsicherheit konzipiert. Die Validierung der Methodik stellt durch Konstruktion und Applikation ein Reifegradmodell zur Bewertung und Verbesserung des Entwicklungsstands neuer Fertigungsprozesse der Umformtechnik bereit. Für eine effektive und effiziente Unterstützung des Anwenders in der Umsetzung der entworfenen Vorgehensweise wurde im Sinne eines Informations- und Assistenzsystems eine entsprechende datenbankbasierte Softwareapplikation realisiert.

Abstract

Maturity models are stage models of a specific and quantitatively difficult to examine object (e.g. process, product or system) to evaluate its maturity level on the basis of qualitative indicators. The maturity represents the development status at a particular valuation point. Currently available maturity models are either too general or limited in their area of application. In the same way information uncertainties like linguistic fuzziness are either disregarded or considered insufficiently, although these uncertainties are in principle inherent in the maturity assessment.

Due to these shortcomings, a methodology for the design of new maturity models has been created. This approach enables a higher reference to the object of examination and thus more valid information about the maturity by taking into account the information uncertainty. The validation of the methodology provides a maturity model for assessing and improving the development status of new metal forming processes. For an effective and efficient support of users in the implementation of the created approach an appropriate database-supported software application has been realized as an information and assistance system.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann, Gründer des Lehrstuhls Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die mehrjährige Unterstützung und intensive Förderung meiner wissenschaftlichen Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptreferats.

Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll, Inhaber des Lehrstuhls Qualitätsmanagement der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Des Weiteren danke ich Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, Leiter des Lehrstuhls für Photonische Technologien der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch, Inhaber des Lehrstuhls für Sensorik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Meinen derzeitigen und ehemaligen Kollegen danke ich für die besonders freundschaftliche und lehrreiche Atmosphäre in den Jahren am Lehrstuhl. Insbesondere Dr.-Ing. Teresa Werner, Dr.-Ing. Peter-Frederik Brenner und M.Sc. Jürgen Götz danke ich für die konstruktiven Diskussionen über die breite Thematik des Qualitätsmanagements und im Speziellen die der Reifegradmodelle. Dr.-Ing. Özgür Tan, Dr.-Ing. Alexander Schuler und Dipl.-Ing. Wito Hartmann danke ich für ihre außerordentliche Hilfsbereitschaft. Mein Dank gilt auch den von mir betreuten Studierenden, die in Seminar-, Studien-, Projekt-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten zur Entstehung und Reife dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Frau Jasmin danke ich für ihr Verständnis, ihre großzügige Geduld und besonders dafür, dass sie mir stets den notwendigen Rückhalt gegeben hat.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die es mir ermöglicht haben, diesen Weg zu beschreiten.

Erlangen, im Dezember 2013

Gökhan Akkasoglu

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung.....	1
2 Grundlegende Betrachtungen zu Reifegradmodellen.....	3
2.1 Begriffsdefinitionen	3
2.1.1 Modelle.....	3
2.1.2 Referenzmodelle	5
2.1.3 Reifegradmodelle	7
2.2 Darstellung und Analyse vorhandener Reifegradmodelle	10
2.2.1 Quality Management Maturity Grid - QMMG	10
2.2.2 Capability Maturity Model Integration - CMMI.....	10
2.2.3 Software Process Improvement and Capability Determination - SPICE	14
2.2.4 Reifegradmodell nach ISO 9004:2009	18
2.2.5 VDA-Reifegradabsicherung.....	19
2.2.6 Spezifische Reifegradmodelle	21
2.3 Prinzipien der Reifegradanalyse	24
2.4 Ansätze zur Auslegung neuer Reifegradmodelle	27
2.5 Informationsunsicherheit in Reifegradmodellen	30
2.5.1 Kategorisierung von Informationsunsicherheiten.....	30
2.5.2 Ansätze zur Berücksichtigung der Informationsunsicherheit in der Reifegradbewertung	33
2.5.3 Auswahl einer Methode zur Modellierung der Unsicherheit	35
2.5.4 Fuzzy-Set-Theorie und Fuzzy-Systeme	37
2.6 Informationsvisualisierung und Kommunikation.....	44
3 Defizite bestehender Verfahren zur Entwicklung von Reifegradmodellen...47	47
4 Zielsetzung und wissenschaftlicher Ansatz	49

5	Auslegung neuer Reifegradmodelle	51
5.1	Vorbereitende Schritte zur Auslegung neuer Reifegradmodelle	52
5.2	Referenzmodellierung zur Deduktion von Indikatoren	53
5.3	Gewichten der Reifegradindikatoren.....	56
5.4	Reifegrad-Kennwert-Matrix	57
5.5	Anwendung von Reifegradmodellen	58
6	Reifegradermittlung mit unsicheren Eingangsgrößen.....	61
6.1	Methodik für merkmalsbasierte Unsicherheitsmodelle	61
6.2	Fuzzy-System zur Abbildung der Informationsunsicherheit	66
6.3	Visualisierung unschärfebehafteter Reifegradergebnisse	69
7	Validierung der konzipierten Vorgehensweise	71
7.1	Entwicklung der Blechmassivumformung	71
7.2	Mögliche Reifegradmodelle für neue Umformverfahren.....	73
7.3	Kombiniertes Referenzmodell für Umformverfahren	76
7.3.1	Systemmodell für Umformprozesse	76
7.3.2	Phasenmodell für neue Umformverfahren.....	77
7.4	Indikatoren für die Entwicklung neuer Umformverfahren	80
7.5	Reifegrad-Kennwert-Matrix für die Entwicklung neuer Umformverfahren ...	83
7.6	Unschärfebehaftete Reifegradermittlung	85
8	Informationstechnische Umsetzung der Reifegradmodellbildung	89
8.1	Konzeption	89
8.2	Implementierung	91
8.3	Anwendung und Beurteilung	94
9	Zusammenfassung und Ausblick	98
	Literatur	100
	Anhang	116

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
bdd	Blockdefinitionsdiagramm
Bew.	Bewertung
CMM	Capability Maturity Model
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CMMI-ACQ	CMMI for Acquisition
CMMI-DEV	CMMI for Development
CMMI-SVC	CMMI for Services
CoA	Center-of-Area
CoM	Center-of-Maxima
DDE	Dynamic Data Exchange
DLL	Dynamic Link Library
DoD	Department of Defense
EFQM	European Foundation for Quality Management
Gew.	Gewichtung
GoM	Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung
GUI	Graphical-User-Interface
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HSQLDB	Hyper Structured Query Language Database
IT	Informationstechnik
MBNQA	Malcolm Baldrige National Quality Award
MoM	Mean-of-Maximum
MRL	Manufacturing Readiness Level
MT	Messtechnik
ORM	Object-relational mapping
PA	Prozessauslegung
PCMM	Predictive Capability Maturity Model
PST	Process Survey Tool

QMMG	Quality Management Maturity Grid
RCP	Rich Client Platform
RG	Reifegrad
SCAMPI	Standard CMMI Appraisal Method for Process Improvement
SEI	Software Engineering Institute
SFB	Sonderforschungsbereich
SOP	Start of Production
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SysML	Systems Modeling Language
TR	Tribologie
TRL	Technology Readiness Level
U	Unsicherheitswert
UM	Umformmaschine
UML	Unified Modelling Language
U-W	Ursache-Wirkung
WS	Werkstück
WW	Wechselwirkung
WZ	Werkzeug
ZGF	Zugehörigkeitsfunktion

1 Einleitung

Stetig steigender Wettbewerbsdruck und kürzere Produktlebenszyklen sowie steigende Kundenforderungen aufgrund globaler Einflüsse stellen Unternehmen und Organisationen gegenwärtig vor die Herausforderung, zielsicher innovative und komplexe Prozesse, Produkte oder Systeme in immer kürzerer Zeit bei reduziertem Kostenaufwand zu entwickeln. Um die hohen Investitionsaufwendungen für technologische Entwicklungen zu minimieren, gehen Unternehmen globale Kooperationen ein, in denen rechtliche, gesellschaftliche und ökologische Vorschriften zu berücksichtigen sind. Infolgedessen resultieren zusätzliche Anforderungen an die Erfassung und Kommunikation von Entwicklungsständen (Bild 1). [Ophey 2005, Weckenmann 2010, Weiber 2006]

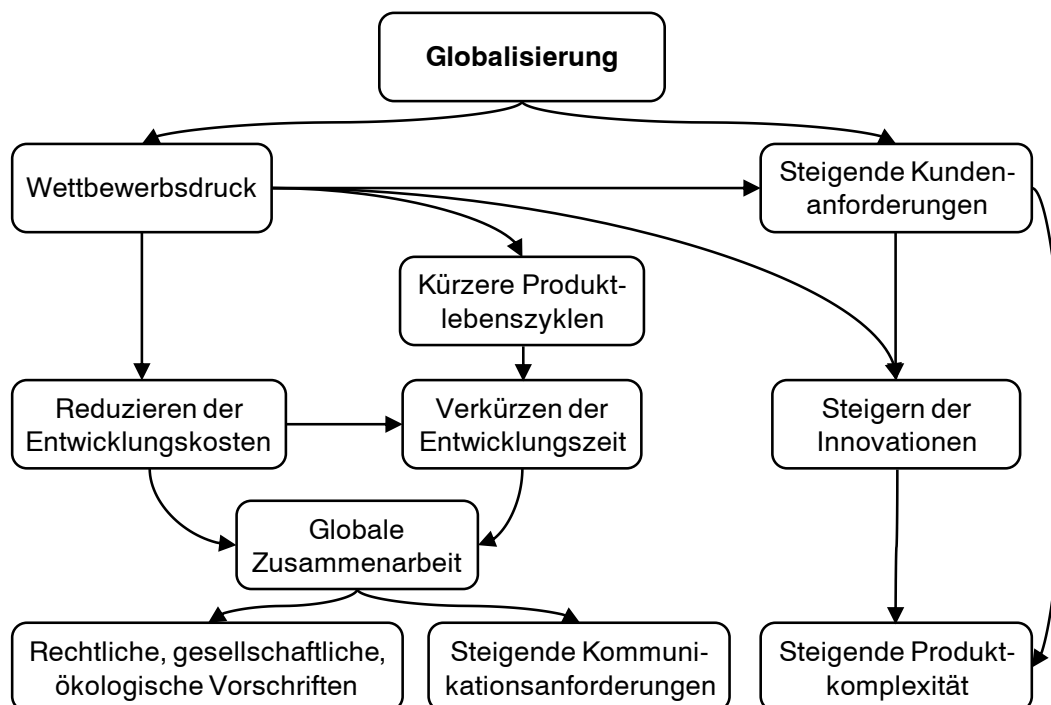


Bild 1: Interrelationendiagramm zu den Herausforderungen in Entwicklungsprozessen [Weckenmann 2010]

Damit eine kosten-, termin- und qualitätsgerechte Steuerung des Entwicklungsvorhabens für einen erfolgreichen Ausgang ermöglicht wird, ist es notwendig, bereits in frühen Entwicklungsphasen über Informationen zum Entwicklungsstand des Betrachtungsobjekts (z. B. Produkt, Prozess, Organisation) anhand kriterienbasierter und transparenter Bewertungsergebnisse zu verfügen. Anforderungsabweichende Objektmerkmale können in dieser frühen Gestaltungsphase aufgrund ihrer vorrangig im Entwurf befindlichen Auslegung kosteneffizient angepasst werden. Gleichzeitig ist jedoch die eindeutige Identifikation des Entwicklungsstandes aufgrund der Unsicherheiten hinsichtlich der in der Entstehung befindlichen und kaum quantitativ erfassbaren Merkmale erschwert. Zu häufig wird der Entwicklungsstand daher erfahrungsbasiert, subjektiv und nicht nachvollziehbar ohne Berücksichtigung der vorhandenen Unsicherheit beurteilt.

Um eine plausible Entscheidungsgrundlage in Entwicklungsprojekten bereitzustellen, eignen sich so genannte Reifegradmodelle, die stufenbasierte Anforderungen an relevante Merkmale eines Betrachtungsobjekts zusammenfassen und ein Referenzsystem für Vergleichsbewertungen darstellen. Durch Gegenüberstellen des aktuellen Ist-Zustands eines vergleichbaren Betrachtungsobjekts und der definierten Anforderungen des Reifegradmodells kann somit der Reifegrad, der dem Entwicklungsstand entspricht, ermittelt werden. Dadurch wird auch für schwierig zu erfassende Bewertungsobjekte eine quantitative und auf das Reifegradmodell rückführbare Entscheidungsbasis geschaffen. Die Herausforderung besteht in einer aussagekräftigen Bestimmung des aktuellen Reifegrads, der den Zustand des Betrachtungsobjekts möglichst realitätsgetreu wiedergibt. Zu diesem Zweck kann entweder auf bestehende adäquate Reifegradmodelle zurückgegriffen werden oder es bedarf der Konstruktion eines anwendungsspezifischen Reifegradmodells. In beiden Fällen ist die den Reifegradmodellen prinzipiell innewohnende Informationsunsicherheit zu erfassen und in der Analyse des quantifizierten Entwicklungsstandes zu berücksichtigen, um Entscheidungen für Verbesserungsmaßnahmen auf differenzierbaren und validen Informationen über den Reifegrad zielorientiert zu treffen. Dabei verfügen anwendungsspezifisch konstruierte Reifegradmodelle über eine vergleichsweise geringere Informationsunsicherheit aufgrund des größeren Bezugs zum Betrachtungsobjekt.

Daher ist es das Ziel dieser Arbeit, eine methodengestützte Vorgehensweise zur Konstruktion und Applikation anwendungsspezifischer Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit als valides Steuerungsinstrument für Entwicklungsprojekte bereitzustellen. Nach grundlegender Analyse bestehender und thematisch gleichgerichteter Ansätze (Kapitel 2), werden deren Defizite thematisiert (Kapitel 3) und die für diese Arbeit resultierende Zielsetzung vorgestellt (Kapitel 4). Anschließend wird das Methodenkonzept zum systematischen Aufbau bedarfsgerechter Reifegradmodelle dargestellt und erläutert (Kapitel 5). Die hierbei prinzipbedingt existente Informationsunsicherheit wird für anwendungsspezifisch konstruierte Reifegradmodelle analysiert und durch Auswahl einer adäquaten Methode in die Reifegradbewertung parameterbasiert integriert (Kapitel 6). Die Validierung der konzipierten Methodik erfolgt exemplarisch innerhalb des Sonderforschungsbereichs / Transregio 73, das die Entwicklung eines neuartigen Fertigungsprozesses der „Blechmassivumformung“ anstrebt. In diesem Rahmen wird ein Reifegradmodell für neue Umformprozesse entworfen und angewendet (Kapitel 7), wodurch der unschärfebehaftete Entwicklungsstand objektiv ermittelt werden kann. Dies unterstützt die frühzeitige und damit kosteneffiziente Einführung von Verbesserungsmaßnahmen für einen beherrschten Fertigungsprozess bei Serienfreigabe. Um sowohl den Aufwand als auch das Fehlerpotential beim Einsatz der Methodik zu reduzieren und eine größtmögliche Anwenderunterstützung zu bieten, wird die Vorgehensweise prototypisch als datenbankbasierte Anwendungssoftware implementiert, erprobt und verifiziert (Kapitel 8).

2 Grundlegende Betrachtungen zu Reifegradmodellen

2.1 Begriffsdefinitionen

2.1.1 Modelle

Modelle finden ihren Einsatz, wenn die Problemlösung in der Realität zu komplex, unübersichtlich und kostenintensiv ist. Auch werden Modelle eingesetzt, um einen Vergleich oder eine Bewertung aufwandsreduziert durchzuführen und Handlungsempfehlungen zu deduzieren [Thomas 2005, Partsch 2010]. Durch Identifikation und Komposition seiner Attribute und Wirkzusammenhänge wird ein Untersuchungsgegenstand anhand wissenschaftlicher Erkenntnisprozesse in ein Modell überführt. Auf diese Weise vereinfachen Modelle schwer zu durchdringende Sachverhalte und ermöglichen eine (modellhafte) Analyse und Gestaltung mit gesteigerter Zugänglichkeit und reduzierter Komplexität [Thomas 2005]. Konklusionen werden durch Modellmodifikationen (datenverarbeitungstechnisch) getätigt und auf den Untersuchungsgegenstand überführt. [Thomas 2005]

Die Definition des Modellbegriffs ist vielschichtig und in der wissenschaftlichen Literatur nicht einheitlich [Thomas 2005]. Nach dem abbildungsorientierten Begriffsverständnis werden Modelle als ein „*adäquates Abbild der betrachteten Wirklichkeit*“ [Kosiol 1961] oder als „*ein abstraktes System, welches ein anderes (reales) System in vereinfachter Weise abbildet*“ angesehen [Baetge 1974]. Nach [Stachowiak 1983] sind Modelle reduzierte Darstellungen eines Originals und zeitlich zweckgebunden für die Belange eines Subjekts (Modellersteller bzw. -nutzer). Originale können hierbei Untersuchungsgegenstände wie Systeme, Prozesse oder Produkte sein, die entweder real oder selbst Modelle sind. Dem abbildungsorientierten Begriffsverständnis steht der konstruktionsorientierte Modellbegriff mit der Annahme gegenüber, dass die Wirklichkeit subjektabhängig ist und damit ein Modell „*eine durch einen Konstruktionsprozess gestaltete, zweckrelevante Repräsentation eines Objekts*“ darstellt und nicht lediglich durch die Abbildung eines empirisch betrachteten Ausschnitts der Wirklichkeit erschlossen wird [Thomas 2005].

Diese Definition soll auch im Fortlauf dieser Arbeit Verwendung finden, da hiernach keine Modellierung eine einzigartige Lösung besitzt und damit jedes durch ein Subjekt für einen bestimmten Zweck erstelltes Modell seine Berechtigung hat. Zudem wird keine explizite Verwendung einer Modellierungssprache vorgeschrieben und damit ein umfassenderes Modellverständnis vertreten. Der zeitliche Bezug eines Modells nach [Stachowiak 1983] ergibt sich implizit durch die Gültigkeit eines Modells für einen bestimmten Anwendungsfall. Daher kommt der Dokumentation der Rahmenbedingungen, der Zielsetzung und der Vorgehensweise beim Modellieren eine höhere Bedeutung zu, um die Nachvollziehbarkeit eines Modells zu wahren und dessen Eignung für einen Anwendungsfall beurteilen zu können [Thomas 2005].

Jedes Modell verfügt - unabhängig vom Begriffsverständnis - über ein Abbildungsmerkmal (Originalbezug), ein Verkürzungsmerkmal (Reduktion bzw. Abstraktion) und ein pragmatisches Merkmal (Subjekt-, Zeit- und Zweckbindung) [Stachowiak 1983]. Insbesondere die Verkürzung ist für die Modellbildung essenziell, da sie die bewusste Vernachlässigung bzw. Abstraktion bestimmter, irrelevanter Merkmale bzw. Informationen (präterierte Attribute) ermöglicht (Bild 2), um die Komplexität des Originals zu reduzieren [Partsch 2010]. Welche Merkmale bei der Modellierung ausgelassen und welche besonders hervorgehoben werden, also das Maß der Verkürzung, wird durch den Zweck des Modells bestimmt [Strahinger 2012]. Des Weiteren besitzen Modelle spezifische Merkmale, die nicht im Original enthalten sind aber für das Modell und dessen Konstruktion notwendig sind (abundante Attribute). Die Modellbetrachtungen sind demnach für die spätere Berücksichtigung der inhärenten Informationsunsicherheiten von Reifegradmodellen notwendig.

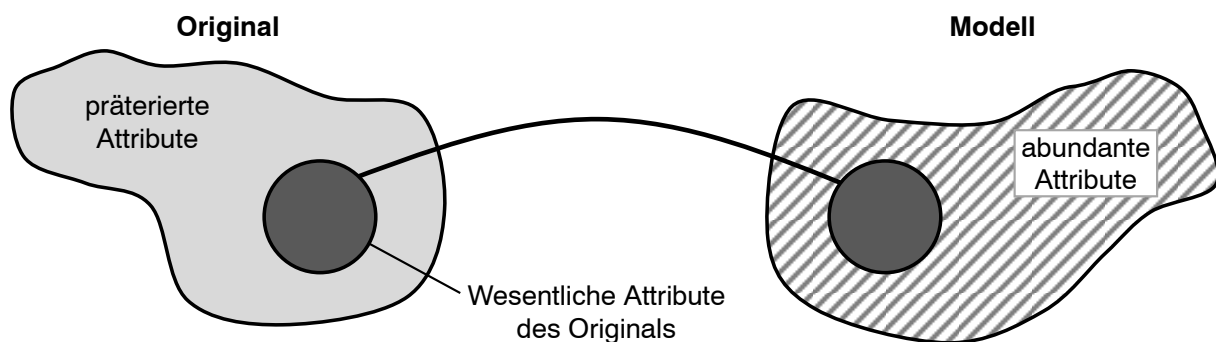


Bild 2: Vereinfachter Zusammenhang zwischen Modell und Original [Partsch 2010]

Grundlegende Anforderungen an die Modellqualität können anhand der Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) gestellt werden [Becker 1995]:

- Grundsatz der Richtigkeit: Die Abbildung eines Originals soll hinsichtlich Struktur und Verhalten (inhaltlich bzw. semantisch) durch die Abstimmung zwischen Modellierer und Modellnutzer korrekt sein und mit der zu verwendenden Modellierungssprache syntaktisch übereinstimmen.
- Grundsatz der Relevanz: Nur zweckrelevante Attribute des Originals sind durch das explizite Erfassen der Modellziele abzubilden.
- Grundsatz der Wirtschaftlichkeit: Ein vertretbares Kosten-Nutzen-Verhältnis kann durch die Verwendung von Referenzmodellen erreicht werden.
- Grundsatz der Klarheit: Wahrung der Verständlichkeit und (intuitiven) Lesbarkeit durch nutzergerechte Auswahl von Modellierungstechniken und -sprachen.
- Grundsatz der Vergleichbarkeit: Unterschiedliche, für denselben Zweck konstruierte Modelle müssen inhaltlich gegenübergestellt werden können.
- Grundsatz des systematischen Aufbaus: Die Komplexität vielschichtiger Darstellungen eines Originals aus unterschiedlichen Perspektiven ist durch eine übergeordnete und konsistente Architektur (Metamodell) zu reduzieren.

2.1.2 Referenzmodelle

Ebenso wie der Modellbegriff erfolgt auch die Definition von Referenzmodellen in der Literatur nicht eindeutig [Brenner 2007]. Nach einer vergleichsweise weit verbreiteten Definition sind Referenzmodelle *„das Ergebnis einer Konstruktion eines Modellierers, der für Anwendungssystem- und Organisationsgestalter Informationen über allgemeingültig zu modellierende Elemente eines Systems zu einer Zeit als Empfehlungen mit einer Sprache deklariert, so dass ein Bezugspunkt (für ein Informationssystem) geschaffen wird“* [Schütte 1998]. In [Brocke 2003] wird ein Referenzmodell definiert als ein *„(Informations-) Modell, das Menschen zur Unterstützung der Konstruktion von Anwendungsmodellen entwickeln oder nutzen, wobei die Beziehung zwischen Referenz- und Anwendungsmodell dadurch gekennzeichnet ist, dass Gegenstand oder Inhalt des Referenzmodells bei der Konstruktion des Gegenstands oder Inhalts des Anwendungsmodells wieder verwendet werden.“* Als Anwendungsmodell wird hierbei das vom Referenzmodellnutzer generierte, spezifische Modell erachtet. Im Rahmen dieser Arbeit soll die von [Hars 1994] aufgestellte Definition und die von [Brocke 2003] aufgeführte Begrifflichkeit des Anwendungsmodells Verwendung finden, wonach ein Referenzmodell als ein Modell festgelegt wird, das für den Entwurf von (spezifischen) Anwendungsmodellen herangezogen werden kann.

Referenzmodelle können in der Beschreibungsebene sowohl Struktur als auch Verhalten eines Untersuchungsgegenstands abbilden und bieten dem Modellersteller einen Bezugspunkt im Sinne einer Best Practice [Schwegmann 1999]. Es besteht somit für den Modellierer die Möglichkeit, Referenzmodelle an die spezifischen Rahmenbedingungen oder Anforderungen anzupassen, statt ein komplett neues Anwendungsmodell zu entwickeln [Becker 2012]. Entsprechend dem wirtschaftlichen Grundsatz ordnungsmäßiger Modellierung unterstützen Referenzmodelle auf diese Weise die kostengünstige Konstruktion anwendungsspezifischer Modelle. Durch die wiederholte Nutzung von Referenzmodellen tritt eine kontinuierliche Verbesserung ein, indem das Referenzmodell nach jeder Anwendung semantisch und syntaktisch überarbeitet werden kann oder neue Aspekte hinzugefügt werden können. [Schwegmann 1999]

Zur Konstruktion von Referenzmodellen wird ein Vorgehensmodell bereitgestellt, welches in seinen Grundzügen an die Vorgehensweise zur Entwicklung und Anwendung von (objektorientierten) Referenzmodellen nach [Schlagheck 2000] angelehnt ist (Bild 3). Grundlegender Vorteil dieser Darstellung ist die gleichwertige Berücksichtigung der Referenzmodellentwicklung und -anwendung anhand zweier Kreisläufe.

Im Rahmen der Referenzmodellentwicklung werden initial das Problem und die Ziele der Modellierung unter Beteiligung mehrerer Personen (z. B. in Rahmen von Workshops) definiert und sukzessive charakterisiert. Die Analyse des Untersuchungsgegenstands trägt relevantes Wissen für den anschließenden Konstruktionsschritt zusammen. Bei der Erstellung des Referenzmodells können zwei prinzipielle Vorge-

hensweisen angewendet werden. Entweder kann aus bereits vorhandenen Modellen, Verfahrensdokumentationen, Expertenbefragungen oder ähnlichem ein Referenzmodell induktiv durch Konsolidierung von Know-how abgeleitet werden oder es wird auf Basis von theoretischem Wissen deduktiv auf das Referenzmodell geschlossen [Schwegmann 1999].

Die Anwendung des Referenzmodells wird ebenfalls mit einer Problem- und Zieldefinition für das Anwendungsmodell angestoßen. Nach einer anschließenden Anforderungsermittlung an das zu verwendende Referenzmodell erfolgt die Suche und Selektion eines ebensolchen. Das ausgewählte Referenzmodell wird letztlich zur Konstruktion des bedarfsgerechten Modells herangezogen. Erfahrungen aus der referenzbasierten Konstruktion des Anwendungsmodells werden zur Evaluation (Bewertung) und Evolution (Weiterentwicklung bzw. Anpassung) der Referenzmodellentwicklung herangezogen.

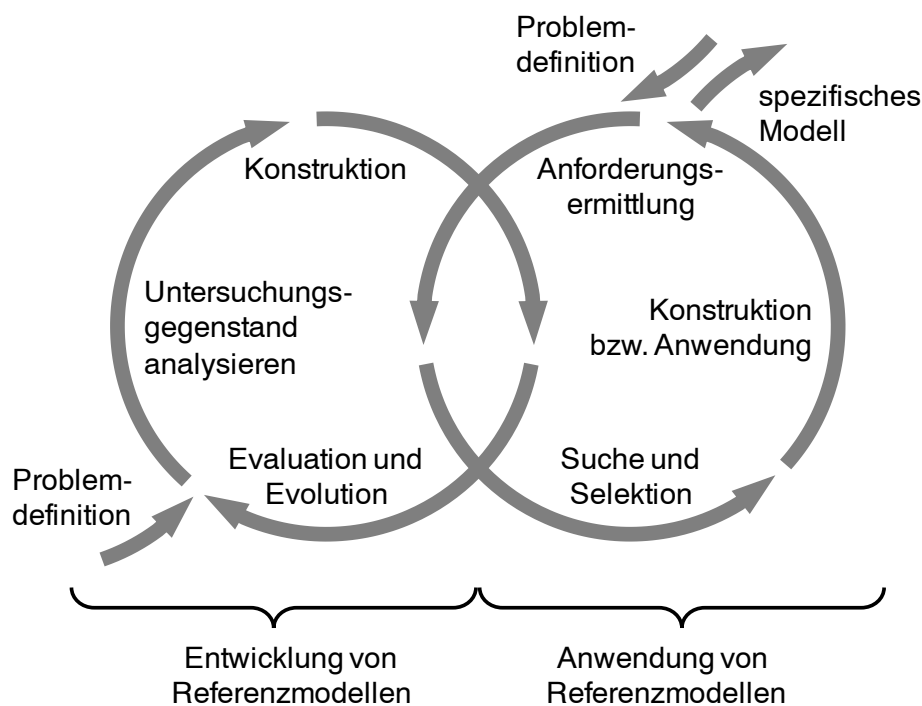


Bild 3: Vorgehensmodell zur Entwicklung und Anwendung von Referenzmodellen (in Anlehnung an [Schlagheck 2000])

Für einen höchstmöglichen Nutzen muss ein Referenzmodell gewisse Anforderungen erfüllen. Diese Anforderungen können aus dem zentralen Aspekt des Referenzmodells, seiner Wiederverwendbarkeit, abgeleitet werden. Damit das Referenzmodell wiederverwendet werden kann, muss es eine ausreichende inhaltliche und modellierungstechnische Qualität (z. B. geeignete Modellierungssprache) aufweisen sowie vom Modellnutzer akzeptiert werden [Schwegmann 1999]. Die Akzeptanz des Modellnutzers ist hierbei davon abhängig, ob er nachvollziehen kann, wie das Referenzmodell zustande gekommen ist. Da das Referenzmodell auch für Nutzer geeignet sein soll, die nicht an dessen Erstellung beteiligt sind, ist eine Dokumentation des

Vorgehens unumgänglich. Zur Bewertung der Modellgüte kann wieder auf die GoM (s. Kapitel 2.1.1) zurückgegriffen werden, wobei eine Anpassung an die Anforderungen eines Referenzmodells nötig ist [Schwegmann 1999]. Dazu werden die Kriterien modularer Aufbau, Allgemeingültigkeit und Anpassbarkeit verwendet.

Der modulare Aufbau wirkt sich auf die Modellvergleichbarkeit und die Forderung nach einem strukturierten Aufbau positiv aus. Außerdem wird die Modellklarheit erhöht, da eine Komplexitätsreduzierung erfolgt. Die Forderung nach Allgemeingültigkeit bedingt die semantische Richtigkeit, sowie die Relevanz des Modells und erhöht außerdem im Zusammenhang mit der Anpassbarkeit die Wirtschaftlichkeit, da das Modell öfter eingesetzt werden kann. Die Module eines Referenzmodells sind durch die Wechselwirkungen mit Systemelementen anderer Module gekennzeichnet. Die Wiederverwendbarkeit einzelner Module hängt von der Anzahl dieser Schnittstellen ab, weshalb auf eine klare Abgrenzung der Module zu achten ist [Schwegmann 1999]. Die Forderung nach Allgemeingültigkeit begründet sich aus der Notwendigkeit, ein Modell an den Zielen der Modellnutzer auszurichten. Da jedoch zum Zeitpunkt der Referenzmodellierung nicht alle Nutzer bekannt sind, kann weder die Relevanz noch die semantische Richtigkeit, bezogen auf die Anforderungen der Anwender, beurteilt werden. Sie werden deshalb durch die Forderung nach Allgemeingültigkeit ersetzt [Becker 2004]. Diese kann entweder durch die Abbildung von Varianten, also die Modellierung von verschiedenen möglichen Ausprägungen eines Modells, oder durch einen hohen Abstraktionsgrad des Referenzmodells erreicht werden. Hierbei werden umso mehr Varianten erforderlich, je geringer der Abstraktionsgrad ist. Es ist zu beachten, dass die Komplexität des (Gesamt-) Modells mit der Anzahl der abgebildeten Varianten steigt und dadurch die Modellklarheit negativ beeinflusst wird. Andererseits ist die Abbildung von Varianten aber unumgänglich, um den Anforderungen der verschiedenen Modellnutzer gerecht zu werden [Schwegmann 1999].

2.1.3 Reifegradmodelle

Reifegradmodelle beziehen sich auf die Stufentheorie, wonach Elemente eines Systems ausgeprägte (Entwicklungs-) Stufen innerhalb einer Zeitperiode durchlaufen und diese Stufen beschrieben werden können [Nolan 1973]. Insbesondere für komplexe und schwer durchzudringende Systeme wie beispielsweise eine nationale Ökonomie (z. B. [Kuznets 1965, Ehrlicher 1975]) oder das menschliche Bewusstsein (z. B. [Kohlberg 1974, Erikson 1966]) findet die Stufentheorie Anwendung, wodurch deren Entwicklungsprozess anhand markanter Stufen dokumentiert und eine vereinfachte Analyse sowie Identifikation des Entwicklungsabschnitts durch Vergleich ermöglicht wird.

In [Nolan 1973] und [Gibson 1974] wurden theoretische Überlegungen über ein Stufenmodell zum Integrationsprozess (Initialisierung, Beschaffung, Etablierung und

Standardisierung, Reorganisation) der elektronischen Datenverarbeitung in Organisationen erstellt und damit die Stufentheorie unternehmensorientiert angewandt. Darauf basierend wurde in [Crosby 1979] im Rahmen des „Quality Management Maturity Grid“ eine fünfstufige Matrix vorgestellt, anhand derer Organisationen die Reife ihrer Service- und Qualitätsmanagementprozesse lokalisieren können [Mettler 2010]. Das Prinzip der Reifegradmodelle etablierte sich erst mit dem „Capability Maturity Model (CMM)“ für Software-Entwicklungsprozesse [Humphrey 1988] und dessen Erweiterung und Verbesserung zum „Capability Maturity Model Integration (CMMI)“ [Ahern 2003], woraufhin eine Vielzahl weiterer Reifegradmodelle mit unterschiedlichsten Betrachtungsgegenständen folgten [Bruin 2005].

Die Begriffe „Reifegrad“ und „Reifegradmodell“ sind in der gängigen Literatur derzeit nicht eindeutig definiert. Unterschiedlichste Literaturquellen grenzen für sich jeweils den Begriff ab, da eine als Referenz anerkannte und allgemeingültige Definition wie z. B. in einer Norm nicht existiert. In [CMMI 2011] wird der Reifegrad (engl.: maturity level) zielabhängig nur auf Prozesse bezogen und definiert als:

„Grad der Prozessverbesserung in einem vordefinierten Satz von Prozessgebieten, in dem alle spezifischen und generischen Ziele erreicht werden.“

Bei [Pfeifer-Silberbach 2005] ist der Reifegrad zeit- und indikatorabhängig auf lediglich den Zustand von Produkten bezogen und definiert als:

„Zustand eines Produktes hinsichtlich definierter Indikatoren, zu einem beliebigen Zeitpunkt“.

[Becker 2009] gibt folgende Definition für den Begriff des Reifegrads an und knüpft den Reifegrad an spezifizierte Forderungen ohne einen zeitlichen Bezug:

„Ein Reifegrad ist durch festgelegte Merkmale des zu untersuchenden Objekts und durch die jeweils zur Erreichung des Reifegrads erforderlichen Merkmalsausprägungen definiert.“

Die Definition von Reifegradmodellen ist ebenfalls divergent. Nach [Ahlemann 2005] sind Reifegradmodelle generisch ausgelegt und von qualitativen Anforderungen abhängig:

„Ein Reifegradmodell definiert unterschiedliche Reifegrade, um beurteilen zu können, inwieweit ein Objekt die für eine Klasse von Objekten allgemeingültig definierten qualitativen Anforderungen erfüllt.“

Bei [Becker 2009] findet sich die folgende Definition, wonach Reifegradmodelle primär auf Prozesse bezogen sind und nach der anforderungsabhängigen Ermittlung eines bestehenden Zustands situationsverbessernde Handlungsmöglichkeiten bereitstellen:

„Reifegradmodelle beziehen sich häufig auf die Beurteilung von Prozessen mit dem Ziel, einheitliche und überprüfbare Aussagen zu ihrem Status und zur Qualität ihrer Durchführung zu erhalten. Ausgehend von der ermittelten Ist-Situation lassen sich Verbesserungsvorschläge und Handlungsempfehlungen ableiten.“

In [Bruin 2005] ist statt einer Definition eine umfangreiche Charakterisierung von Reifegradmodellen vorhanden, worin eine allgemeinere Auffassung des Betrachtungsobjekts vertreten wird und die Reifegradermittlung mittels Bewertung bzw. Vergleich mit definierten Kriterien erfolgt (aus dem Englischen übersetzt):

„Reifegradmodelle werden als bewertende und vergleichende Grundlage für eine Verbesserung [Harmon 2004, Fisher 2004, Spanyol 2004] verwendet, um daraus einen fundierten Ansatz zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit eines bestimmten Bereichs innerhalb einer Organisation abzuleiten [Ahern 2004, Hakes 1996, Paulk 1993]. Reifegradmodelle wurden entwickelt, um den Reifegrad (z. B. hinsichtlich Kompetenz, Leistungsfähigkeit, Ebene der Erfahrung) einer ausgewählten Domäne auf der Basis einer mehr oder weniger umfassenden Reihe von Kriterien zu beurteilen.“

Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen in der Literatur und ihrer geringen Universalität sollen die Begriffe „Reifegrad“ und „Reifegradmodell“ aufbauend auf vorhergehende Arbeiten [Weckenmann 2011, Weckenmann 2011a, Weckenmann 2012] und dem Stand der Technik erfasst werden. Demnach wird der Reifegrad wie folgt definiert:

Der **Reifegrad** ist der indikatorabhängige Entwicklungsstand eines Betrachtungsobjekts zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Hierbei ist der Reifegradbegriff vom Begriff „Fortschritt“ zu unterscheiden, der lediglich einen positiven Anstieg des Entwicklungsgangs, d. h. eine positive Weiterentwicklung [Duden 2013], verzeichnet. Der Reifegrad dahingegen kann aufgrund neuer, zu berücksichtigender Erkenntnisse oder erforderlicher Änderungen, die den Entwicklungsstand zurückwerfen, auch negative Gradienten im Fortlauf der Entwicklung aufweisen. Zudem ist der Reifegradbegriff vom Qualitätsbegriff durch seine zeitabhängige Anforderungsdefinition zu unterscheiden. Der Reifegradmodellbegriff wird nachfolgend definiert:

Ein **Reifegradmodell** ist die ordinalskalierte Abbildung der Merkmalsausprägungen definierter Indikatoren als Anforderungen zu Reifegradstufen.

Reifegradmodelle repräsentieren somit indikatorabhängige Entwicklungsstufen des Betrachtungsobjekts. Die Ermittlung des Reifegrads ergibt sich durch den Vergleich des Betrachtungsobjekts mit einem relevanten Reifegradmodell.

2.2 Darstellung und Analyse vorhandener Reifegradmodelle

Derzeit sind über 100 Reifegradmodelle für die Bewertung und Verbesserung des Entwicklungsstandes unterschiedlicher Betrachtungsobjekte (Produkte, Prozesse, Personen oder Organisationen, s. Kapitel 2.3) verfügbar [Bruin 2005]. Sowohl grundlegende als auch etablierte Reifegradmodelle sollen zunächst als Basis für das im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu konstruierende Reifegradmodell für neue Umformprozesse dargestellt und analysiert werden.

2.2.1 Quality Management Maturity Grid - QMMG

Das „Quality Management Maturity Grid (QMMG)“ von Philip B. Crosby ist eines der ersten Reifegradmodelle für die Bewertung und Verbesserung von Organisationen in Bezug auf die Applizierung und Integration von Qualitätsmanagement in die Unternehmenskultur und wird als Grundlage für das „Capability Maturity Model“ (s. Abschnitt 2.2.2) erachtet [Crosby 1979, Paulk 1993]. Das Modell umfasst die folgenden fünf Reifegradstufen mit ihrer jeweiligen Bedeutung, die ein Unternehmen in seiner Entwicklung durchläuft [Becker 2009a]:

- Unsicherheit (Uncertainty): Keine Kenntnis über Qualitätsprobleme
- Erwachen (Awakening): Infragestellung der Existenz von Qualitätsproblemen
- Erkenntnis (Enlightenment): Systematische Problemidentifikation und -lösung
- Verständnis (Wisdom): Routinierte Fehlervermeidung
- Sicherheit (Certainty): Absolute Kenntnis über Qualitätsprobleme

Neben diesen Stufen definiert das Reifegradmodell folgende Aspekte, die zur Bewertung herangezogen werden [Crosby 1979]:

- Managementverständnis und -verhalten,
- Status der Qualität in der Organisation,
- Problembehandlung,
- Qualitätskosten und
- Aktivitäten zur Qualitätsverbesserung

Sowohl die Reifegradstufen als auch die Bewertungsaspekte werden in einer Matrix zusammengefasst, worin die Matrixelemente die Anforderungen an die Aspekte in Abhängigkeit von der jeweiligen Reifegradstufe bilden. Durch den Vergleich der Ist-Situation im Unternehmen mit den Anforderungen in der Matrix kann die Organisationsreife in Bezug auf die Einbindung des Qualitätsmanagements lokalisiert und durch Benchmark mit anderen, ebenfalls auf derselben Grundlage bewerteten Unternehmen verglichen werden.

2.2.2 Capability Maturity Model Integration - CMMI

Auf Initiative des US Verteidigungsministeriums begann das Software Engineering Institute (SEI) an der Carnegie Mellon University/Pittsburgh 1986 mit der Entwicklung

eines Systems zur Bewertung und Steigerung der Reife von Softwareentwicklungsprozessen, woraus 1991 das „Capability Maturity Model (CMM)“ resultierte [Berg 2002]. Darauf aufbauend folgten verschiedene Abwandlungen des Modells für eine Vielzahl von Disziplinen, wie z. B. die Software-Akquisition oder die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung [Ahern 2004]. Auf Basis dieser Modelle wurde das „Capability Maturity Model Integration (CMMI)“ mit einem umfassenden Zusammenschluss mehrerer, unterschiedlicher Prozessgebiete entwickelt und eine organisationsweite Bewertung und Verbesserung von Geschäftsprozessen ermöglicht [Chrissis 2003, Kulpa 2003]. Ein Prozessgebiet stellt eine Zusammenfassung von bestmöglichen Praktiken für dieses Gebiet dar und ist durch seinen Zweck, seine generischen und spezifischen Ziele definiert (Bild 4). Während generische Ziele auf mehrere Prozessgebiete zutreffen und das Institutionalisieren der eingerichteten Prozessabläufe unterstützen sollen, beschreiben die spezifischen Ziele die zur Erfüllung des Prozessgebiets erforderlichen Merkmale. Institutionalisieren bezeichnet hierbei das Etablieren von Vorgehensweisen in der Organisation, so dass die eingeführten Prozessabläufe von allen Beteiligten als selbstverständlich angesehen und umgesetzt werden [CMMI 2011]. Nur institutionalisierte Prozesse haben auf Dauer Bestand [Chrissis 2003]. Definierte Praktiken der Prozessgebiete auf der generischen und spezifischen Ebene unterstützen die Organisation durch die Bereitstellung bewährter Methoden und Aktivitäten (auch Best-Practice genannt) im Erreichen der zugehörigen Ziele sowie im Realisieren und Verbessern der Prozessgebiete. [CMMI 2011]

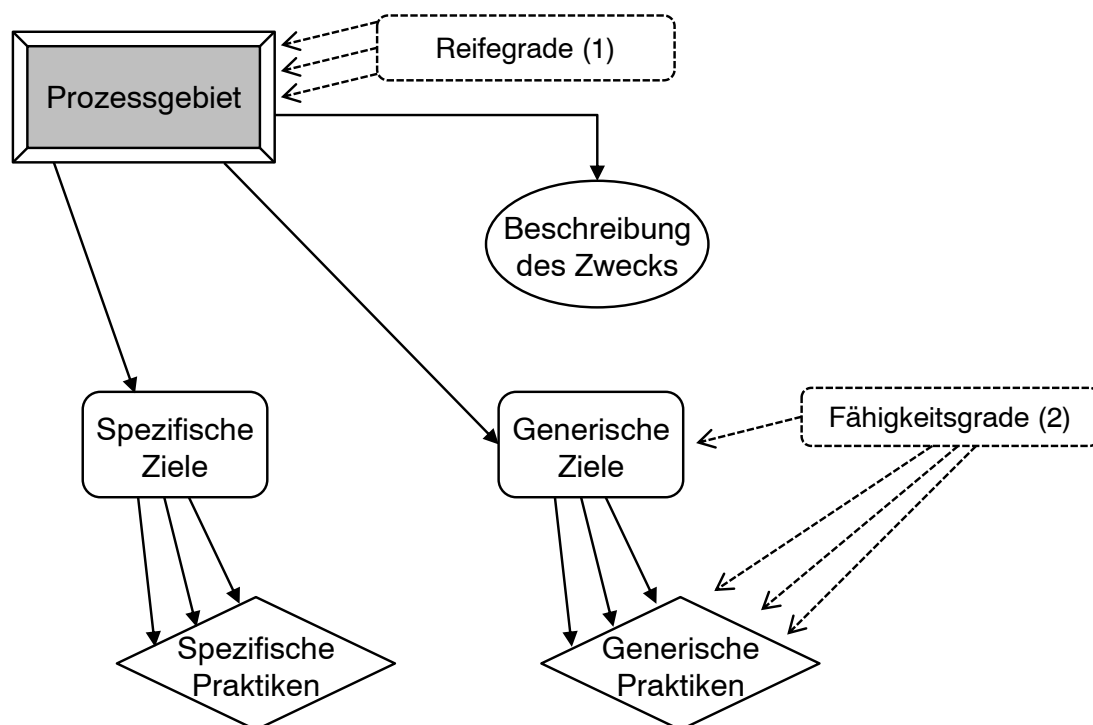


Bild 4: CMMI Modellkomponenten und Bezug der Darstellungen in Reifegraden (1) und Fähigkeitsgraden (2) [CMMI 2011]

Das CMMI bietet die Möglichkeit der kontinuierlichen und stufenförmigen Darstellung, um eine Organisation und deren Entwicklungsstand zu bewerten (Tabelle 1).

Beide Möglichkeiten unterscheiden sich in der Bewertungsstruktur. Bei der kontinuierlichen Darstellungsform entscheidet die Organisation selbst über die zu betrachtenden und zu verbessernden Prozesse und bewertet diese in Abhängigkeit der Umsetzung der vorgegebenen generischen Praktiken anhand von Fähigkeitsgraden (Bild 4) [CMMI 2011]. Ein Fähigkeitsgrad stellt hierbei ein „*Erreichen der Prozessverbesserung innerhalb eines einzelnen Prozessgebiets*“ dar [CMMI 2011]. Die Evaluierung einzelner Prozesse führt zu kontinuierlichen Ergebnissen für das übergeordnete Prozessgebiet und ermöglicht eine differenzierte Betrachtung sowie eine hohe Flexibilität in der Reihenfolge der Verbesserungen. Durch die freie Wahl der zu bewertenden Prozessgebiete weist diese Repräsentationsform eine geringere Vergleichbarkeit auf als die stufenförmige Darstellungsform. In Letzterem wird eine klar strukturierte und erprobte Roadmap zur unternehmensweiten Prozessverbesserung bereitgestellt. Dabei ist jedem Reifegrad ein definierter Satz von Prozessgebieten zugeordnet, deren spezifische und generische Praktiken umgesetzt sein müssen, um den jeweiligen Reifegrad zu erreichen [CMMI 2011]. In beiden Fällen ist der nächsthöhere Grad erreicht, wenn alle Kriterien und Anforderungen der vorhergehenden Stufe erfüllt wurden.

Kontinuierliche Darstellung	Stufenförmige Darstellung
Fähigkeitsgrade	Reifegrade
	5 Optimierung
	4 Quantitativ geführt
3 Definiert	3 Definiert
2 Geführt	2 Geführt
1 Durchgeführt	1 Initial
0 Unvollständig	-

Tabelle 1: Repräsentationsformen des CMMI-Reifegradmodells

Die Ausprägungen der jeweiligen Fähigkeits- bzw. Reifegradstufen werden für Benchmarking- und Bewertungsaktivitäten sowie zur Analyse und Lenkung der Verbesserungsmaßnahmen eines Unternehmens verwendet. Um die Kompatibilität von CMMI mit unterschiedlichen Organisationsbereichen sicherzustellen, stehen dem Anwender drei CMMI-Derivate mit divergent ausgerichteten Prozessgebieten als Best Practices zur Verfügung:

- Das „CMMI for Development“ (CMMI-DEV) unterstützt die Verbesserung von Entwicklungsprozessen für Produkte und Dienstleistungen [CMMI 2011].
- Das „CMMI for Acquisition“ (CMMI-ACQ) zielt auf die Verbesserung von Einkaufsprozessen für Produkte und Dienstleistungen ab [CMMI 2010].
- Das „CMMI for Services“ (CMMI-SVC) fokussiert die Verbesserung von Dienstleistungsprozessen, die im Gegensatz zu einmaligen Projektabläufen auch wiederkehrende Arbeitsabläufe darstellen können [CMMI 2010a].

CMMI-SVC	Reife-grad	CMMI-ACQ	Reife-grad	CMMI-DEV	Reife-grad
Konfigurationsmanagement	2	Konfigurationsmanagement	2	Konfigurationsmanagement	2
Anforderungsmanagement	2	Anforderungsmanagement	2	Anforderungsmanagement	2
Messung und Analyse	2	Messung und Analyse	2	Messung und Analyse	2
Arbeitsplanung	2	Projektplanung	2	Projektplanung	2
Qualitätssicherung von Prozessen und Produkten	2	Qualitätssicherung von Prozessen und Produkten	2	Qualitätssicherung von Prozessen und Produkten	2
Arbeitsverfolgung und -steuerung	2	Projektverfolgung und -steuerung	2	Projektverfolgung und -steuerung	2
Management von Lieferantenvereinbarungen	2	Management von Vereinbarungen	2	Management von Lieferantenvereinbarungen	2
Dienstleistungserbringung	2	Anforderungsentwicklung in der Beschaffung	2		
		Entwicklung der Angebotseinholung und Lieferantenvereinbarung	2		
Entscheidungsanalyse und -findung	3	Entscheidungsanalyse und -findung	3	Entscheidungsanalyse und -findung	3
Integriertes Arbeitsmanagement	3	Integriertes Projektmanagement	3	Integriertes Projektmanagement	3
Organisationsweite Prozessdefinition	3	Organisationsweite Prozessdefinition	3	Organisationsweite Prozessdefinition	3
Organisationsweiter Prozessfokus	3	Organisationsweiter Prozessfokus	3	Organisationsweiter Prozessfokus	3
Organisationsweites Training	3	Organisationsweites Training	3	Organisationsweites Training	3
Risikomanagement	3	Risikomanagement	3	Risikomanagement	3
Management von Kapazität und Verfügbarkeit	3	Validierung der Beschaffung	3	Validierung	3
Vorfallobeseitigung und -prävention	3	Verifizierung der Beschaffung	3	Verifizierung	3
Servicekontinuität	3	Technisches Management in der Beschaffung	3	Produktintegration	3
Servicesystementwicklung	3			Anforderungsentwicklung	3
Servicesystemwechsel	3			Technische Umsetzung	3
Strategisches Servicemanagement	3				
Organisationsweite Prozessfähigkeit	4	Organisationsweite Prozessfähigkeit	4	Organisationsweite Prozessfähigkeit	4
Quantitatives Arbeitsmanagement	4	Quantitatives Projektmanagement	4	Quantitatives Projektmanagement	4
Ursachenanalyse und Problemlösung	5	Ursachenanalyse und Problemlösung	5	Ursachenanalyse und Problemlösung	5
Organisationsweites Prozessfähigkeitsmanagement	5	Organisationsweites Prozessfähigkeitsmanagement	5	Organisationsweites Prozessfähigkeitsmanagement	5

Legende	
	CMMI Kern-Prozessgebiet
	angepasstes Prozessgebiet für CMMI-Derivat
	spezifisches Prozessgebiet für CMMI-Derivat

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Prozessgebiete der CMMI-Derivate [CMMI 2011]

Jedes CMMI-Derivat besitzt denselben Kern von 17 Prozessgebieten aus den drei Prozesskategorien „Unterstützung“, „Prozessmanagement“ und „Projektmanagement“. In Abhängigkeit von der jeweiligen Ausrichtung sind die einzelnen Prozessgebiete eines CMMI-Derivats angepasst oder um charakteristische Prozessgebiete erweitert. In Tabelle 2 sind die CMMI-Varianten mit ihren charakteristischen Prozessgebieten zusammengefasst und entsprechend der Reifegradstufenzuordnung sortiert.

Die Prozessbewertung und -verbesserung auf Basis des CMMI (auch „Appraisal“ genannt) erfolgt standardisiert nach der vorgegebenen Methode SCAMPI („Standard CMMI Appraisal Method for Process Improvement“). Hierbei wird eine eindeutig strukturierte Vorgehensweise zur Bewertung der CMMI-Umsetzung mit folgenden drei Phasen und den zugehörigen Anforderungen definiert:

- 1 Planen und Vorbereiten des Appraisals
- 2 Durchführen des Appraisals
- 3 Ergebnisbericht

Diese Standardisierung bringt den Vorteil der Vergleichbarkeit mit sich. Das Ausmaß der Implementierung einer Praktik eines CMMI-Referenzmodells wird anhand der fünf Stufen

- Fully Implemented (FI)
- Largely Implemented (LI)
- Partially Implemented (PI)
- Not Implemented (NI)
- Not Yet (NY)

qualitativ bewertet [SCAMPI 2011]. Die Vorgehensweise zur Bewertung nach SCAMPI kann auch auf Grundlage anderer Modelle wie eines Qualitätsmanagementsystems nach DIN EN ISO 9001 herangezogen werden.

2.2.3 Software Process Improvement and Capability Determination - SPICE

Ebenso wie das CMMI besitzt auch das „Software Process Improvement and Capability dEtermination (SPICE)“ eine besonders weite Verbreitung. Das 1992 unter anderem aus dem CMM-Ansatz hervorgegangene [Kneuper 2006, Thaller 1998], durch ein Konsortium mehrerer europäischer Firmen und Universitäten entwickelte Reifegradmodell ist von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) anerkannt und in der Normenreihe ISO/IEC 15504 ff. dokumentiert [Mettler 2010]. In seiner ursprünglichen Form fokussiert SPICE Softwareentwicklungsprozesse und bietet in seiner heutigen Fassung ein prinzipielles Rahmenwerk für Reifegradmodelle und zugehörige Assessmentmethoden mit dem Ziel, spezifisch ausgewählte Geschäftsprozesse zu bewerten und kontinuierlich zu verbessern [Fischermanns 2006].

Das Prozess-Assessment (Prozessbewertung) nach SPICE basiert auf einem zwei-dimensionalen Modell, das eine Prozess- sowie eine Fähigkeitsdimension enthält (Bild 5). Beide Dimensionen im Zusammenschluss ergeben das Prozess-Assessmentmodell. Mit der Prozessdimension wird ein externes Prozess-Referenzmodell dargestellt, das nach Prozesskategorien und -gruppen gegliedert sein kann. Die Fähigkeitsdimension erfasst elementare Merkmale eines Prozesses, die so genannten Prozessattribute (Tabelle 3) und beschreibt deren Fähigkeit, aktuelle oder künftige Geschäftsziele zu erreichen [ISO/IEC 15504-1]. Diese Prozessattribute sind für jeden ausgewählten und zu bewertenden Geschäftsprozess anhand einer Ordinalskala nach Tabelle 4 einzustufen. Spezifische Prozessattribute und die jeweils geforderte Bewertung nach Tabelle 4 werden zu sechs aufeinander aufbauenden Fähigkeits- bzw. Reifegradstufen verdichtet („Stufe 0“ ist die Ausgangssituation und besitzt keine Anforderungen). Die Einzelbewertung der ausgewählten Geschäftsprozesse kann anhand dieser Vorgaben zu den Reifegraden zugeordnet werden. Ein Reifegrad gilt als erreicht, wenn die in Tabelle 3 geforderten Bewertungen pro Stufe nachweislich gegeben sind.

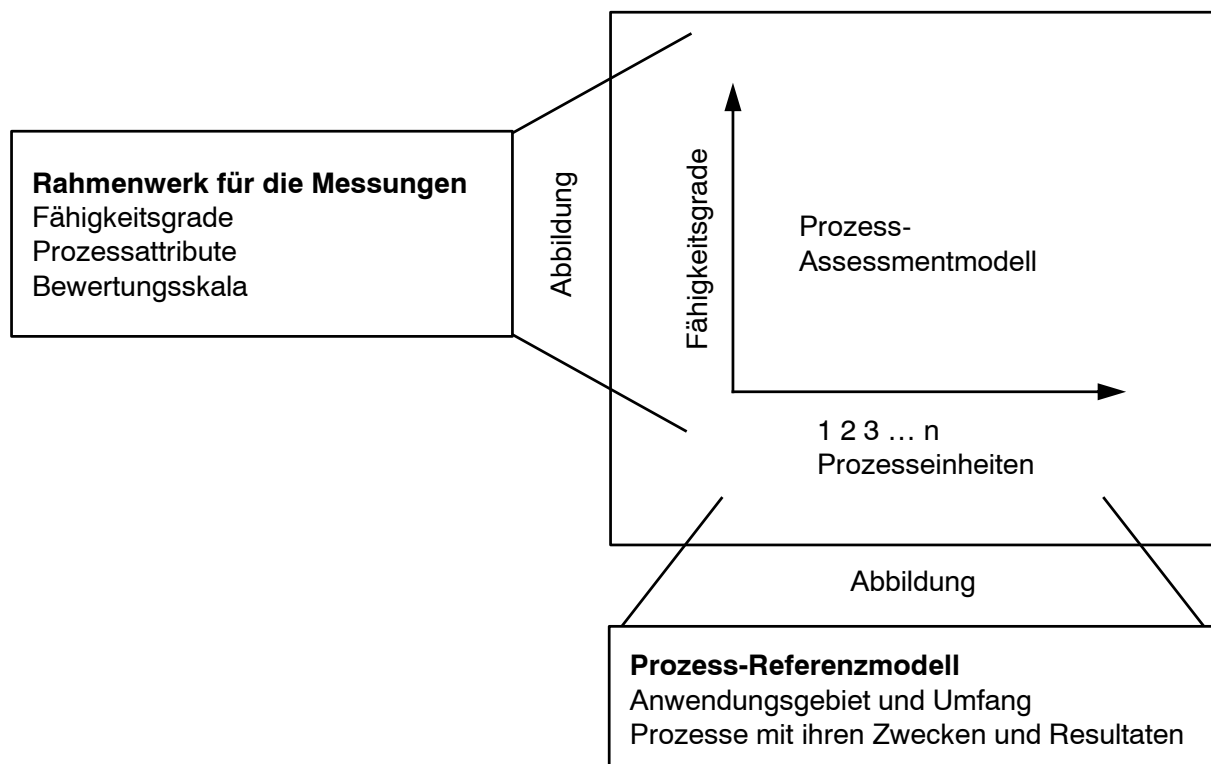


Bild 5: Beziehung zwischen Fähigkeitsgraden und Prozesseinheiten bei SPICE [ISO/IEC 15504-1]

Der Assessmentprozess nach [ISO/IEC 15504-2] erfolgt mittels „Planung“, „Datensammlung“, „Datenvalidierung“, „Bewertung der Prozessattribute“ und „Berichterstattung“, um zu aussagekräftigen Prozessfähigkeitsmessungen zu gelangen. Innerhalb der Normenreihe ISO/IEC 15504 wird in Teil 5 ein exemplarisches Prozess-Assessmentmodell anhand des Referenzmodells für den Software-Lebenszyklus bereitgestellt (Bild 6). Das Referenzmodell besitzt die drei generischen Prozesskategorien:

- Primäre Lebenszyklusprozesse
- Organisatorische Lebenszyklusprozesse
- Unterstützende Lebenszyklusprozesse

Die Prozesskategorien sind wiederum in insgesamt neun Prozessgruppen eingeteilt und umfassen 48 Prozesse zur Akquise von Softwareprodukten und -services. Bei der Durchführung eines Assessments werden ausgewählte Prozesse des Referenzmodells bewertet.

Skala	Prozessattribute	(erforderliche) Bewertung
Stufe 1	Prozessdurchführung	Im Wesentlichen oder vollständig
Stufe 2	Prozessdurchführung	Vollständig
	Management der Prozessdurchführung	Im Wesentlichen oder vollständig
	Arbeitsproduktmanagement	Im Wesentlichen oder vollständig
Stufe 3	Prozessdurchführung	Vollständig
	Management der Prozessdurchführung	Vollständig
	Arbeitsproduktmanagement	Vollständig
	Prozessdefinition	Im Wesentlichen oder vollständig
	Prozesseinsatz	Im Wesentlichen oder vollständig
Stufe 4	Prozessdurchführung	Vollständig
	Management der Prozessdurchführung	Vollständig
	Arbeitsproduktmanagement	Vollständig
	Prozessdefinition	Vollständig
	Prozesseinsatz	Vollständig
	Prozessmessung	Im Wesentlichen oder vollständig
	Prozesskontrolle	Im Wesentlichen oder vollständig
Stufe 5	Prozessdurchführung	Vollständig
	Management der Prozessdurchführung	Vollständig
	Arbeitsproduktmanagement	Vollständig
	Prozessdefinition	Vollständig
	Prozesseinsatz	Vollständig
	Prozessmessung	Vollständig
	Prozesskontrolle	Vollständig
	Prozessinnovation	Im Wesentlichen oder vollständig
	Prozessoptimierung	Im Wesentlichen oder vollständig

Tabelle 3: Stufen der Fähigkeitsgrade mit zugeordneten Prozessattributen und den jeweils geforderten Bewertungen [ISO/IEC 15504-2]

Nicht erfüllt (N)	Teilweise erfüllt (P)	Im Wesentlichen erfüllt (L)	Vollständig erfüllt (F)
0% - 15% erfüllt	16% - 50% erfüllt	51% - 85% erfüllt	86% - 100% erfüllt
<i>Not achieved</i>	<i>Partially achieved</i>	<i>Largely achieved</i>	<i>Fully achieved</i>

Tabelle 4: Grade für die Bewertung der Prozessattribute [ISO/IEC 15504-2]



Bild 6: Prozesskategorien und -gruppen in SPICE [ISO/IEC 15504-5]

Das Prozessreferenzmodell kann beliebig ausgetauscht werden, wodurch das SPICE-Rahmenwerk eine hohe Anpassbarkeit bietet. Abwandlungen des Reifegradmodells nach SPICE durch Bereitstellung spezifischer Prozess-Referenzmodelle existieren derzeit für die Automobilindustrie mit „Automotive SPICE“, die Medizintechnik mit „MediSPICE“ und für die Luft- und Raumfahrtindustrie mit „SPICE for SPACE“ [Wallmüller 2007].

2.2.4 Reifegradmodell nach ISO 9004:2009

Die [ISO 9004] erweitert das Prozessmodell eines Qualitätsmanagementsystems nach [ISO 9001] um weitere Aspekte. Sowohl zusätzliche Interessensparteien an einem Unternehmen als auch weitere unternehmensinterne Aspekte werden berücksichtigt, woraus eine umfassendere und höhere Abbildungsgüte einer Organisation resultiert (Bild 7). Das von der Norm bereitgestellte Reifegradmodell umfasst die Elemente

- Leiten und Lenken für den nachhaltigen Erfolg einer Organisation
- Management von Ressourcen
- Prozessmanagement
- Überwachung, Messung, Analyse und Bewertung
- Verbesserung, Innovation und Lernen
- Strategie und Politik

Insbesondere die Anpassung der ersten beiden Elemente und die Ergänzung um die letzten beiden erweitern das Prozessmodell der [ISO 9001] um den Aspekt des nachhaltigen Erfolgs, wonach eine Organisation sowohl die Erfordernisse als auch die Erwartungen aller ihrer Interessensparteien durchgängig und langfristig in ausgewogener Weise erfüllen sollte. Dies kann bspw. durch eine weitsichtige Planungsperspektive oder das Etablieren von Prozessen für Innovation und ständige Verbesserung gewährleistet werden. [ISO 9004]

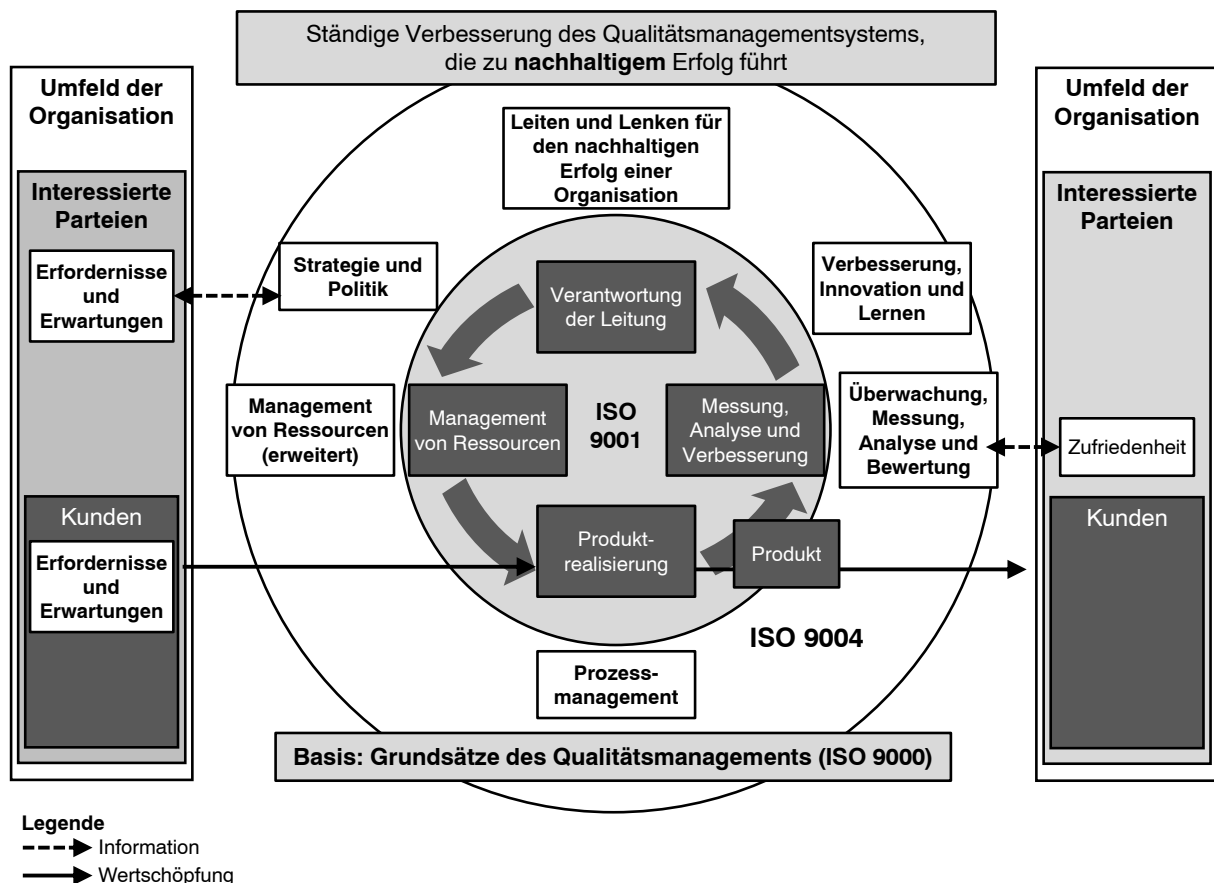


Bild 7: Erweitertes Modell eines prozessbasierten Qualitätsmanagementsystems [ISO 9004]

Für den nachhaltigen Erfolg stellt die [ISO 9004] den Organisationen ein Werkzeug für die Selbstbewertung zur Verfügung, um mittels referenzbasierter Reifegradbestimmung systematisch eigene Stärken und Schwächen zu identifizieren und priorisierte Maßnahmen zur Verbesserung festzulegen. Zu diesem Zweck ist ein Reifegradmodell mit Schlüsselementen dokumentiert, welche durch Fragen charakterisiert und deren Antwortmöglichkeiten anhand definierter Kriterien zu fünf Reifegradstufen zugeordnet werden (Tabelle 5). Damit werden den sechs Elementen der [ISO 9004] aus Bild 7 gestufte Anforderungen zugeordnet, anhand derer sowohl eine Bewertung des aktuellen Standes ermöglicht wird, als auch Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. [ISO 9004]

Schlüsselement	Reifegrad zum Erreichen nachhaltigen Erfolgs				
	Grad 1	Grad 2	Grad 3	Grad 4	Grad 5
Element 1	Kriterium 1 Basisebene	...	...	...	Kriterium 1 Optimale Vorgehensweise
Element 2	Kriterium 2 Basisebene	...	...	...	Kriterium 2 Optimale Vorgehensweise
Element 3	Kriterium 3 Basisebene	....	...	...	Kriterium 3 Optimale Vorgehensweise

Tabelle 5: Allgemeines Modell für Selbstbewertungselemente und -kriterien bezogen auf Reifegrade [ISO 9004]

Jeder Organisation ist es freigestellt, in Abhängigkeit von ihren jeweiligen Randbedingungen das Reifegradmodell individuell anzupassen und zu erweitern. Eine Adaptionsmethodik zur Unterstützung des Anwenders wird nicht bereitgestellt.

2.2.5 VDA-Reifegradabsicherung

Der Schwerpunkt der „Reifegradabsicherung für Neuteile“ nach dem Verband der Automobilindustrie (VDA) liegt auf einer durchgängigen Darstellung, Beurteilung und Erhaltung des Reifegrades für neue, zu beschaffende Automobilkomponenten, um eine hohe Produktreife für den Abnehmer zu gewährleisten und die Robustheit seiner Prozesse nicht zu beeinflussen. Die Notwendigkeit für eine Reifegradabsicherung dieser Komponenten ist auf den Trend zurückzuführen, wonach die Entwicklungs- und Fertigungstiefe sich vom Automobilhersteller hin zum Lieferanten verschiebt. Ziel der Methode nach der „VDA-Reifegradabsicherung“ ist die Anlauf-, Anliefer- und Feldqualität des betrachteten Lieferumfangs zu verbessern, indem die Inhalte und Abläufe in der Lieferkette harmonisiert werden. Hierfür strukturiert die VDA-Reifegradabsicherung einen Referenzprozess, der im Rahmen des Produktentstehungsprozesses einen verstärkten Fokus auf zu beschaffende Teile besitzt (Bild 8). Je geringer der Unterschied des tatsächlichen Beschaffungsprozesses zu den Vorgaben des Referenzprozesses ist, desto höher fällt der Reifegrad der neuen Komponenten aus. [VDA 2010]

Abhängig vom Ergebnis einer multikriteriellen Risikoeinstufung einzelner Zulieferteile wird zu Projektbeginn entschieden, inwieweit diese im Rahmen der Vorgehensweise nach der Reifegradabsicherung überwacht werden müssen. Hierzu werden die Bewertungsfaktoren „Lieferumfangsrisiko“, „Lieferantenrisiko“, „Produktionsrisiko“ und „terminbezogenes Risiko“ herangezogen und die Einzelteile in drei Risikoklassen mit unterschiedlich intensiver Überwachung unterteilt. Als Risiko versteht man in diesem Zusammenhang die Wahrscheinlichkeit, dass die Entwicklungsziele unter Beachtung der Komplexität der Entwicklung erreicht werden.

Insgesamt existieren acht Reifegradstufen (RB), die an bestimmten Kontrollpunkten (auch „Meilensteine“ genannt) bewertet werden, deren Zeitpunkte zu Beginn der Zusammenarbeit zwischen Kunde und Lieferant festzulegen sind. Jedem Meilenstein sind von den vorausgehenden Aktivitäten abhängige Messkriterien zugeordnet, die als Anforderungen ausgedrückt sind und mittels eines Ampelbewertungssystems im Laufe des Projektes von beiden Interessensparteien bewertet werden. Ergebnis der Beurteilung ist der gegenwärtige Reifegrad, welcher der schlechtesten Bewertung der einzelnen Messkriterien entspricht. [VDA 2010]

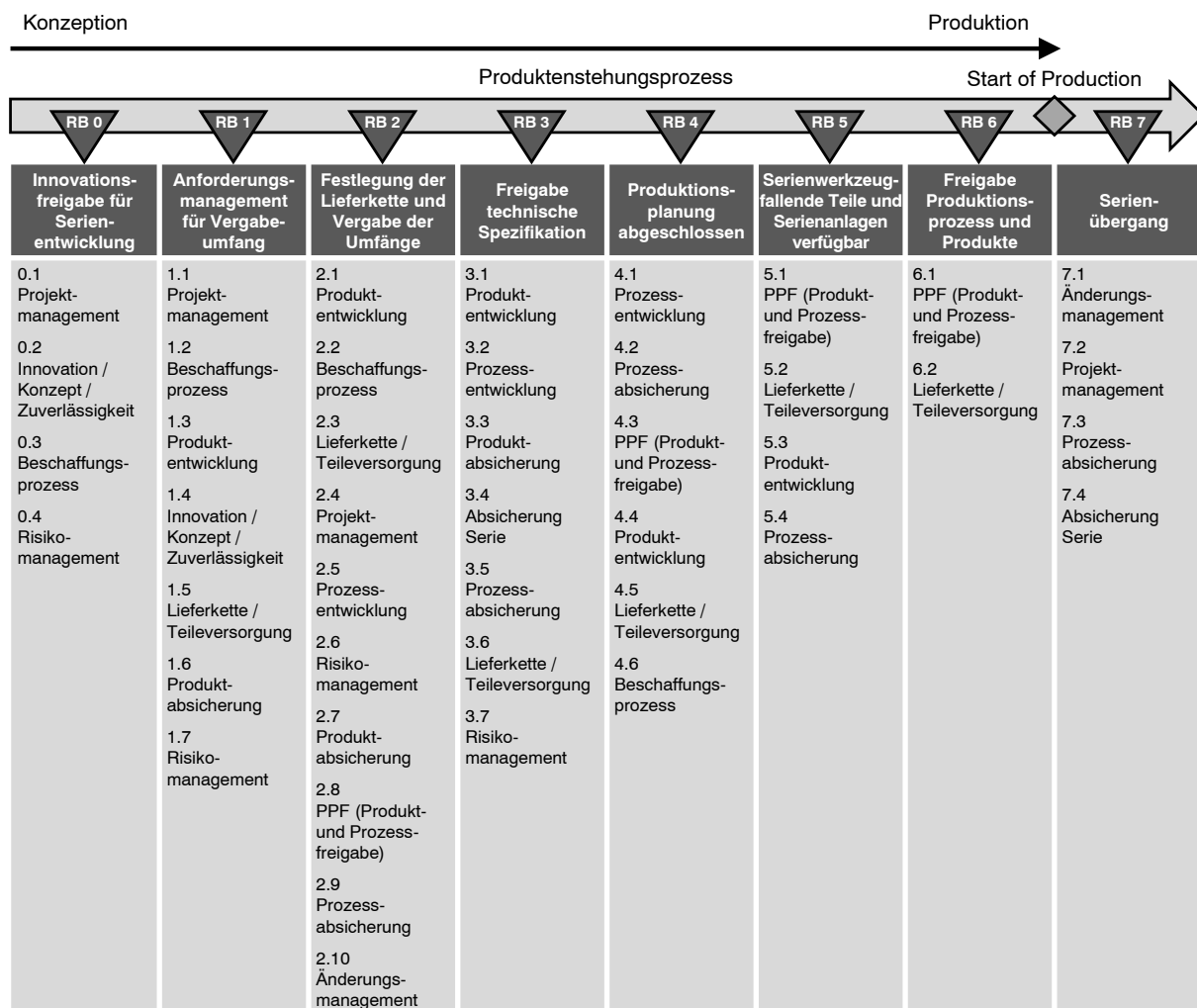


Bild 8: Reifegradphasen für die Absicherung von Neuteilen [VDA 2010]

2.2.6 Spezifische Reifegradmodelle

Reifegradmodelle für in Entwicklung befindliche Fertigungsprozesse sind für den Fortlauf der Arbeit von besonderer Bedeutung, weshalb eine Übersicht derzeit vorhandener und relevanter Stufenmodelle folgt.

EFQM - Process Survey Tools

Die in Partnerschaft mit der „European Foundation for Quality Management (EFQM)“ von dem Unternehmen „Philips“ bereitgestellten „Process Survey Tools (PST)“ stellen ein Instrumentarium zur Ermittlung und Steigerung des Reifegrads unterschiedlicher, bestehender Geschäfts- und Fertigungsprozesse eines Unternehmens dar. Für folgende Prozessgebiete werden die PST angeboten:

- Manufacturing Process Management
- Guide For Supply Chain Management
- Human Resource Management
- Marketing and Sales
- Finance
- Facility Management Process
- Purchasing Process Management

In allen Fällen identifiziert das jeweilige PST für das betrachtete Prozessgebiet Sub-Elemente und ordnet diese zehn Reifegradstufen mit ansteigenden Anforderungen zu. Um eine nächsthöhere Reifegradstufe zu erreichen, müssen alle Kriterien der vorhergehenden Stufen vollständig erfüllt sein. Somit stellen die PST eine Möglichkeit für Unternehmen dar, mittels Selbstbewertung sowohl den Reifegrad spezifischer Prozesse zu ermitteln und darauf basierend zu verbessern als auch Benchmarkings mit Partnern innerhalb oder außerhalb der Organisation durchzuführen. [EFQM 2004]

Technology / Manufacturing Readiness Level

Um die Wirtschaftlichkeit der Entwicklung und Herstellung militärischer Technologien zu gewährleisten, wird ein ursprünglich von der „National Aeronautics and Space Administration (NASA)“ entwickeltes Modell zur Bewertung der Technologiereife [Sadin 1988] vom Verteidigungsministerium der Vereinigten Staaten von Amerika (Department of Defense (DoD)) bereitgestellt [DoD 2011]. Das Reifegradmodell orientiert sich - ähnlich wie das Modell zur Reifegradabsicherung nach VDA - an dem Entwicklungspfad des betrachteten Objekts und definiert neun situationsabhängige „Technology Readiness Level (TRL)“.

Mit der Technologieentwicklung geht die Neu- bzw. Umgestaltung des Fertigungsprozesses einher, der in gleicher Weise für den wirtschaftlichen Erfolg der Technologie von Relevanz ist. Das DoD hat ein weiteres Reifegradmodell mit zehn „Manufacturing Rea-

diness Levels (MRL)“ konzipiert, womit der Entwicklungsstand eines Fertigungssystems zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden kann [DoD 2011 a] (Tabelle 6).

TRL	Beschreibung
1	Grundprinzip beobachtet und berichtet.
2	Technologiekonzept und / oder -anwendung formuliert.
3	Analytische und experimentelle Konzeptvalidierung kritischer Funktionen / Merkmale.
4	Komponenten- und/oder Versuchsaufbauvalidierung in Laborumgebung.
5	Komponenten- und/oder Versuchsaufbauvalidierung in relevanter Umgebung.
6	Modell- oder Prototypdemonstration des (Sub-) Systems in relevanter Umgebung.
7	Prototypdemonstration des Systems in Einsatzumgebung.
8	System abgeschlossen und durch Test und Demonstration qualifiziert.
9	Systemeignung durch erfolgreichen Betriebseinsatz nachgewiesen.
MRL	Beschreibung
1	Grundlegende Implikationen auf den Fertigungsprozess identifiziert.
2	Fertigungskonzepte identifiziert.
3	Fertigungskonzeptvalidierung entwickelt.
4	Fähigkeit, die Technologie in einer Laborumgebung herzustellen.
5	Fähigkeit, Prototypkomponenten in produktionsnaher Umgebung herzustellen.
6	Fähigkeit, Prototyp- (Sub-) System in produktionsnaher Umgebung herzustellen.
7	Fähigkeit, (Sub-) Systeme oder Komponenten in produktionsnaher Umgebung herzustellen.
8	Fähigkeit der Pilotlinie nachgewiesen. Bereit für Produktionsanlauf.
9	Produktionsanlauf nachgewiesen. Fähigkeit für Produktionsstart gegeben.
10	Produktion mit maximaler Ausbringungsmenge demonstriert. Schlanke Produktionspraktiken und kontinuierliche Prozessverbesserung etabliert.

Tabelle 6: Beschreibung der Reifegradstufen für Technologien (TRL) und Fertigungsprozesse (MRL) [DoD 2011, DoD 2011a]

Die Entwicklungspfade für Technologien und Fertigungsprozesse sind dem Beschaffungsprozesses des DoD integriert (Bild 9). Sowohl der Technologie- als auch der Fertigungsreifegrad werden mittels kriterienbasierter Fragenkataloge bewertet.

Entwicklungsphasen

Material Solution Analysis	Technology Development	Engineering and Manufacturing Development	Production and Development	Operations and Support
----------------------------	------------------------	---	----------------------------	------------------------

Technology Readiness Levels

TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5	TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
------	------	------	------	------	------	------	------	------

Manufacturing Readiness Levels

MRL1	MRL2	MRL3	MRL4	MRL5	MRL6	MRL7	MRL8	MRL9	MRL10
------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

Bild 9: Beziehung zwischen TRL, MRL und Beschaffungsphasen nach DoD [DoD 2008, DoD 2011 a]

Predictive CMM for Computational Modeling and Simulation

Der zunehmende Einsatz rechnergestützter Modellierung und Simulation in der Entwicklung von Systemen erfordert deren Validierung im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Glaubwürdigkeit. Das auf dem CMMI und der TRL des DoD basierende „Predictive Capability Maturity Model (PCMM) for Computational Modeling and Simulation“ dient einer ebensolchen Beurteilung und Verbesserung von ingenieursnahen Modellierungs- und Simulationspraktiken anhand der Reifegradermittlung. Dazu werden sechs elementare Aspekte einer Modellierung und Simulation deduziert und zur Beurteilung herangezogen [Oberkampf 2007]:

- Darstellungs- und Geometrietreue
- Physik- und Material-Modelltreue
- Codeverifizierung
- Lösungsverifizierung
- Modellvalidierung
- Unsicherheitsquantifizierung und Sensitivitätsanalyse

Der Begriff Verifizierung stellt dabei den Prozess der Überprüfung dar, inwieweit das eingeführte Modell auch tatsächlich die Konzeptbeschreibung des Entwicklers darstellt. Validation hingegen bezeichnet den Prozess der Festlegung des Grades, bis zu dem ein Modell eine genaue Repräsentation der realen Welt von der Perspektive der beabsichtigten Anwendung darstellt. Im Idealfall erfolgt die Validierung bereits in der Spezifikationsphase, also virtuell oder auf dem Papier, ohne Kosten für Prototypen und Hardware zu verursachen. Die Verifizierung erfolgt dann in der Realisierungs- und Integrationsphase als Nachweis, dass die Forderungen erreicht wurden. [Oberkampf 2007]

Jeder der sechs Aspekte einer Modellierung und Simulation besitzt intrinsische Merkmale, an die diskrete Anforderungen gestellt werden, die wiederum vier Reifegradebenen mit charakteristischen Aussagen zugeordnet sind [Oberkampf 2007]:

- Stufe 0: Keine oder vereinzelte Bewertung der Genauigkeit und Vollständigkeit in Abhängigkeit von persönlicher Erfahrung und Beurteilung des Bewertenden
- Stufe 1: Vereinzelt informelle Bewertung der Genauigkeit und Vollständigkeit anhand interner Expertengruppen (peer-review)
- Stufe 2: Vereinzelt formelle Bewertung der Genauigkeit und Vollständigkeit anhand externer Expertengruppen
- Stufe 3: Formelle Bewertung der Genauigkeit und Vollständigkeit im Wesentlichen anhand unabhängiger, externer Expertengruppen

Die Bewertung des Reifegrads von Modellierungs- und Simulationspraktiken mit Hilfe des „Predictive CMM (PCMM)“ fördert die Kommunikation mit den Interessensgruppen und ermöglicht es, die Entwicklung des Reifegradverlaufs darzustellen und als Entscheidungsbasis zu nutzen [Oberkampf 2007].

2.3 Prinzipien der Reifegradanalyse

Das prinzipielle Ziel von Reifegradmodellen ist die Abbildung und Bereitstellung einer charakteristischen Merkmals- bzw. Indikatorbasis für ein spezifisches Betrachtungsobjekt und die Zuordnung der diskreten Merkmalsanforderungen zu Reifegradstufen, um die Vergleichsbewertung des Entwicklungsstands, das Herleiten von Handlungsempfehlungen und den internen bzw. externen Leistungsvergleich (Benchmark) zu ermöglichen [Bruin 2005, Iversen 1999, Röglinger 2012]. Demnach besitzen Reifegradmodelle entsprechend der Definition von Modellen (s. Kapitel 2.1.1) stets einen Originalbezug, indem die spezifischen Merkmale des Betrachtungsobjekts abgebildet werden (Bild 10). Dabei kann es vorkommen, dass Elemente des Betrachtungsobjektes nicht erfasst werden und unberücksichtigt bleiben. Durch die Zuordnung diskreter Anforderungen an die Merkmalsausprägungen zu Reifegradstufen werden Ordinalmerkmale mit einer Ordnungsbeziehung geschaffen, die eine nachvollziehbare Ermittlung des aktuellen Entwicklungsstandes vom Betrachtungsobjekt (bereits in frühen Entwicklungsphasen) ermöglichen. Die Bewertung erfolgt mittels Beobachtung des Betrachtungsobjekts und anschließendem Vergleich mit dem Reifegradmodell durch einen oder mehrere Bewerter bzw. Assessoren. Ist der Merkmalszustand eines Objekts äquivalent mit den Anforderungen einer Reifegradstufe x , stellt das Reifegradmodell inhärente Handlungsempfehlungen zur Zustandsverbesserung bereit, die den Anforderungen der Reifegradstufe $x+1$ entsprechen. Die einheitliche Basis an elementaren Bewertungsmerkmalen ermöglicht zudem die Durchführung von internen/externen Benchmarkings [Ahlemann 2005].

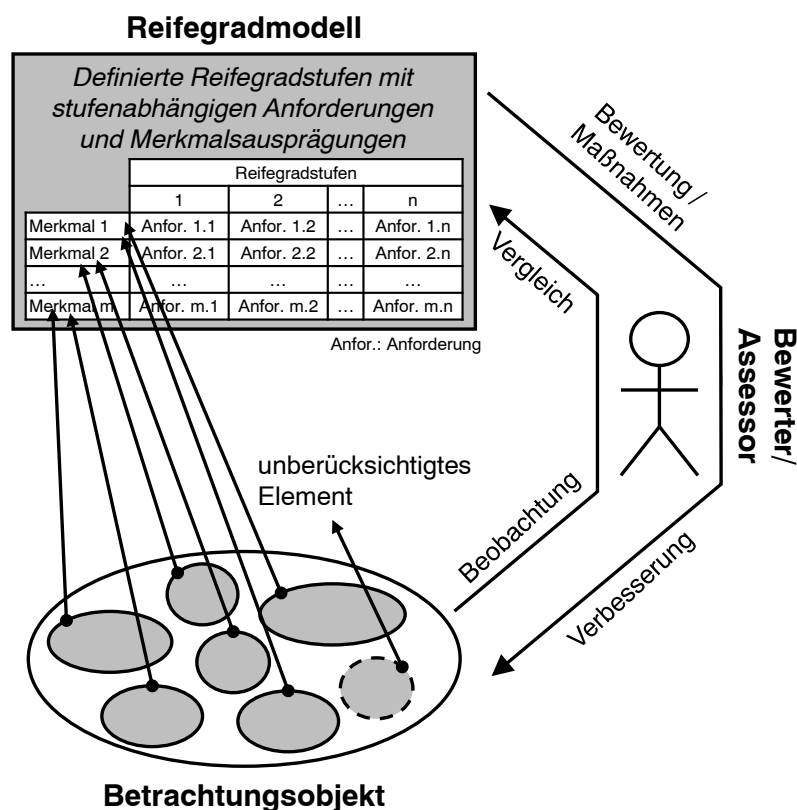


Bild 10: Prinzip von Reifegradmodellen

Eine systematische Anwendung von Reifegradmodellen unterstützt die Erhebung quantitativer Informationen zum Entwicklungsstand eines Betrachtungsobjekts durch den Vergleich mit der bereitgestellten Bewertungsbasis und ermöglicht damit sowohl eine verbesserte Kommunikation als auch nachvollziehbare Entscheidungsfindungen zur Prozess- und Ergebnisverbesserung [Woll 2007]. Eine zielorientierte und strukturierte Entwicklungsvorgehensweise wird damit gewährleistet. Darüber hinaus erfassen Reifegradmodelle das Wissen und die Praktiken zu einem Themengebiet in kompakter Weise und bieten eine flexible Erweiterungsmöglichkeit und Anpassbarkeit. Damit stellen Reifegradmodelle wiederum Referenzmodelle dar, indem sie den Anforderungen individueller Modellnutzer angepasst werden können. Einige Modelle bieten auch explizite Anpassungsmöglichkeiten mit methodischer Fundierung [Ahlemann 2005]. Zur Darlegung des Einsatzes und der Kommunikation nach außen bieten einige Reifegradmodelle (wie z. B. das CMMI) auch die Möglichkeit zur Zertifizierung.

Die Struktur von Reifegradmodellen kann prinzipiell in zwei Gruppen unterteilt werden:

- **Ablauforientierte Reifegradmodellstruktur:**
Der generische Entwicklungsablauf des Betrachtungsobjekts wird anhand von Phasen und Teilaktivitäten dargestellt und die Reifegradstufen sind in Abhängigkeit der innerhalb der Aktivitäten zu berücksichtigenden Anforderungen phasenspezifisch zugewiesen (z. B. TRL, MRL, VDA).
- **Merkmalbasierte Reifegradmodellstruktur:**
Die elementaren Merkmale des Betrachtungsobjekts werden systemisch deduziert und die entwicklungsbegleitenden Anforderungen an die Merkmalsausprägungen werden festgelegt. Der ermittelte Reifegrad eines jeden Merkmals wird zu einem Gesamtreifegrad aggregiert (z. B. CMMI, ISO 9004).

Reifegradmodelle können des Weiteren anhand ihres Betrachtungsobjektes unterschieden werden und beziehen sich im Grunde auf „Produkte“, „Prozesse (auch Fertigungsprozesse)“, „Personal“ oder „Organisationen“. Bild 11 fasst diese Objekte zusammen und gibt exemplarisch jeweils derzeit vorhandene Reifegradmodelle an.

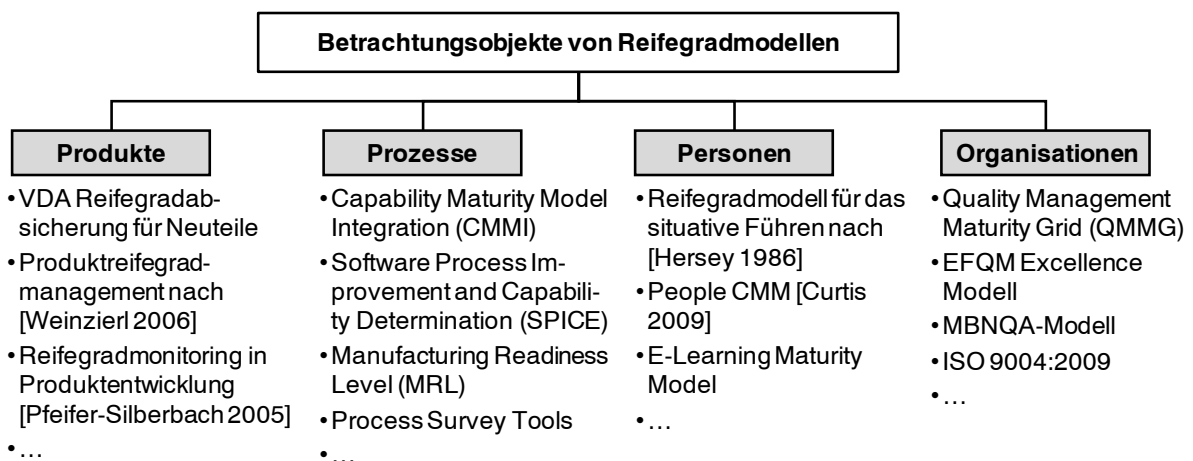


Bild 11: Prinzipielle Betrachtungsobjekte von Reifegradmodellen mit entsprechenden Beispielen

Eine weitere Dimension zur Unterteilung von Reifegradmodellen ist deren Anzahl an Reifegradstufen. Verfügbare Reifegradmodelle besitzen eine Mindestanzahl an drei Reifegradstufen. Eine geringere Stufenanzahl würde zu einer unzureichenden Differenzierung führen. Daher liegen prinzipiell drei bis n Reifegradstufen vor. Die unbestimmte maximale Anzahl an Stufen resultiert aus der ablauforientierten Reifegradmodellstruktur. Bild 12 verdichtet die drei eruierten Dimensionen von Reifegradmodellen.

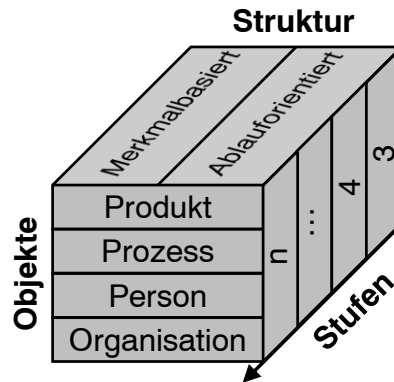


Bild 12: Prinzipielle Reifegradmodellstruktur, -objekte und -stufen

Der Ablauf einer Reifegradbewertung (auch Assessment genannt) nach dem Plan-Do-Check-Act-Prinzip erfolgt zu einem gegebenen Zeitpunkt und beginnt mit der Abgrenzung des zu beurteilenden Bereichs (Bild 13). Nach der anschließenden Auswahl eines kompatiblen Reifegradmodells ist die Bewertungsstrategie festzulegen. Dies ist in drei verschiedenen Arten möglich:

- **Self-Assessment (Selbstbewertung) durch interne Mitarbeiter:**
Dieser Bewertungsablauf erfordert einen geringen Aufwand. Die selbstständige Erarbeitung zusätzlicher Informationen führt zwar unternehmensintern zu einer hohen Akzeptanz [Woll 2006], jedoch geht die subjektive Bewertung mit einer hohen Unsicherheit einher. Ein Benchmarking ist nur bedingt möglich.
- **Self-Assessment durch interne Mitarbeiter mit Support externer Assessoren:**
Die gemeinsame Bewertung durch fachkundige Mitarbeiter und methodisch erfahrene Assessoren kann eine gleichwertige Akzeptanz der Ergebnisse bei vergleichsweise geringem Aufwand und geringer Unsicherheit bewirken.
- **Unabhängiges Assessment durch externe Assessoren:**
Diese Bewertungsart besitzt zwar eine geringe Unsicherheit, ist jedoch aufgrund des erschwerten Informationsflusses zu den Assessoren sehr aufwendig und kann unternehmensintern zu einer geringen Akzeptanz der Ergebnisse führen.

Reifegradrelevante Informationen sind durch das Zusammentragen von Nachweisen und Dokumenten als Grundlage für die Reifegradbewertung zu strukturieren. Anhand der festgelegten Bewertungsstrategie und den Randbedingungen des ausgewählten Reifegradmodells erfolgen die Durchführung der Bewertung und die Ermittlung des Reifegrads. Zur Analyse der Bewertung werden die Reifegraddaten verdichtet und adäquat visualisiert, auf deren Basis Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

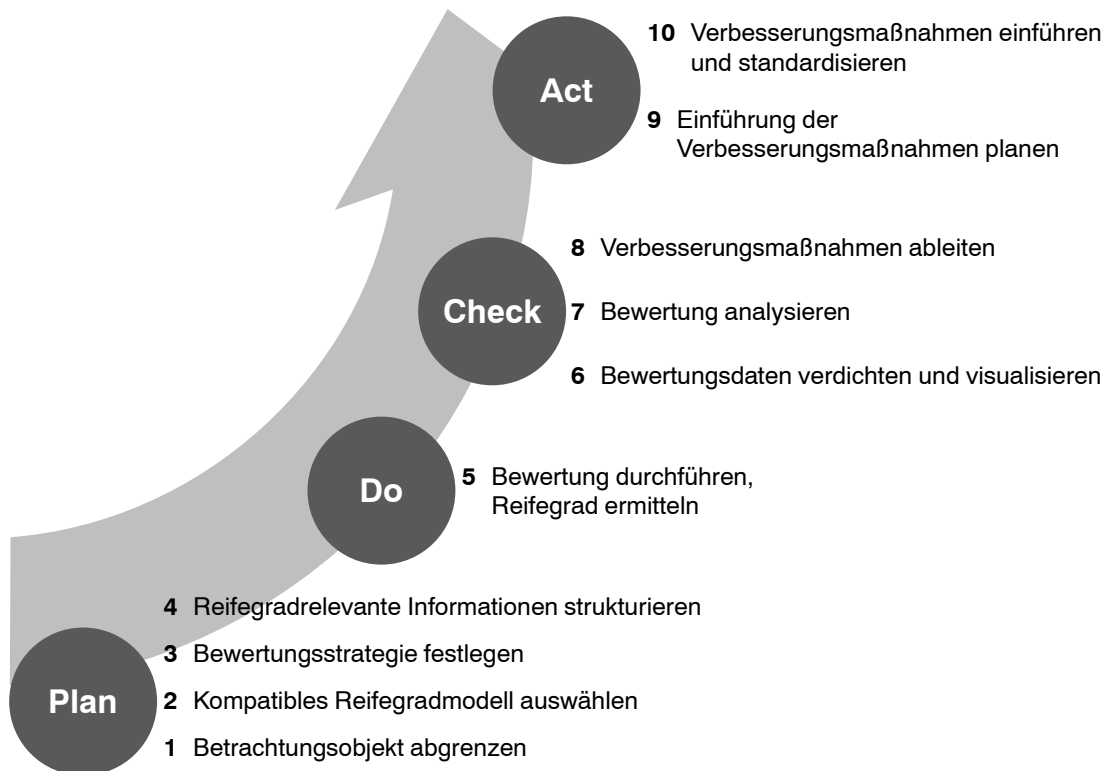


Bild 13: Prinzipieller Ablauf der Reifegradbewertung (in Anlehnung an [ISO 9004])

Abschließend ist im Sinne einer effektiven Etablierung von Maßnahmen deren Einführung gezielt zu planen und umzusetzen. Die Standardisierung der Maßnahmen soll deren Wirkung und Bestand gewährleisten.

2.4 Ansätze zur Auslegung neuer Reifegradmodelle

Ein kompatibles Reifegradmodell als Basis für das zu bewertende Betrachtungsobjekt, entsprechend der Vorgehensweise in Bild 13, ist trotz einer großen Auswahl von Reifegradmodellen [Bruin 2005] nicht immer gegeben. Es kann vorkommen, dass bestehende Reifegradmodelle aufgrund ihrer generischen Ausrichtung oder der berücksichtigten Merkmale die Anforderungen der Modellnutzer nicht erfüllen können, weshalb die methodische Entwicklung anwendungsspezifischer Reifegradmodelle erforderlich wird. Prinzipiell werden Reifegradmodelle deskriptiv erfahrungsbasiert oder mittels systematischer Beobachtungen konzipiert und durch weiterführende Reflexion sowie explorativ in präskriptive (Ideal-) Modelle überführt [Parsch 2010]. In der Literatur existieren unterschiedliche Ansätze zur Auslegung neuer Reifegradmodelle. Auf eine Auswahl der am meisten verbreiteten und aufeinander aufbauenden Vorgehensweisen wird im Folgenden näher eingegangen.

[Bruin 2005] definiert ein sechsheufiges Vorgehensmodell zur Reifegradmodellentwicklung auf Basis von Erkenntnissen, die bei der Konstruktion des „Business Process Maturity Model“ [OMG 2008, Harmon 2004, Rosemann 2004] und des „Knowledge Management Capability Assessment“ [Freeze 2005] gewonnen wurden (Bild 14).

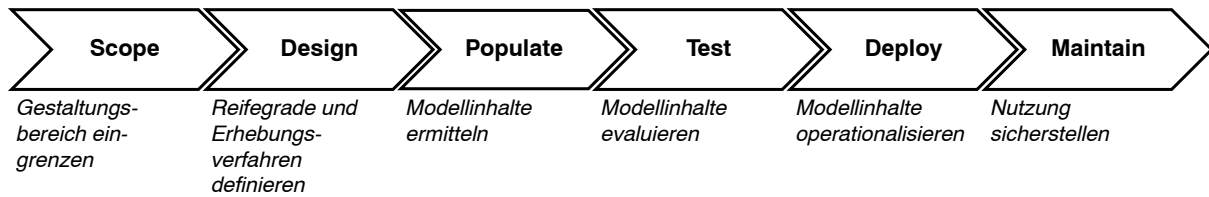


Bild 14: Vorgehensweise zur Reifegradmodellentwicklung [Bruin 2005]

Im ersten Schritt werden der Gestaltungsbereich und die wichtigsten Interessensgruppen des Modells bestimmt. Die Basis einer Eingrenzung bilden eine umfangreiche Literaturrecherche und Erfahrungen in den definierten Bereichen. Mit Hilfe der Literaturanalyse werden in der Design-Phase sowohl die Reifegrade in einer Top-Down-Modellstruktur mit den zugehörigen Anforderungen und Messgrößen (Merkmalen) definiert, als auch das Erhebungsverfahren mit der Auswahl der zur Reifegradevaluation benötigten Daten bestimmt. Im Anschluss erfolgt die Ermittlung der Modellinhalte für die Reifegradbewertung, indem für die ermittelten Gestaltungsobjekte jeweils eine Frage gebildet und in einem Fragenkatalog zusammengetragen wird. Eine ausschlaggebende Bedeutung besitzt die Test-Phase der Reifegradmodellentwicklung, worin die Modellinhalte hinsichtlich Validität, Reliabilität und Generalisierbarkeit mittels gängiger Verfahren wie Fokusgruppensitzungen, Fallstudien, Literaturanalysen oder Interviews geprüft werden sollen. Zur Verbesserung der Akzeptanz und zur Standardisierung des Reifegradmodells ist es innerhalb und außerhalb der Entwicklungsumgebung anzuwenden. Letztlich ist eine regelmäßige Aktualisierung des Reifegradmodells zur Sicherstellung einer dauerhaften Zweckmäßigkeit und damit Nutzung unerlässlich. [Bruin 2005]

Aufbauend auf den Arbeiten von [Bruin 2005] wird in [Becker 2009] eine detailliertere Vorgehensweise für die Entwicklung von Reifegradmodellen dargelegt und im Bereich des IT-Managements angewendet. Das Prozedere umfasst acht Schritte und beginnt mit der Problemdefinition (Bild 15), bei der der zu untersuchende Bereich und die Nutzergruppen des Reifegradmodells zu bestimmen sind. Der Bedarf zur Neuentwicklung eines Reifegradmodells kann innerhalb der nächsten Phase durch die Analyse bestehender Reifegradmodelle ermittelt werden. Die Festlegung der Entwicklungsstrategie unterscheidet zwischen einer Neuentwicklung, Weiterentwicklung oder Zusammenführung mehrerer Reifegradmodelle. Von wesentlicher Bedeutung ist die Phase der iterativen Reifegradmodellentwicklung, da hier die Modellkonstruktion mittels mehrfacher Durchläufe stattfindet. Nach Definition der Stufen und Merkmalsausprägungen zum Erreichen dieser Stufen ist der Modellbereich zu gestalten und hinsichtlich Korrektheit, Aufbau und Rationalität zu prüfen. Eine adressatengerechte Weitergabe des Reifegradmodells kann z. B. durch dokumentierende Handbücher oder die computergestützte Bereitstellung der Ergebnisse anhand einer Software gewährleistet werden. Die Implementierung der Transfermittel stellt dem Nutzer das Reifegradmodell über die geplanten Kommunikationsmittel zur Verfügung. In der finalen Phase der Evaluationsdurchführung wird ermittelt, ob das entwickelte Reife-

gradmodell den avisierten Nutzen erzielt und die Verbesserung der anfänglichen Problemstellung effizient unterstützt. Eine positive Evaluation führt zur Weiterentwicklung des Reifegradmodells, während eine negative Bewertung zur Ablehnung des Reifegradmodells führt. [Becker 2009]

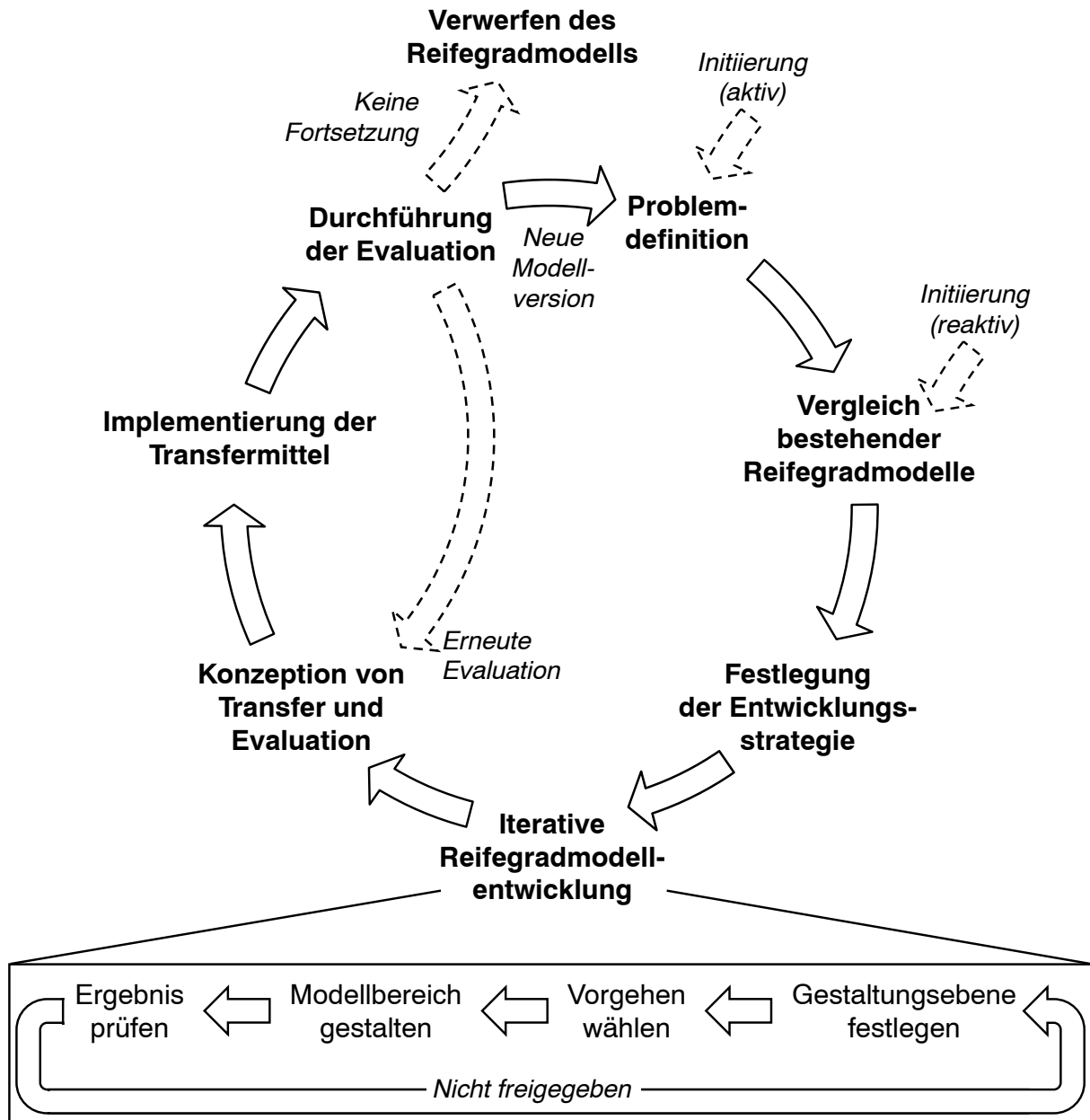


Bild 15: Vorgehensweise zur Reifegradmodellentwicklung in Anlehnung an [Becker 2009]

Auf Basis der Vorgehensweisen von [Bruin 2005] und [Becker 2009] strukturiert [Mettler 2010] einen siebenstufigen Prozess für die Reifegradmodellentwicklung nach dem Bottom-Up-Prinzip, bei dem erst die Modellinhalte mit Anforderungen sowie Maßnahmen definiert und anschließend die Reifegrade gestaltet werden (Bild 16). Die hierbei anfängliche Eingrenzung des Gestaltungsbereichs ist methodisch nicht näher erläutert und geht von einer Definition des zu betrachtenden Bereichs aus. Anschließend sind die Modellinhalte durch Ermittlung der Gestaltungsdimensionen, -ebenen und -objekte anhand von Literaturrecherchen zu definieren.

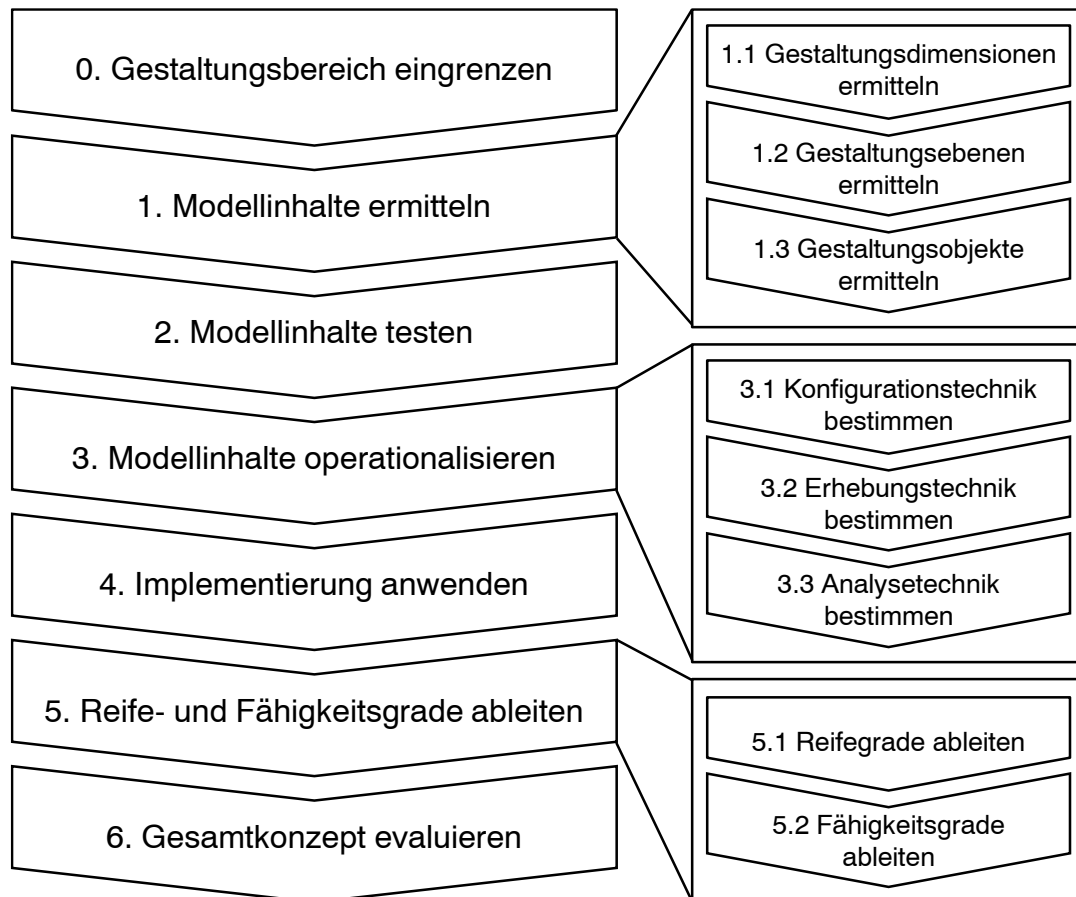


Bild 16: Vorgehensweise zur Reifegradmodellentwicklung nach [Mettler 2010]

Für eine erste Bewertung sind die ermittelten Modellinhalte von Interessensgruppen hinsichtlich Relevanz, Konsistenz, Verbindlichkeit, Vollständigkeit, Zuverlässigkeit, Nachhaltigkeit und Aktualität zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Die Operationalisierung der Modellinhalte umfasst das Entwerfen von Regeln und Formularen, um die zu erhebenden Daten mittels Analyseverfahren in visueller und konzentrierter Form darstellen zu können. Im nächsten Schritt ist zur weiteren Evaluation des Reifegradmodells dessen Umsetzbarkeit zu demonstrieren. Das Ableiten von Reife- und Fähigkeitsgraden soll sowohl statische als auch dynamische Gestaltungshinweise ermöglichen. Im letzten Schritt sind die ermittelten Modellinhalte, die Implementierung sowie das Erhebungsverfahren eingehend auf Adäquanz und Praktikabilität zu evaluieren. Bei unzureichender Anforderungserfüllung ist das Reifegradmodell entsprechend anzupassen. [Mettler 2010]

2.5 Informationsunsicherheit in Reifegradmodellen

2.5.1 Kategorisierung von Informationsunsicherheiten

Durch das den Reifegradmodellen innewohnende Verkürzungsmerkmal nach [Stachowiak 1973] (s. Kapitel 2.1.1) können reifegradrelevante Merkmale, Kriterien und Indikatoren betrachteter Objekte nur unvollständig abgebildet werden (Bild 10). Daher gilt es für objektivierte Resultate die Informationsunsicherheit bei der Reifegrad-

bewertung durch die Bestimmung von Intervallen, innerhalb derer der zu erwartende Wert liegt, zu berücksichtigen. Eine quantifizierte Ermittlung der Informationsunsicherheit schafft zusätzliche Kenntnis über die Reifegradbeurteilung und steigert die Zuverlässigkeit sowie Differenzierbarkeit der Ergebnisse. Der Begriff der Informationsunsicherheit wird hierbei synonym zum Begriff der Ergebnisunsicherheit verwendet:

„Die Ergebnisunsicherheit (Informationsunsicherheit) ist ein geschätzter Betrag zur Kennzeichnung eines Wertebereichs, innerhalb dessen der Bezugswert liegt, wobei dieser je nach Festlegung oder Vereinbarung der wahre Wert oder der Erwartungswert sein kann.“ [DIN 55350]

Zur Klassifizierung von Unsicherheiten existieren mehrere Ansätze, die kaum voneinander abgegrenzt werden können [Bonano 1995, Merz 2011]. Daher werden zur Charakterisierung der Informationsunsicherheiten in der Reifegradbewertung unterschiedliche relevante Betrachtungsweisen herangezogen. Im Bereich der modellbasierten Entscheidungsunterstützung werden Informationsunsicherheiten nach [Walker 2003] in drei Ebenen aufgeteilt:

- Ort (engl.: location)
- Ausprägung (engl.: level)
- Erscheinungsform (engl.: nature)

Die Anwendung von Reifegradmodellen mit ihren Empfehlungen zur Auswahl adäquater Verbesserungsmaßnahmen stellt eine Art der Entscheidungsunterstützung auf Basis von Modellen dar. Orte bzw. Quellen der Informationsunsicherheit können der Modellierer, der Bewerter, das Betrachtungsobjekt oder prinzipiell das „verkürzte“ Reifegradmodell sein (Bild 17). Beim Modellierer und Anwender entstehen Unsicherheiten durch ihre subjektiven Beobachtungen und vorhandene bzw. nichtvorhandene Kenntnisse, die zu einem eingeschränkten Blick auf das Betrachtungsobjekt führen. Das Betrachtungsobjekt an sich kann ebenfalls eine prinzipielle Informationsunsicherheit aufweisen, wenn bspw. die zur Verfügung stehenden reifegradrelevanten Informationen unsicherheitsbehaftet sind, wie in frühen Phasen der entwicklungsbegleitenden Reifegradbewertung (s. Kapitel 7.1).

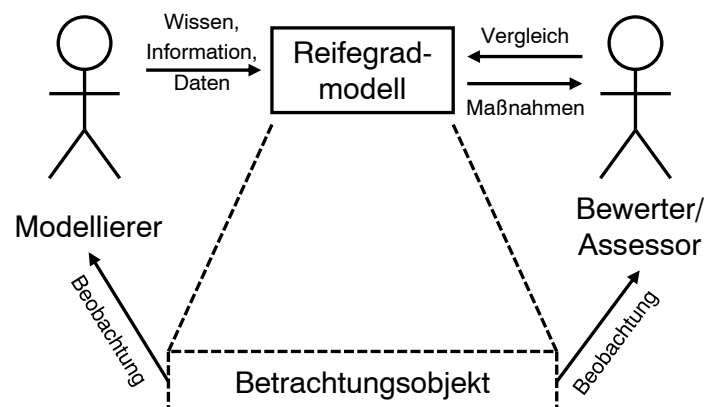


Bild 17: Orte der Informationsunsicherheit bei Reifegradmodellen

Die Ausprägung der Informationsunsicherheit nach [Walker 2003] trifft eine Aussage über deren Betrag. Hierzu werden folgende diskrete Unsicherheitsstufen zwischen den Grenzen des „deterministischen Wissens“ und der „totalen Unkenntnis“ bereitgestellt:

- Statistische Unsicherheit
- Szenario-Unsicherheit
- Anerkannte Unkenntnis

Die Erscheinungsform der Informationsunsicherheit bezieht sich auf die grundlegend zu unterscheidenden aleatorischen und epistemischen Unsicherheitsarten [O'Hagan 2004, Makowski 2006, Helton 1993]. Die aleatorische Unsicherheit (lat.: aleatorius, „zum Würfelspieler gehörend“ [Duden 2014a]) beschreibt die inhärente Variabilität (natürliche Zufälligkeit) eines Systems. Die epistemische Unsicherheit (griech.: émpeiros, „erfahren, kundig“ [Duden 2014b]) ergibt sich aus der unvollständigen Kenntnis über ein System und spiegelt die Subjektivität in Entscheidungen wider [Merz 2011]. Der epistemischen Unsicherheit wird auch die linguistische Unschärfe zugeordnet, die sich durch Unkenntnis in Bezug auf Begrifflichkeiten bezieht und dadurch Interpretationsspielraum einräumt [Zimmermann 1993]. Im Bereich der multikriteriellen Entscheidungsanalyse, zu der die Anwendung von Reifegradmodellen auf Basis mehrerer Merkmale des Betrachtungsobjekts ebenfalls Analogien besitzt, wird die Informationsunsicherheit in die Kategorien

- Datenunsicherheiten,
- Parameterunsicherheiten und
- Modellunsicherheiten

untergliedert [Merz 2011, Bertsch 2007, Morgan 2000]. In Anlehnung an [Bertsch 2007, Merz 2011] zeigt Bild 18 die Elemente der genannten Kategorien in Bezug auf Reifegradmodelle. Innerhalb der Datenunsicherheiten sind zum einen die statistische Abweichung sowie die linguistische Unschärfe erfasst. Die Berücksichtigung der subjektiven Einschätzung als eine weitere Ausprägung der Datenunsicherheiten ist dem klassischen Kommunikationsmodell mit seinem Sender-Empfänger-Prinzip angelehnt [Shannon 1948]. Während linguistische Unschärfen den Beschreibungen im Reifegradmodell zuzuordnen sind, resultieren Unsicherheiten durch die subjektive Einschätzung aus der Interpretation der Erläuterungen im Reifegradmodell durch den Anwender. Parameterunsicherheiten können Abweichungen aufgrund der für jedes Reifegradkriterium festgelegten Gewichtungen darstellen oder die Parametrisierung der Unsicherheit betreffen, welche sich auf die ausgewählte Modellierungsmethode bezieht. Im Falle einer computergestützten Umsetzung von Reifegradmodellen sind hierbei z. B. Rundungsfehler zu berücksichtigen. Die Modellunsicherheiten erfassen die adäquate Auswahl der Indikatoren und Merkmale des Betrachtungsobjekts sowie die Struktur des Reifegradmodells. Die Aggregation verdichtet einzeln ermittelte Reifegradwerte zu einem Gesamtreifegrad und kann in Abhängigkeit der ausgewählten Methode ebenfalls einen Unsicherheitsfaktor bilden.

Unsicherheiten bei Reifegradmodellen		
Datenunsicherheiten	Parameterunsicherheiten	Modellunsicherheiten
Statistische Abweichungen	Gewichtung der Einflussfaktoren	Indikatorenauswahl
Linguistische Unschärfe	Parametrisierung der Unsicherheit	Modellstruktur
Subjektive Einschätzung	Computergestützte Umsetzung	Aggregationsmethode

Bild 18: Ausprägungen der Unsicherheiten (nach [Bertsch 2008, Merz 2011])

2.5.2 Ansätze zur Berücksichtigung der Informationsunsicherheit in der Reifegradbewertung

Die modellinhärente Informationsunsicherheit findet nur in der Anwendung weniger, ressortspezifischer Reifegradmodelle in rudimentärer und divergenter Weise Berücksichtigung. Weit verbreitete Modelle wie CMMI oder SPICE führen eine solche Betrachtung in der Bewertung des Reifegrads (nach den Vorgaben) nicht durch.

In [Altrock 1994, Nieder 1995] wird zur multikriteriellen Entscheidungsfindung im Rahmen einer fortlaufenden Bewertung und Dokumentation des aktuell erzielten Reifegrades einer Entwicklung von Nutzfahrzeugkomponenten die Anwendung von Fuzzy-Logic zur Berücksichtigung der Informationsunsicherheit empfohlen. Der jeweilige Wert der definierten Reifegradindikatoren wird von den zuständigen Mitarbeitern in einem Intervall zwischen 0% und 100% subjektiv geschätzt. Die geschätzten Werte dienen als Eingangsgrößen für ein Fuzzy-System und werden mittels Wenn-Dann-Regeln über Teilreifegrade zur Ausgangsgröße, dem Produktreifegrad, aggregiert. [Altrock 1994, Nieder 1995]

Mit der Optimierung von Entwicklungsprozessen durch den Einsatz der Reifegradanalyse beschäftigt sich [Müller 2007] und schafft dazu ein entsprechendes Rahmenwerk. Der Entwicklungsstand wird dabei in die zwei Perspektiven „realer Reifegrad“ und „digitaler Reifegrad“ aufgeteilt, die nochmals durch weitere Reifegrade und verschiedene Sichten beschrieben werden können (Bild 19). Der digitale Reifegrad resultiert aus der Analyse eines digitalen Produktmodells. Der reale Reifegrad wird durch die Untersuchung realer Elemente ermittelt. Die Gewichtung der jeweiligen Reifegrade ist von den Benutzern festzulegen. Zur Reifegradermittlung wird auf den Ansatz von [Derichs 1997] aufgebaut, wonach im Rahmen des Informationsmanagements im Entwicklungsprozess unsichere Informationen grundsätzlich in inhaltliche Unsicherheiten und Kontextunsicherheiten aufgeteilt werden können. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten wird ein unter anderem vom zeitlichen Projektab-

schnitt abhängiger Unsicherheitsfaktor in eine Formel für die Bewertung des Reifegrads implementiert, welcher in einer frühen Phase einen kleineren Wert besitzt als in einer späten Phase. Die Evaluation des Unsicherheitsfaktors ist abschnittsweise vom Benutzer durchzuführen [Müller 2007].

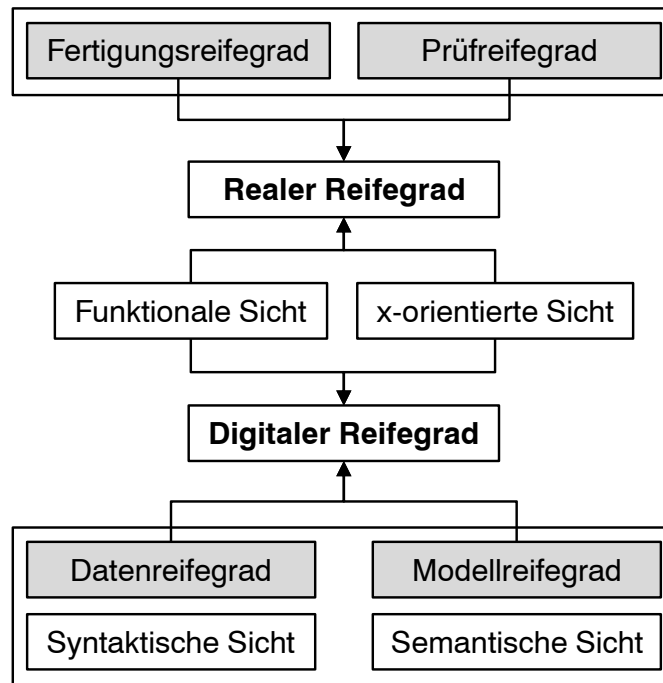


Bild 19: Reifegradbetrachtung nach [Müller 2007]

Innerhalb der Richtlinie zum „PCMM“ (s. Kapitel 2.2.6) wird vorgeschlagen, für Subsysteme ermittelte Reifegradwerte zu einem Gesamtreifegrad in Form eines Tripels (auch 3-Tupel genannt) zu aggregieren. Das vollständige Ergebnis der Reifegradaanalyse umfasst somit den minimalen, durchschnittlichen und maximalen Wert der Teilreifegrade, wodurch den Entscheidungsträgern eine breitere Informationsbasis zur Verfügung gestellt wird. [Oberkampff 2007]

Für das nachhaltige Wertschöpfungsmanagement (engl.: Sustainable Supply-Chain-Management) wird in [Bleck 2011] die Reifegradberechnung in einem eigens dafür entwickelten Reifegradmodell mit fünf Stufen beschrieben. Die Berechnung des Reifegrades erfolgt für jeden einzelnen Prozess des Wertschöpfungsmanagements. Um die Unsicherheiten einer quantitativen Auslegung sprachlich unscharfer Begriffe sowie der Allokation dieser Antwortmöglichkeiten zu einer Reifegradstufe zu modellieren, wird die Fuzzy-Logic verwendet. Dazu werden die Reifegradbewertungen einzelner Teilnehmer mit einer per Zufallszahlen generierten Gaußverteilung multipliziert, die die Standardabweichung $\sigma \approx 0,05$ und den Mittelwert $\mu \approx 1$ besitzt. Auf diese Weise werden die so genannten Fuzzy-Antwort-Scores generiert, die Fuzzy-Zahlen entsprechen, und für die Berechnung der durchschnittlichen Prozessreifegrade herangezogen. Durch diese Vorgehensweise soll die linguistische Unsicherheit adäquater berücksichtigt werden, indem die quantitative und damit vermeintlich genaue Bewertung relativiert wird. [Bleck 2011]

2.5.3 Auswahl einer Methode zur Modellierung der Unsicherheit

Für eine angemessene Darstellung der Unsicherheiten in der Reifegradbewertung kann die Vorgehensweise nach [Pohl 1996] zur Auswahl einer Methode für die prinzipiell aleatorischen und epistemischen Unsicherheitsarten herangezogen werden (Bild 20). Die der aleatorischen Unsicherheit zugehörige stochastische Abweichung kann mit der Wahrscheinlichkeitstheorie abgebildet werden, indem üblicherweise ein Ereignis und die dazugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit zu bestimmen sind. Erstes wird durch eine zweiwertige Logik wiedergegeben: Das Ereignis kann eintreten oder nicht. Die Aussage über die Wahrscheinlichkeit nimmt prinzipiell einen numerischen Wert zwischen 0 und 1 an, wodurch eine Sicherheit und Genauigkeit suggeriert wird [Zimmermann 1993]. Die Wahrscheinlichkeitstheorie beschreibt demnach die Unsicherheit des Eintretens eines bestimmten Ereignisses im Rahmen eines Zufallsexperiments.

Um stochastische Fehler untersuchen zu können, ist es notwendig, über zufällige und voneinander unabhängige Daten zu verfügen. Betrachtet man die Reifegradermittlung als einen Messprozess des Entwicklungsstands, könnte auch der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) zur methodischen Analyse, Ermittlung und Angabe der Unsicherheit herangezogen werden. Allerdings bezieht sich der GUM primär auf stochastische Unsicherheiten auf Basis frequentistischer Daten oder auf modellhafte Daten auf Basis von Herstellerangaben. Auch die Anwendung der Methode B nach GUM, welche die Messunsicherheit mit anderen Mitteln als der statistischen Analyse berechnet, berücksichtigt ausschließlich aleatorische Unsicherheiten. Epistemische Unsicherheiten bleiben außen vor. Im Gegensatz zur Zustandsanalyse einer Maschine unter Berücksichtigung der Messunsicherheit auf Basis stochastischer Daten sind Entwicklungsprozesse durch den hohen kreativen Arbeitsanteil hochdynamische Vorgänge mit stets wechselnden Einflussparametern. Deren Entwicklungsstand ist einem fortwährenden Wandel unterzogen, wodurch die mehrmalige, zeitgleiche Evaluierung des Reifegrads keine unabhängigen Ergebnisse und damit keine statistische Aussagesicherheit gewährleisten würde [Tizhoosh 1998]. Darüber hinaus ist eine mehrmalige Bewertungsvorgehensweise praktisch nicht realisierbar, da eine häufig wiederholte Reifegradermittlung bei den Bewertenden durch den entstehenden hohen Aufwand zu einer Stagnation der Entwicklungsarbeit und damit zu einer Ablehnung der Reifegradanalyse als Steuerungsinstrument führen kann.

In der Reifegradbewertung sind vorrangig unscharfe Daten vorhanden, die den epistemischen Unsicherheiten zuzuordnen sind. Die Modellierung und Berücksichtigung des Unsicherheitswertes wird daher mit Hilfe der Fuzzy-Set-Theorie ausgeführt, da sie sich durch die mehrwertige Logik zum Abbilden dieser Arten von Unsicherheiten als geeignet herausgestellt hat [Schwan 1999].

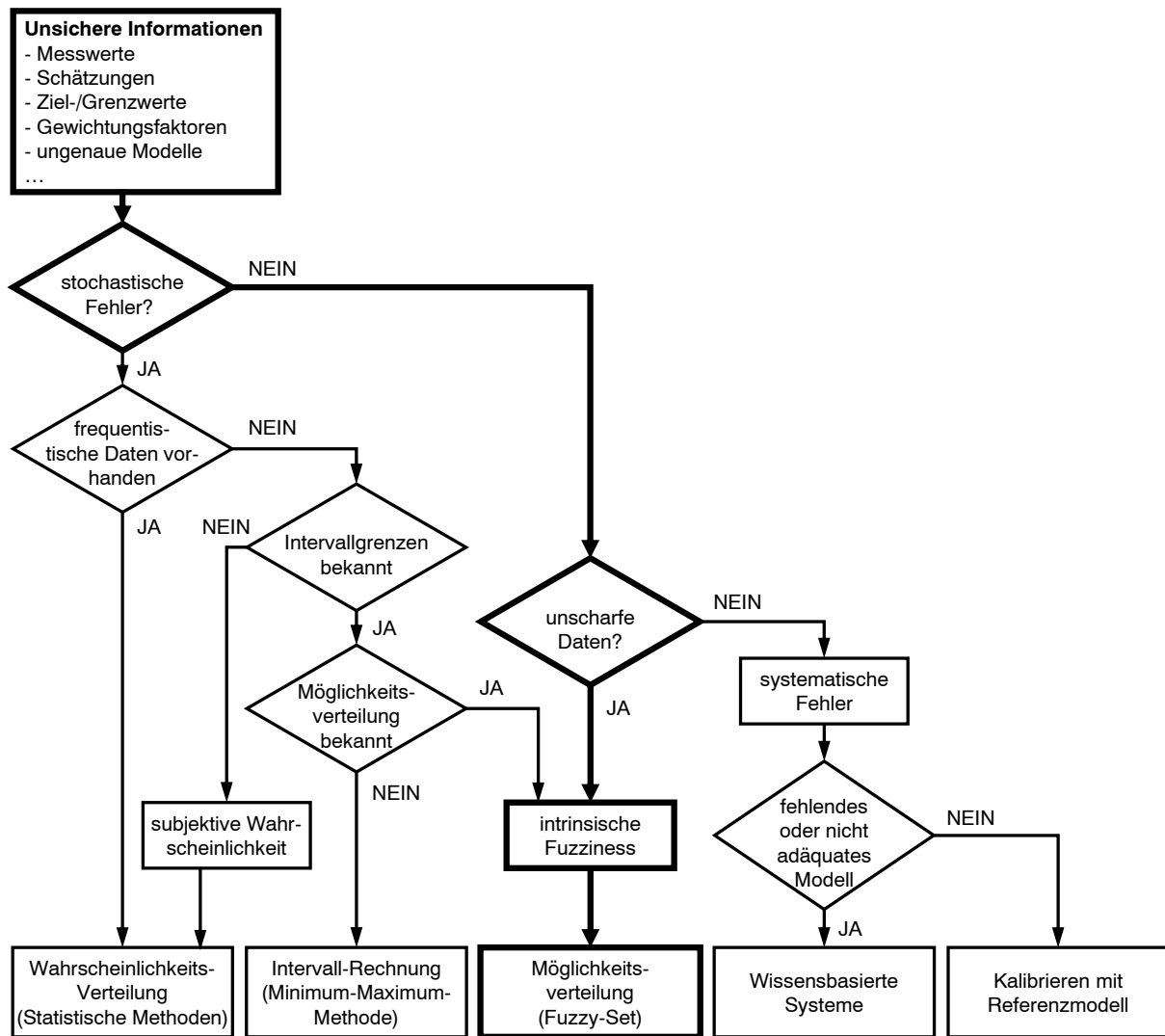


Bild 20: Auswahlschema für die Verarbeitung unsicherer Informationen [Schwan 1999, Pohl 1996]

Die Verwendung der Fuzzy-Set-Theorie zur Abbildung und Verarbeitung unsicherer Informationen besitzt zudem folgende Vorzüge und Besonderheiten [Schwan 1999]:

- Auch bei einer hohen Anzahl unsicherer Eingangsinformationen ist der Modellierungsaufwand geringer
- Sowohl numerische Werte als auch linguistische Informationen können berücksichtigt werden [Salski 1993]
- Prädestiniert für die Anwendung in den Gebieten der Entscheidungsfindung [Altrock 1994] sowie Modellierung qualitativ linguistischer Informationen
- Darstellung der Unsicherheitsangaben für den Anwender durch den Einsatz graphischer Methoden
- Subjektiv unabhängige Bewertungsergebnisse durch die Datenverknüpfung mittels etablierter mathematischer Operationen

Aufgrund ihrer Adäquanz und Vorzüge wird für die Modellierung der Informationsunsicherheit in der Reifegradbewertung die Fuzzy-Set-Theorie ausgewählt und im nächsten Kapitel näher erläutert.

2.5.4 Fuzzy-Set-Theorie und Fuzzy-Systeme

Aristoteles begründete seinerzeit mit dem „Satz vom ausgeschlossenen Dritten“, wonach eine Aussage entweder „wahr“ oder „falsch“ ist, die Fundamente für die klassische, binäre Logik der nächsten 2000 Jahre [Lippe 2006]. Erst Anfang des 20. Jahrhunderts sollte mit der dreiwertigen Logik, die neben „wahr“ und „falsch“ auch den Wert „möglich“ zulässt, der Grundstein für die nichtklassische, mehrwertige Logik gelegt werden [Lukasiewicz 1910, Lukasiewicz 1930]. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden in [Zadeh 1965] die mathematischen Grundlagen für die Verarbeitung unscharfer Mengen (engl.: fuzzy-sets) entwickelt. Demnach wird der Zugehörigkeitsgrad $\mu_i(x)$ eines Elements x (das Teil der Grundmenge G ist) zu einer Menge i nicht mehr als zweiwertig (0 oder 1) wie in der klassischen Logik angesehen, sondern es werden Werte innerhalb des reellen Intervalls $[0; 1]$ als prinzipiell möglich erachtet und zugelassen (Tabelle 7). Die Zugehörigkeitsfunktion (engl.: membership function) bildet somit eine Fuzzy-Menge i , die mit

$$i = \{ \{x; \mu_i(x) \} \mid x \in G \} \tag{1}$$

definiert werden kann [Lippe 2006]. Damit stellt die Fuzzy-Set-Theorie keinen Gegensatz zur klassischen, auf der binären Logik basierenden Mengenlehre dar, sondern eine Erweiterung [Traeger 1993]. Jede klassische Menge entspricht einem Spezialfall der Fuzzy-Sets, weswegen deren Lösungen weiterhin Bestand haben. Die Theorie der unscharfen Mengenlehre findet heute in den unterschiedlichsten Bereichen wie der Regelungs-, Fahrzeug- und Medizintechnik aber auch in der Betriebswirtschaft oder in Expertensystemen Anwendung [Altrock 1995].

	Scharfe Menge	Fuzzy-Menge
Wertebereich der Zugehörigkeitsfunktion	$\mu_i(x) \in \{0; 1\}$	$\mu_i(x) \in [0; 1]$
Zugehörigkeitsfunktion / linguistischer Term	<p>A graph showing a sharp membership function $\mu_i(x)$ on the y-axis (ranging from 0 to 1) against x on the x-axis. The function is 0 for $x < x_1$ and $x > x_2$, and 1 for $x_1 \leq x \leq x_2$. The area between x_1 and x_2 is labeled 'Menge i'.</p>	<p>A graph showing a fuzzy membership function $\mu_i(x)$ on the y-axis (ranging from 0 to 1) against x on the x-axis. The function is 0 for $x < x_1$ and $x > x_4$. It increases linearly from 0 at x_1 to 1 at x_2, stays at 1 between x_2 and x_3, and decreases linearly from 1 at x_3 to 0 at x_4.</p>
Mengendiagramm	<p>A Venn diagram showing a dark oval labeled 'Menge i'. Inside the oval, it says $\mu_i(x) = 1$ and $x_1 \leq x \leq x_2$. Below the oval, it says $\mu_i(x) = 0$ für $x < x_1$ UND $x > x_2$.</p>	<p>A Venn diagram showing a light gray oval representing the fuzzy set, containing a dark gray oval representing the sharp set. The dark oval is labeled $\mu_i(x) = 1$ and $x_2 \leq x \leq x_3$. The light gray oval is labeled $x_1 \leq x < x_2$ UND $x_3 < x \leq x_4$. Below the diagram, it says $\mu_i(x) = 0$ für $x < x_1$ UND $x > x_4$.</p>

Tabelle 7: Gegenüberstellung scharfe und Fuzzy-Menge

Durch die Fuzzy-Set-Theorie wird es möglich, sowohl unsichere, numerische als auch unscharfe, linguistische Eingangsinformationen mit Hilfe der Zugehörigkeits-

funktion $\mu_i(x)$ in Form von linguistischen Termen darzustellen, zu modellieren und datentechnisch zu verarbeiten, um unscharfe oder scharfe (engl.: crisp) Ausgangsinformationen zu erhalten [Zadeh 1965, Zadeh 1988, Schwan 1999]. Technisch schwer zu erfassende Ausdrücke einer natürlichen oder künstlichen Sprache wie „warm“, „groß“ oder „jung“, die stark von der subjektiven Einschätzung abhängen, können so mathematisch formuliert werden [Zadeh 1975, Zadeh 1975a], wodurch eine rechnergestützte Verarbeitung von unstrukturiertem Wissen simplifiziert wird.

Linguistische Terme werden durch eine Zugehörigkeitsfunktion dargestellt, die in der Praxis prinzipiell eine L-Form oder S-Form besitzen (Bild 21) [Nauck 1996, Schwan 1999]. Aufgrund äquivalenter Ergebnisse bei geringerem Modellierungs- und Rechenaufwand werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit lediglich Zugehörigkeitsfunktionen der L-Form berücksichtigt. Zugehörigkeitsfunktionen solcher linguistischen Terme können in Anlehnung an [Akkasoglu 2012] mittels Quadrupel (4-Tupel) definiert werden, deren Elemente die vier Koordinaten der kennzeichnenden Punkte wiedergeben:

$$\mu_i(x) = (l, m_l, m_r, r) \quad (2)$$

Hiermit können Rechteck-, Trapez- und Dreiecksfunktionen visualisiert werden, wobei in letzterem Fall die Parameter m_l und m_r identisch sind. Dreiecksfunktionen beschreiben aufgrund eines einzelnen Wertes für den maximalen Zugehörigkeitsgrad eine höhere Unsicherheit als Trapezfunktionen, die ein Intervall von Werten mit einem bestimmten Zugehörigkeitsgrad besitzen [Unbehauen 2008]. Somit bietet sich die Möglichkeit, Zugehörigkeitsfunktionen der L-Form anhand ihres Kerns (engl.: core) und ihrer Einflussbreite (engl.: support) zu charakterisieren [Kahlert 1993, Schwan 1999]. Der Kern beschreibt alle Punkte der Funktion, die einen Zugehörigkeitsgrad von 1 haben und liegt somit innerhalb des folgenden Intervalls:

$$[m_l; m_r] \text{ mit } \mu_i(x) = 1 \quad (3)$$

Die Einflussbreite definiert all jene Punkte der Zugehörigkeitsfunktion, die einen Zugehörigkeitsgrad größer 0 besitzen, wonach dieses Merkmal anhand des Intervalls

$$[l; r] \text{ mit } \mu_i(x) > 0 \quad (4)$$

festgelegt wird [Kahlert 1993, Schwan 1999].

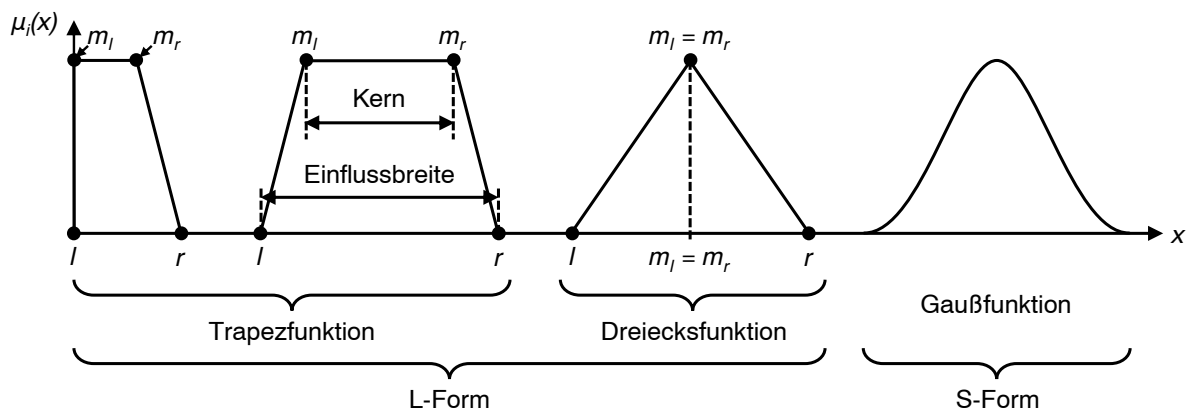


Bild 21: Formen der Zugehörigkeitsfunktionen nach [Nauck 1996]

Linguistische Variablen fassen n linguistische Terme als ihre möglichen Werte zusammen. In Bild 22 ist beispielsweise die linguistische Variable „Größe“ dargestellt, deren linguistischen Werte bzw. Terme „klein“, „mittel“ oder „groß“ sein können. Eine solche linguistische Variable ergibt sich zu

$$LV = (\mu_{\text{klein}}(x), \mu_{\text{mittel}}(x), \mu_{\text{groß}}(x)), \quad (5)$$

mit den linguistischen Termen

$$\mu_{\text{klein}}(x) = ((0; 0), (0; 1), (37,5; 1), (62,5; 0)), \quad (6)$$

$$\mu_{\text{mittel}}(x) = ((37,5; 0), (62,5; 1), (137,5; 1), (162,5; 0)) \text{ und} \quad (7)$$

$$\mu_{\text{groß}}(x) = ((137,5; 0), (162,5; 1), (200; 1), (200; 0)). \quad (8)$$

Demnach besitzt der Wert einer Größe $x = 50$ cm eine unscharfe Zugehörigkeit von 0,5 zu klein und 0,5 zu mittel.

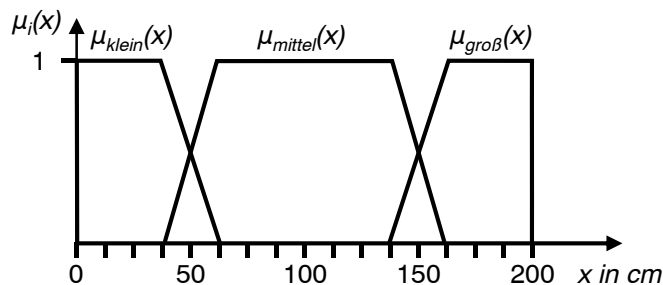


Bild 22: Darstellung einer linguistischen Variablen

Zur Verarbeitung linguistischer Variablen werden regelbasierte **Fuzzy-Systeme** herangezogen, die aus den prinzipiellen Modulen

- Fuzzifizierung,
- Inferenz und
- Defuzzifizierung

bestehen (Bild 23). Mit Hilfe von Fuzzy-Systemen werden subjektive Einschätzungen oder scharfe (Mess-) Werte „fuzzifiziert“, indem sie linguistischen Termen zu einem bestimmten Zugehörigkeitsgrad zugeordnet werden. Ein scharfer Wert kann dabei gleichzeitig mehreren unscharfen Mengen angehören. Die zugeordneten Zugehörigkeitsgrade müssen sich nicht zwingend zu eins aufsummieren, da es sich nicht um Wahrscheinlichkeits- sondern Möglichkeitswerte handelt. Anhand der konstruierten Regelbasis und der definierten Operatoren für die Inferenz werden die linguistischen Eingangsterme mit den linguistischen Ausgangstermen verknüpft und eine unscharfe Gesamtmenge ausgegeben. Boolesche Operatoren wie z. B. UND sowie ODER können in der Fuzzy-Set-Theorie nicht verwendet werden, weil ihr Wertebereich auf null und eins beschränkt ist, weswegen für die unscharfe Mengenlehre charakteristische Operatoren existieren [Altrock 1995]. Die abschließende Defuzzifizierung transformiert die unscharfen Informationen in einen scharfen Ausgangswert, der für weitere Prozessschritte genutzt werden kann. [Kruse 1995, Unbehauen 2008].

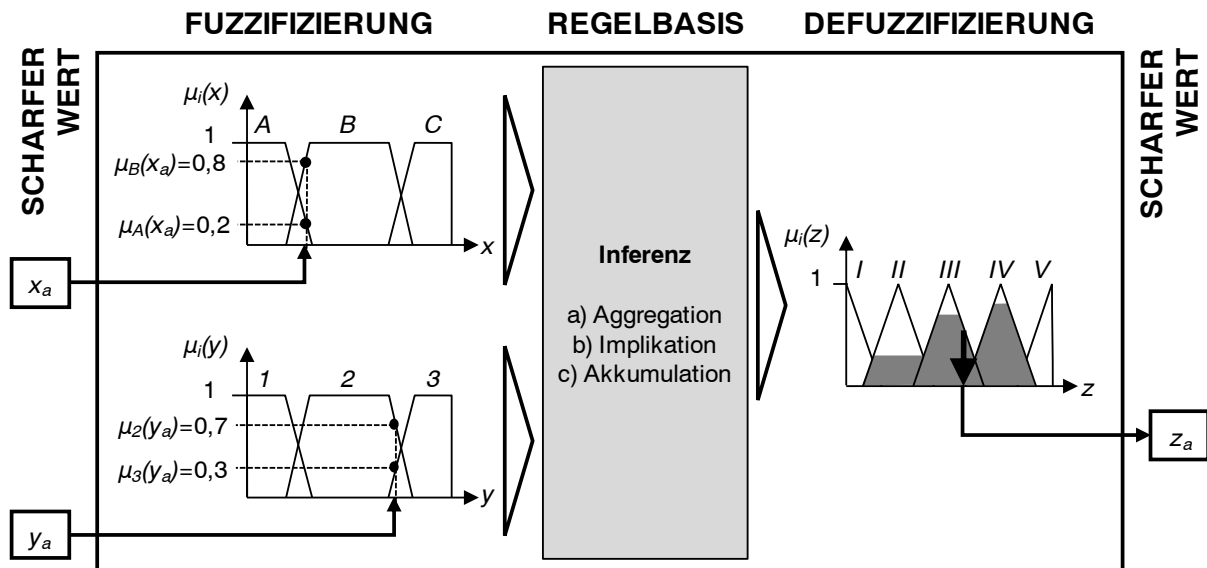


Bild 23: Struktur und Elemente eines exemplarischen Fuzzy-Systems

Die **Regelbasis** besteht aus möglichst vollständigen und widerspruchsfreien Prämissen (WENN) und Konklusionen (DANN), die die Terme der linguistischen Eingangsvariablen mit den Termen einer oder mehrere Ausgangsvariablen verknüpfen [DIN EN 61131-7, Sivanandam 2007]. Somit wird implizit vorhandenes Systemwissen über bekannte Zusammenhänge und Wechselwirkungen (bspw. aus einer vorhergehenden Systemanalyse) explizit abgebildet [Baust 2005]. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine einfache Anpassung der Regelbasis bei unzureichendem Systemverhalten. Wird eine Regel durch das Vorliegen der Prämissen angesprochen, wird dies als sogenannte Feuerung bezeichnet [Kastner 2005]. Die Abarbeitung dieser Regeln im Rahmen der Inferenz gliedert sich dabei in drei Schritte, zu denen unterschiedliche Operatoren festgelegt werden können [Tizhoosh 1998, Unbehauen 2008]:

- Aggregation oder Eingangsaggregation (Auswertung der Prämissen)
- Implikation oder Aktivierung (Auswertung der Konklusionen)
- Akkumulation oder Ausgangsaggregation (Zusammenfassung der Regeln)

Die Operatoren für die (Eingangs-) **Aggregation** definieren, wie der Zugehörigkeitsgrad einer Prämisse, die aus mehreren Termen zusammengesetzt ist, ermittelt werden soll [Altrock 1995]. Der Minimum-Operator (MIN) entspricht dem logischen UND-Operator und gibt als Ergebnis den minimalen Zugehörigkeitswert einer Menge von Werten der Prämisse zurück:

$$\mu_{MIN} = \text{MIN}\{\mu_i\} \text{ für } i = 1 \dots n \quad (9)$$

Die Anzahl aller Zugehörigkeitswerte ist durch n charakterisiert. Dem logischen ODER-Operator entspricht der unscharfe Maximum-Operator (MAX), der den maximalen Wert einer Menge von Zugehörigkeitswerten der Prämisse wiedergibt:

$$\mu_{MAX} = \text{MAX}\{\mu_i\} \text{ für } i = 1 \dots n \quad (10)$$

Die beiden MIN- und MAX-Operatoren finden in der Fuzzy-Set-Theorie am häufigsten Einsatz [Altrock 1995]. Zudem gibt es den Mittelwert- (AVG) und den Produktoperator (PROD). Ersterer bildet den arithmetischen Mittelwert der betrachteten Zugehörigkeitswerte:

$$\mu_{AVG} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i}{n} \right) \text{ für } i = 1 \dots n \quad (11)$$

Der PROD-Operator gibt als Ergebnis das Produkt der betrachteten Zugehörigkeitswerte aus:

$$\mu_{PROD} = \prod_{i=1}^n (\mu_i) \text{ für } i = 1 \dots n \quad (12)$$

Des Weiteren stehen kompensatorische Operatoren zur Verfügung, die durch das Einstellen eines Koeffizienten einen Kompromiss zwischen zwei Operatoren ermöglichen. Kompensatorische Operatoren eignen sich insbesondere in der Entwicklung und Optimierung von Fuzzy-Systemen mit einer hohen Anzahl von Regeln. Der MIN-MAX-Operator ist durch den λ -Koeffizienten auszulegen:

$$\mu_{MIN-MAX} = (1 - \lambda) \cdot MIN(\mu_i) + \lambda \cdot MAX(\mu_i) \text{ für } i = 1 \dots n \quad (13)$$

Für $\lambda = 0$ resultiert somit der MIN-Operator, während für $\lambda = 1$ sich der MAX-Operator ergibt. Der MIN-AVG-Operator ist ebenfalls durch die Variable λ einzustellen:

$$\mu_{MIN-AVG} = (1 - \lambda) \cdot MIN(\mu_i) + \lambda \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_i}{n} \right) \text{ für } i = 1 \dots n \quad (14)$$

Mit $\lambda = 0$ ergibt sich erneut der MIN-Operator, während für $\lambda = 1$ diesmal der AVG-Operator resultiert. Zum mathematischen Abbilden der menschlichen Intuition bei der Verknüpfung von Begriffen eignet sich insbesondere der GAMMA-Operator. Die Fähigkeit dieses Modells wurde auch für komplexe Situationen in empirischen Studien nachgewiesen [Altrock 1995, Zimmermann 1979, Zimmermann 1987]:

$$\mu_{GAMMA} = \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^{\gamma} \text{ für } i = 1 \dots n \quad (15)$$

Eine vereinfachte Vorgehensweise zur Bestimmung des anwendungsspezifischen Wertes für den γ -Koeffizienten ist in [Altrock 1995] dargestellt. Für das Beispiel in Bild 23 sei ein Auszug einer möglichen Regelbasis wiedergegeben, welcher die angesprochenen linguistischen Terme der Eingangsvariablen mittels MIN- und MAX-Operatoren mit den Termen der Ausgangsvariablen verknüpft und jeweils die exemplarischen Zugehörigkeitswerte ermittelt:

$$MIN(WENN A, WENN 2) DANN II \rightarrow MIN\{\mu_A(x_a); \mu_2(y_a)\} = \mu_{II}(z) = 0,2 \quad (16)$$

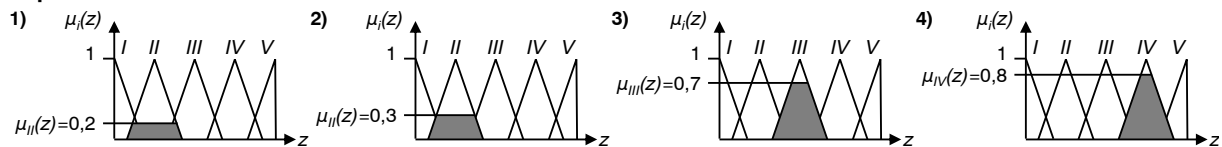
$$MAX(WENN A, WENN 3) DANN II \rightarrow MAX\{\mu_A(x_a); \mu_3(y_a)\} = \mu_{II}(z) = 0,3 \quad (17)$$

$$MIN(WENN B, WENN 2) DANN III \rightarrow MIN\{\mu_B(x_a); \mu_2(y_a)\} = \mu_{III}(z) = 0,7 \quad (18)$$

$$MAX(WENN B, WENN 3) DANN IV \rightarrow MAX\{\mu_B(x_a); \mu_3(y_a)\} = \mu_{IV}(z) = 0,8 \quad (19)$$

Diese für die linguistischen Terme der Ausgangsvariablen resultierenden Zugehörigkeitswerte werden im Rahmen der **Implikation** genutzt, um die entsprechenden Teil-lösungsflächen der Terme zu erhalten (Bild 24). Hierfür stehen das MIN- und das PROD-Verfahren zur Verfügung. Die MIN-Methode führt dazu, dass die jeweilige Zugehörigkeitsfunktion des Ausgangsterms in Höhe des in der Aggregation ermittelten Zugehörigkeitsgrads „abgeschnitten“ wird (Bild 24, oben). Dahingegen werden beim PROD-Verfahren die Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsterme in der Höhe des ermittelten Zugehörigkeitsgrads „gestaucht“ (Bild 24, unten). [Kruse 1995, Haerian 2002, Tizhoosh 1997, Unbehauen 2008]

Implikation im MIN-Verfahren



Implikation im PROD-Verfahren

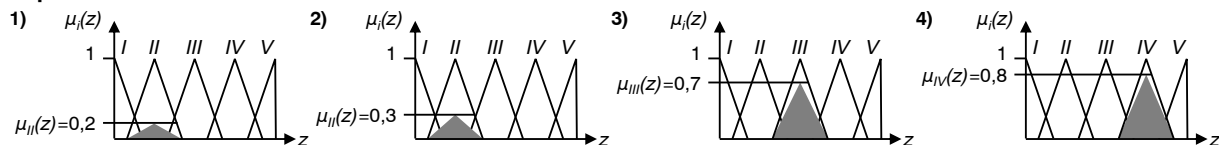


Bild 24: MIN- und PROD-Implikationsverfahren für die Regeln in (16)-(19)

Im Zuge der Aggregation können mehrere Regeln zu unterschiedlichen Ergebnissen für denselben Ausgangsterm führen, weshalb im Schritt der **Akkumulation** (Ergebnisaggregation) die gesamte Ergebnisfläche der linguistischen Ausgangsvariable erstellt wird und dazu festgelegt wird, welche Teil-lösungsfläche eines Ausgangsterms (ausgedrückt durch den jeweiligen Zugehörigkeitsgrad) gelten soll. Prinzipiell sind die MIN-, MAX- und AVG-Operatoren (Formeln (9) bis (11)) anwendbar, die zu unterschiedlichen unscharfen Ergebnisflächen bei der Ausgangsvariable führen [Traeger 1993]. In Bild 25 sind die Ergebnisse des fortgeführten Beispiels für die MAX- und AVG-Operatoren dargestellt, während der MIN-Operator aufgrund seiner geringen Zweckmäßigkeit vernachlässigt ist. Zudem ist das Ergebnis des Akkumulationsoperators für die begrenzte Summenbildung (BSUM) abgebildet, der die Zugehörigkeitswerte für einen Term bis zu einem maximalen (begrenzten) Wert von 1 addiert. [Unbehauen 2008, Zacher 2000]

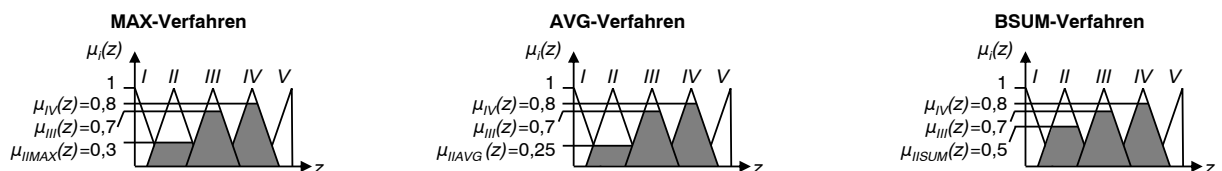


Bild 25: MAX-, AVG- und BSUM-Akkumulationsverfahren

Abhängig von der Wahl der Operatoren für die Schritte Implikation (z. B. MIN-Operator) und Akkumulation (z. B. MAX-Operator) kann die ausgewählte Inferenzstrategie zu einem Ausdruck zusammengefasst werden (z. B. MIN/MAX-Inferenz).

Im letzten Schritt der **Defuzzifizierung** wird die unscharfe Menge der linguistischen Ausgangsvariablen, die aus der Inferenz gewonnen und grafisch als Ergebnisfläche dargestellt wurde, in einen scharfen Ausgangswert (engl.: crisp value) überführt und ausgegeben, der den linguistischen Wert am besten annähert [Traeger 1993, Altrock 1995, Sivanandam 2007]. Für diese Operation stehen verschiedene Methoden zur Verfügung (Bild 26) [Bertram 1994].

Die Flächenschwerpunktmethode (engl.: Center-of-Area (CoA)) gibt den Abszissenwert des Schwerpunkts der unscharfen Ergebnisfläche als scharfen Wert aus. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass alle „befeuchten“ Regeln in die Berechnung der scharfen Ausgangsgröße eingehen und damit eine hohe Genauigkeit bei stetigem Ausgangsverhalten gewährleistet wird [Tizhoosh 1997].

Mit Hilfe der Maximum-Mittelwert-Methode (engl.: Mean-of-Maximum (MoM)) wird der scharfe Ausgangswert als das arithmetische Mittel der Abszissenwerte mit global-maximalem Zugehörigkeitsgrad ausgegeben. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass nicht alle angesprochenen Regeln in die Berechnung der Ausgangsgröße einfließen, wodurch ein nicht-stetiges Ausgangsverhalten resultiert. [Altrock 1995]

Das „Center-of-Maxima (CoM)“ Verfahren berechnet zunächst das arithmetische Mittel der Abszissenwerte mit lokal-maximalem Zugehörigkeitsgrad (MoM_i). Der Ausgangswert wird anschließend durch das gewichtete arithmetische Mittel der MoM_i -Werte ermittelt. Als Gewichtungen dienen die jeweiligen lokal-maximalen Zugehörigkeitsgrade. Diese Methode liefert gleiche oder identische Werte (Bild 26) wie die CoA-Methode mit stetigem Ausgangsverhalten. [Altrock 1995]

Durch die Defuzzifizierung der Ergebnisfläche des Fuzzy-Systems gehen Informationen verloren. Daher ist es auch möglich, die Zugehörigkeitsgrade der Teillösungsflächen als ein Balkendiagramm unscharf wiederzugeben. Für entscheidungsunterstützende Fuzzy-Systeme wird dem Anwender damit eine breitere Informationsbasis zur Verfügung gestellt.

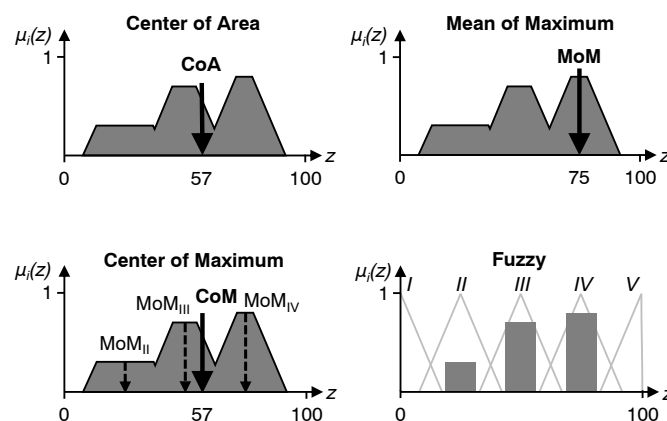


Bild 26: Defuzzifizierungsmethoden im Überblick (Ergebniswerte für MIN/MAX-Aggregation, MIN-Implikation und MAX-Akkumulation)

Zur Entscheidungsunterstützung werden Fuzzy-Systeme vor allem dann eingesetzt, wenn komplexe Bewertungsvorgänge durchzuführen sind, die sich nur schwer mathematisch, aber leicht sprachlich formulieren lassen. Auch die kausalen Zusammenhänge bei einem Reifegradmodell zwischen den Objektmerkmalen und dem ermittelten Reifegrad sind aufgrund der Komplexität des Entwicklungsprozesses mathematisch als unbekannt vorauszusetzen. Die Wenn-Dann-Regeln dieser Größen in einem Fuzzy-System vereinfachen diese Verknüpfung. [Altrock 1995]

Der Aufbau eines Fuzzy-Systems basiert zusammengefasst auf folgenden Schritten [Traeger 1993, Baust 2005]:

- 1) Linguistische Eingangs- und Ausgangsvariablen definieren
- 2) Wertebereich der linguistischen (Eingangs-, Ausgangs-) Variablen festlegen
- 3) Wertebereiche der Variablen skalieren
- 4) Anzahl der linguistischen Terme für jede Variable festlegen
- 5) Linguistische Terme über den Wertebereich der Variablen verteilen
- 6) Zugehörigkeitsfunktionen der Terme auslegen
- 7) Regelbasis aufstellen
- 8) Operatoren für Aggregation, Implikation und Akkumulation festlegen
- 9) Defuzzifizierungsmethode festlegen

Die Auslegung der Zugehörigkeitsfunktion kann dabei anhand von Methoden wie z. B. neuronaler Netze, genetischer Algorithmen oder der systematisierten Intuition erfolgen [Sivanandam 2007]. Im Rahmen dieser Arbeit wird zur rechnergestützten Anwendung von Fuzzy-Systemen die Software fuzzyTECH der Fa. Inform in der Version 5.81d Professional herangezogen. Alle hier vorgestellten Eigenschaften und Merkmale von Fuzzy-Systemen lassen sich mit der Software umsetzen und anwenden. Lediglich die Implikation im Rahmen der Inferenz ist von fuzzyTECH mit dem MIN-Verfahren vorgegeben.

2.6 Informationsvisualisierung und Kommunikation

Die problem- und zielgruppenadäquate Bereitstellung der umfangreichen und multidimensionalen Informationen einer Reifegradbeurteilung kann die Identifikation und Selektion zielführender und reifegradsteigernder Maßnahmen unterstützen und den Austausch der Ergebnisse vereinfachen, weshalb der Auswahl zweckmäßiger Methoden zur Informationsvisualisierung und Kommunikation von Reifegradergebnissen insbesondere bei standortübergreifenden Vorhaben eine hohe Bedeutung zukommt. Daher sollen im Folgenden die grundlegenden Prinzipien und Methoden der Informationsvisualisierung und Kommunikation dargelegt werden.

Die prinzipielle Aufgabe der Informationsvisualisierung besteht in der Überführung von Daten in eine übersichtliche und extensive Darstellung, um die Wahrnehmung und Interpretation von Informationen und damit kognitive Denkprozessen zur prob-

lemlösenden Entscheidungsfindung zu erleichtern (Bild 27). Hierzu werden die selektierten Daten zunächst ausgewertet und entsprechend der ausgewählten Visualisierungstechnik wiedergegeben. Sind für die Entscheidungsfindung zusätzliche Daten notwendig, können Methoden des Qualitätsmanagements wie die Statistische Versuchsplanung herangezogen werden, um neue Daten zu generieren und dem Visualisierungsprozess zuzuführen. In gleicher Weise können auch neue Gegebenheiten oder Erkenntnisse auf Basis der Entscheidungsfindung in die Visualisierung einfließen, indem Verknüpfungen zwischen Daten hinzugefügt oder geändert werden. [Spence 2007]

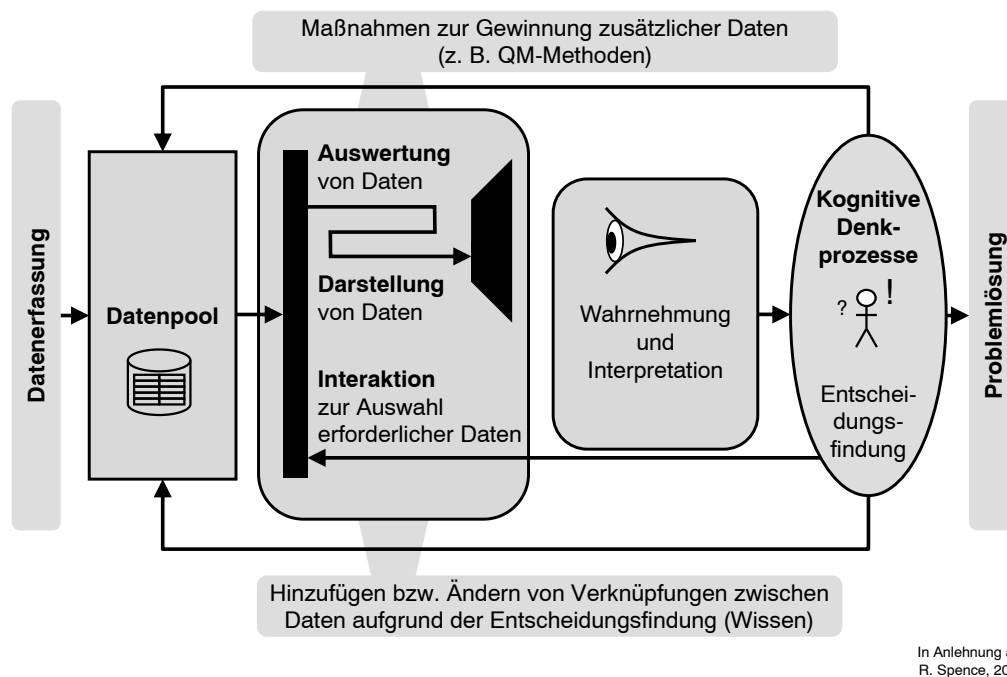


Bild 27: Prinzip der Informationsvisualisierung in Anlehnung an [Spence 2007]

Das Ziel einer effektiven Kommunikation besteht in einer möglichst exakten Übereinstimmung der gesendeten und empfangenen Informationen zwischen den Interaktionspartnern [Thommen 1981]. Dies kann durch die adäquate Auswahl von Kommunikationsmedien unter Berücksichtigung ihres Informationsreichtums und in Abhängigkeit der Explizierbarkeit der zu vermittelnden Information gewährleistet werden [Daft 1984]. Der Informationsreichtum eines Kommunikationsmediums bestimmt sich hierbei durch dessen Übermittlungskapazität und Rückkopplungsrate [Gerstlauer 2004]. Die Explizierbarkeit der Information zieht die Betrachtung in Erwägung, inwieweit vorhandenes Wissen ausgedrückt bzw. übertragen werden kann [Bendt 2000]. Explizit vorhandenes Wissen ist hierbei einfacher zu vermitteln als implizites Wissen.

Auf empirischer Basis wird zwischen der „Explizierbarkeit“ und dem „Informationsreichtum“ ein linearer Zusammenhang angenommen: Je geringer der Grad der Explizierbarkeit von Informationen ist, desto größer muss der Informationsreichtum des verwendeten Kommunikationsmediums sein, um das enthaltene Wissen zu übermitteln [Gerstlauer 2004].

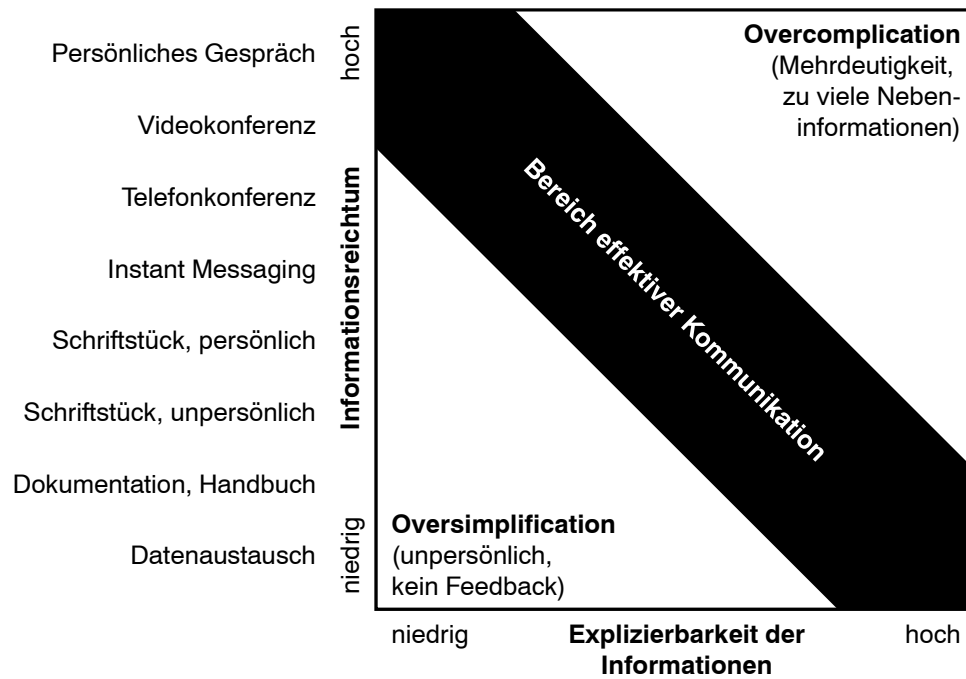


Bild 28: Konzept des Informationsreichtums [Reichwald 1998]

Unter Verwendung der dargestellten Graphik kann eine anforderungsgerechte Auswahl des Kommunikationsmediums erfolgen. Anhand der Explizierbarkeit der vorliegenden Informationen kann das entsprechende Kommunikationsmedium identifiziert werden, das eine effektive Übermittlung der Informationen erlauben. Werden Medien außerhalb des Bereichs effektiver Kommunikation gewählt, ist der Austausch und die Weitergabe der Informationen zwar möglich, jedoch wird sie durch unnötige Komplizierung (Overcomplication) oder unangemessene Simplifizierung (Oversimplification) erschwert [Richter 2010].

3 Defizite bestehender Verfahren zur Entwicklung von Reifegradmodellen

Sowohl für existente Reifegradmodelle als auch für Ansätze zur Entwicklung von Reifegradmodellen bestehen derzeit Defizite. Gegenwärtige und insbesondere weit verbreitete Reifegradmodelle wie das CMMI, SPICE oder die ISO 9004:2009 (Kapitel 2.2.2, 2.2.3 und 2.2.4) besitzen einen universellen Geltungsanspruch, so dass aus modelltheoretischer Sicht die Repräsentation des Betrachtungsobjekts durch das Modell nur in geringem Maße vorhanden ist. Der Fokus dieser Reifegradmodelle liegt primär in der Bereitstellung von Bewertungsergebnissen zu Vergleichszwecken. Dagegen weisen zwar branchenspezifische Reifegradmodelle wie die Reifegradabsicherung nach VDA (Kapitel 2.2.5) oder Reifegradmodelle für Fertigungsprozesse (Kapitel 2.2.6) eine höhere Abbildungsgenauigkeit des Betrachtungsobjekts und dadurch repräsentativere Reifegradbewertungen auf, aber durch ihre Eingrenzung sind sie lediglich für einen kleinen Anwendungsbereich adaptierbar. Einige generische Reifegradmodelle wie z. B. das CMMI oder die ISO 9004:2009 bieten für genauere Reifegradbewertungen eine Anpassbarkeit des Modells an. Allerdings bleibt hierbei die methodische Unterstützung unvollständig. Auch die Berücksichtigung, Verarbeitung sowie angemessene Angabe der inhärenten Informationsunsicherheit wird in diesen Reifegradmodellen bislang kaum berücksichtigt.

Für einen größtmöglichen Bezug zum betrachteten Objekt bestehen unterschiedliche Vorgehensweisen für die Entwicklung anwendungsspezifischer Reifegradmodelle. Hiermit lassen sich zwar neue Reifegradmodelle schrittweise entwickeln, jedoch bieten die bestehenden Verfahren dem Anwender keine oder sehr geringe Unterstützung im systematischen Aufbau von Reifegradmodellen aufgrund des Mangels an adäquat integrierten Methoden oder Werkzeugen des Qualitätsmanagements. So wird in [Bruin 2005] ein generisch verfasstes Rahmenwerk für die Entwicklung von Reifegradmodellen vorgestellt, welches im Bereich des Prozess- und Wissensmanagements angewendet wurde (Kapitel 2.4). Die Relevanz und Nutzbarkeit des Rahmenwerks für andere Bereiche wird offen gelassen. Auch das darauf aufbauende Vorgehen nach [Becker 2009] bietet mit seiner allgemeingehaltene Darstellungsweise nur eine geringe Anwenderunterstützung. In beiden Fällen wird kein spezifisch entwickeltes Reifegradmodell vorgestellt, weswegen die Validierung nicht nachvollzogen werden kann. Dagegen wird in [Mettler 2010] ein Reifegradmodell für das Supply Management im Krankenhaus auf Basis einer eigens erstellten Vorgehensweise bereitgestellt. In den dargestellten Ansätzen fehlen somit sowohl die Integration von Methoden und damit eine effiziente Übertragbarkeit als auch die Eingliederung der systematischen Berücksichtigung der nicht zu vernachlässigenden Informationsunsicherheit in der Entwicklung und Anwendung neuer Reifegradmodelle.

Obwohl durch eine angemessene Darstellung und Quantifizierung der Informationsunsicherheit die Differenzierbarkeit der Reifegradwerte gesteigert und eine Aussage zur Verlässlichkeit eines Reifegradergebnisses getroffen werden kann, bieten lediglich einige ressortspezifisch ausgelegte Reifegradmodelle einen rudimentären Ansatz zur Berücksichtigung der Informationsunsicherheit, der entweder unzureichend oder kaum nachvollziehbar ausgeführt ist. In [Müller 2007] wird die Unsicherheit bei der Bestimmung funktionaler Reifegrade von Automobilkomponenten einbezogen (Kapitel 2.5.2). Die zeitlich abhängige Unsicherheit wird dabei als Faktor im Intervall zwischen $[0; 1]$ charakterisiert und in die Bestimmung eines Reifegrads einkalkuliert. Durch diesen Ansatz wird vielmehr eine summarische und pauschalisierende Bewertung der Unsicherheit dargestellt, als dass ein unterschiedlicher Grad der linguistischen Unschärfe der Informationen und Eingangsgrößen als Ausdruck der epistemischen Unsicherheit abgebildet wird. In [Altrock 1994, Nieder 1995] wird im Rahmen der multikriteriellen Entscheidungsfindung ein in der Automobilindustrie entwickelter Ansatz zur Bestimmung des Reifegrads in der Komponentenentwicklung vorgestellt, welcher „linguistische Entscheidungsmodelle“ verwendet. Ebenso wird in einem für die nachhaltige Zulieferkette entwickelten Reifegradmodell die *„grundlegende Problematik (...) der Modellierung und wertmäßigen Interpretation von sprachlich unscharfen oder umgangssprachlichen Begriffen sowie der Einordnung von Objekten zu einer Klasse“* berücksichtigt [Bleck 2011]. In beiden Fällen werden reifegradrelevante Indikatoren definiert und ein entsprechendes Fuzzy-System aufgebaut. Nicht nachvollziehbar bleibt die Auslegung dieses Fuzzy-Systems und der darin verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Terme. Zudem wird in [Bleck 2011] die Unsicherheit durch Anwendung einer bestimmten Gaußverteilung pauschal definiert und betrachtet, wodurch keine differenzierende Berücksichtigung der Unsicherheitsarten gegeben ist. Auch in [Oberkampff 2007] erfolgt mit der vorgeschlagenen Angabe eines Intervalls für einen Gesamtreifegrad bestehend aus dem minimalen, durchschnittlichen und maximalen Wert der Teilreifegrade eine triviale und unzulängliche Betrachtung der Informationsunsicherheit, die bei einer Menge von Teilreifegraden mit einer hohen Spannweite des Wertebereichs zu einem Gesamtergebnis mit geringer Aussagekraft führen würde.

Vor dem Hintergrund dieser Defizite des aktuellen Standes der Technik ist zusammenzufassen, dass derzeit eine methodengestützte Vorgehensweise zur Auslegung anwendungsspezifischer Reifegradmodelle mit integrierter wie auch differenzierender Berücksichtigung, Auswertung und quantitativer Angabe der Informationsunsicherheit in der Reifegradbewertung fehlt. Damit ist auch die Möglichkeit einer effizienten sowie effektiven Anwenderunterstützung und -führung in der Gestaltung neuer Reifegradmodelle mit validen und zweckmäßigen Ergebnissen in der Ermittlung des Entwicklungsstands nicht gegeben.

4 Zielsetzung und wissenschaftlicher Ansatz

Ziele dieser Arbeit

Die Ziele der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit umfassen zum einen die Konzeption einer methodischen Vorgehensweise für die anwendungsspezifische und referenzbasierte Auslegung von neuen Reifegradmodellen. Zum anderen ist die Informationsunsicherheit, die der Evaluierung des Entwicklungsstands auf Basis eines Reifegradmodells prinzipiell innewohnt, systematisch und nachvollziehbar unter Anwendung eines Unsicherheitsmodells zu berücksichtigen, womit die Möglichkeit geschaffen werden soll, einem ermittelten Reifegradwert einen quantitativen Unschärfebeitrag zuzuordnen zu können. Als Grundlage für die Berücksichtigung und Angabe der Informationsunsicherheit wird die Fuzzy-Set-Theorie aufgrund der in Kapitel 2.5.3 genannten Vorzüge durch die zweckmäßige Konfiguration eines Fuzzy-Systems zur Reifegradbewertung herangezogen, welches sowohl das Reifegrad- als auch das Unsicherheitsmodell fusioniert. Zum Zweck der Validierung ist die konzipierte Methodik in der Entwicklung neuer Umformverfahren anzuwenden, da bisherige Reifegradmodelle primär auf Geschäftsprozesse ausgerichtet sind und für die valide Beurteilung von in der Entwicklung befindlichen Fertigungsprozessen ungeeignet sind. Abschließend ist die validierte Vorgehensweise zur Minimierung der Handhabungskomplexität in ein datenbankbasiertes Informations- und Assistenzsystem softwaretechnisch zu integrieren.

Nutzen der Arbeit

Die auszulegende Methodik dient als Leitfaden zur Konstruktion anwendungsspezifischer Reifegradmodelle und unterstützt den Anwender systematisch entlang der Vorgehensweise durch die Bereitstellung adäquater Methoden. Die höhere Kompatibilität der spezifischen erstellten Reifegradmodelle ermöglicht im Vergleich zu bestehenden und generisch ausgelegten Reifegradmodellen eine zweckmäßigere Bewertung des Entwicklungsstands. Die zusätzliche Berücksichtigung und Angabe der Informationsunsicherheit führt zu einer besseren Differenzierbarkeit und Interpretation der Reifegradergebnisse. Dies schafft die Voraussetzung für ein präventives und effizientes Qualitätsmanagement, bei dem der Entwicklungsstand von Produkten, Prozessen und Systemen bereits in frühen Phasen valide ermittelt und zielorientiert beeinflusst werden kann. Im Rahmen der Validierung der Methodik wird ein adäquates Reifegradmodell zur unsicherheitsbehafteten Ermittlung und Verbesserung des Entwicklungsstands neuer Umformverfahren bereitgestellt, welches bisher nicht verfügbar ist. Die zuverlässige Entscheidungsfindung für Verbesserungsmaßnahmen in der Gestaltung, Analyse und Freigabe von neuen Umformprozessen bietet wegen der teuren Werkzeuge und hohen Kosten für nachträgliche Änderungen insbesondere wirtschaftliche Vorteile. Die abschließende softwaretechnische Implementierung der Methodik gewährleistet eine sowohl effiziente als auch effektive Anwenderunterstützung und -führung.

Wissenschaftlicher Ansatz

Für die Gestaltung bedarfsgerechter Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit ist eine allgemeingültige Methodik mit zwei methodengestützten Vorgehensweisen zu entwerfen. Beide Ansätze sind unabhängig vom Betrachtungsobjekt in unterschiedlichen Anwendungsbereichen anwendbar und integrieren unterstützende Methoden des Qualitätsmanagements zur effizienten Konstruktion von Reifegrad- und Unsicherheitsmodellen. Die Deduktion der Reifegradindikatoren und Unsicherheitsfaktoren für die jeweiligen Modelle erfolgt referenzbasiert. Die Methodik kombiniert zudem beide Modelle in einem Fuzzy-System auf Basis definierter Parameter. Dadurch wird zum einen die derzeit geringe methodische Unterstützung in der Auslegung neuer Reifegradmodelle behoben. Zum anderen wird in der Anwendung von Reifegradmodellen die unschärfebehaftete Bewertung des Entwicklungsstands ermöglicht, wodurch eine breitere Informationsbasis zur Entscheidungsfindung bereitgestellt wird. Zur Angabe und Darstellung der Unschärfe im Ergebnis der Reifegradanalyse wird ein adäquates Visualisierungskonzept bereitgestellt, welches die Ausgangswerte des Fuzzy-Systems in ein effizient beurteilbares Format überführt. Die Validierung der konzipierten Methodik erfolgt im Rahmen des Sonderforschungsbereichs / Transregio 73, der die Entwicklung der neuartigen Blechmassivumformung anvisiert und durch die ausgeprägten Simulations- und Experimentphasen ein exemplarisches sowie herausforderndes Umfeld zur Bestätigung der Anwendbarkeit der methodengestützten Vorgehensweise bietet. Dadurch wird ein bisher nicht verfügbares Reifegradmodell für neue Umformverfahren erarbeitet, das die valide Bewertung des Entwicklungsstands bereits in frühen Phasen ermöglicht und zu einem Serienfertigungsprozess mit geringen Qualitätsproblemen sowie Ausschussraten beiträgt. Abschließend wird die Methodik prototypisch als datenbankbasierte Anwendungssoftware implementiert und verifiziert, wodurch eine effiziente und erprobte Vorgehensweise zur methodischen Reifegradmodellkonstruktion und -anwendung unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit bereitgestellt wird.

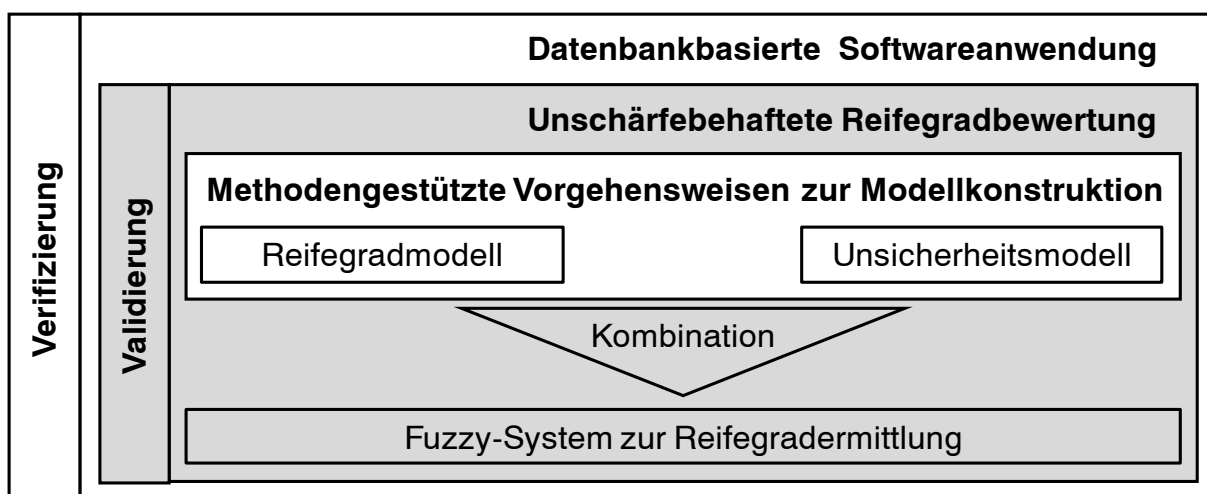


Bild 29: Ansatz zur softwarebasierten Konstruktion und Anwendung unsicherheitsberücksichtiger Reifegradmodelle

5 Auslegung neuer Reifegradmodelle

Anwendungsspezifisch ausgelegte Reifegradmodelle besitzen im Vergleich zu generischen Reifegradmodellen den Vorteil der präziseren „Messung“ des Entwicklungsstandes aufgrund der spezifischeren Indikatoren. Die im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Methodik zur Konstruktion von bedarfsgerechten Reifegradmodellen berücksichtigt der Vollständigkeit halber auch die vorhergehende Phase der „Vorbereitung“ und den nachgeschalteten Abschnitt der „Anwendung“ von Reifegradmodellen (Bild 30). Zu jedem einzelnen Schritt der Vorgehensweise werden zweckmäßige Methoden des Qualitätsmanagements vorgeschlagen. Die Nutzung anderer zielkonformer Methoden bleibt dem Anwender weiterhin möglich. Die initiale Bedarfsermittlung analysiert den Nutzen eines entwicklungsbegleitend angewandten Reifegradmodells und begründet dessen Einsatz. Auf Basis der Zieldefinition im Rahmen der Anforderungsermittlung können bestehende und relevante Reifegradmodelle recherchiert und hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit analysiert werden. Ist die Nutzbarkeit existenter Reifegradmodelle ausgeschlossen, ist das kombinierte Referenzmodell mittels einfach gehaltener oder dokumentierter Modellierungssprachen unter Berücksichtigung der Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) [Becker 1995] auszulegen. In generischer Weise wird hierbei der Betrachtungsgegenstand anhand eines Systemmodells zur Erfassung der Struktur und eines Phasenmodells zur Abbildung der elementaren Aktivitäten ab-

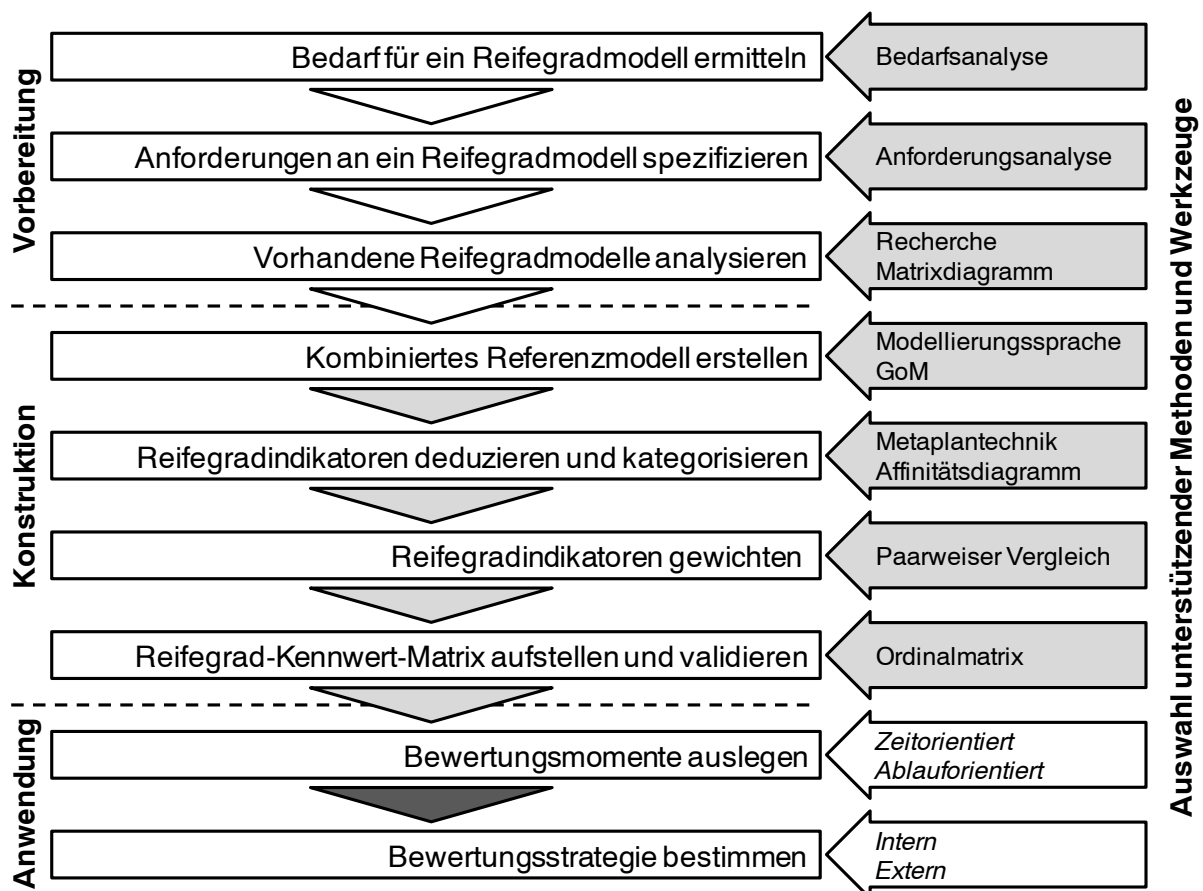


Bild 30: Vorgehensweise zur methodengestützten Auslegung von Reifegradmodellen

gegrenzt. Als adäquate Methoden zur Deduktion und zum Kategorisieren reifegradrelevanter Indikatoren eignen sich das Ishikawa-Diagramm und das Affinitätsdiagramm. Für die Gewichtung der Indikatoren bietet der paarweise Vergleich eine systematische Vorgehensweise. Der Aufbau der Reifegrad-Kennwert-Matrix mit den gestuften Anforderungen an die Ausprägungen der Indikatoren können durch eine Ordinalmatrix erfasst werden. Der Aufbau des Reifegradmodells ist mit der Zuordnung der eruierten Indikatoren zum System- und Phasenmodell des kombinierten Referenzmodells abgeschlossen. Werden das System- und Phasenmodell durch die erhobenen Indikatoren komplett erfasst, ist die Validität des Reifegradmodells gegeben und der Entwicklungsstand kann spezifisch ermittelt werden. Zur Anwendung des Reifegradmodells sind letztlich die Bewertungsmomente und -strategie planerisch zu bestimmen.

5.1 Vorbereitende Schritte zur Auslegung neuer Reifegradmodelle

Bedarf für ein Reifegradmodell ermitteln

Zu Beginn der Auslegung eines Reifegradmodells ist zu beurteilen, ob die Reifegradermittlung und -analyse als zweckmäßiges Steuerinstrument Anwendung finden kann und soll. Insbesondere wenn das angestrebte Entwicklungs- oder Änderungsvorhaben eine zeitlich große Ausdehnung besitzt oder die Merkmale des Entwicklungsstandes aufgrund der hohen Komplexität des Vorhabens schwierig zu quantifizieren sind (z. B. bei Forschungsprojekten oder kontinuierlichen Verbesserungsprozessen im Sinne der Organisationsentwicklung), bietet sich die Nutzung von Reifegradmodellen an. Zu beachten ist, dass die Reifegradermittlung die Analyse und Bewertung bestehender, durch Mitarbeiter praktizierter Abläufe erfordert, um die Transparenz des Betrachtungsgegenstands zu steigern. Dies kann unter Umständen zu einem Widerstand des involvierten Personals führen, wenn der Zustand ihres Aufgabengebiets offen gelegt wird. Wird der Bedarf für ein Reifegradmodell als gegeben erachtet, ist es zu Beginn eines Vorhabens unerlässlich, dass die organisatorische Leitungsebene die Entscheidung für Reifegradanalysen im Sinne eines Commitments ausspricht, dokumentiert und kommuniziert.

Anforderungen spezifizieren und vorhandene Reifegradmodelle analysieren

Mit der Abgrenzung des Betrachtungsgegenstandes für das auszulegende Reifegradmodell ist zu definieren, welche Strukturen und Prozesse Teil der Reifegradbewertung sein sollen und welche nicht mit in die Beobachtung einfließen. Hierzu bietet sich ein einfach gehaltenes Strukturdiagramm an, welches die Elemente des zu betrachtenden Objekts und dessen relevante Merkmale erfasst und verknüpft. Darauf aufbauend können die Ziele definiert werden, indem die Merkmale des Betrachtungsgegenstands ausgewählt werden, die durch das zu konzipierende Reifegradmodell erfasst und quantifiziert werden sollen. Um den (hierarchischen) Aufbau sowie die Wechselwirkungen zwischen den Merkmalen aufzuzeigen und damit eine hohe Konsistenz innerhalb der Zieldefinition zu gewährleisten, kann die Mindmap-Methode herangezogen

werden. Aufgrund der hohen Anzahl verfügbarer und divergenter Reifegradmodelle ist deren Zweckmäßigkeit für den ausgewählten Betrachtungsgegenstand zur Nutzung von Synergien zu analysieren. Hierzu kann ein zweidimensionales Matrixdiagramm angewendet werden, welches die zu erfassenden Merkmale des Betrachtungsgegenstands den Indikatoren bestehender Reifegradmodelle gegenüberstellt und mittels Bewertung deren Anwendbarkeit ermittelt.

5.2 Referenzmodellierung zur Deduktion von Indikatoren

Während die Vorbereitungsphase zur Auslegung von Reifegradmodellen maßgeblich vom Modellierer durchgeführt wird, sollten die Phasen der Konstruktion und Anwendung innerhalb eines Teams erarbeitet werden. Die Gruppenkonstellation kann hierzu aus dem Modellierer, der die Rolle des Moderators und des Methodenspezialisten einnimmt, sowie den (internen) Systemelement-Experten bestehen. Die Systemelement-Experten sind diejenigen, die sich mit den strukturellen Elementen des Betrachtungsgegenstands vom Reifegradmodell intensiv auskennen und das entworfene Reifegradmodell nutzen werden. Durch die frühe Einbindung der Nutzergruppe wird eine hohe Akzeptanz des Reifegradmodells gewährleistet und der Maßnahmenenerfolg gesichert.

Kombiniertes Referenzmodell erstellen

Die Referenzmodellierung bildet mit ihrer definierten Eingrenzung des Betrachtungsobjekts die Grundlage zur Erhebung reifegradrelevanter Indikatoren. Dabei stellt ein Referenzmodell ein präskriptives Modell dar, welches durch eine generalisierte Modifikation des (deskriptiven) Objektbilds zu einer Richtlinie (Best Practice) für Verbesserungen am Betrachtungsobjekt ausgelegt wird (Bild 31). Entsprechend der Definition von Referenzmodellen in Kapitel 2.1.2 können diese auch zur Auslegung von Anwendungsmodellen mit Planungscharakter herangezogen werden, um Derivate des Betrachtungsobjekts zu realisieren. Verbesserungen am Betrachtungsobjekt oder dessen Nutzung zur Adaption für ein Derivat ohne die (Referenz-) Modellierung können insbesondere für komplexe Objekte mit Risiken verbunden sein, da mit steigender Komplexität die Berücksichtigung der Randbedingungen erschwert wird.

Aus methodischer Sicht ist für den der Entwicklung von Referenzmodellen nachfolgenden Schritt der Deduktion von Reifegradindikatoren unterschiedliche Sichten (Perspektiven) auf das Betrachtungsobjekt zu erfassen und auf eine zweckmäßig detaillierte Analyse sowie Darstellung des Betrachtungsobjekts (Granularität) zu achten. Demnach ist das Referenzmodell in kombinierter Weise sowohl mit einer struktur- als auch ablauforientierten Perspektive zu erfassen. Für beide Sichten kommt der Granularität im Hinblick auf die Anwendbarkeit des Referenzmodells eine hohe Bedeutung zu. Eine ablauforientierte Perspektive mit einer hohen Granularität und damit präzisen Verfahrensvorgaben kann insbesondere bei Prozessen mit einem hohen Kreativitätsanteil (z. B. Forschungs- und Entwicklungsprozesse) zur Ablehnung des Modells durch den Anwender aufgrund

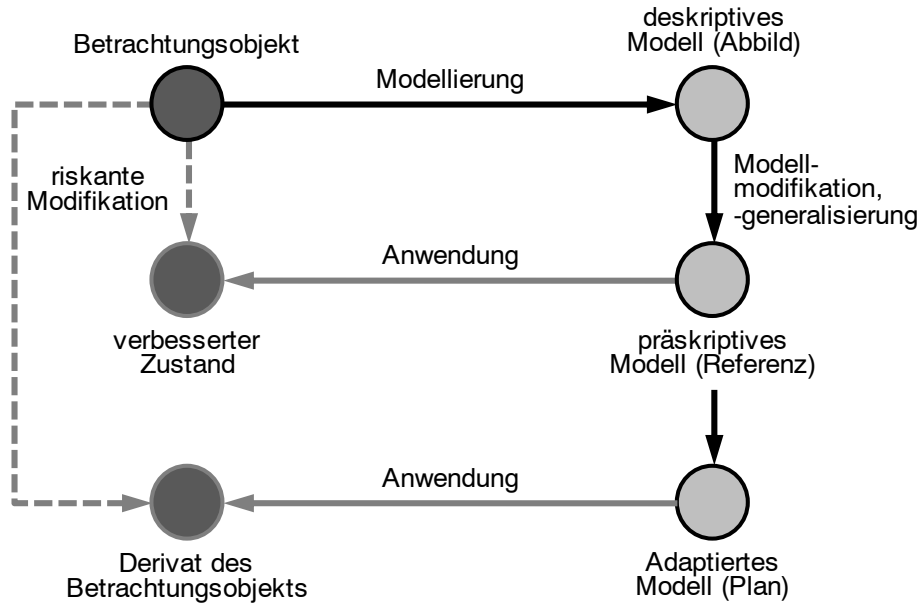


Bild 31: Entstehung und Nutzung von Referenzmodellen (in Anlehnung an [Partsch 2010])

des geringen Spielraums bei Unwägbarkeiten führen. Dahingegen kann ein hoher Detailgrad des Systemmodells durch Erfassung relevanter Parameter und Kenngrößen für das jeweilige Systemelement die Basis für die Bewertungsmerkmale schaffen. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte werden im Rahmen dieser Arbeit das „Systems Modeling Language (SysML)“ für das Systemmodell und ein auf dem Stage-Gate-Modell nach [Cooper 2002] basierendes Phasenmodell als Modellierungssprachen vorgeschlagen und verwendet. Beide Darstellungsformen sind einfach zu handhaben und weit verbreitet, wodurch sich eine grundsätzliche Vergleichbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Modelle ergibt [Weckenmann 2012b]. Mit der SysML können neben technischen Strukturen auch Systemverhalten und Anforderungen dargelegt und Verbindungen aufgezeigt werden (Bild 32). Insbesondere zur Abbildung von Strukturen eignet sich das Blockdefi-

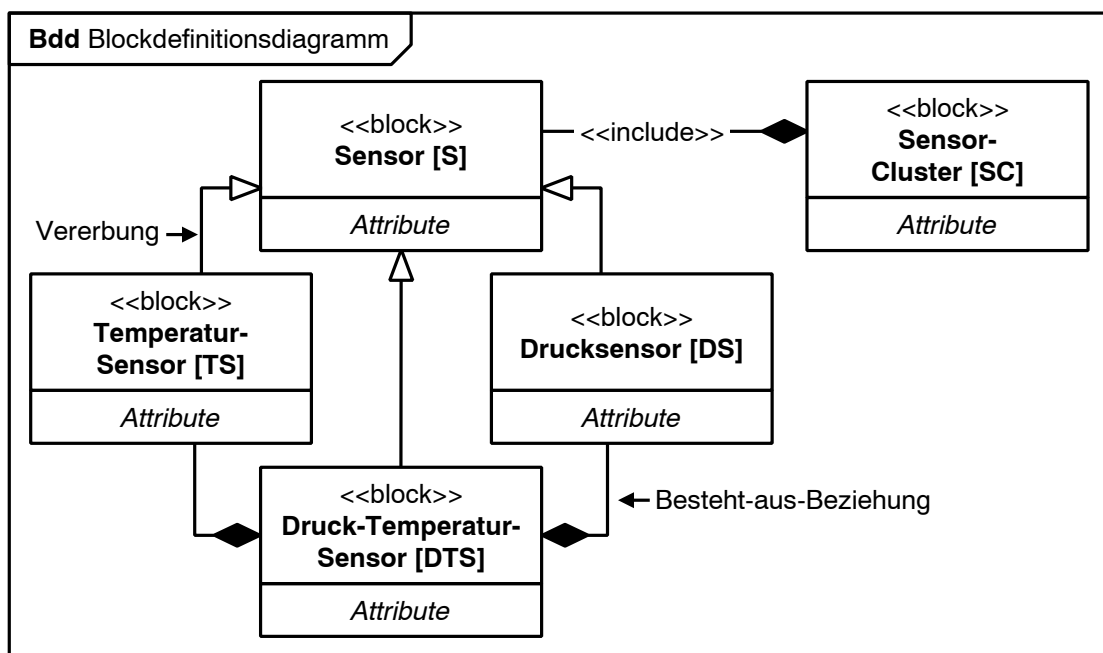


Bild 32: Aufbau eines Systemmodells nach SysML am Beispiel von Sensoren [Alt 2012]

nitionsdiagramm, welches Systemelemente und ihre Eigenschaften in Blöcken sowie Abhängigkeiten durch grafisch definierte Pfeile darstellen lässt [Alt 2012]. Innerhalb der Vorgehensweise zur Auslegung eines Reifegradmodells kann das Systemmodell auf das in der Phase der Anforderungsdefinition erstellte Strukturdiagramm aufbauen.

Das Phasenmodell unterteilt den zu betrachtenden Ablauf in übersichtlicher Weise in definierte und strukturierte Abschnitte (Bild 33). Zwischen diesen Abschnitten sind Meilensteine oder Quality Gates als Momente definierbar, zu denen der Reifegrad bewertet werden kann. Meilensteine können dabei im Gegensatz zu Quality Gates auch ohne Erfüllung aller Anforderungen passiert werden [Exel 2007]. Zu den jeweiligen Phasen sind detaillierende Aktivitäten unter Berücksichtigung einer zweckmäßigen Granularität und der Modellverwendbarkeit für das abzubildende Objekt zu beschreiben. Sowohl das System- als auch das Phasenmodell sind zur Gewährleistung einer angemessenen Modellqualität nach den Grundsätzen ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) auszulegen (s. Kapitel 2.1.1) [Becker 1995]. Dies trägt zu einer hohen Nutzerakzeptanz und damit zur Verwendbarkeit des kombinierten Referenzmodells bei.

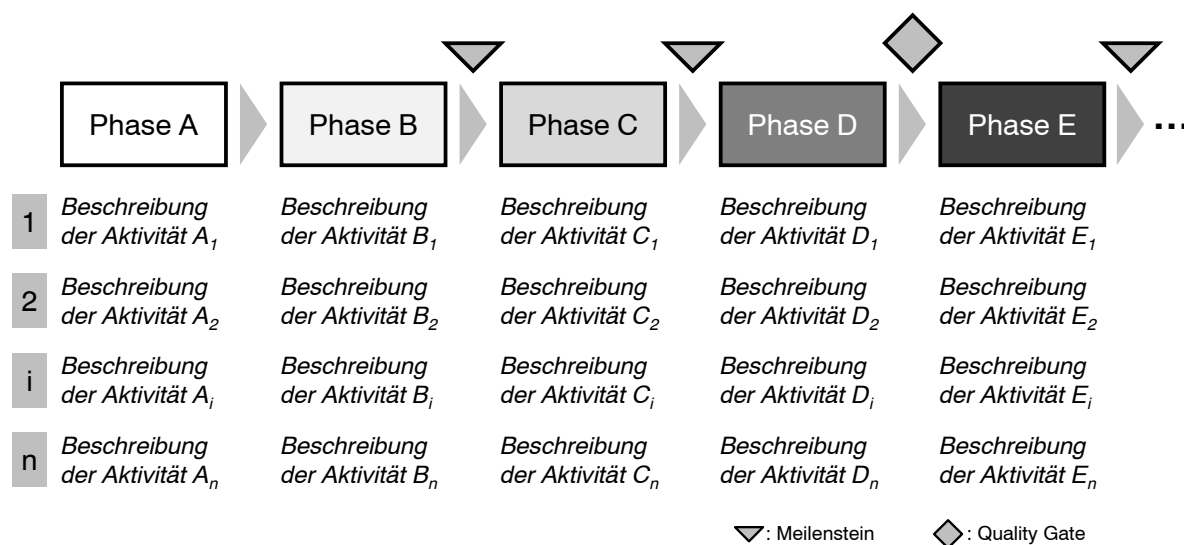


Bild 33: Aufbau eines Phasenmodells

Reifegradindikatoren deduzieren und kategorisieren

Die reifegradrelevanten Indikatoren, die aussagekräftig den Entwicklungsstand charakterisieren, sind auf Basis des kombinierten Referenzmodells zu eruieren. Zur Unterstützung einer dynamischen und visuell klaren Ideensammlung innerhalb eines moderierten Teams bietet sich die Metaplantchnik an [Linß 2005]. Vorschläge einzelner Teammitglieder werden dazu auf bereitgestellten Karten aufgeschrieben und auf einer Metaplanwand sichtbar angebracht. Nach anschließender Diskussion sind identische Ideen auszusortieren und eine Vorabbewertung durchzuführen. Mit Hilfe eines Affinitätsdiagramms sind die ungeordnet vorliegenden Indikatoren durch Kategorisierung der Informationen zu zwei Indikatorebenen zu strukturieren. Die untergeordnete Ebene der Indikatoren soll hierbei als Sub-Indikatoren bezeichnet werden.

Im Hinblick auf das im Fortlauf der Reifegradmodellbildung zu erstellende Fuzzy-System sollten maximal vier Sub-Indikatoren zu einem übergeordneten Indikator gruppiert werden, da sonst die Anzahl der Regeln zu hoch und damit nicht mehr handhabbar wird. Auch die (Gesamt-) Anzahl der Indikatoren ist bei ihrer Deduktion zu beachten. Eine hohe Anzahl an Indikatoren kann das Betrachtungsobjekt umfassender abbilden. Allerdings bedingt dies einen höheren Bewertungsaufwand. Weitere Anforderungen an Reifegradindikatoren seien stichpunktartig wiedergegeben:

- Zielkonformität: Eruierte Indikatoren müssen im Einklang mit den definierten Zielen des Reifegradmodells sein.
- Unabhängigkeit: Zwei oder mehr Indikatoren dürfen nicht dasselbe beurteilen. Dies kann durch ein Interrelationendiagramm analysiert und dargelegt werden.
- Vollständigkeit: Die vom kombinierten Referenzmodell erfassten Merkmale sind von den eruierten Indikatoren ganzheitlich zu berücksichtigen.
- Interpretierbarkeit: Die Indikatoren sind eindeutig zu definieren.
- Beeinflussbarkeit: Es muss die Möglichkeit bestehen, den ermittelten Wert der Indikatoren innerhalb des Betrachtungsobjekts beeinflussen zu können.

5.3 Gewichten der Reifegradindikatoren

Eine zusätzliche Differenzierung der Indikatoren nach ihrer Bedeutung für das definierte Ziel des Reifegradmodells ist durch deren Gewichtung vorzunehmen. Für eine möglichst objektive und nachvollziehbare Ermittlung der Gewichtungswerte wird der paarweise Vergleich vorgeschlagen, der eine systematische Vorgehensweise zur Bildung einer quantitativen Rangfolge bietet. Hierzu werden die Indikatoren (oder die zu untersuchenden Kriterien) zu einer Matrix (Präferenzmatrix) angeordnet und jeweils gegenübergestellt (Bild 34). Das Ergebnis des Vergleichs kann numerisch nach folgendem Schema ausgedrückt werden und ist in das jeweilige Matrixelement einzutragen [Benz 2008]:

- 0: „Zeile“ ist weniger wichtig/niedriger als „Spalte“
- 1: „Zeile“ ist gleichbedeutend wie „Spalte“
- 2: „Zeile“ ist wichtiger/höher als „Spalte“

Da beim paarweisen Vergleich die Zeilen- und Spaltentitel dieselben Indikatoren bzw. Kriterien umfassen, genügt die Bewertung der rechten Dreiecksmatrix. Die linke Dreiecksmatrix ergibt sich konsequenter Weise. Zudem sind die Hauptdiagonalelemente der Matrix erwartungsgemäß mit dem Wert „1“ festzuhalten. Die zeilenweisen Summenwerte ergeben die Bedeutungsrangfolge der Indikatoren (Rangvektor). Der Quotient aus dem jeweiligen Rangwert und dem Quadrat der Anzahl der untersuchten Indikatoren (entspricht der Summe der Rangwerte und dient als Kontrollgröße) ergibt die jeweilige Gewichtung und damit den Gewichtungsvektor. Trotz einer einfachen Handhabung erhöht sich mit steigender Anzahl der Indikatoren der Bewertungsaufwand beim paarweisen Vergleich quadratisch.

	Präferenzmatrix					Rangvektor	Gewichtungsvektor	
	1	2	3	4	5	Σ	Gew.	
1	1	0	0	1	1	3	12%	
2	2	1	2	2	2	9	36%	
3	2	0	1	2	1	6	24%	
4	1	0	0	1	1	3	12%	
5	1	0	1	1	1	4	16%	
						25	100%	

Legende
 1 Fahrgeräusche
 2 Sicherheit
 3 Kosten
 4 Farbe
 5 Design

Bewertung **Rang (-wert)**

Bild 34: Paarweiser Vergleich am Beispiel eines Automobils (nach [Theden 2002])

5.4 Reifegrad-Kennwert-Matrix

Der Kern des anwendungsspezifisch ausgelegten Reifegradmodells ist die Reifegrad-Kennwert-Matrix, die als Bewertungsbasis zur Ermittlung des Entwicklungsstands dient. Die Reifegrad-Kennwert-Matrix erfasst hierbei zu jedem (Sub-) Indikator ordinalskalierte Anforderungen und ordnet diese den Reifegradstufen zu (Tabelle 8). Durch Vergleich der Situation eines modellkompatiblen Betrachtungsgegenstands mit den stufenabhängigen Anforderungen in der Reifegrad-Kennwert-Matrix ist es möglich, dessen Entwicklungsstand hinsichtlich der Aspekte des jeweiligen Sub-Indikators zu kategorisieren und zu bewerten.

Für den Aufbau der Matrix ist zunächst die Anzahl der Reifegradstufen zu definieren. Derzeit gängige, merkmalsbasierte Reifegradmodelle (s. Kapitel 2.3) umfassen drei bis sechs Reifegrade [Kamprath 2011, Maier 2009]. Eine höhere Anzahl an Reifegradstufen bewirkt zwar eine präzisere Bewertungsmöglichkeit des Entwicklungsstands, führt aber zu einer gesteigerten Komplexität der Reifegrad-Kennwert-Matrix, da die Anforderungen an die Sub-Indikatoren innerhalb der einzelnen Reifegradstufen detaillierter gegliedert und voneinander abgegrenzt werden müssen.

Zur Determinierung der stufenabhängigen Anforderungen sind zu jedem Sub-Indikator ordinalskalierte Charakteristiken zu bestimmen und den Reifegradstufen hierarchisch zuzuordnen. Für qualitative Sub-Indikatoren können linguistische Ausprägungen als Merkmale Verwendung finden, während für quantitative Sub-Indikatoren numerische Intervalle zu jeder Reifegradstufe eingegrenzt werden können. Exemplarisch sind im Folgenden ein qualitativer und ein quantitativer Sub-Indikator mit ihren ordinalskalierten Charakteristiken aufgeführt:

- Geschmack (qualitativ): (ungenießbar, neutral, schmackhaft)
- Schalldruckpegel (quantitativ in dB): ([60; 70]; [70; 80]; [80; 90])

			Reifegradstufen				
Indikator	Gew.	Sub-Indikator	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	...	Stufe m
1	1.1 ...	Anforderungen an 1.1 in Stufe 1	Anforderungen an 1.1 in Stufe 2	Anforderungen an 1.1 in Stufe 3	...	Anforderungen an 1.1 in Stufe m
		1.2 ...	Anforderungen an 1.2 in Stufe 1	Anforderungen an 1.2 in Stufe 2	Anforderungen an 1.2 in Stufe 3	...	Anforderungen an 1.2 in Stufe m
2	2.1 ...	Anforderungen an 2.1 in Stufe 1	Anforderungen an 2.1 in Stufe 2	Anforderungen an 2.1 in Stufe 3	...	Anforderungen an 2.1 in Stufe m
		2.2 ...	Anforderungen an 2.2 in Stufe 1	Anforderungen an 2.2 in Stufe 2	Anforderungen an 2.2 in Stufe 3	...	Anforderungen an 2.2 in Stufe m
n	n.1 ...	Anforderungen an n.1 in Stufe 1	Anforderungen an n.1 in Stufe 2	Anforderungen an n.1 in Stufe 3	...	Anforderungen an n.1 in Stufe m
		n.2 ...	Anforderungen an n.2 in Stufe 1	Anforderungen an n.2 in Stufe 2	Anforderungen an n.2 in Stufe 3	...	Anforderungen an n.2 in Stufe m

Steigende Anforderungen

Tabelle 8: Schematischer Aufbau einer Reifegrad-Kennwert-Matrix

Durch die Top-Down-Vorgehensweise in der Ermittlung der Reifegradindikatoren, sind diese zumeist generisch ausgelegt und der Bezug zum Referenzmodell kann undeutlich werden. Dadurch wird auch eine zeitabhängige Beurteilung des Reifegrads im Verlauf des Phasenmodells erschwert. Daher sind die Sub-Indikatoren systemelement- und phasenabhängig dem Referenzmodell zuzuordnen, wodurch eine spezifische Evaluation des Entwicklungsstands anhand der relevanten Indikatoren zum Bewertungsmoment ermöglicht wird. Die Allokation der Sub-Indikatoren zum kombinierten Referenzmodell kann anhand folgender Syntax erfolgen:

{Phase}{Aktivität}_{(Sub-)Indikator}_{Systemelement}

Mit Bezug auf die Beispiele in Bild 32 bis Bild 34 ist „D3_2_DS“ ein Exempel für einen spezifizierten Indikator, der die Evaluation innerhalb der Phase D im Hinblick auf die Aktivität 3 (s. Bild 33) anhand der Anforderungen des Indikators 2 „Sicherheit“ (s. Bild 34) bezüglich des Systemelements „Drucksensor“ (s. Bild 32) erfasst. Durch die Spezifizierung erfolgt gleichzeitig eine Validierung der eruierten Indikatoren, da mit diesem Schritt ersichtlich wird, ob alle Elemente des Systemmodells und Phasenmodells durch die vorhandenen Indikatoren berücksichtigt werden.

5.5 Anwendung von Reifegradmodellen

Bewertungsmomente auslegen

In den meisten Fällen wird der Ablauf von Betrachtungsobjekten (z. B. ein Entwicklungsprojekt) durch vier bis sechs Evaluationsmomente unterteilt [Peters 2010]. Je mehr Bewertungsmomente eingeplant werden, desto mehr Informationen können über den Entwicklungsstand erhoben werden. Unverkennbar ist allerdings der damit verbundene, höhere Bewertungsaufwand. Die Auslegung der Bewertungsmomente entlang des Ablaufs eines Betrachtungsobjekts kann prinzipiell zeit- oder zustandsori-

entiert erfolgen (Bild 35). Eine zeitorientierte Strukturierung gliedert die Bewertungsmomente unabhängig vom Ablauf des Betrachtungsobjekts, indem beispielsweise die Reifegradermittlung halbjährlich erfolgt. Hierdurch wird zwar eine Kontinuität im Ablauf gewährleistet, wodurch eine leichtere Arbeitsaufteilung erreicht werden kann, jedoch können durch die zeitorientierte Strukturierung kritische Zustände im Ablauf unbeachtet bleiben. Für eine zweckmäßigere Berücksichtigung solch kritischer Momente eignet sich eher die zustandsorientierte Strukturierung, bei der die Bewertungszeitpunkte insbesondere bei Vereinigungen oder Aufteilungen im Ablauf des Betrachtungsobjekts positioniert werden. Allerdings kann die zustandsorientierte Strukturierung zu einem unübersichtlichen Einsatz von Bewertungsmomenten führen. Die Kombination beider Strukturierungsarten kann deren Vorzüge zusammenführen.

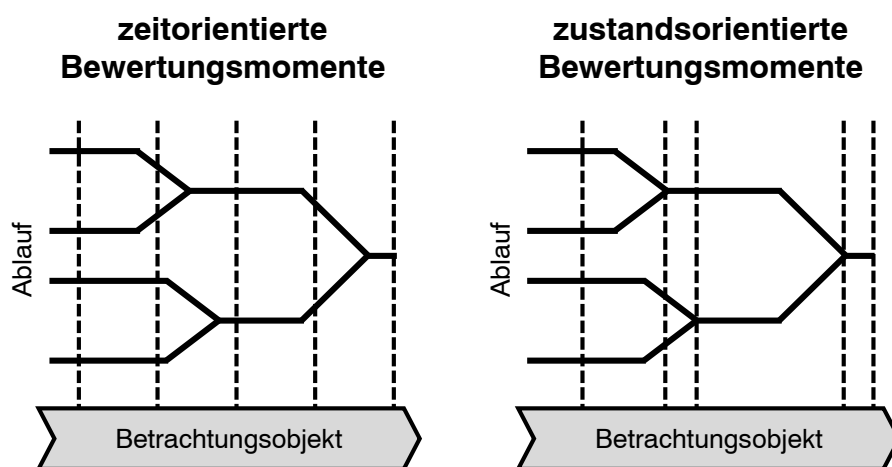


Bild 35: Zeit- und zustandsorientierte Strukturierung der Bewertungsmomente

Der Bewertungsumfang zu einem Moment kann unterschiedliche Ausprägungen besitzen. Eine prinzipielle Unterscheidung des Umfangs kann durch Meilensteine oder Quality Gates erfolgen. Beide beschreiben einen definierten Zustand im Ablauf des Betrachtungsobjekts und erfordern den Abgleich des tatsächlichen Entwicklungszustands mit den Anforderungen. Jedoch wird an Quality Gates anhand spezifischerer Erfüllungskriterien eine intensivere Evaluation des Entwicklungsstands mit drastischeren Maßnahmen und Entscheidungen hinsichtlich des weiteren Verlaufs betrieben als an Meilensteinen, die auch ohne Erreichen des geforderten Zustands mit der Bedingung, resultierende Maßnahmen bis zum nächsten Meilenstein umzusetzen, übersritten werden können [Pfeifer 2007, Exel 2007].

Bewertungsstrategie bestimmen

Die Bewertungsstrategie ist abhängig von der Konstellation der Bewertenden und der angewandten Vorgehensweise zur Reifegradevaluation. Ersteres kann zum einen durch (Unternehmens-) interne oder externe Personen zusammengesetzt sein (Bild 36). Die Rolle eines externen Bewertenden kann beispielsweise ein entsprechend ausgewiesener Mitarbeiter des Kunden übernehmen. Des Weiteren kann eine interne Bewertung durch Unabhängige oder Beteiligte (in Bezug auf das Betrachtungsobjekt)

vorgenommen werden. Handelt es sich um beteiligte Personen, kann die Bewertung durch den Konsens mehrerer Personen oder durch eine Einzelperson erfolgen. Letztere Konstellation entspricht der Selbstbewertung. Sie weist zwar einen geringeren Aufwand auf, ist aber mit einer hohen Subjektivität und damit Unsicherheit im Bewertungsergebnis verbunden. Dahingegen besitzen umfassendere Bewertungen durch beispielsweise externe Personen eine höhere Objektivität aufgrund der unvoreingenommenen Herangehensweise. Allerdings ist diese Konstellation auch an einen höheren Aufwand gekoppelt.

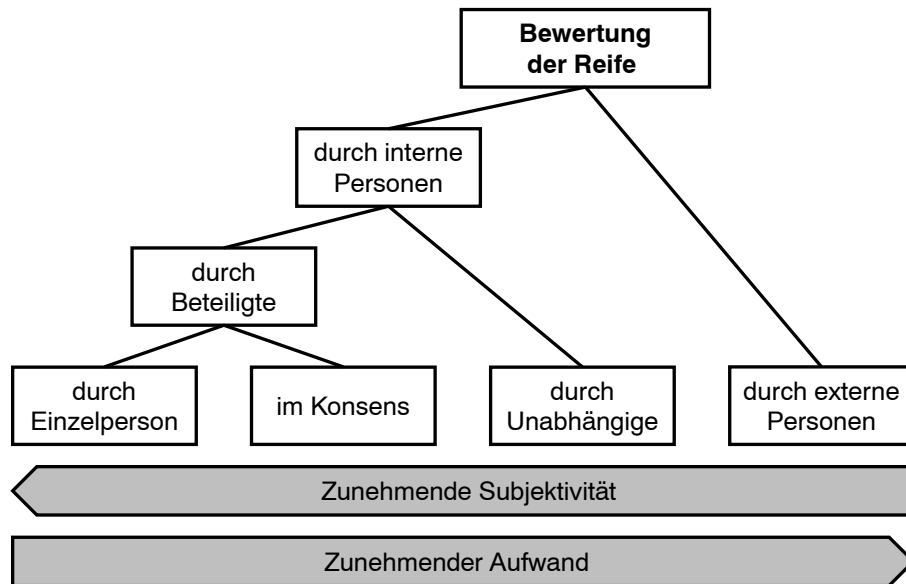


Bild 36: Alternative Strategien zur Reifegradermittlung in Anlehnung an [Bitterli 2005]

Jeder Systemelement-Experte evaluiert zu einem bestimmten Moment in moderierter Weise sein jeweiliges Systemelement. Durch die geringe Personalbindung bleibt der Aufwand niedrig, während die Bewertungseffektivität durch das Involvieren der jeweiligen Experten hoch ausfällt. Allerdings besitzen die Bewertungsergebnisse dieser Konstellation aufgrund ihrer Subjektivität eine hohe inhärente Unsicherheit, die nicht zu vernachlässigen ist. Unter Berücksichtigung des Unsicherheitsaspekts wird im Rahmen dieser Arbeit die folgende Vorgehensweise für die Reifegradevaluation gewählt:

- 1 Bewertung:
Alle bis zum aktuellen Evaluationsmoment den Phasen zugewiesenen Indikatoren sind durch die jeweiligen Systemelement-Experten zu bewerten.
- 2 Ermittlung und Visualisierung:
Unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit sind die Bewertungen zu Reifegraden zu aggregieren und darzustellen.
- 3 Diskussion:
Das Reifegradergebnis ist im Gespräch zu analysieren und zu untersuchen.
- 4 Maßnahmen:
Auf Basis der Reifegradergebnisse sind unter Zuhilfenahme der Reifegrad-Kennwert-Matrix Maßnahmen abzuleiten, einzuleiten und zu verfolgen.

6 Reifegradermittlung mit unsicheren Eingangsgrößen

6.1 Methodik für merkmalsbasierte Unsicherheitsmodelle

Die Reifegradermittlung ist prinzipbedingt mit Unsicherheiten verbunden, da eine Einschätzung zur Erfüllung der Anforderungen der Reifegrad-Kennwert-Matrix durch den Betrachtungsgegenstand stets subjektive Meinungen bzw. nicht quantifizierbare Größen mitverwendet und zu einem quantifizierten Grad, der eine vermeintliche Genauigkeit suggeriert, überführt werden. So weisen die beiden Werte 82% oder 85% eine ähnliche und nicht scharf trennbare Bedeutung auf. Die Berücksichtigung und Angabe der Informationsunsicherheit in der Reifegradanalyse gewährleistet valide und differenzierbare Daten über den Entwicklungsstand, wodurch gezielt Verbesserungsmaßnahmen ausgewählt werden können. Dazu ist parallel zur Konstruktion eines anwendungsspezifischen Reifegradmodells ein merkmalsbasiertes Unsicherheitsmodell aufzustellen, das ein Stufenmodell mit unsicherheitsrelevanten Faktoren darstellt und damit die multikriterielle Erfassung der Informationsunsicherheit ermöglicht. Die Unsicherheitsfaktoren sind hierbei auf Basis eines Systemmodells zu deduzieren, welches die prinzipiellen Elemente in der Reifegradmodellkonstruktion und -anwendung sowie die dabei wirkenden Unsicherheiten erfasst (Bild 37). Zur methodischen Unterstützung in der Systemmodellierung können Strukturdiagramme oder Interrelationendiagramme eingesetzt werden. Die anschließende Herleitung der Unsicherheitsfaktoren kann durch die Metaplantchnik und die kategorisierenden Affinitätsdiagramme effizient durchgeführt werden. Nach Gewichtung der Faktoren kann die Unsicherheit-Kennwert-Matrix aufgestellt werden, welche die stufenweisen Anforderungen an die jeweiligen Faktoren - analog zu einer Reifegrad-Kennwert-Matrix - definiert. Abschließend können sowohl das Unsicherheitsmodell als auch das Reifegradmodell in einem Fuzzy-System zusammengeführt werden. Dazu werden die Reifegradstufen als linguistische Eingangsterme abgebildet, deren Zugehörigkeitsfunktion unsicherheitsabhängig ausgelegt wird.

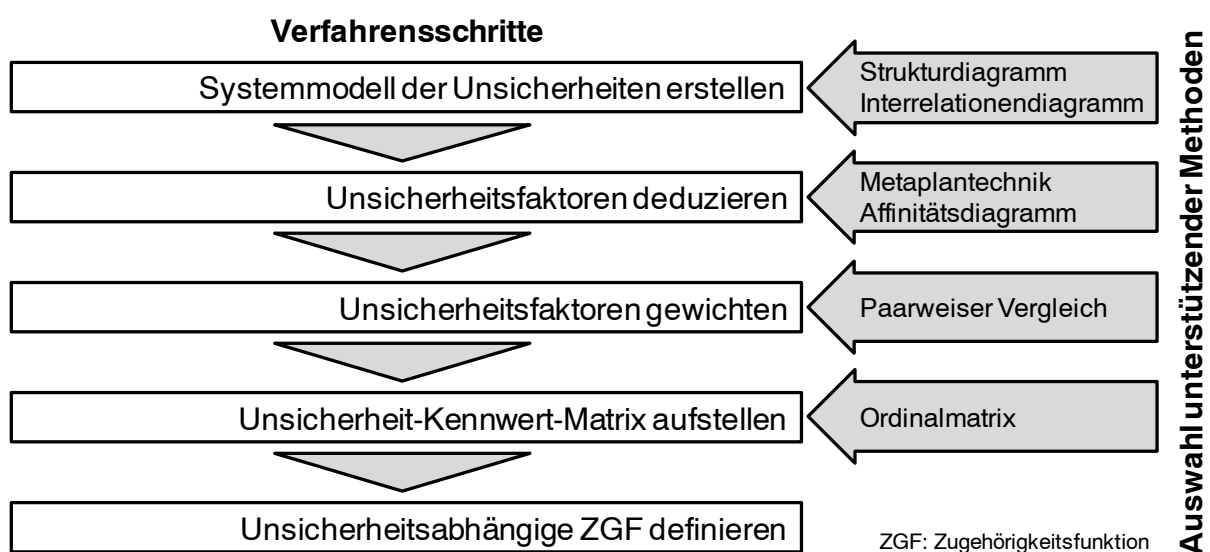


Bild 37: Vorgehensweise zur methodengestützten Auslegung eines Unsicherheitsmodells

Systemmodell aufbauen

Als Grundlage für die systemische Betrachtung der Informationsunsicherheiten in der Reifegradmodellauslegung und -anwendung dient die in Bild 17 ansatzweise vorgestellte Analyse. Diese wird um das Element des Referenzmodells erweitert (Bild 38), wodurch sowohl die Konstruktionsphase als auch die Anwendungsphase erfasst werden. Die Konstruktionsphase umfasst das Betrachtungsobjekt, das Referenzmodell sowie das resultierende Reifegradmodell. Die Anwendungsphase wiederum setzt sich aus dem Reifegradmodell, dem Bewertenden und dem Betrachtungsobjekt zusammen. Die Interdependenzen zwischen diesen Strukturelementen werden durch die Informationsflüsse berücksichtigt. In Anlehnung an das Sender-Empfänger-Prinzip im Kommunikationsmodell nach [Shannon 1948] werden sukzessive potentielle Informationsdefizite zwischen zwei Systemelementen analysiert, bei dem eines entsprechend des Informationsflusses die Senderrolle einnimmt, wenn es die Informationsquelle ist, während das andere die Empfängerrolle übernimmt, wenn es die Informationssenke ist. Anhand der Informationsdefizite werden essenzielle Faktoren zur multikriteriellen Analyse und Bewertung der Unsicherheit deduziert. Ein Informationsrückfluss kann entstehen, wenn Modelle oder das Betrachtungsobjekt durch gewonnene Erkenntnisse revidiert oder verbessert werden.

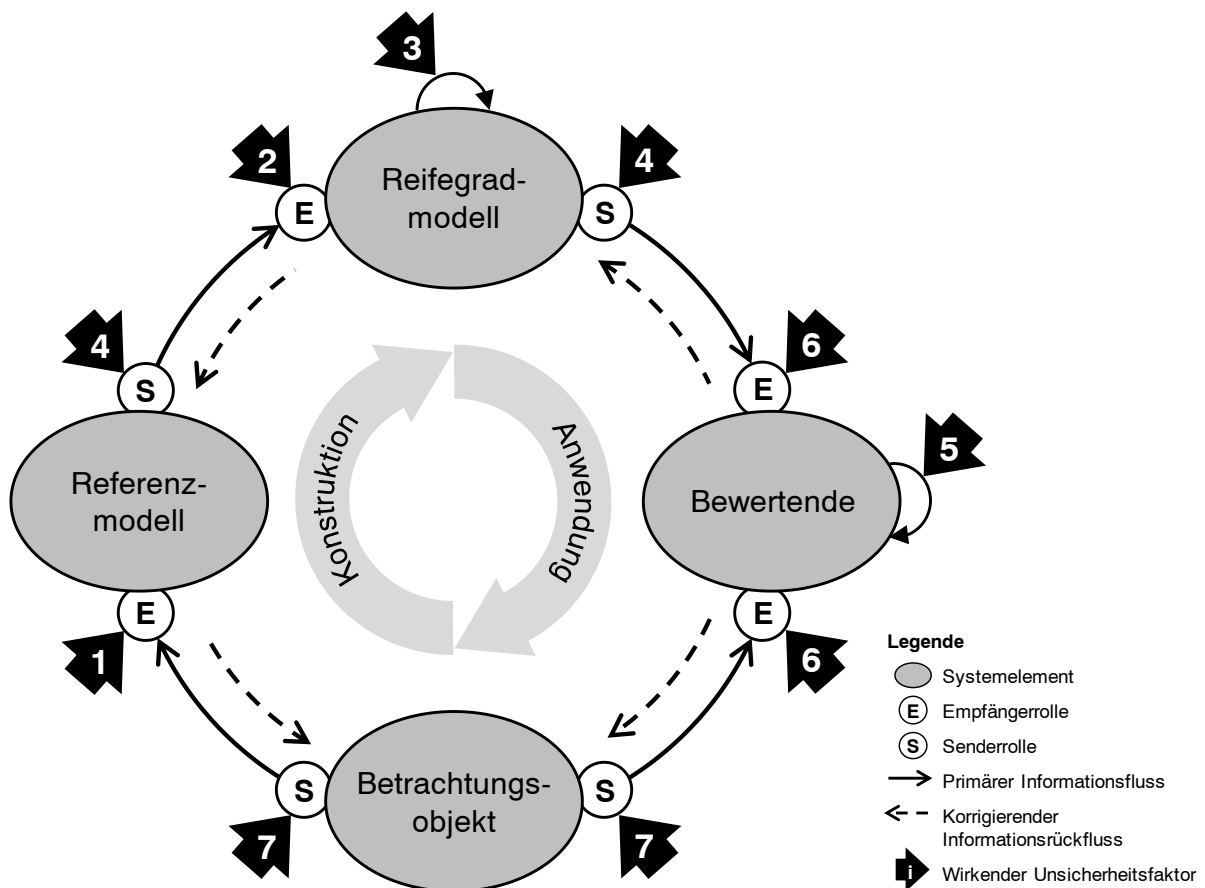


Bild 38: Ansatzpunkte für Unsicherheitsfaktoren in der Reifegradmodellauslegung und -bewertung

Unsicherheitsfaktoren deduzieren

Die erhobenen Unsicherheitsfaktoren sind in Bild 38 mit ihrem Wirkungsort erfasst und werden in zwei Kategorien unterteilt. Hierdurch werden zum einen die Unsicherheiten berücksichtigt, die dem Reifegradmodell und dessen Konstruktion innewohnen. Zum anderen werden die aus Anwendungssicht bewertungsabhängigen Unsicherheiten wiedergespiegelt. Hinsichtlich der Auslegung von Reifegradmodellen resultieren die folgenden, näher beschriebenen Unsicherheitsfaktoren:

- 1 **Abbildungsdiskrepanz des Referenzmodells**
Als Abbild des Betrachtungsobjekts kann ein Referenzmodell dieses nur in beschränktem Maße zu einem bestimmten Zweck erfassen. Aufgrund geplanter oder ungeplanter Reduktionen in der Vorgehensweise der Modellierung und Validierung sowie im Umfang können Abweichungen zwischen Betrachtungsobjekt und Referenzmodell entstehen, die mit diesem Faktor erfasst werden.
- 2 **Abbildungsdiskrepanz der Reifegradindikatoren**
Das Reifegradmodell nutzt die Informationen aus dem Referenzmodell, um auf dessen Basis die Reifegradindikatoren zu eruieren. Da auch hier die Abbildungsgüte der Indikatoren eingeschränkt sein kann, fokussiert dieser Faktor deren Validität, indem das Identifikations- und Validierungsverfahren, der Umfang und die Struktur des Modells (Anzahl der Reifegradstufen etc.) beurteilt werden.
- 3 **Gewichtungsunsicherheit**
Abhängig vom angewandten Erhebungsverfahren können die Gewichtungswerte der Indikatoren die Unsicherheit in der Reifegradermittlung beeinflussen, weswegen dieser Effekt in die Unsicherheitsanalyse einbezogen wird.
- 4 **Linguistische Unschärfe / Modellunsicherheit**
Mit Hilfe dieses Faktors wird berücksichtigt, dass aufgrund abweichend verwendeter Begrifflichkeiten in den primär qualitativ beschriebenen und ausgedrückten Anforderungen der Reifegrad-Kennwert-Matrix oder unzureichender Anwendung von Modellierungssprachen in der Referenzmodellierung linguistische Unschärfen oder Modellierungsunsicherheiten resultieren können, die wiederum zur fehlerhaften Interpretation und damit zu einer defizitären Reifegradbewertung führen.

Im Hinblick auf die Anwendung von Reifegradmodellen ergeben sich anhand des Strukturdiagramms in Bild 38 folgende, näher erläuterte Unsicherheitsfaktoren:

- 5 **Unkenntnis im Untersuchungsumfeld**
Je geringer der prinzipielle Wissens- bzw. Kenntnisstand im Untersuchungsumfeld ist und je intensiver die vorzunehmenden Änderungen und Verbesserungen am Betrachtungsobjekt sind, desto höher ist die vorliegende Unsicherheit aufgrund der erschwerten Einschätzung des Entwicklungsstands. Aufgrund der temporal ansteigenden Wissensbasis im Veränderungsverlauf des Betrachtungsobjekts besitzt dieser Faktor eine von der Zeit abhängige Komponente.

6 Subjektivität in der Interpretation/Beobachtung

Der Bewertende hat mit seinem subjektiven Vorwissen sowohl die Beobachtungen am Betrachtungsobjekt zu interpretieren als auch die Anforderungen in der Reifegrad-Kennwert-Matrix, um die Schnittmenge zwischen Zustand und Anforderung als Reifegrad auszudrücken. Die Vorgehensweise, die Zusammensetzung der Bewertungsgruppe und die Verfügbarkeit unterstützender Dokumente beeinflussen die Unsicherheit und werden mit diesem Faktor erfasst.

7 Informationsqualität (des Betrachtungsobjekts)

Die Unsicherheit der Reifegradbewertung des Betrachtungsobjekts ist abhängig von der Qualität der verfügbaren und bereitgestellten Informationen. Durch diesen Faktor werden die Zugänglichkeit, Fehlerfreiheit, eindeutige Auslegbarkeit / Darstellung, Verständlichkeit, Relevanz, angemessener Umfang und Aktualität der Informationen und Daten für die Unsicherheitsanalyse bewertet [Wang 1998].

Unsicherheitsfaktoren gewichten

Der paarweise Vergleich zur Gewichtung der Unsicherheitsfaktoren erfolgt analog zu Kapitel 5.3 und bewertet den Unsicherheitseinfluss der Faktoren in der methodischen Auslegung und Anwendung bedarfsgerechter Reifegradmodelle. Der Kenntnisstand der Bewertenden über das Betrachtungsobjekt ist besonders schwierig einzuschätzen. Daher besitzt der Faktor „Unkenntnis im Untersuchungsumfeld“ den höchsten Unsicherheitseinfluss. Die „Abbildungsdiskrepanz der Indikatoren“ spiegelt die Adäquanz des Reifegradmodells für das Betrachtungsobjekt wider und ist sowohl für die Auslegung als auch Anwendung von bedarfsgerechten Reifegradmodellen folgerichtig von hoher Relevanz. Die Interpretationsunsicherheit des Referenz- und Reifegradmodells („Linguistische Unschärfe / Modellunsicherheit“) ist aufgrund der Berücksichtigung eines System- und Phasenmodells sowie der Verwendung der Reifegrad-Kennwert-Matrix niedrig. Ebenso fällt der Einfluss der „Gewichtungsunsicherheit“ aufgrund der eingesetzten Methode des paarweisen Vergleichs niedrig aus. Tabelle 9 fasst die ermittelten Gewichtungswerte für die jeweiligen Faktoren zusammen.

		Unsicherheitsfaktoren							Σ	Gew.*
		1	2	3	4	5	6	7		
Unsicherheitsfaktoren	1	1	1	2	1	1	1	1	8	16%
	2	1	1	2	2	1	2	1	10	21%
	3	0	0	1	1	0	1	1	4	8%
	4	1	0	1	1	0	0	1	4	8%
	5	1	1	2	2	1	2	2	11	23%
	6	1	0	1	2	1	1	1	6	12%
	7	1	1	1	1	0	1	1	6	12%
* angewandte Werte								Summe:	49	100%

Legende Unsicherheitsfaktoren

- 1 Abbildungsdiskrepanz des Referenzmodells
- 2 Abbildungsdiskrepanz der Reifegradindikatoren
- 3 Gewichtungsunsicherheit
- 4 Linguistische Unschärfe / Modellunsicherheit
- 5 Unkenntnis im Untersuchungsumfeld
- 6 Subjektivität in der Interpretation/Beobachtung
- 7 Informationsqualität (des Betrachtungsobjekts)

Tabelle 9: Paarweiser Vergleich der Unsicherheitsfaktoren zur Bestimmung der Gewichtungen

Unsicherheit-Kennwert-Matrix aufstellen

Die Unsicherheit-Kennwert-Matrix erfasst - ähnlich zur Reifegrad-Kennwert-Matrix - in einer Ordinalstruktur stufenweise die Anforderungen an die jeweiligen Unsicherheitsfaktoren und bietet damit einen Ordnungsrahmen für die Bewertung der vorliegenden Unsicherheit in der Reifegradmodellkonstruktion und -anwendung. Die Ordinalmatrix umfasst vier Stufen zur Bewertung der Unsicherheit, die den prozentualen Intervallen [0%; 15%], [15%; 50%], [50%; 85%] und [85%; 100%] zugeordnet werden. Dieser Bewertungsrahmen ist dem bewährten Reifegradmodell SPICE entlehnt. Zu jeder Unsicherheitsstufe werden die Anforderungen anhand factorspezifischer Merkmale und der stufenabhängigen Variation ihrer Ausprägungen definiert (Tabelle 10).

	Unsicherheitsfaktor	Merkmale	Ausprägung
Konstruktion Reifegradmodell	1 Abbildungsdiskrepanz des Referenzmodells	Methodische Vorgehensweise	nicht -/appliziert
		Validierung durch Nutzer	nicht -/durchgeführt
		Modellumfang	un-/angemessen
		Bewertungsorgan	einzeln/Team
		Abbildungsgüte	un-/berücksichtigt
	2 Abbildungsdiskrepanz der Reifegradindikatoren	Methodische Vorgehensweise	nicht -/appliziert
		Validierung durch Nutzer	nicht -/durchgeführt
		Umfang	un-/angemessen
		Bewertungsorgan	einzeln/Team
		Methodenexperte	nicht -/vorhanden
	3 Gewichtungsunsicherheit	Methodische Vorgehensweise	nicht -/appliziert
		Revision	nicht -/durchgeführt
		Bewertungsorgan	einzeln/Team
		Dokumentation	nicht -/nachvollziehbar
	4 Linguistische Unschärfe / Modellunsicherheit	Fachspezifische Begriffe	nicht -/verwendet
		Unterstützende Dokumentation	nicht -/vorhanden
Modellierungssprache		nicht -/verwendet	
Anwendung Reifegradmodell	5 Unkenntnis im Untersuchungsumfeld	Thematische Neuartigkeit	aktuell/innovativ
		Änderungsgrad	tiefgreifend/überschaubar
		Bewertungsmoment	früh/fortgeschritten
	6 Subjektivität in der Interpretation/ Beobachtung	Methodische Vorgehensweise	nicht -/appliziert
		Subjektiver Kenntnisstand	geringe/hohe Kenntnis
		Betrachtungsumfang	einseitig/multiperspektivisch
		Bewertungsorgan	einzeln/Team
		Methodenexperte	nicht -/vorhanden
	7 Informationsqualität (des Betrachtungsobjekts)	Zugänglichkeit	ja/nein
		Fehlerfreiheit	ja/nein
		eindeutige Darstellung	ja/nein
		Verständlichkeit	ja/nein
		Relevanz	ja/nein
Umfang		un-/angemessen	
Aktualität		ja/nein	

Tabelle 10: Merkmale und Ausprägungen der eruierten Unsicherheitsfaktoren

Die gesamte Unsicherheit-Kennwert-Matrix ist dem Anhang dieser Arbeit zu entnehmen (Tabelle-Anhang A und Tabelle-Anhang B). Die Validierung des konstruierten Unsicherheitsmodells bezüglich Gültigkeit und Zweckmäßigkeit erfolgte im Rahmen der Anwendung der vollständigen Vorgehensweise zur Auslegung bedarfsgerechter Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit am Beispiel der Entwicklung eines neuen Umformprozesses (s. Kapitel 7).

Mit Hilfe der Unsicherheit-Kennwert-Matrix kann die existente Unsicherheit fallspezifisch ermittelt werden, indem ein bestehender Zustand mit den definierten Anforderungsstufen verglichen und ein prozentualer Wert zu jedem Faktor geschätzt wird. Mittels des gewichteten arithmetischen Mittelwerts der einzelnen Faktorbewertungen ergibt sich letztlich ein Unsicherheitswert U , der die gegenwärtige Informationsunsicherheit wiedergibt.

6.2 Fuzzy-System zur Abbildung der Informationsunsicherheit

Für die Reifegradbewertung unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit kommt ein Fuzzy-System zum Einsatz, dessen Parameter sowohl in Abhängigkeit des Reifegradmodells als auch in Bezug zum Unsicherheitsmodell auszulegen sind. Dabei entsprechen die scharfen Eingangswerte des Fuzzy-Systems dem prozentual eingeschätzten Überschneidungsgrad zwischen dem beobachteten Entwicklungsstand und den Anforderungen der Reifegrad-Kennwert-Matrix. Die linguistischen Eingangsvariablen des Fuzzy-Systems repräsentieren die Sub-Indikatoren des Reifegradmodells und sind durch die manuell oder softwaregestützt aufgestellte Regelbasis (Wenn-Dann-Beziehungen) sowie die festgelegten Operatoren für Aggregation, Implikation und Akkumulation mit den linguistischen Ausgangsvariablen, die die übergeordneten Indikatoren darstellen, verknüpft (Bild 39). Die Anzahl der linguistischen Terme für die Eingangsvariablen (Sub-Indikatoren) ergibt sich aus der Anzahl der Reifegradstufen. Eine linguistische Ausgangsvariable sollte prinzipiell mehr Terme besitzen als deren Eingangsvariablen [Leonenkov 2005, Altrock 1995]. Der Wertebereich beider linguistischen Variablen entspricht dem Bewertungsintervall der Sub-Indikatoren bzw. Indikatoren. Die linguistischen Terme sind durch ihre Zugehörigkeitsfunktionen μ explizit zu definieren. Dies kann durch die Parameter „Einflussbreite“ und „Kern“ (s. Bild 21) erfolgen. Zur Reduzierung der Komplexität des Fuzzy-Systems können die Ausgangsterme über den Wertebereich der Variablen als Dreiecksfunktionen gleichverteilt werden. Die Zugehörigkeitsfunktionen μ der Eingangsterme bleiben zu bestimmen. Dies soll in Abhängigkeit vom Unsicherheitswert U erfolgen. Als Ergebnisse des Fuzzy-Systems resultieren die unscharfen Indikatorreifegrade, die entweder in dieser Form ausgegeben oder durch die Anwendung einer Defuzzifizierungsmethode in einen scharfen Wert umgewandelt werden können. Mit Hilfe zweckmäßiger Visualisierungstechniken sind diese Daten und Informationen konzentriert darzustellen (Kapitel 6.3).

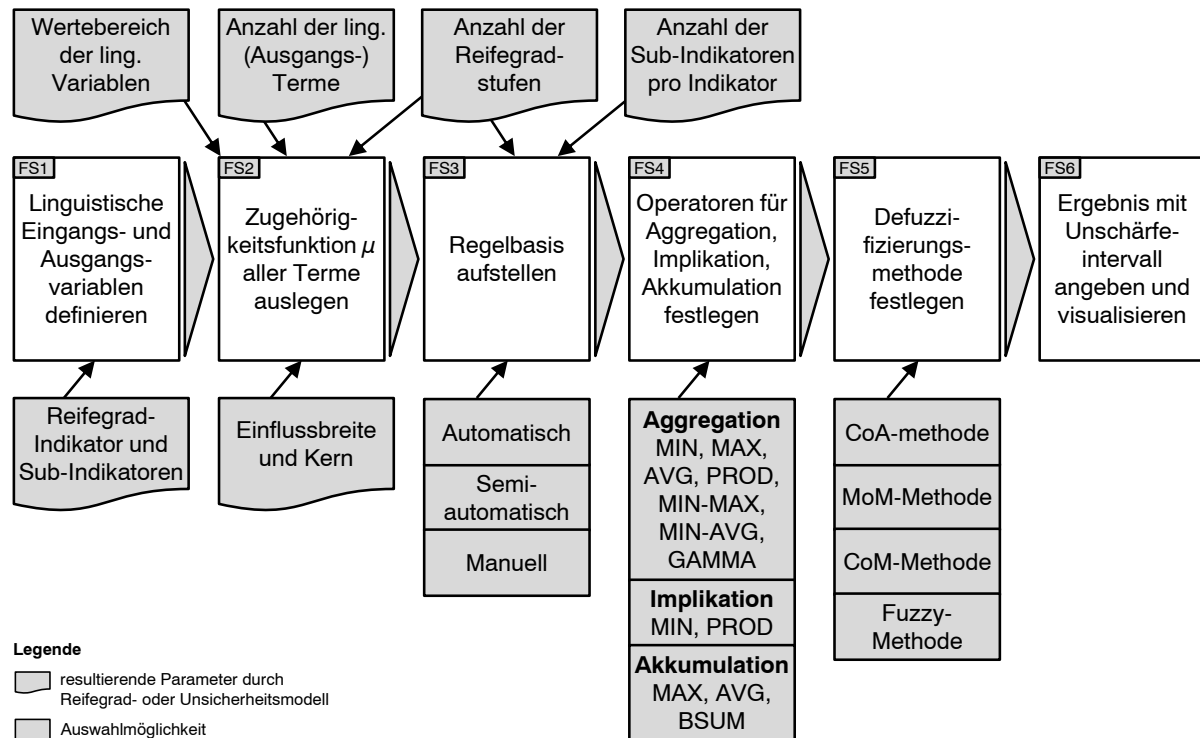


Bild 39: Erfasste Struktur und Parameter eines Fuzzy-Systems zur Reifegradermittlung unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit

Grenzsituationen für linguistische Terme in Abhängigkeit vom Unsicherheitswert

Zur Auslegung der Zugehörigkeitsfunktionen μ_i mit $i \in \{I, II, III, IV\}$ der Eingangsterme in Abhängigkeit vom Unsicherheitswert U werden die beiden Grenzsituationen $U = 0$ und $U = 1$ am Beispiel einer linguistischen Variable mit vier Termen betrachtet (Bild 40). Dies entspricht einem Sub-Indikator mit vier Reifegradstufen. Bei einer inexistenten Unsicherheit ($U = 0$) wird angenommen, dass die Grenzen der Reifegradstufen eindeutig sind, wonach jede Einschätzung zum Überdeckungsgrad zwischen aktuellem Zustand und den Anforderungen der Reifegrad-Kennwert-Matrix einer spezifischen Reifegradstufe zugeordnet werden kann. Für die linguistischen Terme resultieren damit rechteckige und klar voneinander abgegrenzte Zugehörigkeitsfunktionen. Eine maximale Unsicherheit ($U = 1$) entspricht demnach Reifegradstufen mit sich überschneidenden Grenzen, die durch überlappende, dreieckige Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt werden können. Für $0 < U < 1$ resultieren trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen.

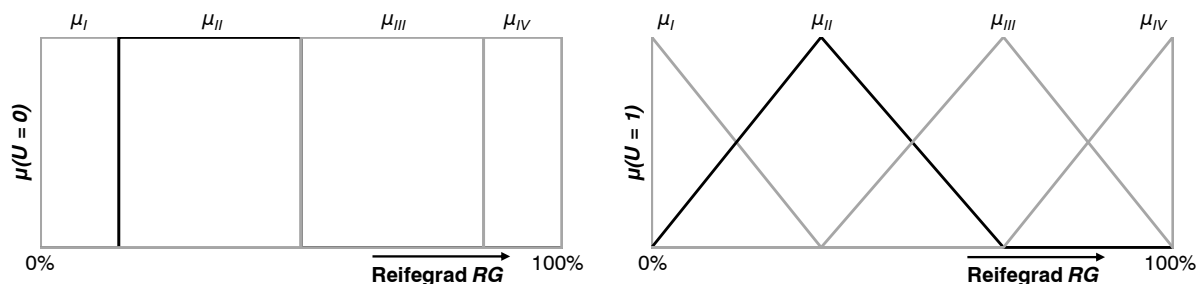


Bild 40: Grenzsituationen für eine linguistische Variable mit vier Termen in Abhängigkeiten vom Unsicherheitswert U

Auswahl und Auslegung der Parameter von linguistischen Termen

Auf Basis der vorangehenden Grenzbetrachtung sind die linguistischen Eingangsterme in Abhängigkeit ihrer Einflussbreite ($\mu_i = 1$) und ihrem Kern ($\mu_i > 0$) zu parametrisieren. Dazu wird die in Kapitel 2.5.4 bestimmte Koordinatendarstellung für linguistische Terme verwendet (s. Formel (2)) und in Abhängigkeit vom mittels gewichtetem arithmetischem Mittelwert der bewerteten Unsicherheitsfaktoren bestimmten Unsicherheitswert U ausgelegt.

Während die Strecke $[lr]$ der Einflussbreite der Zugehörigkeitsfunktion entspricht, wird der Kern durch die Strecke $[m_1, m_2]$ repräsentiert (Bild 41). Für die in Bild 40 dargestellten Grenzsituationen ist der Zusammenhang zwischen den Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Terme μ_i bis μ_{IV} und dem Unsicherheitswert U nicht linear ausgelegt, sondern mittels Wurzelfunktionen beschrieben [Akkasoglu 2012b]:

$$\mu_I(U) = \{(0; 0), (0; 1), (0, 15 \cdot (1 - \sqrt{U}); 1), (0, 175 \cdot \sqrt{U} + 0, 15; 0)\} \quad (20)$$

$$\mu_{II}(U) = \{(0, 15 \cdot (1 - \sqrt{U}); 0), (0, 175 \cdot \sqrt{U} + 0, 15; 1), (0, 5 - 0, 175 \cdot \sqrt{U}; 1), (0, 175 \cdot \sqrt{U} + 0, 5; 0)\} \quad (21)$$

$$\mu_{III}(U) = \{(0, 5 - 0, 175 \cdot \sqrt{U}; 0), (0, 175 \cdot \sqrt{U} + 0, 5; 1), (0, 85 - 0, 175 \cdot \sqrt{U}; 1), (0, 15 \cdot \sqrt{U} + 0, 85; 0)\} \quad (22)$$

$$\mu_{IV}(U) = \{(0, 85 - 0, 175 \cdot \sqrt{U}; 0), (0, 15 \cdot \sqrt{U} + 0, 85; 1), (1; 1), (1; 0)\} \quad (23)$$

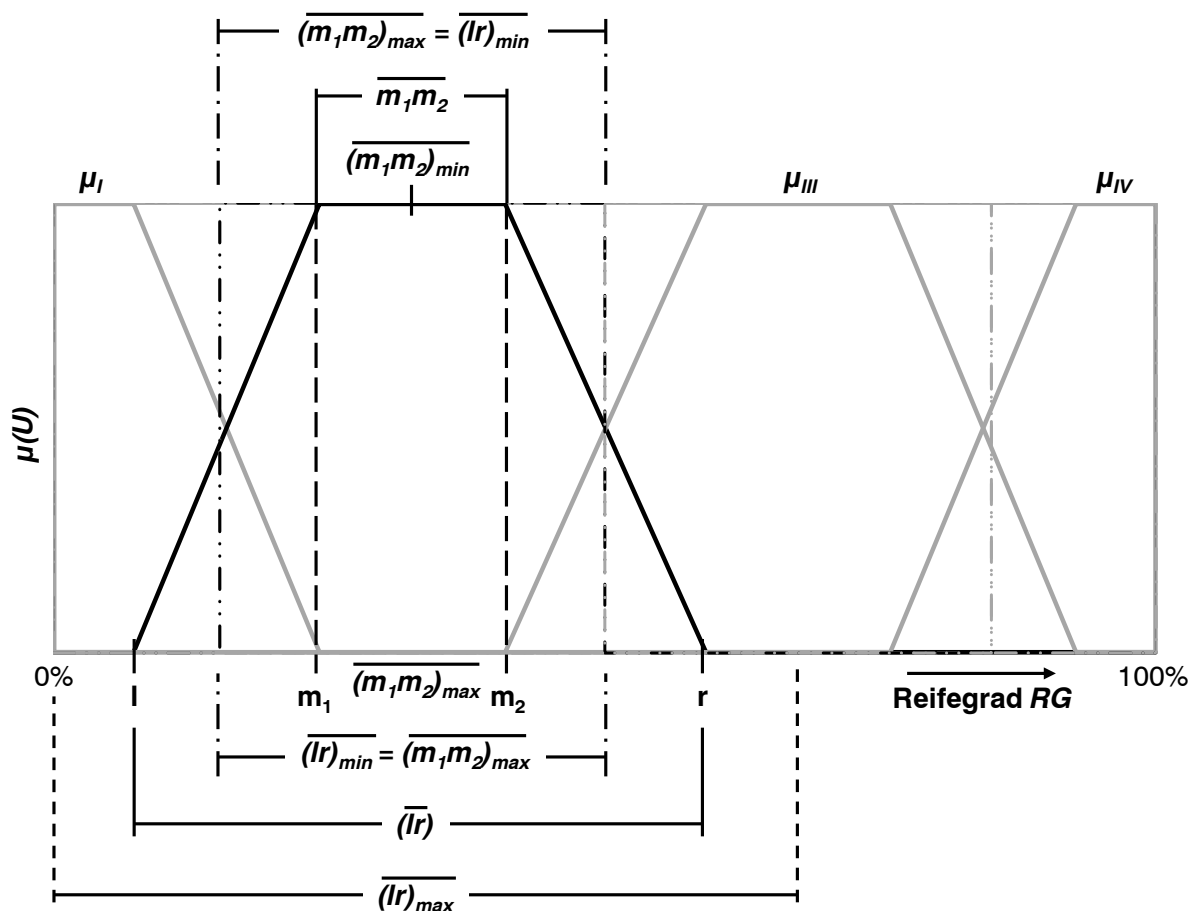


Bild 41: Parametrisierung der Zugehörigkeitsfunktion (in Anlehnung an [Akkasoglu 2012b])

Durch die nichtlineare Spezifizierung der linguistischen Terme haben bereits kleine Unsicherheitswerte einen größeren Effekt auf die Einflussbreite und den Kern einer Zugehörigkeitsfunktion (Bild 42). Auf diese Weise können potenziell niedrige Bewertungen der Faktoren zur Beschönigung des Unsicherheitseinflusses kompensiert werden.

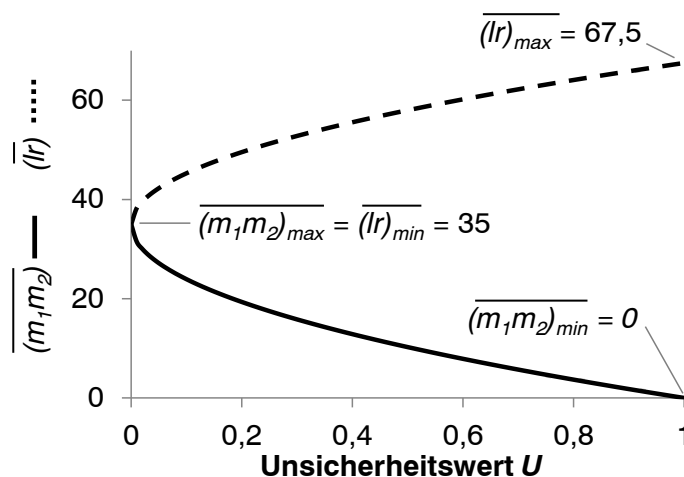


Bild 42: Einfluss des Unsicherheitswerts auf die Parameter der Zugehörigkeitsfunktion (in Anlehnung an [Akkasoglu 2012b])

6.3 Visualisierung unschärfebehafteter Reifegradergebnisse

Die vorausgehende Parametrisierung und Auslegung eines Fuzzy-Systems ermöglicht die Verknüpfung des anwendungsspezifisch konstruierten Reifegradmodells mit dem Unsicherheitsmodell, wodurch der Entwicklungsstand zu einem bestimmten Moment unter Berücksichtigung der Unsicherheit ermittelt werden kann. Das Ergebnis eines Fuzzy-Systems zur Reifegradermittlung sind die Indikatorreifegrade, die abhängig von der Defuzzifizierungsmethode als scharfer Wert oder als eine Fuzzy-Darstellung ausgegeben werden. Letzteres entspricht einem Balkendiagramm der Zugehörigkeiten zu den linguistischen Ausgangstermen und stellt Informationen zum Möglichkeitsintervall für die jeweiligen Reifegradwerte bereit. Dies wird als Unschärfeintervall interpretiert. Zur Visualisierung unschärfebehafteter Reifegrade werden die Informationen aus beiden Ausgabetypen herangezogen und in einem separaten Balkendiagramm der Indikatorreifegrade zusammengefasst (Bild 43). Für einen gesamtheitlichen Überblick über den momentanen Entwicklungsstand können die Indikatorreifegrade mit Hilfe der Intervallrechnung durch den gewichteten, arithmetischen Mittelwert der jeweils minimalen, maximalen und scharfen Ausgabewerte der Indikatoren zum Gesamtreifegrad mit Unschärfeintervall zusammengefasst werden. Eine solche Vorgehensweise in der unschärfebehafteten Reifegradermittlung besitzt eine systembedingte Auflösung in Abhängigkeit von der Anzahl der linguistischen Ausgangsterme. Eine möglichst hohe Anzahl von Ausgangstermen ist allerdings durch die Anzahl der Eingangsvariablen und -terme beschränkt, da sonst einige Ausgangsterme aufgrund der geringen Kombinierbarkeit der Prämissenelemente der Regelbasis (Wenn-Beziehungen) nicht angesprochen werden können.

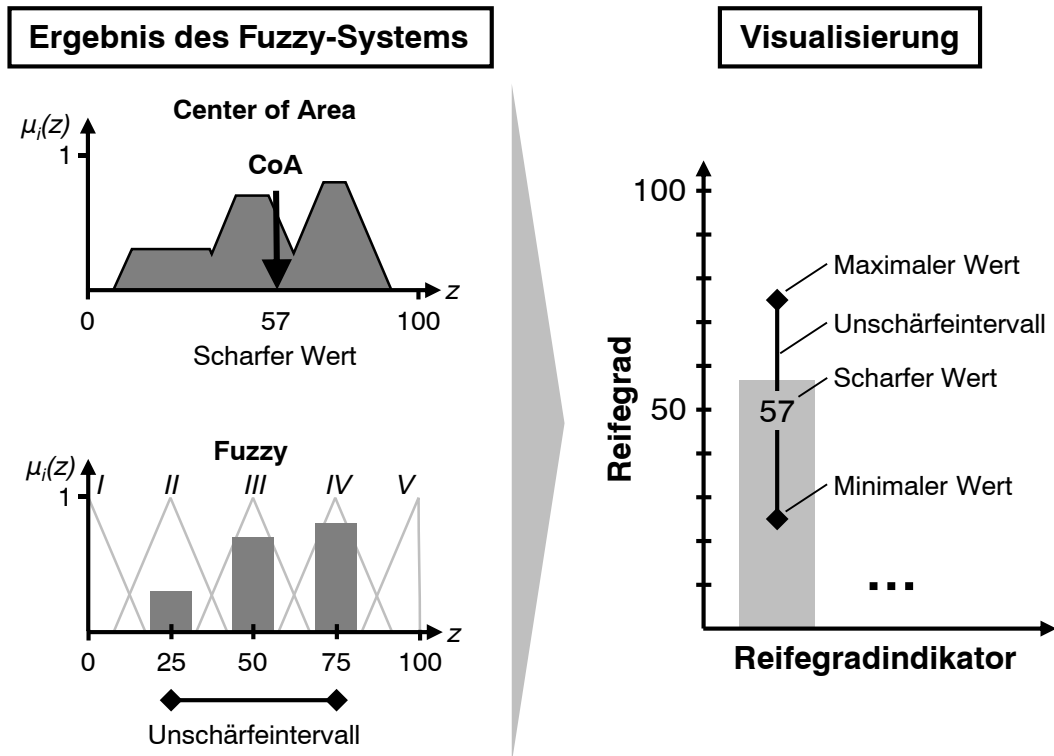


Bild 43: Visualisierungsschema am Beispiel aus Kapitel 2.5.4

7 Validierung der konzipierten Vorgehensweise

Die konzipierte Methodik zum Aufbau von Reifegradmodellen unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit soll hinsichtlich Zweckmäßigkeit und Gültigkeit validiert werden. Als Betrachtungsobjekt wurde die Entwicklung des neuartigen Blechmassivumformprozesses im Rahmen des SFB/Transregio 73 gewählt. Zunächst werden Ziele und Besonderheiten in der Gestaltung und Auslegung des Fertigungsprozesses charakterisiert und der Bedarf für ein Reifegradmodell abgeleitet. Anschließend erfolgt die Analyse existenter Reifegradmodelle im Hinblick auf ihre Relevanz für das Betrachtungsobjekt.

7.1 Entwicklung der Blechmassivumformung

Etablierte Fertigungsverfahren gelangen aufgrund steigender Kundenforderungen nach gewichtsreduzierten, eigenschaftsverbesserten und funktionserweiterten Produkten an ihre derzeitigen Leistungsgrenzen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die kontinuierliche Verbesserung und Entwicklung von Fertigungsprozessen notwendig. Insbesondere Umformverfahren bieten mit ihrer hohen Materialeffizienz und damit ressourcenschonenden sowie endkonturnahen Materialbearbeitung forderungsgerechte Potenziale, die mit der Überwindung derzeitiger Prozessgrenzen erfüllt werden können. Diese Möglichkeit wird mit der Entwicklung der neuartigen Blechmassivumformung im Rahmen des SFB/Transregio 73 aufgegriffen: Durch die technologische Kombination von Blech- und Massivumformverfahren und Integration in einen Prozessschritt sollen variantenreiche Produkte mit gesteigerter Bauteilfunktionalität sowie einer verkürzten und damit sowohl wirtschaftlichen als auch robusten Prozesskette ermöglicht werden [Merklein 2010, Weckenmann 2012a]. Eine konzeptionelle Prozesskette für die Entwicklung der Blechmassivumformung umfasst die vorbereitende Fertigung eines prozessangepassten Halbzeugs und die endkonturnahe Herstellung eines Bauteils mit integrierten Funktionselementen (Bild 44). Beide Prozessstufen sollen ausgewählte Verfahren der Blech- und Massivumformung kombinieren, um die Form des flächenhaften Eingangsmaterials bildsam zu ändern. Dabei steigen entlang der Prozesskette die Anforderungen an die zu integrierende Messtechnik aufgrund der filigraneren Bauteilelemente.

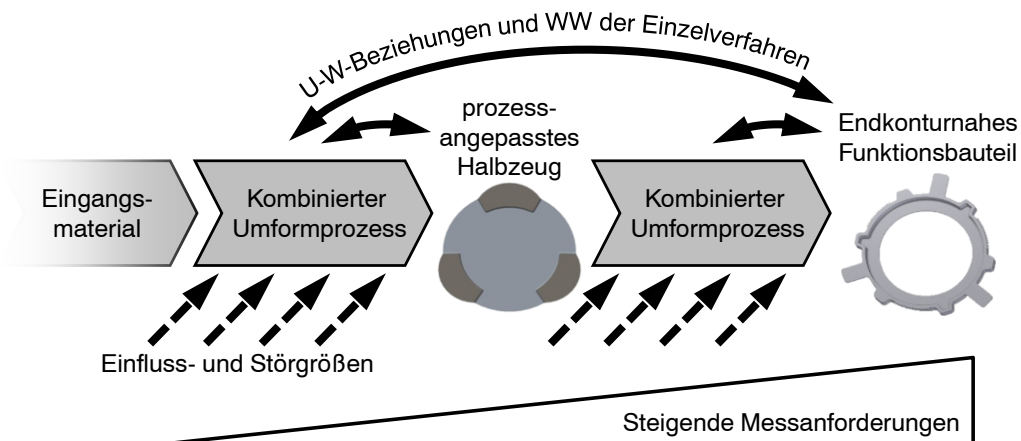


Bild 44: Konzeptionelle Prozesskette in der Entwicklung der Blechmassivumformung

Charakteristisch für die Entwicklung eines neuen Umformverfahrens sind ausgeprägte Simulations- und Experimentphasen zur Konzeption und Validierung erarbeiteter Lösungsmöglichkeiten. Iterative und umfassende Entwicklungstätigkeiten in parallelen Abläufen erfordern zudem die interdisziplinäre Analyse, Gestaltung und Erprobung der Prozesselemente - wie z. B. Werkzeuge, Maschinen und Prozessauslegung - sowie deren Wechselbeziehungen, wodurch ein kontinuierlicher Anstieg des Entwicklungsstands über die Zeit resultiert. Grundlegende Modifikationen, auftretende Probleme oder Erweiterungen des Anforderungsprofils können auch zu negativen Steigungen und einem niedrigeren Entwicklungsstand führen (Bild 45) [Brenner 2010]. In späten Entstehungsphasen des Fertigungsprozesses (z. B. nach kostenintensiver Herstellung eines Werkzeugkonzepts) erfordern Fehlerbehebungen und Änderungen entsprechend der Zehnerregel der Fehlerkosten einen höheren Ressourcenaufwand [Akkasoglu 2012, Akkasoglu 2012a, Davis 1982, Ehrlenspiel 2009, Weckenmann 2012]. Eine fehlervermeidende und damit effiziente Entwicklung des Umformverfahrens setzt zielorientierte Entscheidungen auf Basis eines nachvollziehbar ermittelten Entwicklungsstands bereits in frühen Entwicklungsphasen voraus, wo die Beeinflussbarkeit der Merkmale des Umformprozesses hoch ist [Giapoulis 2000]. Allerdings sind speziell in frühen Phasen erkennbare und quantitative Merkmale des Fertigungsprozesses wegen der bisher nur konzeptionellen Auslegung kaum verfügbar [Werner 2002]. Die Beurteilung des Entwicklungsstands ist folglich mit Informationsunsicherheiten behaftet und wird zumeist anhand subjektiver und damit unscharf definierter Kriterien durchgeführt. Aufgrund der kaum reproduzierbaren Evaluationen können Fehlentscheidungen eine verzögerte oder verfrühte Serienfertigungsfreigabe mit erhöhten Qualitätsproblemen und Ausschussraten bewirken.

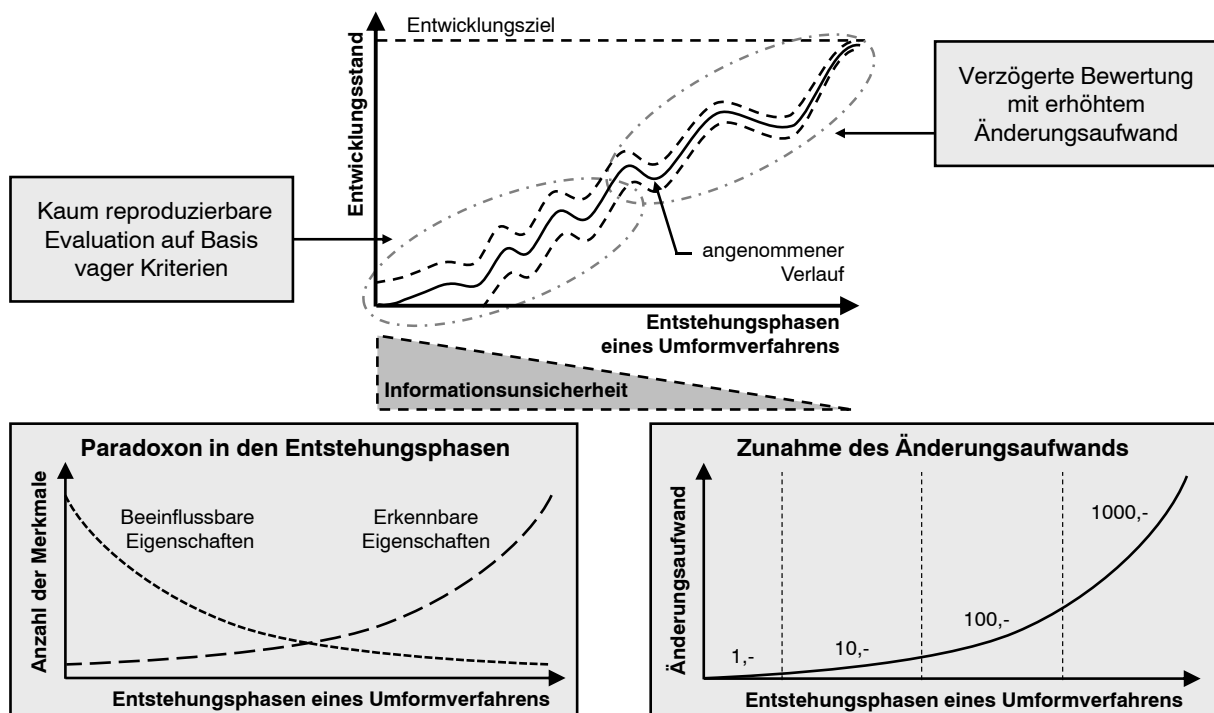


Bild 45: Herausforderungen in der Bewertung des Entwicklungsstands neuer Umformverfahren (in Anlehnung an [Davis 1982, Ehrlenspiel 2009, Giapoulis 2000, Weckenmann 2012])

Die entwicklungsbegleitende Anwendung eines Reifegradmodells für neue Umformverfahren kann durch die definierte Bewertungsbasis bereits in frühen Phasen die Transparenz des Entwicklungsstands steigern und ermöglicht eine zielorientierte Entwicklungsvorgehensweise auf Basis nachvollziehbarer Entscheidungen. Eine frühzeitige Charakterisierung des Reifegrads kann durch die damit verbundene aufwandsreduzierte Verbesserungsmöglichkeit vor der Serienfreigabe eine Ausgangsbasis für sichere und beherrschte - also „reife“ - Umformprozesse schaffen. Aufgrund dieser zweckmäßigen Potenziale wird der Bedarf für ein Reifegradmodell für neue Umformverfahren als gegeben erachtet.

7.2 Mögliche Reifegradmodelle für neue Umformverfahren

Zur Nutzung bereits existenter Reifegradmodelle sind diese hinsichtlich ihrer Relevanz zu untersuchen und zu beurteilen. Hierfür ist es zunächst notwendig, die Ziele und Anforderungen an das Reifegradmodell für neue Umformverfahren einzugrenzen, um einen systematischen Vergleich mit dem Stand der Technik durchführen zu können. Das Reifegradmodell soll definierte Indikatoren erfassen, um eine reproduzierbare Beurteilung des Entwicklungsstands neuer Umformverfahren zu ermöglichen. Folgende Anforderungen sind im Besonderen von einem anwendbaren Reifegradmodell für das Betrachtungsobjekt zu erfüllen, um sowohl spezifische als auch unschärfebehaftete Reifegradergebnisse mit einer hohen Differenzierbarkeit und frühzeitigen Einsetzbarkeit zu erhalten:

- Der Betrachtungsgegenstand des Reifegradmodells muss die Forschungs- und Entwicklungsphasen umfassen.
- Das Reifegradmodell muss als Betrachtungsgegenstand einen Fertigungsprozess fokussieren.
- Die divergenten umformtechnischen Entwicklungselemente sind durch das Reifegradmodell zu berücksichtigen.
- Ebenso sind die ausgeprägt simulativen und experimentellen Entwicklungsphasen in die Reifegradbetrachtung mit einzubeziehen.
- Ziel der Anwendung des Reifegradmodells ist die Ermittlung des operativen Entwicklungsstands.
- Die Indikatorbasis des Reifegradmodells setzt dazu den primären Fokus auf Ursache-Wirkung-Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen.
- Die Informationsunsicherheit ist in die Reifegradermittlung anhand definierter Kriterien unter Berücksichtigung der linguistischen Unschärfe in nachvollziehbarer Weise zu integrieren.

Durch die aufgestellten Anforderungen wird zudem der Betrachtungsgegenstand eines adäquaten Reifegradmodells eingegrenzt. Maßnahmen zur Verbesserung und Absicherung des Entwicklungsstands neuer Umformverfahren werden nach dessen

Ermittlung durch den stufenweisen Aufbau von Reifegradmodellen in intrinsischer Weise bereitgestellt. Analysiert man derzeit vorhandene Reifegradmodelle hinsichtlich dieser Anforderungen, so fokussieren Reifegradmodelle wie CMMI-DEV [CMMI 2011] oder SPICE [ISO/IEC 15504-1] in unterschiedlich ausgeprägter Form Geschäftsprozesse der Entwicklungsphasen und stimmen durch generische Indikatoren zur Messung zum Teil auch mit Entwicklungselementen der Blechmassivumformung wie der Messtechnik überein. Zwar decken weitere Indikatoren wie „Verifizierung“ und „Validierung“ auch die simulativen und experimentellen Phasen ab, allerdings besitzen die Reifegradergebnisse eher eine strategische als operative Ausrichtung, weswegen auch Kausalzusammenhänge zwischen den Entwicklungselementen außer Acht gelassen werden. Ebenso wenig fließt die Informationsunsicherheit in die Reifegradbewertung ein. Ähnlich verhält es sich mit dem Reifegradmodell für Organisationen nach [ISO 9004], bei dem zusätzlich der Entwicklungsbezug gänzlich fehlt.

Die Reifegradabsicherung nach VDA [VDA 2010] besitzt einen partiellen Fokus auf die Auslegung von Fertigungsprozessen für die Entwicklung neuer Produkte durch Lieferanten. Allerdings ist hierbei der Entwicklungsumfang gering und dient eher der Sicherung der Produktqualität als der Analyse und Gestaltung eines neuen Fertigungsprozesses, weshalb sowohl die charakteristischen Simulations- und Experimentphasen in der Entwicklung neuer Umformverfahren als auch Untersuchungen zu Wechselbeziehungen zwischen Einfluss- und Zielgrößen unberücksichtigt bleiben.

Das EFQM - Process Survey Tool [EFQM 2004] bezieht sich auf bestehende und bereits im Einsatz befindliche Fertigungsprozesse. Entwicklungsphasen wie auch die Informationsunsicherheit fließen in die Reifegradermittlung nicht ein. Dem gegenüber betrachtet das Manufacturing Readiness Level [DoD 2011a] Fertigungsprozesse in der Entwicklung. Aber der Bezug zur simulationsbasierten Entwicklung umformtechnischer Elemente und damit die Definition relevanter Reifegradindikatoren sind ebenfalls defizitär oder nicht vorhanden. Gleichermaßen verhält es sich mit der Integration der Informationsunsicherheit.

Das Predictive-CMM [Oberkampff 2007] dient insbesondere der Bewertung des Reifegrads für simulationsgestützte Prozesse und damit verbundene Validierungsaktivitäten. Zudem wird eine rudimentäre Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Unsicherheit vorgegeben. Weitere Anforderungen können nicht erfüllt werden, weshalb eine geringe Relevanz des Predictive-CMM für die Evaluierung neuer Umformverfahren resultiert.

[Müller 2007] fokussiert Entwicklungsprozesse und bezieht bei der Bestimmung operativer Reifegrade die Informationsunsicherheit lediglich durch einen Faktor zwischen [0; 1] ein. Umformtechnische Entwicklungselemente und deren Ursache-Wirkungs-Beziehungen wie auch Wechselwirkungen bleiben unberücksichtigt.

Der Ansatz nach [Altrock 1994, Nieder 1995] dient zwar der Bestimmung des operativen Reifegrads von Komponenten in der Entwicklung unter Verwendung „linguisti-

scher Entscheidungsmodelle“ zur Integration der Informationsunsicherheit in die Entscheidungsfindung, jedoch bleiben die Anforderungen nach umformtechnischen Entwicklungselementen oder der Betrachtung simulativer und experimenteller Entwicklungsphasen unerfüllt.

Das Reifegradmodell für das Sustainable Supply Chain Management nach [Bleck 2011] bietet einen gering nachvollziehbaren Ansatz zur Berücksichtigung der linguistischen Unschärfe oder der Unsicherheit durch die Einordnung von Objekten zu einer Klasse in der Reifegradevaluation und erfüllt damit lediglich die Anforderung nach der Integration der Informationsunsicherheit.

Auf Basis des Analyseergebnisses sind bestehende Reifegradmodelle für die Gestaltung und Auslegung von neuen Umformprozessen unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit als nicht anwendbar einzustufen. Entweder liegt ein abweichender Betrachtungsfokus vor, wodurch keine spezifische Ermittlung des Entwicklungsstands resultiert, oder die Informationsunsicherheit wird unzureichend in die Reifegradanalyse mit einbezogen. Daher wird für die Entwicklung neuer Umformverfahren ein anwendungsspezifisches Reifegradmodell auf Basis eines adäquaten Referenzmodells konstruiert.

Reifegradmodelle	Anforderungen						
	Forschungs- und Entwicklungsphasen	Fokus auf Fertigungsprozess	Umformtechnische Entwicklungselemente	Simulative und experimentelle Entwicklungsphasen	Ermittlung des operativen Entwicklungsstands	Fokus auf U-W-Beziehungen und WW	Integration der Informationsunsicherheit
CMMI-DEV	●	○	◐	◐	○	○	○
SPICE	◐	○	◐	◐	○	○	○
ISO 9004	○	○	◐	○	○	○	○
VDA-Reifegradabsicherung	◐	◐	◐	○	◐	○	○
EFQM - Process Survey Tools	○	●	◐	○	◐	○	○
Manufacturing Readiness Level	●	●	○	◐	●	◐	○
Predictive-CMM	○	○	○	●	○	○	◐
[Müller 2007]	◐	○	○	●	◐	○	◐
[Altrock 1994, Nieder 1995]	◐	○	○	○	◐	○	◐
[Bleck 2011]	○	○	○	○	○	○	◐

Legende
 ● : erfüllt
 ◐ : teilweise erfüllt
 ○ : nicht erfüllt

Tabelle 11: Matrixdiagramm zur Analyse der Anforderungserfüllung bestehender Reifegradmodelle

7.3 Kombiniertes Referenzmodell für Umformverfahren

Das Referenzmodell für Umformverfahren umfasst zum einen das Systemmodell, welches die Struktur des Entwicklungsvorhabens abbildet, und zum anderen das Phasenmodell, das die Vorgehensschritte zur Entwicklung neuer Umformverfahren erfasst. Beide Teilmodelle wurden zunächst deskriptiv durch Beobachtungen und Iterationen mit den Modellnutzern konzipiert und anschließend zu einem präskriptiven Ideal- bzw. Referenzmodell erweitert. Auf Basis des Referenzmodells werden entsprechend der systematischen Vorgehensweise die reifegradrelevanten Indikatoren für die Beurteilung des Entwicklungsstandes neuer Umformprozesse deduziert.

7.3.1 Systemmodell für Umformprozesse

Ein Systemmodell erfasst grundlegende Elemente und Module eines Betrachtungsgegenstandes in strukturierter Form. In Abstimmung mit den Experten innerhalb der Entwicklung der Blechmassivumformung wurde ein Systemmodell für Umformprozesse anhand des Blockdefinitionsdiagramms der standardisierten, weitverbreiteten und damit zugänglichen Modellierungssprache SysML [OMG 2010] erstellt (s. Kapitel 5.2). Die zentralen Systemkomponenten eines Umformverfahrens sind in Bild 46 dargestellt, wonach diese aus

- Umformmaschine (UM),
- Werkzeug (WZ),
- Werkstück (WS),
- Tribologie (TR),
- Prozessauslegung (PA) und
- Messtechnik (MT)

bestehen [Reithmeier 2011, Weckenmann 2012b]. Zur Charakterisierung der betrachteten Systemelemente wurden deren „Parameter“ und „Zielgrößen“ jeweils notationskonform festgehalten, indem ein entsprechender Stereotyp definiert und eingesetzt wurde. Durch diese Aufgliederung lassen sich die notwendigen Betrachtungselemente sowie ihre Interdependenzen untereinander für die Gestaltung und Analyse neuer Umformverfahren erfassen, wodurch ein Fokus auf die herzuleitenden und reifegradrelevanten Indikatoren gesetzt wird. Um den Fokus der Reifegradbetrachtungen auf Umformprozesse beizubehalten, wurden die unterschiedlichen Ausrichtungen in der Werkzeug-, Werkstück- und Prozessmesstechnik allgemein unter dem Systemelement „Messtechnik“ zusammengefasst. Durchgezogene, mit einer Raute beginnende Linien visualisieren nach SysML die Systembestandteile eines übergeordneten Systemelements. Gestrichelte Pfeile kennzeichnen die Abhängigkeiten von Systemelementen wie z. B. die der „Prozessauslegung“ von der „Umformmaschine“, dem „Werkstück“, der „Schmierung“ und dem „Werkzeug“. Geschlossene Kreise durch die Abhängigkeitsverknüpfungen wurden vermieden.

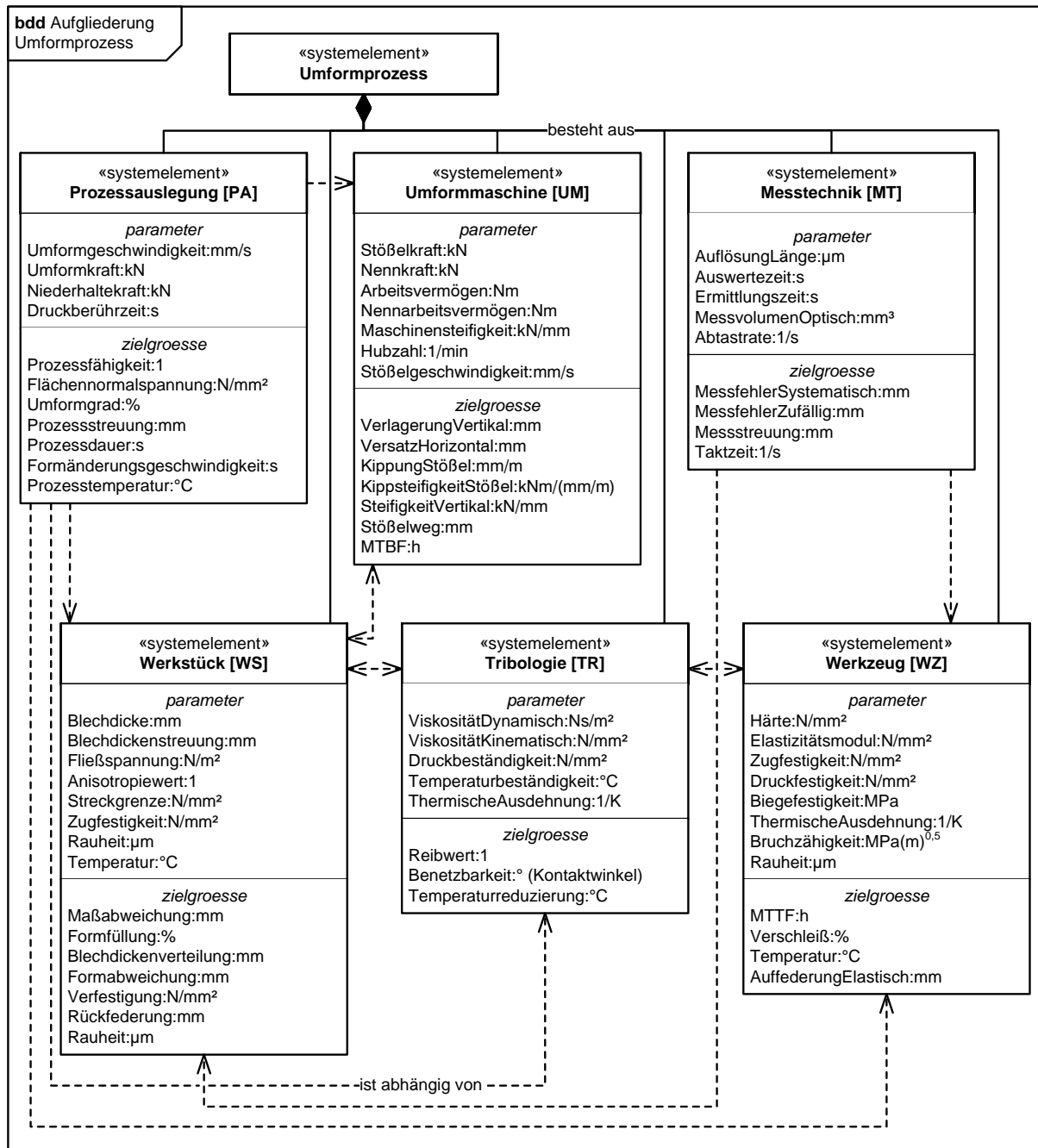


Bild 46: Systemmodell für Umformprozesse

7.3.2 Phasenmodell für neue Umformverfahren

Als weitere Referenz für das Herleiten reifegradrelevanter Indikatoren wurden neben dem Systemmodell auch die Entwicklungsaktivitäten für neue Umformverfahren herangezogen. Zur Berücksichtigung der Kreativitätsfreiräume wurden die Aktivitäten mit Hilfe eines Phasenmodells in Kooperation mit den Umformexperten aufgestellt (Bild 47). Für die Auslegung der Phasen wurde explizit berücksichtigt, dass die Entwicklung neuer Umformverfahren sowohl auf der Ebene der digitalen Modelle als auch der experimentellen Versuche stattfindet [Brenner 2010a]. Diese iterative Vorgehensweise im Phasenmodell integriert damit die kostenreduzierte Untersuchung und Gestaltung von Komponenten des Umformprozesses, um sie im Anschluss experi-

mentell zu validieren und zu verbessern. Das Phasenmodell für die Gestaltung und Analyse von Umformprozessen kategorisiert die neun wesentlichen Entwicklungsintervalle und trägt die elementaren Aktivitäten der jeweiligen Phasen zusammen, womit ein generisches Vorgehensmodell zur Verfügung steht. Zur eindeutigen Identifikation der einzelnen Felder des Phasenmodells, die den Aktivitäten entsprechen, wurden die Zeilen und Spalten mit Nummern bzw. Buchstaben versehen.

Die Ausrichtung und damit die Zielerfüllung der simulativen und experimentellen Phasen sowie die konzeptionelle Auslegung des Umformprozesses können durch vorbereitende Entwicklungsabschnitte wie „Systemanalyse“ und „Systementwurf“ entscheidend beeinflusst werden und wurden daher in den gleichnamigen Phasen berücksichtigt. Die Phase der „Modellierung“ erfasst das Erstellen ausführbarer Modelle durch Bestimmen und Charakterisieren der Modellparameter. Anschließend sind die verifizierten Modelle für grundlegende Auslegungen und Verbesserungen im Aufbau und Verhalten des Umformprozesses durch Simulationsversuche in der Entwicklungsphase der „Simulation“ und „Virtuellen Optimierung“ heranzuziehen. Konstruierte Werkzeugkonzepte und erweitertes Wissen über die Ursache-Wirkungsbeziehungen (U-W-Beziehungen) und Wechselwirkungen (WW) des neuen Umformprozesses stellen Ergebnisse der simulativen Entwicklungsebene dar. Die auf Basis von Simulationen gewonnen Erkenntnisse werden im Rahmen des zweiten „Systementwurfs“ durch reale Modellversuche kosteneffektiv vorvalidiert. Gegebenenfalls sind die betroffenen Systemelemente zu revidieren und neu auszulegen. Notwendige Betriebsmittel, die zur realen Ausführung des Umformprozesses erforderlich sind, werden in der Phase der „Experimentellen Vorbereitung“ beschafft und präpariert. Durch Versuchsdurchführungen unter möglichst produktionsnahen Bedingungen in der Phase der „Experimentellen Validierung“ werden die Beobachtungen aus der Simulationsphase an einem Gesamtsystem bestätigt bzw. revidiert. Die resultierenden Auswertungen der vorangehenden Untersuchungen dienen in der „Experimentellen Optimierungsphase“ zur Deduktion von Verbesserungsmaßnahmen, die am realen Fertigungsprozess eingeführt werden. Eine Zielwertoptimierung legt die Systemparameter bestmöglich im Hinblick auf die festgelegten Zielwerte aus. Abschließende Validierungen bestätigen die optimale Einstellung der Systemparameter.

Zum Ende einer jeden Phase sind die zustandsorientierten Bewertungsmomente anhand von Meilensteinen oder Quality Gates festgesetzt (s. Kapitel 5.5). Quality Gates und damit verbunden die intensivere Reifegradevaluierung kommen bewusst an der Schnittstelle zwischen der simulativen und der experimentellen Entwicklung zum Einsatz sowie beim Abschluss der Entwicklungsarbeiten. Zur Ermittlung des aktuellen Reifegrads sind auch Bewertungen des Entwicklungsstandes zwischen den Meilensteinen und Quality Gates möglich.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	Q2
	B	C	D	E	F	G	H	I
	Systementwurf 1	Modellierung	Simulation	Virtuelle Optimierung	Systementwurf 2	Experimentelle Vorbereitung	Experimentelle Validierung	Experimentelle Optimierung
A	Systemanalyse							
1	Struktur und Verhalten der Systemelemente erfasst.	Ziele und Aufgaben des Simulationsmodells definiert.	Modeligültigkeit verifiziert.	Simulationsmodell erweitert (Modell- abstraktionsgrad reduziert).	Reale Modellversuche zur Revision der Systemelemente durchgeführt.	Beschaffte Systemelemente in das reale Gesamtsystem integriert und in Betrieb genommen.	Experimentelle Analysen entsprechend Versuchsplan am Gesamtsystem durchgeführt und ausgewertet.	Zielwert- optimierung der Versuchs- ergebnisse untersucht.
2	Einfluss- und Zielgrößen erfasst. Vermutete U-W- Beziehungen und WW dokumentiert.	Modellparameter festgelegt.	Simulations- versuche zur Untersuchung der Systemelemente systematisch geplant.	Simulations- versuche zur Optimierung der Systemelemente am erweiterten Simulationsmodell systematisch geplant.	Untersuchte Konzepte der Systemelemente ausgewählt und final konstruiert.	Ziele und Anforderungen an Experimente sowie Qualitätsmerkmale am Bauteil definiert.	Systemelemente untersucht (insbesondere Werkzeug- und Werkstück- belastung).	Experimente zur Validierung der optimalen Systemparameter geplant.
3	Systemkomponenten grundlegend (in unterschiedlicher Variation von Geometrie, Material etc.) ausgelegt.	Charakteristische Kennwerte/Daten (z.B. Materialparameter) aufgenommen und aufbereitet.	Simulations- versuche zu den Systemelementen durchgeführt und ausgewertet.	Geplante Optimierungs- versuche am erweiterten Simulationsmodell durchgeführt und ausgewertet.	Betriebsmittel (z.B. Schmierstoffe) evaluiert und ausgewählt.	Versuche zur Untersuchung des Gesamtsystems systematisch geplant.	U-W-Beziehungen sowie WW revidiert und erweitert.	Experimente am realen Gesamtsystem durchgeführt und ausgewertet.
4	Messanforderungen, -kriterien und -aufgaben definiert.	Bekannte und relevante Wirkbeziehungen dem Modell übermittelt.	U-W-Beziehungen sowie WW der Systemelemente identifiziert und bestimmt.	Bisher beobachtete U-W- Beziehungen und WW revidiert.	Messanforderungen revidiert und Messsysteme evaluiert.		Simulationsmodell validiert und kalibriert.	Optimale Einstellung der Systemparameter validiert.
5	(Vorhandene) Messsysteme analysiert und evaluiert.		Konzepte der Systemelemente revidiert, bewertet und ausgewählt.	Fertigungs- gerechte und zweckmäßige Bauteilgeometrie definiert und konstruiert.			Messsysteme revidiert und optimal angepasst.	

Bild 47: Phasenmodell für die Entwicklung neuer Umformverfahren

7.4 Indikatoren für die Entwicklung neuer Umformverfahren

Auf Basis des kombinierten Referenzmodells bestehend aus System- und Phasenmodell für neue Umformverfahren wurden die reifegradrelevanten Indikatoren in Zusammenarbeit mit den Systemelement-Experten innerhalb der Entwicklung der Blechmassivumformung hergeleitet und definiert [Akkasoglu 2012, Akkasoglu 2012b, Reithmeier 2011, Weckenmann 2012b]. Aufgrund der Komplexität des Entwicklungsvorhabens und der geringen Kenntnis in dem zu erforschenden Gebiet der Blechmassivumformung ist die Festlegung quantitativer Indikatoren erschwert. Dieser Umstand ist auch der prinzipiell geringen Erkennbarkeit von (Prozess-) Merkmalen in frühen Entwicklungsphasen - wie in Bild 45 erläutert - geschuldet. Die daher qualitativ ausgelegten Indikatoren und ihre Sub-Indikatoren mit dem Ziel der Bewertung des Entwicklungsstands neuer Umformverfahren sind in Tabelle 12 erfasst und werden im Folgenden durch ihre jeweilige Motivation, ihren Fokus und ihrer relevantesten Merkmale näher dargestellt.

- 1 Ziele und Anforderungen
Motivation: Eine eindeutige und möglichst detaillierte Definition von Zielen und Anforderungen ist für jedes Entwicklungsvorhaben und dessen Orientierung von immanenter Bedeutung.
Fokus: Analyse und Beurteilung der determinierten Voraussetzungen für den Entwicklungserfolg
Merkmale: Analyse aktueller Gegebenheiten; Betrachtung von Wechselwirkung zwischen den Systemelementen; Zeit- und Aufgabenplanung; Machbarkeitsstudien.
- 2 Systemanalyse und -entwurf
Motivation: Ein ordentlicher Systementwurf schafft die Grundlage für eine umfassende Systemanalyse. Eine kontinuierliche Dokumentation gewährleistet eine valide Kommunikationsbasis in frühen Phasen.
Fokus: Analyse der abgebildeten und zu entwickelnden Systemelemente und -parameter
Merkmale: Systematik in der Erfassung von Systemstruktur und -verhalten; Revision der Dokumentation; Systemparameter und Wirkbeziehungen mit Zielgrößen.
- 3 Konzeption und Konstruktion
Motivation: Die Schritte der Konstruktion, Konzeptanalyse und Integration der Elemente in das Gesamtsystem sind für einen nachhaltigen Entwicklungsstand unerlässlich.
Fokus: Erfassen der Auslegung, Untersuchung und Integration der Systemelemente
Merkmale: Spezifizieren der Systemelemente; Umfang von Konzeptanalysen; Versuchsumfeld; Integrationsstand/-umfeld der Systemelemente.

- 4 Modellbildung
 - Motivation: Zuverlässige Simulationen erweitern den Kenntnisstand und ermöglichen eine kosteneffektive Auslegung der Systemelemente in der Entwicklung neuer Umformverfahren.
 - Fokus: Erfassen der Randbedingungen zur Beurteilungen der Relevanz der Simulationsergebnisse
 - Merkmale: Modellreduktion (also die Abstraktion der Realität); Verwendete Modellparameter und -gleichungen; Diskretisierungsfehler und numerische Fehler; Plausibilitätsprüfungen und Sensitivitätsanalysen; Plausibilität der Simulationsergebnisse.

- 5 Versuche
 - Motivation: Die Vorgehensweise bei der Durchführung von Versuchen sowie die Berücksichtigung der Datenunsicherheiten (z. B. Prozessstreuung) geben Aufschluss über die Verlässlichkeit der Versuchsergebnisse.
 - Fokus: Evaluierung der Art und Weise der Versuchsdurchführung und der Bereitstellung der Versuchsergebnisse
 - Merkmale: Versuchsplanung, -durchführung, -auswertung, -dokumentation; Bereitstellung der Ergebnisse; Unsicherheit und Zeitabhängigkeit der Daten; Anzahl aufgenommener Daten.

- 6 Ursache-Wirkung-Beziehungen und Wechselwirkungen
 - Motivation: Als ein wesentliches Ergebnis der Entwicklung neuer Umformverfahren ist der Kenntnisstand zu den U-W-Beziehungen und WW zu erachten.
 - Fokus: Bewertung der ermittelten und analysierten U-W-Beziehungen und WW
 - Merkmale: Art der Ermittlung der U-W-Beziehungen und WW (z. B. simulativ oder experimentell); Betrachtete Systemelemente; Charakterisierung der U-W-Beziehungen und WW (z. B. Regressionsmodell oder analytisches Modell).

- 7 Evaluierung und Validierung
 - Motivation: Eingesetzte Entscheidungskriterien und die Verlässlichkeit der Ergebnisse im Entwicklungsverlauf können einen hohen und validen Entwicklungsstand bewirken.
 - Fokus: Analyse der angewandten Praktiken zur Entscheidungsfindung und Ergebnisbestätigung
 - Merkmale: Angewandte Bewertungskriterien; Durchführung und Konsequenzen der Entscheidung; Zuverlässigkeit (zeitabhängige Funktionserfüllung) und Robustheit (Störgrößenunabhängigkeit).

- **8 Optimierung**
 Motivation: Innerhalb der Optimierung sind die gesammelten Erkenntnisse zum Umformverfahren gezielt einzusetzen, um durch reale Versuche den Prozess zu verbessern.
 Fokus: Analyse der experimentellen Verbesserungsmaßnahmen am realen Fertigungsprozess
 Merkmale: Verwendete Einflussgrößen; Prozessfenster zur Visualisierung; Prozessregelung; Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen.

- **9 Messsystem**
 Motivation: Integraler Bestandteil eines vollständigen Umformprozesses ist die Messtechnik zur Datenerfassung und Prozessregelung.
 Fokus: Analyse der eingesetzten Messtechnik sowie der vorliegenden Rahmenbedingungen
 Merkmale: Auflösung; Genauigkeit (Richtigkeit, Präzision); Stabilität; Kalibrierung; Ausbildungsstand Personal; Umgebungsbedingungen; Messmethode; Integrationsgrad im Fertigungsprozess; Prozessregelung.

Indikator	Sub-Indikator
1 Ziele und Anforderungen	1.1 Zustandsanalyse 1.2 Zieldefinition 1.3 Zeitplan und Aufgaben 1.4 Machbarkeitsstudie
2 Systementwurf und -analyse	2.1 Systemabbildung 2.2 Systemparameter
3 Konzeption und Konstruktion	3.1 Konstruktion 3.2 Konzeptanalyse 3.3 Systemintegration
4 Modellbildung	4.1 Modellreduktion / Idealisierung 4.2 Wirkbeziehung der Kenngrößen 4.3 Verifikation und Validierung
5 Versuche	5.1 Prozedur 5.2 Datenunsicherheit
6 Ursache-Wirkung-Beziehungen und Wechselwirkungen	6.1 Identifizierung der Wirkbeziehungen 6.2 Charakterisierung der Wirkbeziehungen
7 Evaluierung und Validierung	7.1 Bewertungskriterien und Entscheidung 7.2 Zuverlässigkeit und Robustheit
8 Optimierung	8.1 Zielwertoptimierung 8.2 Wirksamkeit von Optimierungen
9 Messsystem	9.1 Messsystemanalyse 9.2 Messrahmenbedingungen 9.3 Messprozessintegration

Tabelle 12: Reifegradindikatoren zur Bewertung des Entwicklungsstandes neuer Umformverfahren

Die Indikatoren „Konzeption und Konstruktion“, „Versuche“, „Ursache-Wirkung-Beziehungen und Wechselwirkungen“, „Evaluierung und Validierung“ sowie „Optimierung“ haben einen generischen Charakter in Bezug auf die Entwicklungsphasen des Umformprozesses und können sowohl in der simulativen als auch in der experimentellen Ebene zur Beurteilung des Entwicklungsstandes herangezogen werden.

Die Gewichtung der Reifegradindikatoren zur Differenzierung ihrer Beiträge zum Entwicklungsstand erfolgt mit Hilfe des paarweisen Vergleichs (Tabelle 13). Die gegenüberstellende Bewertung einzelner Indikatoren erfolgt ergebnisorientiert im Hinblick auf einen reifen, realen Umformprozess auf Basis einer umfassenden Wissensgenerierung. Aufgrund dessen sind experimentell orientierte Indikatoren wie z. B. „Ursache-Wirkung-Beziehungen und Wechselwirkungen“ höher gewichtet, als simulativ orientierte Indikatoren, z. B. „Modellbildung“.

		Reifegradindikatoren									Σ	Gew.*	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Reifegradindikatoren	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	13	15%	
	2	1	1	0	2	1	0	0	0	1	6	7,5%	
	3	1	2	1	2	2	0	0	1	2	11	12,5%	
	4	0	0	0	1	1	1	0	0	2	5	7,5%	
	5	0	1	0	1	1	1	0	1	2	7	7,5%	
	6	1	2	2	1	1	1	2	2	2	14	17,5%	
	7	0	2	2	2	2	0	1	0	2	11	12,5%	
	8	1	2	1	2	1	0	2	1	2	12	15%	
	9	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	5%	
* angewandte Werte											Summe:	81	100%

Legende Reifegradindikatoren
1 Ziele und Anforderungen
2 Systemanalyse und -entwurf
3 Konzeption und Konstruktion
4 Modellbildung
5 Versuche
6 U-W-Beziehungen und WW
7 Evaluierung & Validierung
8 Optimierung
9 Messsystem

Tabelle 13: Paarweiser Vergleich der Reifegradindikatoren zur Bestimmung der Gewichtungen

7.5 Reifegrad-Kennwert-Matrix für die Entwicklung neuer Umformverfahren

Die Reifegrad-Kennwert-Matrix ordnet die Merkmalsausprägungen der eruierten Indikatoren für den Entwicklungsstand neuer Umformverfahren in Form von graduellen Anforderungen zu spezifischen Reifegradstufen zu und schafft somit die Ordinalmatrix, durch die quantitativ kaum oder schwer erfassbare Aspekte in der Entwicklung neuer Umformverfahren in eine einheitliche Bewertungsbasis mit Ordinalmerkmalen überführt werden und eine sowohl vereinfachte als auch vergleichbare Bewertung des Reifegrads ermöglicht wird. Die Struktur der im Umfeld der Entwicklung der Blechmassivumformung konstruierten Reifegrad-Kennwert-Matrix für neue Umformverfahren entspricht dem prinzipiellen Aufbau in Tabelle 8 und umfasst vier Reifegradstufen, deren prozentuale Einteilung gemäß [ISO/IEC 15504-2] (Tabelle 4) aus-

gelegt ist. Die zusammen mit den Prozesseignern innerhalb der Entwicklung der Blechmassivumformung erarbeitete Reifegrad-Kennwert-Matrix mit den charakterisierten Anforderungen zu den eruierten Indikatoren und Sub-Indikatoren sowie den in Tabelle 13 ermittelten Gewichtungen kann der Tabelle-Anhang C bis Tabelle-Anhang G entnommen werden.

Die eindeutige Zuweisung der Reifegradindikatoren zum Phasen- und Systemmodell für eine zeitabhängige und spezifische Beurteilung des Entwicklungsstands erfolgt entsprechend der Syntax in Kapitel 5.4 und schließt die Konzeption des Reifegradmodells für neue Umformverfahren ab. So evaluiert beispielsweise „D4_6.2_UM“ die in der Phase der Simulation (D4) charakterisierten Wirkungsbeziehungen (6.2) hinsichtlich der Auslegung der Umformmaschine (UM). Tabelle 14 fasst die zugeordneten Sub-Indikatoren in Abhängigkeit der Aktivitäten des Phasenmodells zusammen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	A1_1.1_PA	B1_2.1_PA	C1_1.2_PA	D1_4.3_PA	E1_4.1_PA	F1_5.1_PA	G1_3.3_UM	H1_3.2_PA	I1_8.1_PA
	A1_1.1_UM	B1_2.1_UM	C1_1.2_UM	D1_4.3_UM	E1_4.1_UM	F1_5.1_UM	G1_3.3_WZ	H1_3.2_UM	I1_8.1_UM
	A1_1.1_WZ	B1_2.1_WZ	C1_1.2_WZ	D1_4.3_WZ	E1_4.1_WZ	F1_5.1_WZ	G1_3.3_WS	H1_3.2_WZ	I1_8.1_WZ
	A1_1.1_WS		C1_1.2_WS	D1_4.3_WS	E1_4.1_WS	F1_5.1_WS	G1_3.3_TR	H1_3.2_WS	I1_8.1_WS
						F1_5.2_PA F1_5.2_UM F1_5.2_WZ F1_5.2_WS	G1_9.3_MT	H1_3.2_TR	I1_8.1_TR
2	A2_1.2_PA	B2_2.2_PA	C2_4.1_PA	D2_5.1_PA	E2_5.1_PA	F2_3.1_UM	G2_1.2_PA	H3_7.2_UM	I2_5.1_PA
	A2_1.2_UM	B2_2.2_UM	C2_4.1_UM	D2_5.1_UM	E2_5.1_UM	F2_3.1_WZ	G2_1.2_UM	H3_7.2_WZ	I2_5.1_UM
	A2_1.2_WZ	B2_2.2_WZ	C2_4.1_WZ	D2_5.1_WZ	E2_5.1_WZ	F2_7.1_UM	G2_1.2_WZ	H3_7.2_WS	I2_5.1_WZ
	A2_1.2_WS		C2_4.1_WS	D2_5.1_WS	E2_5.1_WS	F2_7.1_WZ	G2_1.2_WS G2_1.2_TR	H3_7.2_TR	I2_5.1_WS I2_5.1_TR
3	A3_1.3_PA	B3_3.1_PA	C3_5.1_UM	D3_3.2_PA	E3_3.2_PA	F3_7.1_TR	G3_5.1_PA	H2_6.1_PA	I3_3.2_PA
	A3_1.3_UM	B3_3.1_UM	C3_5.1_WZ	D3_3.2_UM	E3_3.2_UM		G3_5.1_UM	H2_6.1_UM	I3_3.2_UM
	A3_1.3_WZ	B3_3.1_WZ	C3_5.1_WS	D3_3.2_WZ	E3_3.2_WZ		G3_5.1_WZ	H2_6.1_WZ	I3_3.2_WZ
			C3_5.2_UM	D3_3.2_WS	E3_3.2_WS		G3_5.1_WS	H2_6.1_WS	I3_3.2_WS
			C3_5.2_WZ				G3_5.1_TR	H2_6.1_TR	I3_3.2_TR
			C3_5.2_WS					H2_6.2_PA H2_6.2_UM H2_6.2_WZ H2_6.2_WS H2_6.2_TR	
4	A4_1.4_PA	B4_1.2_MT	C4_4.2_PA	D4_6.1_PA	E4_6.1_PA	F4_1.2_MT		H4_4.2_PA	I4_8.2_PA
	A4_1.4_UM		C4_4.2_UM	D4_6.1_UM	E4_6.1_UM	F4_9.1_MT		H4_4.2_UM	I4_8.2_UM
	A4_1.4_WZ		C4_4.2_WZ	D4_6.1_WZ	E4_6.1_WZ	F4_9.2_MT		H4_4.2_WZ	I4_8.2_WZ
	A4_1.4_WS		C4_4.2_WS	D4_6.1_WS	E4_6.1_WS			H4_4.2_WS	I4_8.2_WS
				D4_6.2_PA	E4_6.2_PA			H4_4.3_PA	I4_8.2_TR
				D4_6.2_UM	E4_6.2_UM			H4_4.3_UM	
				D4_6.2_WZ	E4_6.2_WZ			H4_4.3_WZ	
		D4_6.2_WS	E4_6.2_WS		H4_4.3_WS				
5		B5_9.1_MT		D5_7.1_PA	E5_3.1_WS			H5_9.1_MT	
		B5_9.2_MT		D5_7.1_UM				H5_9.2_MT	
				D5_7.1_WZ				H5_9.3_MT	
				D5_7.1_WS					

Tabelle 14: Spezifische Zuordnung der Indikatoren zu Phasen- und Systemelementen

7.6 Unschärfebehaftete Reifegradermittlung

Durch die Anwendung des konzipierten Reifegradmodells für neue Umformverfahren innerhalb der Entwicklung der Blechmassivumformung wird der unschärfebehaftete Entwicklungsstand zur Deduktion reifegradverbessernder Maßnahmen ermittelt. Die exemplarische Reifegradanalyse wird entsprechend der in Kapitel 5.5 skizzierten Vorgehensweise durchgeführt. Die Bewertung findet innerhalb der Phase der „Experimentellen Optimierung“ statt. Zur Ermittlung des Reifegrads sind somit alle bis zu dieser Phase zugeordneten Indikatoren heranzuziehen. Um den Aufwand niedrig zu halten, erfolgt die Bewertung durch intern beteiligte Einzelpersonen (s. Bild 36), die durch die Systemelement-Experten für die Prozessauslegung, Umformmaschine und Messtechnik repräsentiert werden und gleichfalls die Systemelemente Werkstück, Tribologie und Werkzeug berücksichtigen. Jeder Experte evaluiert unter Anleitung eines Moderators sein relevantes Systemelement, indem der prozentuale Überschneidungsgrad zwischen dem beobachteten Entwicklungsstand und den Anforderungen in der Reifegrad-Kennwert-Matrix für jeden spezifischen Indikator beurteilt wird (s. Tabelle-Anhang H). Anschließend werden die einzelnen Schätzungen zunächst zu phasenspezifischen Werten gemittelt und dann zu einem Wert pro Sub-Indikator durch gewichtete Mittelwertbildung subsumiert, welcher dem Fuzzy-System zur Reifegradermittlung als scharfe Eingangsgröße übermittelt wird (s. Tabelle-Anhang I). Die Gewichtungen der phasenspezifischen Werte (in Klammern angegeben) stellen die Anzahl der einzelnen Schätzungen pro Phase und Indikator dar.

Für das Fuzzy-System zur Reifegradermittlung werden die Sub-Indikatoren als linguistische Eingangsvariablen modelliert, deren linguistischen Terme den vier Reifegradstufen der Reifegrad-Kennwert-Matrix entsprechen. Die Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsterme sind durch die Quadrupel (Koordinaten der kennzeichnenden Punkte) in (25) bis (28) definiert (Bild 48), die anhand des unter Zuhilfenahme der Unsicherheit-Kennwert-Matrix ermittelten Unsicherheitswertes U (Tabelle 15) und den Formeln (21) bis (24) ausgelegt wurden. Insbesondere die hohe „Subjektivität in der Beobachtung“ durch die ausgewählte Evaluationsvorgehensweise wurde hierbei berücksichtigt.

	Unsicherheitsfaktor	Gew.	Bew.
Konstruktion	1 Abbildungsdiskrepanz des Referenzmodells	16%	0,2
	2 Abbildungsdiskrepanz der Reifegradindikatoren	21%	0,2
	3 Gewichtungsunsicherheit	8%	0,4
	4 Linguistische Unschärfe / Modellunsicherheit	8%	0,3
Anwendung	5 Unkenntnis im Untersuchungsumfeld	23%	0,2
	6 Subjektivität in der Interpretation/Beobachtung	12%	0,5
	7 Informationsqualität (des Betrachtungsobjekts)	12%	0,3
	resultierender Unsicherheitswert		0,27

Tabelle 15: Bestimmung des Unsicherheitswertes

$$\mu_I(U) = \{(0; 0), (0; 1), (0,07; 1), (0,24; 0)\} \quad (24)$$

$$\mu_{II}(U) = \{(0,07; 0), (0,24; 1), (0,41; 1), (0,59; 0)\} \quad (25)$$

$$\mu_{III}(U) = \{(0,41; 0), (0,59; 1), (0,76; 1), (0,93; 0)\} \quad (26)$$

$$\mu_{IV}(U) = \{(0,76; 0), (0,93; 1), (1; 1), (1; 0)\} \quad (27)$$

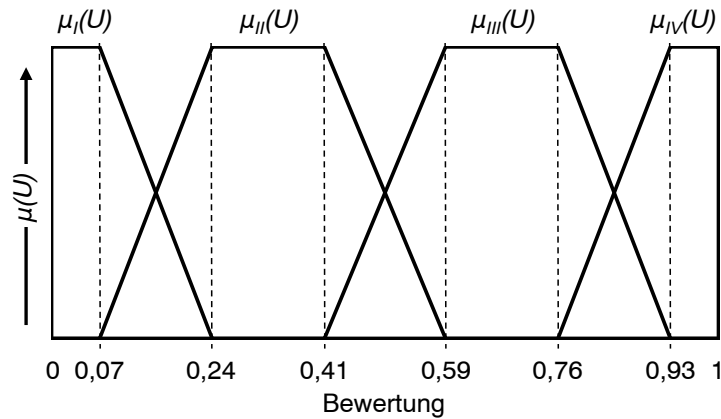


Bild 48: Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Eingangsterme für $U = 0,27$

Die linguistischen Ausgangsvariablen des Fuzzy-Systems repräsentieren die übergeordneten Indikatoren und besitzen mit acht linguistischen Termen, die als Dreiecksfunktionen gleichmäßig über den gesamten Wertebereich verteilt sind, prinzipbedingt mehr Terme als die einzelnen Eingangsvariablen. Die Regelbasen aggregieren die prozentualen Bewertungen der Sub-Indikatoren zu Indikatorreifegraden und wurden semi-automatisch mit der Software fuzzyTECH (Version 5.81d) als maximal korrelierend mit der Ausgangsgröße erstellt. Somit beinhaltet jede der neun Regelbasen jeweils 4^k Regeln, wobei k die jeweilige Anzahl der linguistischen Eingangsvariablen darstellt. Zur (Eingangs-) Aggregation wird der Gamma-Operator ($\gamma = 0,3$) verwendet, welcher menschliche Entscheidungsfindungen durch seine kompensatorische Wirkungsweise angemessen wiedergibt [Altrock 1994]. Die Ausgangsaggregation (Akkumulation) findet mit dem Max-Operator statt. Die Implikation ist mit dem MIN-Verfahren durch die verwendete Software vorgegeben. Die Indikatorreifegrade werden durch das Fuzzy-System und die Anwendung der Center-of-Area-Defuzzifizierungsmethode zum einen als scharfe Werte ausgegeben. Zum anderen erfolgt die Ergebnisausgabe unscharf, wodurch das zusammenfassende Visualisierungsschema nach Bild 43 in Kapitel 6.3 für die einzelnen Indikatorreifegrade realisiert werden kann.

Die Ergebnisse der unschärfebehafteten Reifegradevaluierung mit Hilfe des Fuzzy-Systems wurden zur übersichtlichen Darstellung und vereinfachenden Entscheidungsfindung in ein Dokumentationslayout zusammengeführt (Bild 49). Hierbei wird neben den organisatorischen Informationen zum Bewertungsdatum, zum Moderator oder zu den bewertenden Systemelement-Experten auch der Bewertungsmoment entlang des Phasenmodells erfasst. Im darunter folgenden Abschnitt sind die Daten zu den ermittelten Indikatorreifegraden aufgeführt. Der Sollreifegrad beläuft sich in dieser Bewertungs-

phase auf 100% für die jeweiligen Indikatoren. Die Min-Werte stellen die untere Intervallgrenze des kleinsten aktiven, linguistischen Ausgangsterms im Fuzzy-System dar. In gleicher Weise repräsentieren die Max-Werte die obere Intervallgrenze des größten, aktiven linguistischen Ausgangsterms. Des Weiteren sind die Gewichtungen der Indikatoren, die scharfen Werte aus dem Fuzzy-System (crisp) und die ohne das Fuzzy-System bestimmten Mittelwerte der Schätzungen zu den jeweiligen Sub-Indikatoren tabellarisch erfasst. Die unscharfen Ausgabeinformationen des Fuzzy-Systems sind in Form von Balkendiagrammen der Zugehörigkeitsgrade zu den linguistischen Ausgangstermen pro Indikator dargestellt. Die Gesamtübersicht bildet die sortierten Werte der Indikatorreifegrade ab und erfasst dabei die jeweiligen scharfen Werte, das Unschärfeintervall und den arithmetischen Mittelwert sowie den Gesamtreifegrad. Letzterer wird durch die gewichtete Mittelwertbildung der Einzelwerte der Indikatorreifegrade bestimmt. Es zeigt sich, dass die arithmetischen Mittelwerte pro Indikator nahezu mit den crisp-Werten übereinstimmen und stets innerhalb der Unschärfeintervalle liegen.

Die Analyse der unschärfebehafteten Indikatorreifegrade zum Bewertungszeitpunkt ergibt, dass der Entwicklungsstand der Blechmassivumformung tendenziell als positive einzustufen ist. Auffällig sind insbesondere die Verbesserungsmöglichkeiten im Rahmen der „Optimierung“. Da sich der Bewertungsmoment im Anfangsstadium der experimentellen Optimierungsphase befindet, ist dieser Indikator besonders schwach ausgeprägt. Als reifegradsteigernde Maßnahme kann unter Zuhilfenahme der Reifegrad-Kennwert-Matrix die variantenreiche Konzeptuntersuchung von Umformwerkzeugen abgeleitet werden. Aus methodischer Sicht ist hierbei die Anwendung der statistischen Versuchsplanung zielführend, um dadurch eine Zielwertoptimierung anhand mehrerer Antwortvariablen in Abhängigkeit von den als signifikant ermittelten Prozessstellgrößen vornehmen zu können. Zudem ist auf den Ergebnissen der simulativen Optimierung aufzubauen, um eine vorhandene Informations- und Wissensbasis zu nutzen und in die Auslegung sowie reale Umsetzung von Umformwerkzeugen einzugliedern. Die erweiterte Kenntnis über die Einflussgrößen sollte zur Regelung des Fertigungsprozesses genutzt werden. Um letztlich die Verbesserung des Entwicklungsstands zu prüfen und abzusichern, sind die getroffenen konstruktiven Maßnahmen zu validieren.

Die Anwendung der Methodik im Rahmen der Entwicklungsarbeiten zur Blechmassivumformung hat gezeigt, dass die rückführbare da referenzbasierte Reifegradevaluierung unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit zu einem transparenten und differenzierbaren Entwicklungsstand führt. Durch die „unscharfe“ Darstellung der Bewertungsergebnisse in Form von Balkendiagrammen war auch eine Trendanalyse der Indikatorreifegrade möglich. Zielführende und reifegradsteigernde Maßnahmen konnten anhand der Reifegrad-Kennwert-Matrix abgeleitet und eingeführt werden, wodurch eine systematische Vorgehensweise in der Entwicklung der neuen Blechmassivumformung mit bewährten Praktiken, reduzierten Iterationen und zuverlässigen Ergebnissen erreicht werden konnte.

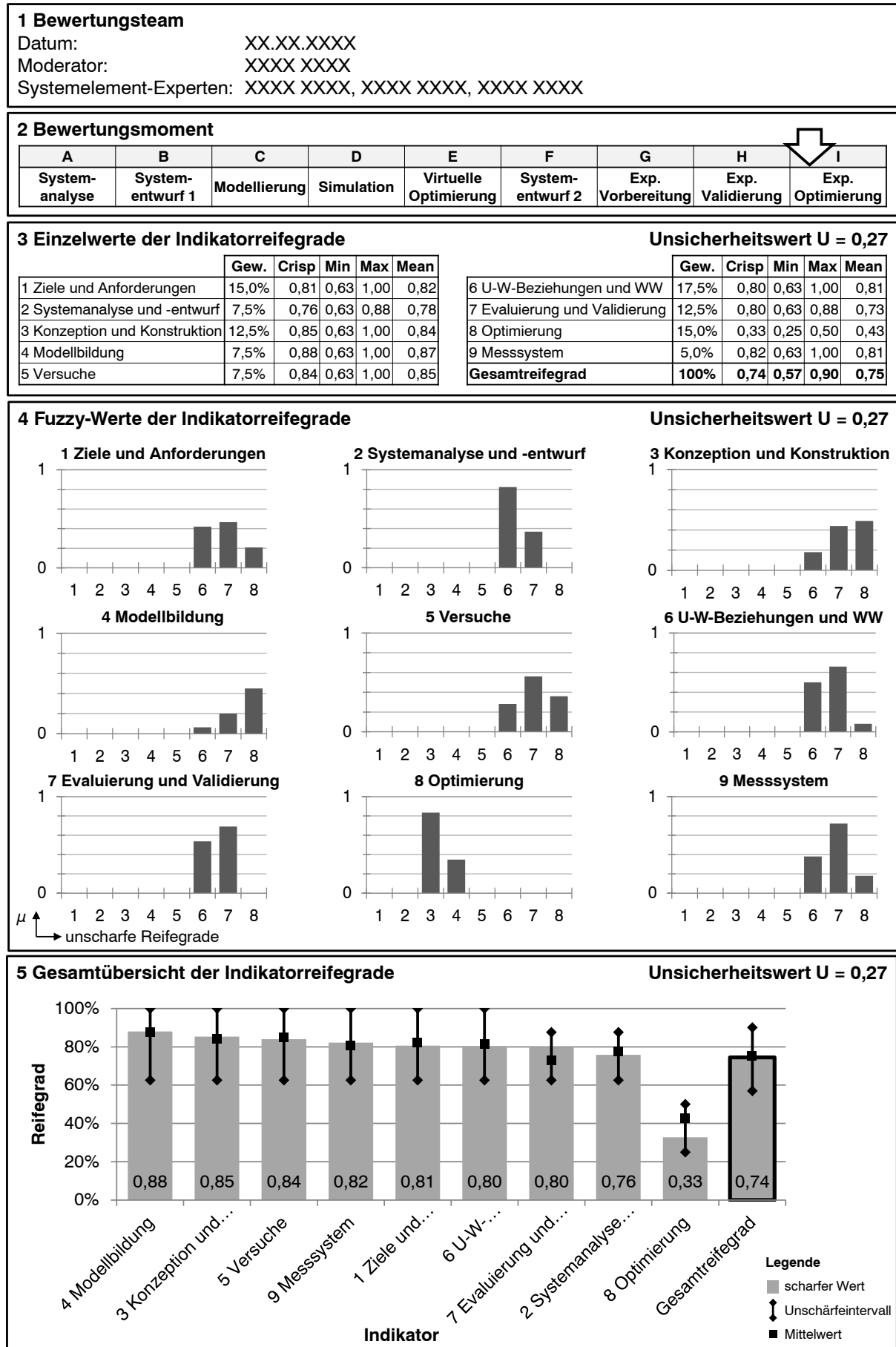


Bild 49: Dokumentation und Visualisierung der exemplarischen Reifegradbewertung

8 Informationstechnische Umsetzung der Reifegradmodellbildung

Während der Validierung wurde von den Systemelement-Experten der Aufwand für die Anwendung der Methodik als hoch eingeschätzt, da eine hohe Anzahl sowohl vernetzter als auch umfangreicher Datensätze und Informationen zu handhaben und zu verarbeiten ist. Um dieses Defizit aufzulösen und eine größere Anwenderunterstützung zu erreichen, wird ein datenbankbasiertes Informations- und Assistenzsystem für die methodische Reifegradmodellkonstruktion und -anwendung unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit konzipiert, prototypisch implementiert und erprobt. Mit der resultierenden Anwendungssoftware können zum einen einzelne Abläufe der Methodik automatisiert werden. Zum anderen erleichtert die elektronische Datenverarbeitung die Datenhandhabung und -visualisierung und schafft ein strukturiertes Rahmenwerk für die Auslegung und Anwendung von Reifegradmodellen. Der Bedarf für eine solche Applikation begründet sich durch weitere perspektivische Vorzüge [Akkasoglu 2012b]:

- Die Zugänglichkeit und Effizienz der Methodik für den Anwender wird erhöht.
- Die Verarbeitung der Daten und Informationen wird beschleunigt.
- Die Kommunikation und der Datenaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg werden vereinfacht.

Bisherige Ansätze zur informationstechnischen Unterstützung fokussieren lediglich die Anwendung spezieller Reifegradmodelle. Beispielsweise steht ein auf der Tabellenkalkulationssoftware „Excel“ basierendes Bewertungstool zur Verfügung, welches ein Reifegradmodell für die Produktionslogistik bereitstellt [Prodlog 2010]. Die methodische und softwarebasierte Anwenderunterstützung in der Entwicklung von Reifegradmodellen bleibt außen vor, wodurch die Software auf produktionslogistische Anwendungsgebiete beschränkt ist. Eine softwarebasierte durchgängige Unterstützung in der Konstruktion wie auch Anwendung von bedarfsgerechten Reifegradmodellen existiert bisher nicht.

8.1 Konzeption

Die informationstechnische Umsetzung der Vorgehensweise zur Reifegradmodellbildung und -anwendung erfasst im Sinne eines vertikalen Prototyping alle Elemente der im Rahmen dieser Arbeit konzipierten Methodik, wodurch ein Kernsystem zur kontinuierlichen Verbesserung bereitgestellt wird [Stahlknecht 2005]. Primäre Ziele der prototypischen Softwareumsetzung sind die Steigerung der Anwenderunterstützung und informationstechnische Abbildung der Methodik für eine optimale Benutzerführung. Im Rahmen der Konzeption wurde entschieden, die Software als neue, weitestgehend eigenständige Stand-Alone-Applikation zu realisieren. Dies bietet größere Freiheiten in der Auslegung der Software und vermeidet etwaige Kosten für Softwarelizenzen in der Nutzung der Anwendungssoftware.

Mögliche Anwendungsfälle der geplanten Applikation sind mit einem Use-Case-Diagramm erfasst (Bild 50). Für eine höhere Praktikabilität ist die Software so auszulegen, dass die beiden Benutzerkategorien „Modellierer“ und „Nutzer“ mit unterschiedlichen Befugnissen berücksichtigt werden können. Während ersterer für die Konstruktion des Reifegrad- und Unsicherheitsmodells verantwortlich ist, bewertet und analysiert der „Nutzer“ anhand der Modelle den unschärfebehafteten Entwicklungsstand. Innerhalb dieser Bewertung kann der „Modellierer“ den „Nutzer“ unterstützen. Die Anwendungssoftware ist so aufzubauen, dass beide Benutzerkategorien schrittweise durch die Methodik geführt werden.

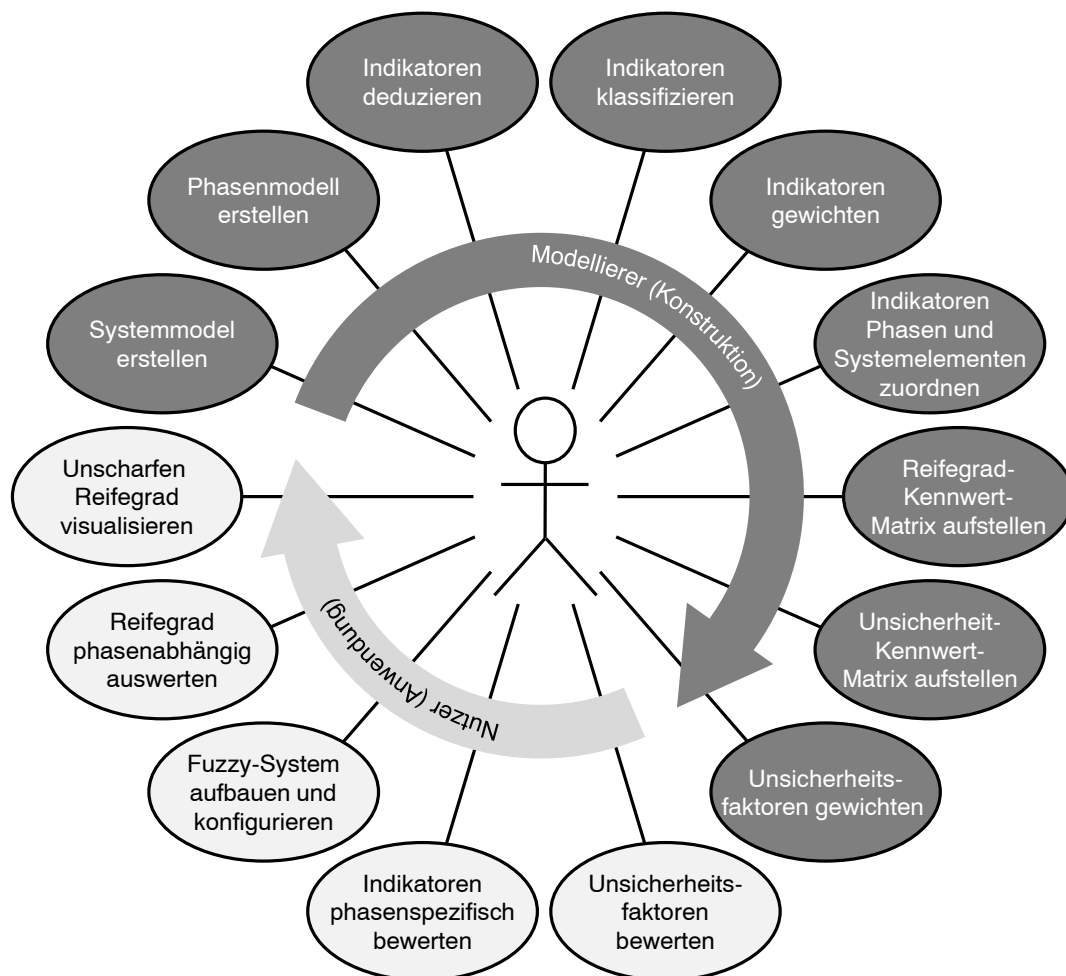


Bild 50: Use-Case-Diagramm der Software zur Auslegung neuer Reifegradmodelle und Ermittlung des unschärfebehafteten Reifegrads

Der Modellierer soll sowohl das System- als auch das Phasenmodell des Betrachtungsobjekts erstellen können. Die in Abhängigkeit dieses kombinierten Referenzmodells deduzierten Indikatoren sollen klassifiziert, gewichtet und sowohl den System- als auch Phasenelementen (Aktivitäten) spezifisch zugeordnet werden können. Das Fuzzy-System und damit verbunden die linguistischen Variablen und Terme sollen durch die Software weitestgehend automatisiert erstellt werden, um den Modellierungsaufwand für den Anwender zu reduzieren. Dennoch soll für den Anwender die Möglichkeit bestehen, das automatisch generierte Fuzzy-System vor Berechnung der Indikatorreifegrade zu

manipulieren. Eine entsprechende Eingabemaske soll den Aufbau der tabellarischen Reifegrad-Kennwert-Matrix mit vier Reifegradstufen ermöglichen. Für das Unsicherheitsmodell ist die Möglichkeit zu schaffen, Unsicherheitsfaktoren zu gewichten und Anforderungen an diese innerhalb einer Unsicherheit-Kennwert-Matrix zu definieren. Der Nutzer soll für die Bewertung des Reifegrads zunächst den Unsicherheitswert ermitteln können, welcher für die Auslegung der linguistischen Eingangsterme und zum automatischen Aufbau des Fuzzy-Systems herangezogen wird. Nach phasenabhängiger Bewertung der Sub-Indikatoren ist der Reifegrad zusammen mit den Informationen zur Unschärfe durch die Applikation zu visualisieren.

8.2 Implementierung

Zum Zweck einer architekturneutralen und leistungsfähigen prototypischen Implementierung der Methodik zur Reifegradmodellbildung und -anwendung unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit wird die objektorientierte Programmiersprache Java eingesetzt. Als Entwicklungsumgebung kommt die Open-Source-Plattform „Eclipse RCP (Rich Client Platform)“ zum Einsatz, welche ein modulares Grundgerüst mit erweiterbaren Anwendungsfunktionalitäten für die Realisierung einer eigenständig lauffähigen Desktop-Anwendung mit einer grafischen Benutzeroberfläche (engl.: Graphical-User-Interface (GUI)) bereitstellt.

Als Datenbank wird die frei verfügbare und vollständig in Java programmierte „Hyper Structured Query Language Database (HSQLDB)“ als relationale SQL-Datenbank verwendet. Eine relationale Datenbank besteht aus Tupeln, die Zeilen entsprechen, und Attributen, die durch Spalten dargestellt werden können. Um mit Hilfe der objektorientierten Programmiersprache Java die im Rahmen der Reifegradmodellbildung aufgenommenen Daten in die relationale Datenbank zu speichern und daraus zu lesen, wird das „Hibernate“-Framework zur objektrelationalen Abbildung (engl.: object-relational mapping (ORM)) eingesetzt. Ein Framework (dt.: Rahmenstruktur) ist hierbei als eine bereitgestellte Programmkomponente zu verstehen, die kein eigenständiges Softwareprodukt darstellt, sondern im Rahmen eines übergeordneten Entwicklungsprogramms für Software modular eingesetzt werden kann. So erfolgt mit Hilfe des weiteren Frameworks „JFreeChart“ die Visualisierung von Daten und Informationen wie dem unschärfebehafteten Reifegrad entsprechend Bild 49. Mit Hilfe von JFreeChart ist es auch möglich, die dargestellten Grafiken zu exportieren.

Für die Verarbeitung der Schätzungen zum Reifegrad der Sub-Indikatoren wird auf die Software fuzzyTECH in der Version 5.81d zurückgegriffen. Die Software ist weit verbreitet und bietet eine hohe Leistungsfähigkeit. Die grafische Benutzeroberfläche gewährleistet zudem eine einfache Handhabung in der Fuzzy-Systemerstellung. Die Software fuzzyTECH unterstützt zum Datenaustausch das von der Fa. Microsoft zur Verfügung gestellte Protokoll „Dynamic Data Exchange (DDE)“ (dt.: dynamischer Datenaustausch). Mit Hilfe der „Dynamic Link Library (DLL)“ (dt.: dynamische Bibliothek)

können fuzzyTECH Werte für Variablen übermittelt werden. Die Ansteuerung von fuzzyTECH erfolgt mit Hilfe eines eigens erstellten Moduls für Eclipse (qfm.maturity.fuzzytech), wodurch eine Verbindung zum Fuzzy-System erstellt werden kann und mit Hilfe von DDE durch DLL eine Interaktion ermöglicht wird.

Zum Protokollieren von Fehlern oder Infomeldungen während der testweisen Anwendung der Software wird das quelloffene Framework „Apache Log4j“ für Java verwendet, wodurch effektive Verbesserungsansätze in der inkrementellen Softwareentwicklung erschlossen werden können. Je nach eingestelltem Ausgabeumfang werden Meldungen durch die Software in eine Protokolldatei geleitetet und zu Auswertezwecken gespeichert. Die frei verfügbaren Frameworks „JUnitTest“ und „Mockito“ ermöglichen das Testen einzelner, isolierter Module der entwickelten Software wie beispielsweise Klassen oder Methoden. Um deren Funktionalität und Verhalten zu prüfen, wurde zu jeder Klasse ein entsprechender Test erstellt.

Die Struktur der Software besteht im Wesentlichen aus drei Ebenen, die in Bild 51 zusammengefasst sind. Aus Gründen der Konsistenz zur entwickelten implementierten Applikation erfassen Bild 51 und Bild 52 die englischen Bezeichnungen. Das GUI

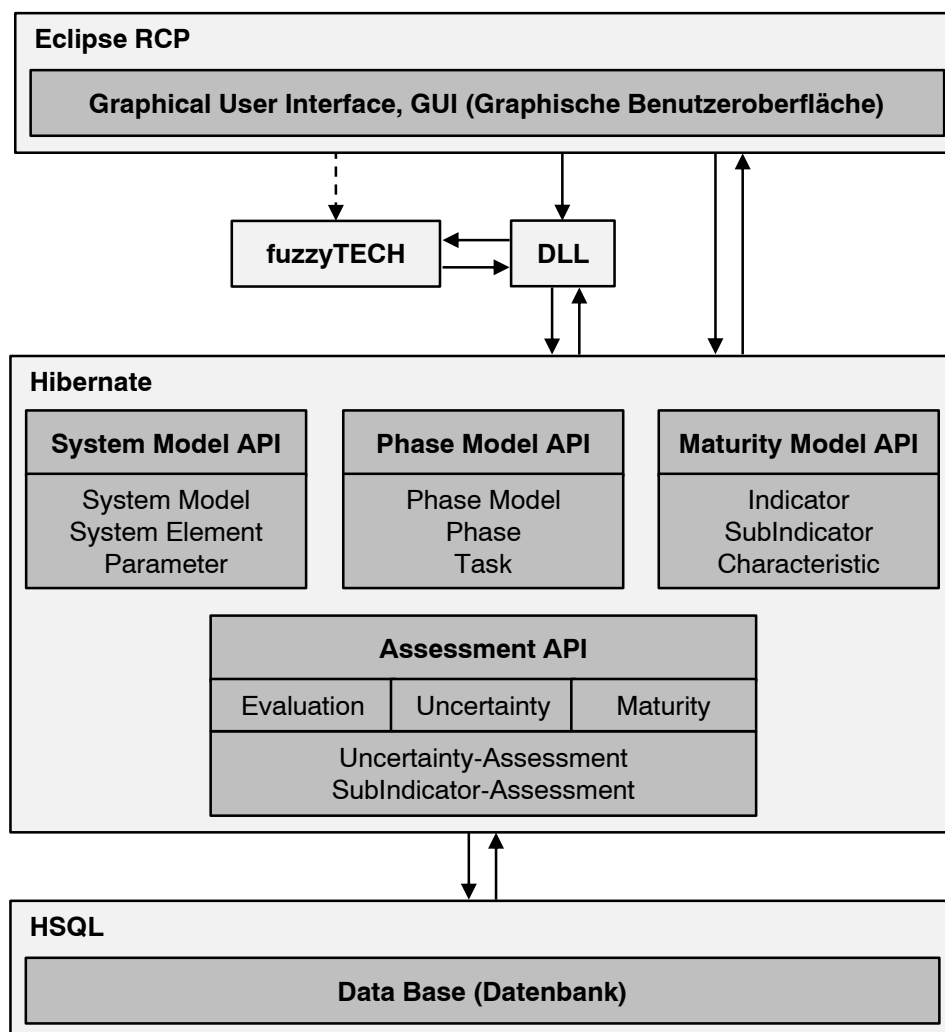


Bild 51: Struktur der Software zur Reifegradmodellauslegung und -anwendung

stellt dem Anwender verschiedene Operationen mittels grafischer Symbole zur Verfügung und erhöht damit die Bedienerfreundlichkeit. Die API-Unterebene (Application Programming Interface (API), dt.: Programmierschnittstelle) ermöglicht die Manipulation der grafischen Benutzeroberfläche und den Zugriff auf die Datenbanken. Wird ein solcher Zugriff auf die Datenbank (speichern, lesen, ändern) initiiert, übersetzt Hibernate den Befehl in die Datenbanksprache, welcher letztlich von der Datenbank umgesetzt wird. Die Software fuzzyTECH wird bei Bedarf und in der entsprechenden Phase der Methodik durch das GUI automatisch gestartet. Die Kommunikation bzw. der Datenaustausch zwischen fuzzyTECH und GUI erfolgt mit Hilfe der DLL-Schnittstelle. Aufgenommene Daten überträgt die GUI in die Datenbank.

Klassendiagramme bilden die Systemarchitektur detailliert ab und ermöglichen deren gezielte Analyse. Hierzu fasst das mit Hilfe der Modellierungssprache UML (Unified Modeling Language) erstellte Klassendiagramm in Bild 52 die implementierten Entitäten der Software durch ihre Bezeichnung, Attribute und Beziehungen zueinander zusammen. Die einzelnen Entitäten sind zu den API-Elementen aus Bild 51 gruppiert. Die Symbole vor dem Namen der Attribute kennzeichnen deren Sichtbarkeit. Sämtliche Attribute der prototypischen Software sind als „public“ (Symbol: +) klassifiziert, wodurch jede andere Systemkomponente uneingeschränkter Zugriff auf das jeweilige Attribut besitzt. Die Beziehungen zwischen den Entitäten werden durch entsprechende Assoziationen notiert. Eine durchgezogene Linie steht für eine einfache Verbindung zwischen zwei Klassen. Die gerichtete Assoziation stellt den einseitigen Zugriff der einen Klasse auf die andere Klasse dar. So greift die Klasse „Evaluation“ auf die Klasse „Phase“ zu - jedoch nicht

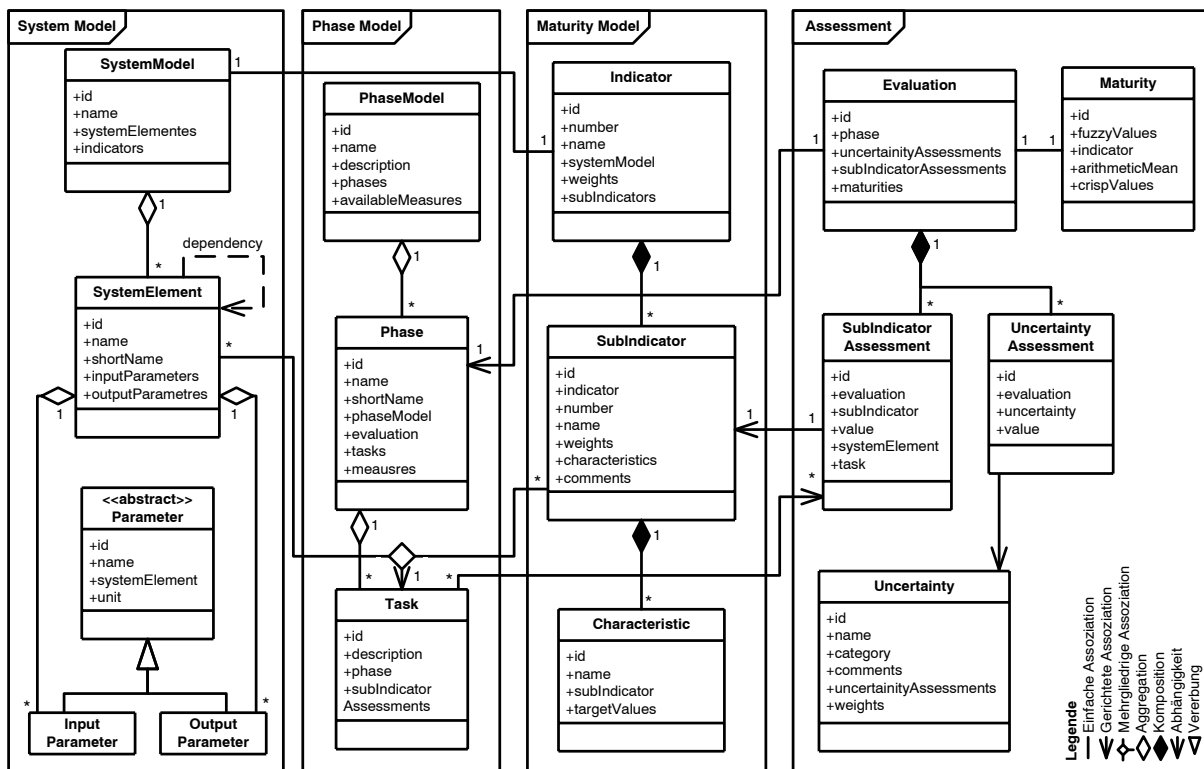


Bild 52: Klassendiagramm der konzipierten Anwendungssoftware zur Auslegung neuer Reifegradmodelle (in Anlehnung an [Akkasoglu 2012b])

umgekehrt. Die Verknüpfung der Sub-Indikatoren und Systemelemente mit den Tasks wird durch eine mehrgliedrige Assoziation abgebildet. Beziehungen zwischen einem Teil und einem Ganzen werden durch Aggregationen visualisiert. Beispielsweise sind mehrere Instanzen der Klasse „SystemElement“ ein Teil von „SystemModel“. Kompositionen stellen ebenfalls die Beziehung zwischen einem Teil und einem Ganzen dar, wobei in diesem Fall das Teil vom Ganzen existenzabhängig ist. Gestrichelte Pfeile geben Abhängigkeiten wieder, die z. B. zwischen einzelnen Objekten der Entität „SystemElement“ vorliegen. Die abstrakte Klasse „Parameter“ vererbt ihre Attribute an die Klassen „InputParameter“ und „OutputParameter“. Diese Beziehung der Klassen zueinander wird durch einen dreieckigen Pfeil symbolisiert. [OMG 2011]

Mittels Multiplizitäten zwischen Klassen wird die mögliche Anzahl der an der Beziehung beteiligten Instanzen, d. h. Objekte der Klassen, angegeben. So sagt die Multiplizität zwischen „SystemElement“ (1) und „OutputParameter“ (*) aus, dass ein Systemelement mehrere Outputparameter besitzen kann bzw. mehrere Outputparameter einem Systemelement zugeordnet sein können. [OMG 2011]

8.3 Anwendung und Beurteilung

Für die informationstechnisch unterstützte Durchführung der Methodik werden die entwickelte Software und eine lauffähige Version des Programms „fuzzyTECH“ benötigt (www.fuzzytech.de). Eine kostenfreie Demonstrationsversion ist unter Verzicht auf eine Speichermöglichkeit von Fuzzy-Systemdateien ebenso verwendbar. Die GUI erstellt bei erstmaliger Initialisierung der Software automatisch ein exemplarisches System- und Phasenmodell. Diese Modelle kann der Benutzer über die GUI-Elemente ändern. Die Durchführung der Methodik ist innerhalb der Software in die drei Phasen

- Planung (engl.: Planning)
- Bewertung vorbereiten (engl.: Prepare Assessment)
- Bewertung (engl.: Assessment)

unterteilt, die als Perspektiven in Form von Registerkarten implementiert sind. Die ersten beiden Phasen sind der Benutzerkategorie „Modellierer“ zugeordnet. Die „Assessment“-Phase ist für die Rolle des „Nutzers“ vorgesehen. Die „Planning“-Perspektive umfasst sieben untergliederte Abschnitte, die zum systematischen Aufbau des Reifegrad- und Unsicherheitsmodells von links nach rechts durchzuführen sind (Bild 53). Der Abschnitt „System Model“ ermöglicht das Erstellen, Ändern und Löschen eines Systemmodells nach SysML [OMG 2010] unter Angabe der Parameter und Zielgrößen für das jeweilige Systemelement (Bild-Anhang A). In dem anschließenden Schritt „Phase Model“ können Phasen und zugehörige Aktivitäten (Tasks) für das Phasenmodell des Betrachtungsobjekts erstellt, geändert und gelöscht werden. Ebenso können definierte Indikatoren in Abhängigkeit der Systemelemente zu den jeweiligen Aktivitäten zugeordnet werden (Bild-Anhang B). Das Deduzieren und Definieren von reifegradrelevanten

Indikatoren sowie Sub-Indikatoren und dazugehörige Merkmale sind unter dem Abschnitt „Indicators“ möglich (Bild-Anhang C). Für die Gewichtung der Indikatoren mit Hilfe des paarweisen Vergleichs steht in dem Schritt „Weighting Indicators“ eine Matrix zur Verfügung (Bild-Anhang D). Die Reifegrad-Kennwert-Matrix wird unter dem Bereich „Maturity Level Matrix“ durch das Beschreiben der Anforderungen zu den einzelnen Sub-Indikatoren in vier Reifegradstufen aufgebaut (Bild-Anhang E). In der Sub-Phase „Uncertainty Level Matrix“ können sowohl die relevanten Unsicherheitsfaktoren definiert und kategorisiert als auch die Anforderungen zu den einzelnen Unsicherheitsfaktoren in vier Unsicherheitsstufen beschrieben werden (Bild-Anhang F). Die „Planning“-Phase abschließend können die Unsicherheitsfaktoren im Abschnitt „Weighting Uncertainties“ durch einen paarweisen Vergleich gewichtet werden (Bild-Anhang G).

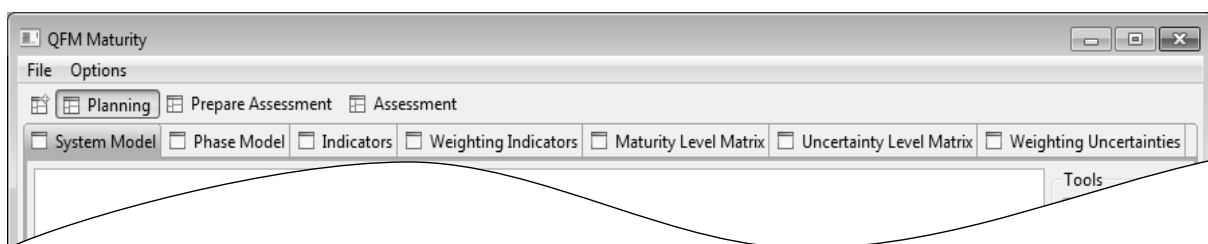


Bild 53: Perspektive „Planning“ mit den zugehörigen Abschnitten

In der „Prepare Assessment“-Perspektive (Bild 54) werden das Reifegrad- und Unsicherheitsmodell in einem Fuzzy-System fusioniert. Im Abschnitt „Uncertainty Analysis“ können hierzu die Unsicherheitsfaktoren phasenabhängig bewertet werden, um den vorliegenden Unsicherheitswert zu ermitteln. In Anlehnung an die Formeln (21) - (24) werden die linguistischen Terme der Eingangsvariablen des Fuzzy-Systems automatisiert ausgelegt (Bild-Anhang H). Unter „Create Fuzzy System“ wird das Fuzzy-System mit phasenrelevanten Sub-Indikatoren, Regelblöcken und den entsprechenden Indikatoren selbsttätig in fuzzyTECH aufgebaut. Dem Softwarenutzer ist es anschließend möglich, sowohl die Regeln der Regelblöcke als auch weitere Parameter des Fuzzy-Systems gezielt einzustellen. Die linguistischen Ausgangsvariablen werden durch die Software standardmäßig mit acht gleichverteilten Termen ausgestattet (Bild-Anhang I).

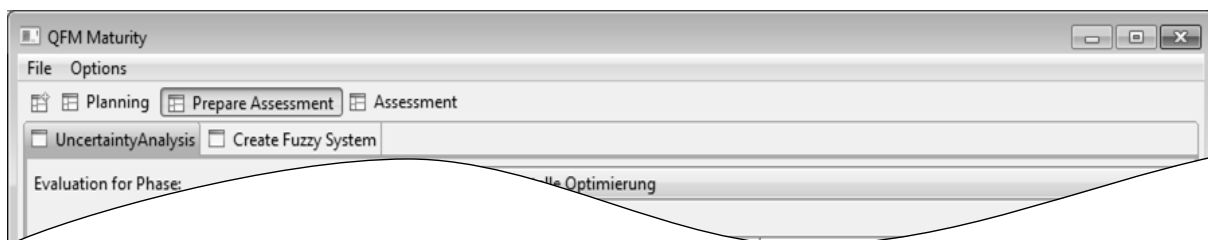


Bild 54: Perspektive „Prepare Assessment“ mit den zugehörigen Abschnitten

Die Perspektive „Assessment“ (Bild 55) ermöglicht im gleichnamigen Abschnitt „Assessment“ das Bewerten der in Abhängigkeit der ausgewählten Phase bereitgestellten Sub-Indikatoren durch Vergleich der aktuellen Situation des Betrachtungsobjekts mit den Anforderungen der Reifegrad-Kennwert-Matrix (Bild-Anhang J). Die Bewertungen werden in das jeweilige Fuzzy-System unter fuzzyTECH automatisiert übertragen und verarbei-

tet. Die resultierenden unscharfen Werte werden durch die Software aus fuzzyTECH ausgelesen. Unter „Visualisation Overview“ werden die Daten zu den unscharfen Indikatorreifegraden und dem Gesamtreifegrad aufgearbeitet und entsprechend dem Visualisierungskonzept nach Bild 43 bzw. Bild 49 ausgegeben. (Bild-Anhang K)

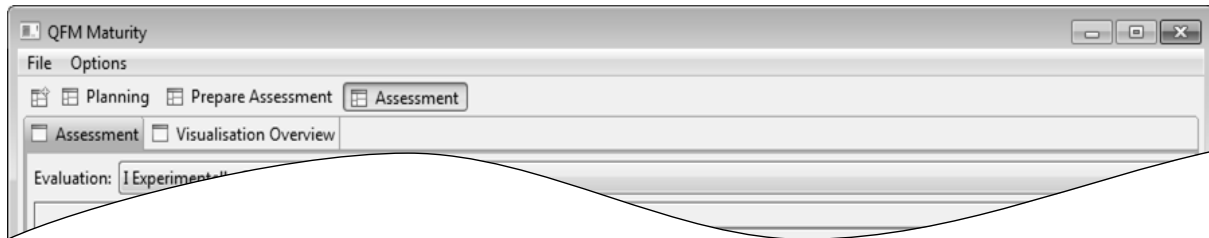


Bild 55: Perspektive „Assessment“ mit den zugehörigen Abschnitten

Zur Beurteilung der Software wurde die implementierte Methodik zur Reifegradmodellbildung schrittweise anhand der Entwicklung der Blechmassivumformung (Kapitel 7) angewendet. Die bereits eruierten Daten und Informationen wurden an entsprechender Stelle der Methodik in das informationstechnische System übertragen.

Zunächst wurde das Systemmodell mit seinen Systemelementen und den dazugehörigen „Parameter“ und „Zielgrößen“ entsprechend Bild 46 aufgebaut. Das Phasenmodell für die Entwicklung neuer Umformverfahren ist dem in Bild 47 konzipierten Ablauf entlehnt, wodurch die Phasen und die jeweiligen Phasenelemente (Aktivitäten) in das Informationssystem überführt wurden. Die Software ermöglicht die klassifizierte Deduktion von Indikatoren und Sub-Indikatoren. Dem Informationssystem wurden zur exemplarischen Anwendung die bereits in Kapitel 7.4 deduzierten Indikatoren und Sub-Indikatoren mitgeteilt. Nach paarweiser Gewichtung der Indikatoren gemäß Tabelle 13 wurde entsprechend der implementierten Methodik die Reifegrad-Kennwert-Matrix aufgebaut. Hierzu wurden die Matrixelemente aus Tabelle-Anhang C bis Tabelle-Anhang G in die Softwareapplikation eingetragen. Anschließend wurden die Sub-Indikatoren sowohl den Systemelementen als auch den Phasenelementen spezifisch wie in Tabelle 14 zugeordnet. Die Eingabemaske zur Reifegrad-Kennwert-Matrix stellt die Zuordnungen der Sub-Indikatoren zu den jeweiligen Phasen übersichtlich dar, wodurch eine Prüfung der Zuweisungen ermöglicht wird (Bild-Anhang E). Für den Aufbau der Unsicherheit-Kennwert-Matrix wurden der Softwareapplikation die Unsicherheitsfaktoren mitgeteilt. Dazu wurden die in Kapitel 6.1 eruierten Faktoren herangezogen und als Unsicherheit-Kennwert-Matrix auf die Tabelle-Anhang A und Tabelle-Anhang B zurückgegriffen. Anschließend wurden die Faktoren mit Hilfe des paarweisen Vergleichs analog zur Tabelle 9 gewichtet.

Nach dem Aufbau des Reifegrad- und Unsicherheitsmodells wurde das Fuzzy-System erstellt. Die Software bietet hierzu die in Kapitel 6.2 konzipierte Vorgehensweise zur Auslegung der linguistischen Terme in Abhängigkeit vom Unsicherheitswert als Funktion. Für die exemplarische Anwendung wurde der Unsicherheitswert U zu 0,27 (wie in der Vergleichsbewertung in Tabelle 15) bestimmt, wodurch die Zuge-

hörigkeitsfunktionen der linguistischen Eingangsterme nach Bild 48 resultieren. Mit Hilfe der Software wurde das entsprechende Fuzzy-System automatisiert aufgebaut und manuell ausgelegt (s. Kapitel 7.6).

Im Rahmen des „Assessments“ erfolgt die Reifegradbewertung innerhalb der untersuchten Phase der „Experimentellen Optimierung“. Als Werte für die phasenabhängigen Sub-Indikatoren wurde auf die Daten aus Tabelle-Anhang H zurückgegriffen. Als Reifegradergebnisse resultieren entsprechend Bild-Anhang K dieselben Werte für die Reifegradindikatoren und den Gesamtreifegrad wie bei der manuellen Auswertung in Kapitel 7.6, Bild 49, womit die Implementierung der Methodik als Software erfolgreich verifiziert wurde.

Die Erprobung der implementierten Anwendungssoftware zur Konstruktion und Applikation von bedarfsgerechten Reifegradmodellen mit den Systemelement-Experten verspricht eine Steigerung der Zeit- und Ressourceneffizienz in der Anwendung der Methodik. Die Nutzer werden durch die GUI der Software schrittweise entlang der konzipierten und validierten Vorgehensweise geführt. Zu jedem Schritt sind die Forderungen an den Benutzer durch die Vorgaben der Eingabemasken eindeutig, wodurch die Zugänglichkeit der Methodik erhöht und die Handhabung vereinfacht wird. Dies erspart mehrfache Iterationen und reduziert den Zeitaufwand beim Aufbau und der Anwendung eines bedarfsgerecht ausgelegten Reifegradmodells.

Die generierten Daten und Informationen für das bedarfsgerechte Reifegradmodell werden erfasst, verarbeitet, zentralisiert gespeichert, visualisiert und zur Verfügung gestellt. Operationen im Rahmen der Methodik wie z. B. Zuordnung der Sub-Indikatoren zu den einzelnen Elementen des Systemmodells und den Aktivitäten des Phasenmodells können rechnergestützt in einem Programmfenster durchgeführt werden, wodurch die Übersichtlichkeit gewahrt wird und die Datenhandhabung vereinfacht wird.

Der automatisierte Aufbau des für die jeweilige Entwicklungsphase erforderlichen Fuzzy-Systems steigert zusätzlich die Zeiteffizienz der Methodik. Hierbei werden sowohl die phasenabhängige Struktur des Fuzzy-Systems als auch die von dem zuvor bewerteten Unsicherheitswert abhängigen Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Eingangsterme erstellt. Der Benutzer hat weiterhin die Möglichkeit, die Regelbasis auszulegen und die Operatoren für Aggregation, Implikation und Akkumulation festzulegen sowie eine Defuzzifizierungsmethode auszuwählen (Schritt 7-9 im Aufbau eines Fuzzy-System entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 2.5.4).

Die grafische Ausgabe der Reifegradergebnisse, wie in Bild 43 und Bild 49 konzipiert, ermöglicht eine detaillierte Datenanalyse und eine valide Maßnahmenauswahl zur Reifegradsteigerung. Dazu kann auf die im System hinterlegte Reifegrad-Kennwert-Matrix zurückgegriffen werden, um der nächsthöheren Reifegradstufe des defizitären Sub-Indikators reifegradsteigernde Ansätze zu entnehmen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Um prinzipiell eine effektive Steuerung oder Verbesserungen zu ermöglichen, ist die vorherige Messung bzw. quantitative Erfassung des Betrachtungsobjekts notwendig. Insbesondere in Gestaltungs- und Änderungsprozessen von komplexen Betrachtungsobjekten ist die frühe quantitative Erfassung von Informationen zum Reifegrad, welcher den Entwicklungsstand repräsentiert, nur erschwert möglich, da kaum messbare Merkmale zur Verfügung stehen. Eine zielgerichtete Lenkung des Entwicklungsvorhabens kann dennoch durch einen referenzbasierten und kategorisierten Vergleichswert für den Entwicklungsstand ermöglicht werden. Diesen Ansatz verfolgen Reifegradmodelle, die sich als adäquates Werkzeug zur kontinuierlichen Entwicklung und Verbesserung von Prozessen, Produkten und Organisationen durch strukturierte Selbstbewertung etabliert haben. Derzeit verfügbare Reifegradmodelle weisen jedoch Defizite hinsichtlich der Abbildung spezifischer Betrachtungsobjekte auf, weswegen ihre Anwendbarkeit durch eine geringe Kompatibilität zum Anwendungsbereich oder eine allzu allgemeingültige Auslegung eingeschränkt ist. Darüber hinaus wird lediglich in gesonderten Fällen die der Reifegradbewertung innewohnende Informationsunsicherheit berücksichtigt. Dies trifft weitestgehend auch auf vorhandene Vorgehensweisen zum Aufbau neuer Reifegradmodelle zu, die zudem aufgrund ihrer abstrakten Darstellung und fehlenden Integration von spezifischen Methoden eine unzureichende Anwenderunterstützung bieten.

Daher ist für den systematischen Aufbau bedarfsgerechter Reifegradmodelle eine anwenderorientierte Methodik erforderlich gewesen, die die implizite Informationsunsicherheit in der Ermittlung des Entwicklungsstands hinreichend berücksichtigt. Hierzu ist im Rahmen dieser Arbeit eine methodengestützte Vorgehensweise erstellt worden, welche eine effektive Anwenderunterstützung in der Reifegradmodellentwicklung bietet. Die Methodik umfasst im Kern die referenzmodellbasierte Deduktion reifegradrelevanter Indikatoren zur Konstruktion der Reifegrad-Kennwert-Matrix, welche als Grundlage zur Bewertung des Entwicklungsstands durch Vergleich des Betrachtungsobjekts mit den stufenweise definierten Anforderungen dient. Gleichwertig zur Messtechnik ist auch die Verwendung von Reifegradmodellen (entspricht dem „Messsystem“) zur Ermittlung (entspricht der „Messung“) eines Reifegradwertes (entspricht dem „Messwert“) mit Unsicherheiten verbunden. Allerdings sind Reifegradbewertungen überwiegend mit epistemischen Unsicherheiten behaftet, die durch bestehende Methodiken wie dem GUM nicht angemessen verarbeitet werden können. Zur Berücksichtigung und Verarbeitung der typischen Informationsunsicherheiten in der Reifegradbewertung stellt die im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Methodik eine analytische Vorgehensweise bereit, wonach die wirkenden Unsicherheitsfaktoren in einer Unsicherheit-Kennwert-Matrix erfasst werden. Dies ermöglicht die Quantifizierung der vorliegenden Informationsunsicherheit in Form eines Unsicherheitswertes. Aufgrund der vorrangig unscharfen Daten wurde die Fuzzy-Set-Theorie zur Verarbeitung der Informationsunsicherheit ausgewählt. Infolge-

dessen umfasst die Methodik die strukturierte Abbildung der Reifegradindikatoren in einem Fuzzy-System als linguistische Variablen und die Auslegung der linguistischen Terme in Abhängigkeit des Unsicherheitswertes. Zur adäquaten Visualisierung der Bewertungsunschärfe wurde ein entsprechendes Darstellungskonzept aufgestellt.

Die konzipierte Systematik wurde zur Validierung innerhalb des SFB / Transregio 73 zur Entwicklung der „Blechmassivumformung“ angewendet. Dadurch ist ein zweckmäßiges Reifegradmodell für die Analyse und Gestaltung neuer Umformverfahren bereitgestellt, das eine reproduzierbare und unschärfebehaftete Ermittlung des Entwicklungsstands ermöglicht. Auf Basis von Bewertungsergebnissen konnten durch die Anforderungen der nächsthöheren Stufen der Reifegrad-Kennwert-Matrix für den abgebildeten Bereich des jeweils defizitären Reifegradindikators zielführende Maßnahmen deduziert werden. Um die hohen und vernetzten Datenmengen, die bei Anwendung der Methodik anfallen, vereinfacht handhaben zu können sowie einzelne Schritte in der Methodik zu automatisieren, wurde eine datenbankbasierte Anwendungssoftware konzipiert und prototypisch realisiert. Dies gewährleistet eine höchstmögliche Anwenderunterstützung in der strukturierten Durchführung der Methodik und führt durch die vereinfachte Zugänglichkeit der Methodik auch zu einer gesteigerten Akzeptanz beim Nutzer.

Eine systembedingte Auflösungsbegrenzung für den Unschärfebereich eines ermittelten Reifegradwertes resultiert durch die zur Abbildung der Reifegradindikatoren und -stufen verwendete Software fuzzyTECH 5.81d. Bei dem Fuzzy-System zur Reifegradermittlung unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit sind alle linguistischen Eingangsterme mit den linguistischen Ausgangstermen in Form von Wenn-Dann-Regeln zu verbinden, um möglichst stetige Antwortgrößen zu erhalten. Aufgrund der Restriktion der genutzten Software fuzzyTECH für die maximale Anzahl der Regeln in einer Regelbasis wird die Gesamtanzahl der Eingangsterme und die Anzahl der Ausgangsterme in einem Regelblock begrenzt gestaltbar. Da insbesondere die Anzahl der Ausgangsterme einen Effekt auf die Auflösung des Fuzzy-System zur Reifegradermittlung besitzt, führt dies zu einer Einschränkung. Mit der Auswahl von vier Eingangstermen und acht Ausgangstermen konnte dennoch ein praktikables Fuzzy-System aufgebaut und angewendet werden. In der Validierung der Methodik hat sich gezeigt, dass als geeigneter Unschärfebereich für die durch den Vergleich mit der Reifegrad-Kennwert-Matrix in frühen Phasen ermittelten Indikatorreifegrade mind. 12,5% resultieren. Durch die Auslegung, Implementierung und Verwendung eines entsprechend verbesserten Softwaremoduls zur rechnergestützten Verarbeitung unscharfer Daten kann die Auflösung des Unschärfeintervalls in der Ermittlung des Reifegrads angepasst werden. Dadurch wird die Basis für zukünftige, auf die hier vorgestellten Arbeiten aufbauende Analyse geschaffen, welcher Unschärfebereich weitestgehend realitätsnah ist und wie demnach die Anzahl der linguistischen Eingangs- und Ausgangstermen auszulegen ist. Diese Erkenntnisse ebnet den Weg für die Adaption der Systematik zur Berücksichtigung und Verarbeitung der Informationsunsicherheit in andere Methoden wie z. B. FMEA oder QFD.

Literatur

[Ahern 2004]

Ahern, D. M.; Clouse, A.; Turner, R.: CMMI Distilled: A Practical Introduction to Integrated Process Improvement. 2. Auflage. Boston: Addison-Wesley, 2004.

[Ahlemann 2005]

Ahlemann, F.; Schroeder, C.; Teuteberg, F.: Kompetenz- und Reifegradmodelle für das Projektmanagement. In: Ahlemann, F.; Teuteberg, F. (Hrsg.): ISPRI-Arbeitsbericht Nr. 01/2005. Osnabrück: ISPRI - Forschungszentrum für Informationssysteme in Projekt- und Innovationsnetzwerken, 2005.

[Akkasoglu 2012]

Akkasoglu, G.; Weckenmann, A.: Systematically designed Maturity Model for Sustainable Development of New Forming Processes. In: Seliger, G.; Kilic, S. E. (Hrsg.): 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Towards Implementing Sustainable Manufacturing (31.10.-02.11.2012, Istanbul, Türkei). Ankara: METU, pp. 576-581. - ISBN 978-605-63463-1-6.

[Akkasoglu 2012a]

Akkasoglu, G.; Weckenmann, A.: Systematic design of a Maturity Model for the Development of New Forming Processes. Quality and its Applications (19.-21.09.2012, Gdansk, Polen). In: Journal of Management and Finance 10 (2012) 3, pp. 191-202. - ISSN 2084-5189.

[Akkasoglu 2012b]

Akkasoglu, G.; Weckenmann, A.; Rampp, A.: Design of a Maturity Model for New Forming Processes considering Uncertain Values. In: Quality-Access to Success 13 (2012) 5, pp. 47-52. - ISSN: 1582-2559.

[Alt 2012]

Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. München: Carl Hanser Verlag, 2012.

[Altrock 1994]

von Altrock, C.; Krause, B.: Multi-criteria decision making in German automotive industry using fuzzy logic. In: Fuzzy Sets and Systems 63 (1994) 3, S. 375-380.

[Altrock 1995]

von Altrock, C.: Fuzzy Logic. Band 1: Technologie. 2. Auflage. München: Oldenbourg, 1995.

[Baetge 1974]

Baetge, J.: Betriebswirtschaftliche Systemtheorie: Regelungstheoretische Planungs- und Überwachungsmodelle für Produktion, Lagerung und Absatz. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1974.

[Baust 2005]

Baust, A.: Messbarkeit integrierter Dienstleistungsprozesse. Heidelberg, Universität, Diss., 2005.

[Becker 1995]

Becker, J.; Rosemann, M.; Schütte, R.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. In: Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 5, S. 435-445.

[Becker 2004]

Becker, J.; Schütte, R.: Handelsinformationssysteme. Frankfurt am Main: Redline Wirtschaft, 2004.

[Becker 2009]

Becker, J. et al.: Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management - Vorgehensmodell und praktische Anwendung. In: Wirtschaftsinformatik 51 (2009) 3, S. 249-260.

[Becker 2009a]

Becker, J.; Knackstedt, R.; Pöppelbuß, J.: Dokumentationsqualität von Reifegradmodellentwicklungen. In: Becker, J.; Hellingrath, B.; Klein, S.; Kuchen, H.; Müller-Funk, U.; Vossen, G. (Hrsg.): Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik Nr. 123. Münster: Westfälische Wilhelms-Universität, 2009.

[Becker 2012]

Becker, J.; Probandt, W.; Vering, O.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung - Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement. Berlin: Springer, 2012.

[Bendt 2000]

Bendt, A.: Wissenstransfer in Multinationalen Unternehmen. Wiesbaden: Gabler, 2000.

[Benz 2008]

Benz, C.: Qualitätsplanung: Operative Umsetzung strategischer Ziele. München: Hanser, 2008.

[Berg 2002]

Berg, P.; Leinonen, V. L.; Pihlajamaa, J.: Assessment of quality and maturity level of Research and Development. In: International Journal of Production Economics 78 (2002), S. 29-35.

[Bertram 1994]

Bertram, T.; Svaricek, F.; Bindel, T.; Böhm, R.; Kiendl, H.; Pfeiffer, B.-M.; Weber, M.: Fuzzy Control - Zusammenstellung und Beschreibung wichtiger Begriffe. In: Automatisierungstechnik 42 (1994) 7, S. 322-326.

[Bertsch 2007]

Bertsch, V.: Uncertainty Handling in Multi-Attribute Decision Support for Industrial Risk Management. Karlsruhe, Universität, Diss., 2008.

[Bitterli 2005]

Bitterli, P. R.: Prozessreife-Beurteilung mit moderiertem Self Assessment. In: 5. itSMF-Jahreskongress „Grenzen überwinden - Brücke in die Zukunft“ (05.-07.12.2005, Dresden).

[Bleck 2011]

Bleck, F.; Wittstruck, D.; Teuteberg, F.: Entwicklung und Validierung eines Reifegradmodells für das Sustainable Supply Chain Management. In: Heiss, H.-U. et al. (Hrsg.): Informatik schafft Communities. Bonn: Gesellschaft für Informatik, 2011.

[Bonano 1995]

Bonano, E. J.: Decision Making under Uncertainty and Risk Assessment. In: Deshotels, E. L.; Zimmerman, R. D. (Hrsg.), Cost-Effective Risk Assessment for Process Design. New York: McGraw-Hill, 1995.

[Brenner 2007]

Brenner, P.-F.: Steigerung der Leistungsfähigkeit der statistischen Versuchsmethodik durch die Gestaltung anwendungsspezifischer Informationssysteme nach einem Referenzmodell. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2007.

[Brenner 2010]

Brenner, P.-F.; Akkasoglu, G.; Weckenmann, A.: Referenzmodellgestützte Reifegradabsicherung bei der Entwicklung neuer umformtechnischer Verfahren. In: Schmitt, R. (Hrsg.): Berichte zum Qualitätsmanagement. Bd. 12/2010. Aachen: Apprimus, 2010, S. 123-144.

[Brenner 2010a]

Brenner, P.-F.; Weckenmann, A.; Akkasoglu, G.: Reifegradmethode für neue Fertigungsverfahren - Rasch und sicher auf neue Wege. In: Qualität und Zuverlässigkeit QZ 55 (2010) 6, S. 52-55.

[Brocke 2003]

vom Brocke, J.: Referenzmodellierung - Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen. In: Becker, J. et al. (Hrsg.): Advances in Information Systems and Management Science. Berlin: Logos Verlag, 2003.

[Bruin 2005]

de Bruin, T. et al.: Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. In: 16th Australasian Conference on Information Systems. Sydney, 2005. - Internet: <http://aisel.aisnet.org/acis2005/109/>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Chrissis 2003]

Chrissis, M. B.; Konrad, M.; Shrum, S.: CMMI - Guidelines for Process Integration and Product Improvement. Boston: Addison-Wesley, 2003.

[CMMI 2010]

Software Engineering Institute (Hrsg.): CMMI® for Acquisition, Version 1.3. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2010.

[CMMI 2010a]

Software Engineering Institute (Hrsg.): CMMI® for Services, Version 1.3. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2010.

[CMMI 2011]

Software Engineering Institute (Hrsg.): CMMI® für Entwicklung, Version 1.3. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2011.

[Cooper 2002]

Cooper, R. G.: Top oder Flop in der Produktentwicklung. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.

[Crosby 1979]

Crosby, P. B.: Quality is Free: The Art of Making Quality Certain. New York: McGraw-Hill, 1979.

[Curtis 2009]

Curtis, B.; Hefley, B.; Miller, S.: People Capability Maturity Model, Version 2.0, Second Edition. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2009.

[Daft 1984]

Daft, R. L.; Lengel, R. H.: Information Richness: A new Approach to Managerial Behavior and Organizational Design. In: Research in Organizational Behavior 6 (1984), S. 191-233.

[Davis 1982]

Davis, B.: The Economics of automated Testing. London: McGraw-Hill, 1982.

[Derichs 1997]

Derichs, T.: Informationsmanagement im Simultaneous Engineering. Bonn: Universität, Diss., 1997.

[DIN 55350]

Norm DIN 55350-13:1987-07. Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen.

[DIN EN 61131-7]

Norm DIN EN 61131-7:2000. Speicherprogrammierbare Steuerungen Teil 7: Fuzzy-Control-Programmierung.

[DoD 2008]

Richtlinie Department of Defense Instruction 5000.02:2008. Operation of the Defense Acquisition System. - Internet: <http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/500002p.pdf>, aufgerufen am 25.07.2013.

[DoD 2011]

US Department of Defense (Hrsg.): Technology Readiness Assessment (TRA) - Guidance. - Internet: http://www.acq.osd.mil/chieftechologist/publications/docs/TRA_2011.pdf, aufgerufen am 25.07.2013.

[DoD 2011a]

US Department of Defense (Hrsg.): Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook. - Internet: http://www.dodmrl.com/MRL_Deskbook_V2.pdf, aufgerufen am 25.07.2013.

[Duden 2013]

Bibliographisches Institut GmbH (Hrsg.): Fortschritt. - Internet: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Fortschritt>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Duden 2014a]

Bibliographisches Institut GmbH (Hrsg.): aleatorisch. - Internet: <http://www.duden.de/rechtschreibung/aleatorisch>, aufgerufen am 12.01.2014.

[Duden 2014b]

Bibliographisches Institut GmbH (Hrsg.): empirisch. - Internet: <http://www.duden.de/rechtschreibung/empirisch>, aufgerufen am 12.01.2014.

[EFQM 2004]

EFQM-Philips (Hrsg.): Process Survey Tool for Manufacturing Process Management. Brüssel, 2004.

[Ehrlenspiel 2009]

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 4. Auflage. München: Hanser, 2009.

[Ehrlicher 1975]

Ehrlicher, W.: Kompendium der Volkswirtschaftslehre, Band 1. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1975.

[Erikson 1966]

Erikson, E. H.: Identität und Lebenszyklus. Frankfurt a. M.: Suhrkamp Taschenbuch Verlag, 1973.

[Exel 2007]

Exel, I.: Quality Gates. In: Qualität und Zuverlässigkeit QZ 52 (2007) 7, S. 74-75.

[Fischermanns 2006]

Fischermanns, G.; Völpel, M.: Der Reifegrad des Prozessmanagements. In: Zeitschrift Führung und Organisation zfo (2006) 5, S. 284-290.

[Fisher 2004]

Fisher, D. M.: The Business Process Maturity Model. A Practical Approach for Identifying Opportunities for Optimization. Internet:

<http://www.bptrends.com/publicationfiles/10-04%20ART%20BP%20Maturity%20Model%20-%20Fisher.pdf>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Freeze 2005]

Freeze, R. D.; Kulkarni, U.: Knowledge management capability assessment: Validating a knowledge assets measurement instrument. In: Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences HICSS-38 (03.-06.01.2005, Hawaii), S. 251a.

[Gerstlauer 2004]

Gerstlauer, M.: Eignung neuer Informations- und Kommunikationstechnik zur Erhöhung der Internationalität von Forschung und Entwicklung - Möglichkeiten und Grenzen. Bamberg: Universität, Diss., 2004.

[Giapoulis 2000]

Giapoulis, A.: Einsatz von Methoden zur Produktentwicklung in der industriellen Praxis. In: VDI (Hrsg.): VDI Berichte 1558. Düsseldorf: VDI, 2000, S. 1-9.

[Gibson 1974]

Gibson, C. F.; Nolan, R. L.: Managing the four Stages of EDP Growth. In: Harvard Business Review 52 (1974) 1, S. 76-88.

[Haerian 2002]

Haerian, S.-H.: Beitrag zur kaskadierten Fuzzy-Regelung eines feldorientiert betriebenen Asynchronmotors. Berlin: Technische Universität, Diss., 2002.

[Hakes 1996]

Hakes, C.: The Corporate Self Assessment Handbook. 3. Auflage. London: Chapman & Hall, 1996.

[Harmon 2004]

Harmon, P.: Evaluating an Organization's Business Process Maturity. Internet: <http://www.bptrends.com/publicationfiles/03-04%20NL%20Eval%20BP%20Maturity%20-%20Harmon.pdf>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Hars 1994]

Hars, A.: Referenzdatenmodell - Grundlagen effizienter Informationssysteme für spanende Fertigungsprozesse. Düsseldorf: VDI, 1997.

[Helton 1993]

Helton, J.C.: Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal. In: Reliability Engineering & System Safety 42 (1993) 2/3, S. 327-367.

[Hersey 1986]

Hersey, P.: Situatives Führen - die anderen 59 Minuten. Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie, 1986.

[Humphrey 1988]

Humphrey, W.: Characterizing the Software Process: A Maturity Framework. In: IEEE Software 5 (1988) 2, S. 73-79.

[ISO 9001]

Norm DIN EN ISO 9001:2008. Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen.

[ISO 9004]

Norm DIN EN ISO 9004:2009. Leiten und Lenken für den nachhaltigen Erfolg einer Organisation - Ein Qualitätsmanagementansatz.

[ISO/IEC 15504-1]

Norm DIN ISO/IEC 15504-1:2011. Informationstechnik - Prozess-Assessment - Teil 1: Konzepte und Vokabular.

[ISO/IEC 15504-2]

Norm DIN ISO/IEC 15504-1:2011. Informationstechnik - Prozess-Assessment - Teil 2: Durchführung eines Assessments.

[ISO/IEC 15504-5]

Norm DIN ISO/IEC 15504-5:2011. Informationstechnik - Prozess-Assessment - Teil 5: Beispiel für ein Prozess-Assessmentmodell.

[Iversen 1999]

Iversen, J.; Nielsen, P. A.; Norbjerg, J.: Situated assessment of problems in software development. In: Data Base for Advances in Information Systems 30 (1999) 2, S. 66-81.

[Janssen 2005]

Janssen, P. H. M.; Petersen, A. C.; van der Sluijs, J. P.; Risbey, J. S.; Ravetz, J. R.: A guidance for assessing and communicating uncertainties. In: Water Science & Technology 52 (2005) 6, S. 126-131.

[Kahlert 1993]

Kahlert, J.; Hubert, F.: Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control. Braunschweig: Vieweg, 1993.

[Kamprath 2011]

Kamprath, N.: Einsatz von Reifegradmodellen im Prozessmanagement - Eine anwendungsorientierte Analyse. In: HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik 48 (2011) 282, S. 93-102.

[Kastner 2005]

Kastner, W.; Schildt, G.-H.: Informatik - Aufgaben und Lösungen. 3. Auflage, Wien: Springer, 2005.

[Kneuper 2006]

Kneuper, R.: CMMI: Verbesserung von Softwareprozessen mit Capability Maturity Model Integration. 2. Auflage. Heidelberg: dpunkt-Verlag, 2006.

[Kosiol 1961]

Kosiol, E.: Modellanalyse als Grundlage unternehmerischer Entscheidungen. In: Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung (1961) 13, S. 318-334.

[Kohlberg 1974]

Kohlberg, L.: Zur kognitiven Entwicklung des Kindes. Baden Baden: Suhrkamp, 1974.

[Kruse 1995]

Kruse, R.; Gebhardt, J.; Klawonn, F.: Fuzzy-Systeme. 2. Auflage. Stuttgart: Teubner, 1995.

[Kulpa 2003]

Kulpa, M. K.; Johnson, K. A.: Interpreting the CMMI - A Process Improvement Approach. Boca Raton: CRC Press LLC, 2003.

[Kuznets 1965]

Kuznets, S.: Economic Growth and Structure: Selected Essays. New York: W. W. Norton, 1965, S. 213-216.

[Leonenkov 2005]

Leonenkov, A.: Fuzzy Modeling in MATLAB and FuzzyTECH Environments. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005.

[Linß 2005]

Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. München: Hanser, 2005.

[Lippe 2006]

Lippe, W.-M.: Soft Computing. Heidelberg: Springer, 2006.

[Lukasiewicz 1910]

Lukasiewicz, J.: Über den Satz des Widerspruchs bei Aristoteles, 1910. Übersetzt in: Barski, J.: Zur modernen Deutung der Aristotelischen Logik. Band 5. Hildesheim: Georg Olms, 1993.

[Lukasiewicz 1930]

Lukasiewicz, J.; Tarski, A.: Untersuchungen über den Aussagenkalkül. In: Comptes Rendus Séances Société des Sciences et Lettres Varsovie 23 (1930), S. 30-50.

[Maier 2009]

Maier, A. M.; Moultrie, J.; Clarkson, P. J.: Developing maturity grids for assessing organisational capabilities: practitioner guidance. In: 4th International Conference on Management Consulting, Academy of Management - MCD 2009 (11.-13.06.2009, Wien, Österreich).

[Makowski 2006]

Makowski, M.: Structured Modeling for Coping with Uncertainty in Complex Problem. In: Marti, K. et al. (Hrsg.): Coping with Uncertainty. Berlin: Springer, 2006.

[Merklein 2010]

Merklein, M.; Koch, J.; Schneider, T.; Opel, S.; Vierzigmann, U.: Manufacturing of complex functional components with variants by using a new metal forming process - sheet-bulk metal forming. In: International Journal of Material Forming 3 (2010) 1, S. 347-350.

[Merz 2011]

Merz, M.: Entwicklung einer indikatorenbasierten Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011.

[Mettler 2010]

Mettler, T.: Supply Management im Krankenhaus - Konstruktion und Evaluation eines konfigurierbaren Reifegradmodells zur zielgerichteten Gestaltung. Univ. St. Gallen, Diss.. Göttingen: Sierke, 2010.

[Morgan 2000]

Morgan, M. G.; Henrion, M.: Uncertainty - A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. New York: Cambridge University Press, 2000.

[Müller 2007]

Müller, M.: Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am besonderen Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie. Univ. des Saarlandes, Diss., 2007.

[Nauck 1996]

Nauck, D.; Kruse, R.: Neuronale Fuzzy-Systeme. - Internet: <http://fuzzy.cs.uni-magdeburg.de/publications/afn/AFNBer96Nauck.pdf>, aufgerufen am: 25.07.2013.

[Nieder 1995]

Nieder, A.: Reifebestimmung zur Optimierung von Entwicklungsprozessen. In: Zimmermann, H.-J.; von Altrock, C. (Hrsg.): Fuzzy Logic - Anwendungen. Band 2. München: Oldenbourg, 1995, S. 31-40.

[Nolan 1973]

Nolan, R. L.: Managing the Computer Resource: A Stage Hypothesis. In: Communications of the ACM 16 (1973) 7, S. 399-405.

[Oberkampf 2007]

Oberkampf, W. L.; Pilch, M.; Trucano, T. G.: Predictive Capability Maturity Model for Computational Modeling and Simulation. Washington: Sandia National Laboratories, 2007.

[O'Hagan 2004]

O'Hagan, A.; Oakley, J. E.: Probability is perfect, but we can't elicit it perfectly. In: Reliability Engineering & System Safety 85 (2004) 1-3, S. 239-248.

[OMG 2008]

Object Management Group (OMG): Business Process Maturity Model (BPMM), 2008. - Internet: <http://www.omg.org/spec/BPMM/1.0/PDF/>, aufgerufen am 25.07.2013.

[OMG 2010]

Object Management Group (OMG): OMG Systems Modeling Language, Version 1.2, 2010. - Internet: <http://www.omg.org/spec/SysML/1.2/PDF/>, aufgerufen am 25.07.2013.

[OMG 2011]

Object Management Group (OMG): OMG Unified Modeling Language Superstructure, Version 2.4. - Internet: <http://www.omg.org/spec/UML/2.4/Superstructure/Beta2/PDF/>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Ophey 2005]

Ophey, L.: Entwicklungsmanagement: Methoden in der Produktentwicklung. Berlin: Springer, 2005.

[Parsch 2010]

Parsch, H.: Requirements-Engineering systematisch: Modellbildung für softwaregestützte Systeme. 2. Auflage. Berlin: Springer, 2010.

[Paulk 1993]

Paulk, M.; Curtis, B.; Chrissis, M.; Weber, C.: Capability Maturity Model for Software. Version 1.1. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1993. - Internet: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA263403>, aufgerufen am: 25.07.2013.

[Peters 2010]

Peters, P.: Entwicklung und Empirische Bestätigung eines Selbstbewertungsmodells für das Quality Gates Management. Technische Universität Berlin, Diss., 2010.

[Pfeifer 2007]

Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Masing - Handbuch Qualitätsmanagement. 5. Auflage. München: Hanser, 2007.

[Pfeifer-Silberbach 2005]

Pfeifer-Silberbach, U.: Ein Beitrag zum Monitoring des Reifegrades in der Entwicklung eines Produktes. Darmstadt: Technische Universität, Diss., 2005.

[Pohl 1996]

Pohl, C.; Matjaz, R.: Sind Ökobilanzen zu präzise? Zum Einsatz von Fuzzy-Set-Theorie und Fehlerrechnung in LCAs. In: Ranze, C.; Tuma, A.; Hilty, L. M.; Haasis, H.-D.; Herzog, O. (Hrsg.): Intelligente Methoden zur Verarbeitung von Umweltinformationen. Marburg: Metropolis, 1996, S. 121-136.

[Prodlog 2010]

Internetauftritt: <http://www.prodlog-design.de/>, aufgerufen am: 29.05.2013.

[Reichwald 1998]

Reichwald, R.; Möslein, K.; Sachenbacher, H.; Englberger, H.: Telekooperation: Verteilte Arbeits- und Organisationsformen. Berlin: Springer, 1998.

[Reithmeier 2011]

Reithmeier, E.; Weckenmann, A.; Behrens, B.-A. et al.: Qualitätsorientierte Entwicklung der Blechmassivumformung. In: M. Merklein (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Erlanger Workshop Blechmassivumformung 2011. Bamberg: Meisenbach, 2011, S. 97-118.

[Richter 2010]

Richter, A.: Der Einsatz von Social Networking Services in Unternehmen. Wiesbaden: Gabler, 2010.

[Röglinger 2012]

Röglinger, M.; Kamprath, N.: Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen - Eine Analyse ökonomischer Zusammenhänge. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 82 (2012) 5, S. 509-538.

[Rosemann 2004]

Rosemann, M.; de Bruin, T.; Hueffner, T.: A Model for Business Process Management Maturity. In: Proceedings of the 15th Annual Australasian Conference on Information Systems (ACIS) (01.-03.12. 2004, Hobart, Tasmania). - Internet: <http://aisel.aisnet.org/acis2004/6/>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Sadin 1988]

Sadin, S. R.; Povinelli, F. P.; Rosen, R.: The NASA technology push towards future space mission systems. In: 39th International Astronautical Congress - IAF (08.-15.10.1988, Bangalore, India).

[Salski 1993]

Salski, A.: Fuzzy-Sets-Anwendungen in der Umweltforschung. In: Reusch, B.: Fuzzy Logic - Theorie und Praxis. Berlin: Springer, 1993, S. 13-21.

[SCAMPI 2011]

Software Engineering Institute (Hrsg.): Standard CMMI® Appraisal Method for Process Improvement (SCAMPISM) A, Version 1.3: Method Definition Document. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2011.

[Schlagheck 2000]

Schlagheck, B.: Objektorientierte Referenzmodelle für das Prozess- und Projektcontrolling.: Grundlagen - Konstruktionen - Anwendungsmöglichkeiten. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2000.

[Schütte 1998]

Schütte, R.: Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung, Konstruktion konfigurations- und anpassungsorientierter Modelle. Wiesbaden: Gabler, 1998.

[Schwan 1999]

Schwan, A.: Fuzzygestütztes Bewertungsmodell für die Entwicklung umweltverträglicher Produkte und Prozesse. Univ. Erlangen-Nürnberg, Diss., 1999.

[Schwegmann 1999]

Schwegmann, A.: Objektorientierte Referenzmodellierung. Wiesbaden: Gabler, 1999.

[Shannon 1948]

Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication. In: Bell System Technical Journal 27 (1948). S. 623-656.

[Sivanandam 2007]

Sivanandam, S. N.; Deepa, S. N.; Sumathi, S.: Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Berlin: Springer, 2007.

[Spanyi 2004]

Spanyi, A.: Towards Process Competence. Internet:

<http://www.spanyi.com/images/BPM%20Towards.pdf>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Spence 2007]

Spence, R.: Information Visualization - Design for Interaction. 2. Auflage. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

[Stachowiak 1973]

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer, 1973.

[Stahlknecht 2005]

Stahlknecht, P.; Hasenkamp, U.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik. Berlin: Springer, 2005.

[Strahringer 2012]

Strahringer, S.: Modell. In: Kurbel, K.; Becker, J.; Gronau, N.; Sinz, E.; Stuhl, L. (Hrsg.): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik - Online-Lexikon. München: Oldenbourg, 2012. - Internet: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-encyklopaedie/lexikon/is-management/Systementwicklung/Hauptaktivitaten-der-Systementwicklung/Problemanalyse-/konzeptuelle-modellierung-von-is/modell/index.html>, aufgerufen am 25.07.2013.

[Thaller 1998]

Thaller, G. E. (Hrsg.): SPICE - ISO 9001 und Software in der Zukunft. Kaarst: bhv, 1998.

[Theden 2002]

Theden, P.; Colsmann, H.: Qualitätstechniken - Werkzeuge zur Problemlösung und ständigen Verbesserung. 3. Auflage. München: Hanser, 2002.

[Thomas 2005]

Thomas, O.: Das Modellverständnis in der Wirtschaftsinformatik: Historie, Literaturanalyse und Begriffsexplikation. In: Scheer, A.-W. (Hrsg.): Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik. Heft 184. Saarbrücken: Institut für Wirtschaftsinformatik, 2005.

[Thommen 1981]

Thommen, A.: Innerbetriebliche Information - Kompendium der betrieblichen Kommunikation. Bern: P. Haupt, 1981.

[Tizhoosh 1998]

Tizhoosh, H. R.: Fuzzy-Bildverarbeitung: Einführung in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1998.

[Traeger 1993]

Traeger, D. H.: Einführung in die Fuzzy-Logik. Stuttgart: Teubner, 1993.

[Unbehauen 2008]

Unbehauen, H.: Regelungstechnik I - Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2008.

[VDA 2010]

Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.): Joint quality management in the supply chain - Product creation - Maturity level assurance for new parts. 2. Auflage. Frankfurt a.M.: Heinrich Druck und Medien, 2010.

[Walker 2003]

Walker, W. E.; Harremoes, P.; Rotmans, J.; Van Der Sluijs, J. P.; Van Asselt, M. B. A.; Janssen, P.; Kraye Von Krauss, M.P.: Defining Uncertainty A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. In: Integrated Assessment 4 (2003) 1, S. 5-17.

[Wang 1998]

Wang, R. Y.: A Product Perspective on Total Data Quality Management. In: Communications of the ACM 2 (1998) 41, S. 58-65.

[Wallmüller 2007]

Wallmüller, E.: SPI- Software Process Improvement mit CMMI und ISO 15504. München: Hanser, 2007.

[Weckenmann 2009]

Weckenmann, A.; Westkämper, E.; Dietlmaier, A.; Haag, H.: Kosten-Nutzen-Analyse bei Messergebnissen: Wert der Messung. In: QZ Qualität und Zuverlässigkeit 54 (2009) 1, S. 54-55.

[Weckenmann 2010]

Weckenmann, A.; Akkasoglu, G.: Managing the challenges in development processes with the maturity method. In: Satyanarayana, B.; Ramji, K. (Eds.): Proceedings of the 3rd Intl. and 24th All India Manufacturing Technology Design and Research Conference (AIMTDR). Volume 1. Visakhapatnam: Andhra University College of Engineering, 2010, S. 3-10.

[Weckenmann 2011]

Weckenmann, A.; Behrens, B.-A.; Reithmeier, E. et al.: Appli-ance of the maturity method in the development of endoscopic geometry inspection for sheet-bulk metal forming tools. In: Total Quality Management & Excellence 39 (2011) 1, p. 11-16.

[Weckenmann 2011a]

Weckenmann, A.; Akkasoglu, G.: Maturity Method for the Development of Metal Forming Processes considering Fuzzy Input Parameters. In: Akkök, M. et al. (Eds.): Proceedings of the 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds (DIEMOLD) 2011. Ankara: Atılım University, 2011, pp. 9-15.

[Weckenmann 2012]

Weckenmann, A.; Akkasoglu, G.: Maturity Determination of New Forming Processes considering Uncertain Indicator Values. MESIC (21.-23.09.2011, Cadiz, Spanien). In: Key Engineering Materials KEM 502 (2012), pp. 97-102.

[Weckenmann 2012a]

Weckenmann, A.; Reithmeier, E.; Behrens, B.-A.; Wartzack, S.; Merklein, M.; Akkasoglu, G.; Ohrt, C.; Salfeld, V.; Breitsprecher, T.; Plugge, B.; Schneider, T.: Methodengestützte Referenzvorgehensweise für neue Umformverfahren. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 107 (2012) 1-2, S. 43-47.

[Weckenmann 2012b]

Weckenmann, A.; Akkasoglu, G.: Maturity Model for the development of new forming processes applied to the Sheet-Bulk Metal Forming. ESAFORM (14.-16.03.2012, Erlangen). In: Key Engineering Materials KEM 504-506 (2012), pp. 1011-1016.

[Weiber 2006]

Weiber, R.; Kollmann, T.; Pohl, A.: Das Management technologischer Innovationen. In: Kleinaltenkamp, M.; Plinke, W.; Jacob, F.; Söllner, A. (Hrsg.): Markt- und Produktmanagement. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2006.

[Weinzierl 2006]

Weinzierl, J.: Produktreifegrad-Management in unternehmensübergreifenden Entwicklungsnetzwerken - Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entscheidungsunterstützung im strategischen Anlaufmanagement. Univ. Dortmund, Diss., 2006.

[Werner 2002]

Werner, B. M.: Messung und Bewertung der Leistung von Forschung und Entwicklung im Innovationsprozess. TU Darmstadt, Diss., 2002.

[Woll 2006]

Woll, R.; Bäsler, M.: Nutzenbetrachtung von Methoden zur Entscheidungsunterstützung. In: Winzer, P. (Hrsg.): Berichte zum Qualitätsmanagement. Bd. 8/2006. Aachen: Shaker, 2006, S. 59-76.

[Woll 2007]

Burkhard, C.; Behrends, J.; Woll, R.: Reifegradbestimmung - Einsatz der Selbstbewertung in Deutschland zur Analyse von Verbesserungspotentialen in Unternehmen. In: Linß, G. (Hrsg.): Berichte zum Qualitätsmanagement. Bd. 9/2007. Aachen: Shaker, 2007, S. 59-72.

[Zacher 2000]

Zacher, S.: Automatisierungstechnik kompakt - Theoretische Grundlagen, Entwurfsmethoden, Anwendungen. 1. Auflage. Braunschweig: Vieweg Verlag, 2000.

[Zadeh 1965]

Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. In: Information and Control, 8 (1965) 3, S. 338-353.

[Zadeh 1975]

Zadeh, L. A.: The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning (I). In: Information Sciences (1975) 8, S. 199-249.

[Zadeh 1975a]

Zadeh, L. A.: The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning (II). In: Information Sciences (1975) 8, S. 301-357.

[Zadeh 1988]

Zadeh, L. A.: Fuzzy Logic. In: IEEE Computer (1988) 21, S. 83-93 .

[Zimmermann 1979]

Zimmermann, H.-J.; Thole, U.: On the suitability of minimum and product operators for the intersection of fuzzy sets. In: Fuzzy Sets and Systems 2 (1979), S. 167-180.

[Zimmermann 1987]

Zimmermann, H.-J.: Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems. London: Springer, 1987.

[Zimmermann 1993]

Zimmermann, H.-J.: Fuzzy Technologien. Düsseldorf: VDI Verlag, 1993.

Anhang

Unsicherheit-Kennwert-Matrix

Faktor	Gew.	Unsicherheitsstufen			
		Stufe 1 [0% - 15%]	Stufe 2 [15% - 50%]	Stufe 3 [50% - 85%]	Stufe 4 [85% - 100%]
1 Abbildungsdiskrepanz des Referenzmodells	16%	Das Referenzmodell ist durch methodische Vorgehensweise innerhalb eines interdisziplinären Teams dem Betrachtungsobjekt entlehnt und erfasst in einem angemessenen Umfang sowohl dessen Abläufe als auch dessen Struktur. Die Abbildungsgüte ist im Rahmen einer Validierung mit den Modellnutzern abgeschätzt.	Das Referenzmodell ist unsystematisch innerhalb eines interdisziplinären Teams dem Betrachtungsobjekt entlehnt und umfasst einen angemessenen Umfang. Eine Validierung liegt nicht vor.	Das Referenzmodell ist unsystematisch und subjektiv dem Betrachtungsobjekt entlehnt. Der Modellumfang ist unangemessen und einseitig. Eine Validierung liegt nicht vor.	Das Referenzmodell ist unsystematisch und subjektiv dem Betrachtungsobjekt entlehnt. Der Umfang der Indikatoren, die Anzahl und der Wertebereich der Reifegradstufen sind ohne nähere Berücksichtigung ausgelegt. Eine Validierung liegt nicht vor.
2 Abbildungsdiskrepanz der Reifegradindikatoren	21%	Die Reifegradindikatoren sind systematisch mit Unterstützung eines Methodenexperten innerhalb eines interdisziplinären Teams auf Basis des Referenzmodells deduziert. Der Umfang der Indikatoren, die Anzahl und der Wertebereich der Reifegradstufen sind mit Bedacht und angemessen ausgelegt. Die eruierten Indikatoren sind mit den Modellnutzern validiert und decken alle Aspekte des Referenzmodells ab.	Die Reifegradindikatoren sind unsystematisch innerhalb eines interdisziplinären Teams auf Basis des Referenzmodells deduziert. Der Umfang der Indikatoren, die Anzahl und der Wertebereich der Reifegradstufen sind mit Bedacht und angemessen ausgelegt. Die eruierten Indikatoren sind mit den Modellnutzern validiert.	Die Reifegradindikatoren sind unsystematisch innerhalb eines interdisziplinären Teams auf Basis des Referenzmodells deduziert. Der Umfang der Indikatoren, die Anzahl und der Wertebereich der Reifegradstufen sind mit Bedacht und angemessen ausgelegt. Eine Validierung liegt nicht vor.	Die Reifegradindikatoren sind unsystematisch und subjektiv dem Referenzmodell entlehnt. Der Umfang der Indikatoren, die Anzahl und der Wertebereich der Reifegradstufen sind ohne nähere Berücksichtigung ausgelegt. Eine Validierung liegt nicht vor.
3 Gewichtsunsicherheit	8%	Die Gewichtungswerte sind im Team systematisch ermittelt und revidiert. Ihr Zustandekommen ist nachvollziehbar dokumentiert.	Die Gewichtungswerte sind unsystematisch im Team ermittelt und revidiert. Ihr Zustandekommen ist nachvollziehbar dokumentiert.	Die Gewichtungswerte sind unsystematisch im Team ermittelt. Ihr Zustandekommen ist nicht nachvollziehbar.	Die Gewichtungswerte sind unsystematisch nach subjektivem Ermessen ermittelt. Ihr Zustandekommen ist nicht nachvollziehbar.
4 Linguistische Unschärfe / Modellunsicherheit	8%	Standardisierte Modellierungssprachen (für das Referenzmodell) kommen zum Einsatz. Abhängig vom Betrachtungsgegenstand sind fachspezifische Begriffe (im Reifegradmodell) verwendet und in einem Glossar definiert. Sowohl die verwendeten Begrifflichkeiten als auch das Glossar sind durch Experten revidiert.	Standardisierte Modellierungssprachen (für das Referenzmodell) kommen zum Einsatz. Abhängig vom Betrachtungsgegenstand sind fachspezifische Begriffe (im Reifegradmodell) verwendet. Die verwendeten Begrifflichkeiten sind durch Experten revidiert.	Eigens definierte Modellierungssprachen (für das Referenzmodell) kommen zum Einsatz. Abhängig vom Betrachtungsgegenstand sind weitestgehend fachspezifische Begriffe (im Reifegradmodell) verwendet. Eine Revision der verwendeten Begrifflichkeiten liegt nicht vor.	Definierte oder standardisierte Modellierungssprachen (für das Referenzmodell) kommen nicht zum Einsatz. Verwendete Begrifflichkeiten (im Reifegradmodell) entstammen dem Verständnis des Modellkonstruktors und sind weder fachspezifisch noch revidiert.

Tabelle-Anhang A: Unsicherheit-Kennwert-Matrix für bedarfsgerecht ausgelegte Reifegradmodelle

		Unsicherheitsstufen			
Faktor	Gew.	Stufe 1 [0% - 15%]	Stufe 2 [15% - 50%]	Stufe 3 [50% - 85%]	Stufe 4 [85% - 100%]
5 Unkenntnis im Untersuchungsumfeld	23%	Der Betrachtungsgegenstand ist thematisch weitgehend durchdrungen und gehört in weiten Teilen zum Stand des Wissens, an dem überschaubare Änderungen oder Verbesserungen vorgenommen werden sollen. Der Bewertungsmoment findet in einem fortgeschrittenen Stadium des Betrachtungsgegenstands statt, wo Einschätzungen des Entwicklungsstands eine hohe Validität besitzen.	Der Betrachtungsgegenstand ist thematisch bekannt, an dem adaptierende Änderungen oder Verbesserungen vorgenommen werden sollen. Der Bewertungsmoment findet in einem gestaltenden Stadium des Betrachtungsgegenstands statt, wo Einschätzungen des Entwicklungsstands eine akzeptierte Validität besitzen.	Der Betrachtungsgegenstand ist thematisch neuartig, an dem durch Verwendung bekannter Wissens weiterentwickelnde Änderungen oder Verbesserungen vorgenommen werden sollen. Der Bewertungsmoment findet in einem gestaltenden Stadium des Betrachtungsgegenstands statt, wo Einschätzungen des Entwicklungsstands eine geringe Validität besitzen.	Der Betrachtungsgegenstand ist thematisch unbekannt oder innovativ, an dem tiefgreifende Änderungen oder Verbesserungen zur Erlangung neuer Erkenntnisse vorgenommen werden sollen. Der Bewertungsmoment befindet sich in einem frühen Stadium des Betrachtungsgegenstands, wo Einschätzungen des Entwicklungsstands eine geringe Validität besitzen.
6 Subjektivität in der Interpretation/Beobachtung	12%	Der Betrachtungsgegenstand wird systematisch in einem interdisziplinären Expertenteam, das eine hohe Kenntnis über den Betrachtungsgegenstand besitzt, multiperspektivisch mit Unterstützung durch einen unabhängigen Assessor analysiert und mit den Anforderungen im Reifegradmodell verglichen.	Der Betrachtungsgegenstand wird in einem interdisziplinären Expertenteam, das eine weitgehende Kenntnis über den Betrachtungsgegenstand besitzt, multiperspektivisch analysiert und mit den Anforderungen im Reifegradmodell verglichen.	Der Betrachtungsgegenstand wird im Team, das eine geringe Kenntnis über den Betrachtungsgegenstand besitzt, multiperspektivisch analysiert und mit den Anforderungen im Reifegradmodell verglichen.	Der Betrachtungsgegenstand wird nach subjektivem Ermessen (Selbstbewertung) mit geringer Kenntnis des Bewertenden über den Betrachtungsgegenstand analysiert und mit den Anforderungen im Reifegradmodell verglichen.
7 Informationsqualität	12%	Relevante und aktuelle Informationen zum Betrachtungsgegenstand sind zugänglich und liegen in einem angemessenen Umfang vor. Durch aufgezeichnete Revisionen ist die Fehlerfreiheit der Informationen dokumentiert. Die vorliegenden Informationen sind durch ihre Strukturierung verständlich und eindeutig auslegbar.	Relevante und aktuelle Informationen zum Betrachtungsgegenstand sind zugänglich und liegen in einem weitestgehend angemessenen Umfang vor. Die Fehlerfreiheit der Informationen ist nicht nachvollziehbar. Die vorliegenden Informationen sind durch ihre Strukturierung weitestgehend verständlich und eindeutig auslegbar.	Relevante, jedoch veraltete Informationen zum Betrachtungsgegenstand sind zugänglich und liegen in einem weitestgehend angemessenen Umfang vor. Die Fehlerfreiheit der Informationen ist nicht nachvollziehbar. Die vorliegenden Informationen sind aufgrund ihrer geringen Strukturierung kaum verständlich oder eindeutig auslegbar.	Lediglich veraltete und kaum relevante Informationen zum Betrachtungsgegenstand sind zugänglich, wodurch kein angemessener Umfang vorliegt. Die Fehlerfreiheit der Informationen ist nicht nachvollziehbar. Die vorliegenden Informationen sind aufgrund ihrer geringen Strukturierung kaum verständlich oder eindeutig auslegbar.

Anwendung Reifegradmodell

Tabelle-Anhang B: Unsicherheit-Kennwert-Matrix für bedarfsgerecht ausgelegte Reifegradmodelle (Fortsetzung)

Reifegrad-Kennwert-Matrix

		Reifegradstufen			
Indikator	Sub-Indikator	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
		[0% - 15%]	[15% - 50%]	[50% - 85%]	[85% - 100%]
1 Ziele und Anforderungen (15%)	1.1 Zustandsanalyse	Istzustand, Stand der Technik und Technologieentwicklung subjektiv analysiert.	Istzustand, Stand der Technik und Technologieentwicklung subjektiv analysiert. In die Betrachtung sind die Systemkomponenten unabhängig voneinander, ohne deren WW erfasst.	Istzustand, Stand der Technik und definierter Bewertungskriterien in einem Peer-Review analysiert. Der Betrachtungsfokus erfasst alle technisch relevanten Systemkomponenten (inkl. WW).	Istzustand, Stand der Technik und Technologieentwicklung (wirtschaftlich und technisch) mittels definierter, quantitativer Bewertungskriterien in einem Peer-Review analysiert. Der Betrachtungsfokus liegt systemübergreifend auch auf angrenzende Prozessschritte vor.
	1.2 Zieldefinition	Ziele sind ausgelegt und Anforderungen sind definiert. Definierte Ziele und Anforderungen dokumentiert.	Ziele sind ausgelegt und Anforderungen sind vollständig und eindeutig anhand von Qualitätsmerkmalen definiert. Bisherige Erkenntnisse sind ggf. berücksichtigt (z. B. aus Simulationen). Zuständigkeiten sind spezifisch definiert. Definierte Ziele und Anforderungen dokumentiert.	Ziele sind ausgelegt und Anforderungen sind vollständig und konsistent (widerspruchsfrei) anhand von Qualitätsmerkmalen definiert. Sowohl Ziele als auch Anforderungen sind im Peer-Review abgestimmt. Ziele und Anforderungen sind entsprechend ihrer Wichtigkeit priorisiert und gewichtet. Bisherige Erkenntnisse sind ggf. berücksichtigt (z. B. aus Vorstudien). Definierte Ziele und Anforderungen sind gezielt kommuniziert und zugänglich dokumentiert sowie kontinuierlich revidiert.	Ziele sind ausgelegt. Anforderungen sind vollständig, eindeutig, messbar und konsistent (widerspruchsfrei) anhand von Qualitätsmerkmalen für alle Entwicklungsentitäten definiert. Sowohl Ziele als auch Anforderungen sind im Peer-Review abgestimmt. Ziele und Anforderungen sind entsprechend ihrer Wichtigkeit priorisiert und gewichtet. Abhängigkeit von Zielen und Anforderungen sind untersucht. Bisherige Erkenntnisse sind ggf. berücksichtigt (z. B. aus Vorstudien). Definierte Ziele und Anforderungen sind gezielt kommuniziert und zugänglich dokumentiert sowie kontinuierlich revidiert.
	1.3 Zeitplan und Aufgaben	Zeitlicher Rahmen des Entwicklungsvorhabens bestimmt.	Zeitlicher Rahmen des Entwicklungsvorhabens bestimmt. Aktivitäten im Zeitplan sind aufeinander abgestimmt und kommuniziert.	Zeitraum des Vorhabens bestimmt. Abgeleitete und definierte Arbeitspakete sind zeitlich abgeschätzt und im Plan integriert. Zeitplan ist aufeinander abgestimmt und kommuniziert.	Zeitraum des Vorhabens mittels Phasenmodell definiert. Abgeleitete Arbeitspakete sind zeitlich abgeschätzt und im Phasenmodell integriert. Zeitplan ist gemäß Simultaneous Engineering optimiert, kommuniziert, abgestimmt, zugänglich dokumentiert und regelmäßig revidiert.
	1.4 Machbarkeitsstudie	Machbarkeitsstudie im weitesten Sinne durchgeführt.	Machbarkeitsstudie anhand definierter Ziele und Anforderungen zur Realisierbarkeit des definierten Sollzustands durchgeführt. Erkenntnisse der Studien zur Definition der Ziele und des Sollzustands berücksichtigt.	Machbarkeitsstudie anhand definierter Ziele und Anforderungen zur Realisierbarkeit des definierten Sollzustands durchgeführt. Quantitativ bewertete Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt und dokumentiert. Erkenntnisse der Studien zur Zieldefinition und zum Sollzustand berücksichtigt.	Eine multikriterielle Machbarkeitsstudie anhand definierter Ziele und Anforderungen zur Realisierbarkeit des definierten Sollzustands durchgeführt. Quantitativ bewertete Kosten-Nutzen-Analyse sowie eine Risikoanalyse durchgeführt, dokumentiert, bereitgestellt und kontinuierlich revidiert. Erkenntnisse der Studien zur Zieldefinition und zum Sollzustand berücksichtigt.

Tabelle-Anhang C: Reifegrad-Kennwert-Matrix für neue Umformprozesse

Reifegradstufen				
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
	[0% - 15%]	[15% - 50%]	[50% - 85%]	[85% - 100%]
2 Systementwurf und -analyse (7,5%)	Systemstruktur und -ablauf sind dezentral bekannt.	Betrachtetes Gesamtsystem ist abgegrenzt und in seine relevanten Systemelemente dekomponiert.	Betrachtetes Gesamtsystem ist in seine Systemelemente abgegrenzt sowie in seine relevanten Bestandteile dekomponiert. Systemstruktur und -verhalten sind systematisch erfasst (z. B. mit einer Modellierungssprache) und näher analysiert. Das Systemmodell wird kontinuierlich revidiert.	Betrachtetes Gesamtsystem ist in seine Systemelemente abgegrenzt sowie in dessen relevanten Bestandteile dekomponiert. Systemstruktur und -verhalten sind systematisch erfasst (z. B. mit einer Modellierungssprache) und näher analysiert. Das Systemmodell wird kontinuierlich revidiert.
	Systemparameter sind bekannt, aber nicht erfasst.	Parameter der Systemelemente ermittelt und im Systemstruktur- und -ablaufmodell hinterlegt.	Sowohl bekannte als auch vermutete Parameter der Systemelemente ermittelt und im Systemstruktur- und -ablaufmodell zentral hinterlegt und zur Verfügung gestellt. Parameter nach Einfluss-, Stör- und Zielgrößen unterschieden.	Bekannte und vermutete Parameter der isolierten Systemelemente ermittelt und im Systemstruktur- und -ablaufmodell hinterlegt. Parameter nach Einfluss-, Stör- und Zielgrößen unterschieden. Bekannte und ermittelte Wirkbeziehungen zwischen Einfluss- und Zielgrößen sowie signifikante Einflussgrößen im Systemmodell hinterlegt.
3 Konzeption und Konstruktion (12,5%)	Die Konstruktion ist angedroht.	Die wichtigsten Funktions- und Strukturelemente des Systems sind messgerecht spezifiziert sowie zugänglich und verwertbar dokumentiert.	Wichtigsten Funktions- und Strukturelemente des Systems sind mess- und fertigungsgerecht spezifiziert sowie zugänglich und verwertbar dokumentiert.	Die wichtigsten Funktions- und Strukturelemente des Systems sind mess- und fertigungsgerecht spezifiziert sowie zugänglich und verwertbar dokumentiert. Design Review der Konstruktion durchgeführt.
	Das beobachtete System durchläuft eine Untersuchung.	Das Systemverhalten wird durch Untersuchungen und Tests anhand Variation relevanter Parameter analysiert. Das Systemverhalten ist dokumentiert.	Untersuchungen und Tests erfolgen nach einer reproduzierbaren Vorgehensweise durch anforderungsgerechte Variation relevanter Parameter. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind ausgewertet und signifikante Faktoren auf das Systemverhalten sind ermittelt. Das Systemverhalten ist umfangreich dokumentiert.	Umfangreiche Untersuchungen und Tests erfolgen nach einer reproduzierbaren Vorgehensweise durch anforderungsgerechte Variation relevanter und bisher unberücksichtigter Parameter sowohl auf Prozess- als auch auf Produktebene (z.B. Werkstoff, Maßhaltigkeit, Formgenauigkeit). Die Ergebnisse der Untersuchungen sind statistisch valide ausgewertet und signifikante Faktoren auf das Systemverhalten sind ermittelt. Das Systemverhalten ist unterstützend visualisiert und umfangreich dokumentiert.
	Das konzeptionelle bzw. erweiterte System ist simulationsbasiert am Rechner untersucht.	Das entworfene Konzept wird an einem realen Modellversuch im Laborumfeld aufgebaut. Ergebnisse der Simulationsstudien sind berücksichtigt.	Systemelemente der Konzepte sind zusammengeführt. Ergebnisse der Simulationsstudien sind berücksichtigt und verwertet. Das konzeptionelle bzw. erweiterte System ist in einem produktionsnahen Umfeld aufgebaut.	Systemelemente sind zusammengeführt bzw. in andere übergreifende Systeme integriert. Ergebnisse der Simulationsstudien sind berücksichtigt und verwertet. Das konzeptionelle bzw. erweiterte System ist im Einsatzumfeld aufgebaut.

Tabelle-Anhang D: Reifegrad-Kennwert-Matrix für neue Umformprozesse (Fortsetzung)

		Reifegradstufen			
Indi- kator	Sub- Indi- kator	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
		[0% - 15%]	[15% - 50%]	[50% - 85%]	[85% - 100%]
4 Modellbildung (7,5%)	4.1 Modellreduktion / Idealisierung	Modellreduktion mit problemspezifischer Idealisierung des Systems.	Modellreduktion mit problemspezifischer Idealisierung des Systems. Idealisierung basiert auf Vermutungen. Modell erfasst interessierenden Ergebnisbereich.	Modellreduktion mit problemspezi- fischer Idealisierung des Systems. Idealisierung basiert auf Erfah- rungswissen und/oder Vermutung- en. Modell erfasst interessierenden Ergebnisbereich. Ungenauigkeiten im Simulationsergebnis durch Modellreduktion berücksichtigt und sind nicht vernachlässigbar gering.	Modellreduktion ist für die geforderten Simulationsergebnisse unerheblich - Signifikante Kenngrößen für die Modellierung ermittelt und herangezogen. (Signifikanz statistisch ermittelt). Modellfokus erfüllt Adäquanz und Genauigkeit der Ziele und Anforderungen.
	4.2 Wirkbeziehung der Kenngrößen	Die vermuteten U-W- Beziehungen von Kenngrößen fließen in die Modellbildung ein.	Die auf empirischen Modell- gleichungen basierenden U- W-Beziehungen fließen in die Modellbildung ein. Die Signifikanz berücksichtigter Kenngrößen ist statistisch abgesichert.	Die auf physikalischen und validierten Modellgleichungen basierenden U-W-Beziehungen fließen in die Modellbildung ein. Die Signifikanz berücksichtigter Kenngrößen ist statistisch abgesichert.	Die zum Großteil auf physikalischen und analytischen Modellgleichungen basierenden U- W-Beziehungen von Kenngrößen fließen in die Modellbildung ein. Die Signifikanz der berücksichtigten Kenngrößen ist statistisch abgesichert.
	4.3 Verifikation und Validierung	Modellverifikation und -validierung findet unstrukturiert mittels subjektiver Beurteilung statt. Das Simulations- modell liefert Ausgabewerte.	Verifikation und Validierung erfolgt strukturiert anhand subjektiver Bewertungskriterien. Simulationswerte des Modells sind annehmbar hinsichtlich des Wertebereichs.	Verifikation und Validierung erfolgt strukturiert anhand definierter, quantitativer Bewertungskriterien. Simulationswerte des Modells sind nachvollziehbar hinsichtlich Wertebereich und zeitlichem Verlauf und sind mit Daten abgeglichen.	Verifikation und Validierung erfolgt durch struktu- rierte Plausibilitätsprüfungen und Sensitivitäts- analysen mittels definierter, quantitativer Bewer- tungskriterien und anschließendem Peer-Review. Simulationswerte des Modells sind annehmbar und nachvollziehbar hinsichtlich Wertebereich und zeitlichem Verlauf. Simulationsmodell durch adäquate Experimente validiert und kalibriert.
5 Versuche (7,5%)	5.1 Prozedur	Versuche werden ad- hoc und unstrukturiert durchgeführt. Die Auswertungen haben keine statistische Basis.	Versuche werden systematisch und strukturiert durchgeführt. Versuchs- planung erfolgt nach Plan. Versuchsauswertung erfolgt durch statistische Testverfahren.	Versuche werden systematisch und effizient unter Zuhilfenahme der statistischen Versuchsplanung ausgelegt. Versuchsdurchführung erfolgt nach Plan. Versuchsaus- wertung erfolgt durch statistische Testverfahren.	Versuche werden systematisch und effizient unter Zuhilfenahme der statistischen Versuchs- planung ausgelegt. Versuchsdurchführung erfolgt nach Plan. Versuchsauswertung erfolgt durch statistische Testverfahren. Versuchsergebnisse werden visuell aufbereitet, dokumentiert und allen Teilnehmern bereitgestellt.
	5.2 Daten- unsicherheit	Unsicherheiten in der Datenerhebung nicht berücksichtigt.	Datenunsicherheiten aufgrund von Streuungen (Fertigungs- und Messprozess) sind ermittelt.	Datenunsicherheiten aufgrund von Streuungen (Fertigungs- und Messprozess) sind ermittelt und in der Datenauswertung berücksichtigt. Anzahl der gemessenen Daten sub-optimal.	Datenunsicherheiten aufgrund von Streuungen (Fertigungs- und Messprozess) sind in regelmäßigen Zeitabständen ermittelt und in der Datenverarbeitung sowie -auswertung differenziert berücksichtigt. Anzahl der gemessenen Daten statistisch optimal.

Tabelle-Anhang E: Reifegrad-Kennwert-Matrix für neue Umformprozesse (Fortsetzung)

		Reifegradstufen			
Indikator	Sub-Indikator	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
		[0% - 15%]	[15% - 50%]	[50% - 85%]	[85% - 100%]
6 U-W-Beziehungen und WW (17,5%)	6.1 Ident. der Wirkbezgh.	Kenntnisse über U-W-Beziehungen und WW sind kaum vorhanden oder liegen unstrukturiert vor.	Bekannte und vermutete U-W-Beziehungen und WW innerhalb eines Systemelements sind (z. B. in einer U-W-Matrix) dokumentiert.	Identifizierte und bekannte U-W-Beziehungen und WW sind simulativ und auch zwischen Systemelementen identifiziert und dokumentiert.	Identifizierte und bekannte U-W-Beziehungen und WW sind experimentell validiert. Mehrstufige Wirkzusammenhänge innerhalb von Prozessketten berücksichtigt. Dokumentation liegt vor.
	6.2 Charakt. d. Wirkbezgh.	Einzelne U-W-Beziehungen (ohne WW) basieren auf Vermutungen und sind untereinander klassifiziert.	Signifikante Korrelationen einzelner U-W-Beziehungen (ohne WW) sind bestimmt und in visuell aufgearbeiteter Form dokumentiert.	Das Regressionsmodell signifikanter U-W-Beziehungen und WW ist aufgestellt und experimentell validiert.	Auf Basis des Regressionsmodells signifikanter U-W-Beziehungen und WW sind analytische Gleichungen zu den Wirkbeziehungen aufgestellt.
7 Evaluierung und Validierung (12,5%)	7.1 Bewertungskriterien	Die Entscheidung (Auswahl) basieren auf subjektiven Einschätzungen.	Evaluierung basiert auf definierten, multidimensionalen Kenngrößen. Die Entscheidung erfolgt strukturiert und qualitativ.	Evaluierung basiert auf quantitativen, multidimensionalen, nachvollziehbaren Kenngrößen. Die Entscheidung erfolgt strukturiert und quantitativ in einem Peer-Review. Die Evaluierungsergebnisse sind nachvollziehbar und wiederholbar.	Evaluierung basiert auf definierten, quantitativen, multidimensionalen Kenngrößen/Kriterien hinsichtlich Systemleistung und Systemtechnologie. Die Evaluierungsergebnisse sind valide ermittelt und statistische Abweichungen sind berücksichtigt. Die Evaluierungsergebnisse sind nachvollziehbar und wiederholbar. Entscheidungen erfolgt strukturiert und quantitativ im Peer-Review unter Zuhilfenahme von Risikobetrachtungen.
	7.2 Zuverlässigkeit u. Robustheit	Funktionserfüllung untersucht. Zielkonformität der Ergebnisse ausgelassen.	Funktionserfüllung gemäß den definierten Zielen über einen nicht bestimmten Zeitraum gegeben.	Funktionserfüllung gemäß den definierten Zielen über einen bestimmten Zeitraum bewiesen.	Funktionserfüllung gemäß den definierten Zielen über einen bestimmten und erweiterten Zeitraum bewiesen. Robustheit des Systems ist durch Minimierung der Störeinflussgrößen evaluiert und gegeben.
8 Optimierung (15%)	8.1 Zielwert-optimierung	Auswahl und Initiierung der Maßnahmen zur Zielwertoptimierung erfolgt nicht nachvollziehbar und unstrukturiert.	Signifikante Einflussgrößen des Prozesses auf die Zielgrößen ermittelt und im Systemmodell hinterlegt.	Die Zielwertoptimierung basiert auf Parametrierung und Auslegung signifikanter Einflussgrößen.	Zielwertoptimierung basiert auf systematischer Parametrierung und Auslegung signifikanter Einflussgrößen in Optimierungsplänen. Prozessfenster ist durch vorgenommene Mehrzieloptimierung erstellt. Einflüsse durch (signifikante) Störgrößen sind reduziert, überwacht oder geregelt.
	8.2 Wirksamkeit von Opt.	Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen wird nicht validiert.	Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen wird subjektiv beurteilt.	Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen wird quantitativ anhand definierter Kriterien überprüft.	Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen wird quantitativ anhand definierter Kriterien überprüft/validiert. Verbesselter Status ist reproduzierbar und wird in Fähigkeitsanalysen abgenommen, standardisiert und kommuniziert.

Tabelle-Anhang F: Reifegrad-Kennwert-Matrix für neue Umformprozesse (Fortsetzung)

		Reifegradstufen			
		Stufe 1 [0% - 15%]	Stufe 2 [15% - 50%]	Stufe 3 [50% - 85%]	Stufe 4 [85% - 100%]
9 Messsystem (5%)	Sub-Indikator	Das Messsystem ist nicht evaluiert oder letzte Analyse liegt weit zurück. Es wird sich lediglich auf Datenblätter des Herstellers gestützt.	Die Messsystemanalyse erfolgt vor Versuchen oder es liegen äquivalente Informationen vor. Messsystem ist hinsichtlich seiner Auflösung als passend befunden. Die Richtigkeit ist analysiert und korrigiert. Die Präzision des Messsystems ist ermittelt.	Die Messsystemanalyse erfolgt vor Versuchen oder es liegen äquivalente Informationen vor. Messsystem ist hinsichtlich seiner Auflösung bewertet und als passend befunden. Die Richtigkeit ist analysiert und korrigiert. Die Präzision bedingt durch Messsystem und Bedienerinfluss ist ermittelt und ggf. reduziert. Die Stabilität des Messsystems ist evaluiert und als stabil befunden.	Die Messsystemanalyse erfolgt vor Versuchen oder es liegen äquivalente Informationen vor. Messsystem ist hinsichtlich seiner Auflösung bewertet und als passend befunden. Die Richtigkeit ist analysiert und korrigiert. Die Präzision bedingt durch Messsystem und Bedienerinfluss ist ermittelt und ggf. reduziert. Das Messsystem ist als anforderungsgerecht eingestuft. Die Stabilität des Messsystems ist evaluiert und als stabil befunden. Systematische und kontinuierliche Kalibrierung in definierten Zeitabständen. Ergebnis der Messsystemanalyse in Entscheidungsfindungen berücksichtigt.
	9.1 Messsystemanalyse	Durchführung des Versuchs/der Messung von ungeschultem Personal.	Durchführung des Versuchs/der Messung von geschultem Personal mit geeignetem Messmittel.	Durchführung des Versuchs/der Messung von geschultem und erfahrenem Personal mit geeignetem Messmittel unter weitestgehend konstanten Umgebungsbedingungen.	Durchführung des Versuchs/der Messung von geschultem und erfahrenem Personal mit geeignetem Messmittel unter konstanten Umgebungsbedingungen nach eindeutig vorgegebenen Messmethoden.
	9.2 Messrammenbedingungen	Messprozess ist parallel zum Fertigungsprozess etabliert. Anzahl der geprüften Bauteile ist ungesteuert. Eine Prozessregelung ist nicht vorhanden.	Messprozess ist seriell im Fertigungsprozess integriert. Anzahl der geprüften Bauteile ist nicht zufriedenstellend. Eine Prozessregelung ist nicht vorhanden.	Messprozess ist seriell im Fertigungsprozess integriert. Anzahl der geprüften Bauteile ist statistisch abgesichert. Die Prozessregelung erfolgt manuell durch den Bediener.	Messprozess ist seriell im Fertigungsprozess integriert. Anzahl der geprüften Bauteile beläuft sich auf 100%. Die Prozessregelung erfolgt automatisch, ohne dass menschliches Eingreifen benötigt wird.
	9.3 Prozessintegration				

Tabelle-Anhang G: Reifegrad-Kennwert-Matrix für neue Umformprozesse (Fortsetzung)

Exemplarische Bewertung der spezifizierten Reifegradindikatoren

	A		B		C		D		E		F		G		H		I	
1	A1_1.1_PA	85%	B1_2.1_PA	80%	C1_1.2_PA	70%	D1_4.3_PA	90%	E1_4.1_PA	90%	F1_5.1_PA	80%	G1_3.3_UM	85%	H1_3.2_PA	85%	I1_8.1_PA	45%
	A1_1.1_UM	85%	B1_2.1_UM	80%	C1_1.2_UM	70%	D1_4.3_UM	90%	E1_4.1_UM	90%	F1_5.1_UM	80%	G1_3.3_WZ	85%	H1_3.2_UM	85%	I1_8.1_UM	45%
	A1_1.1_WZ	85%	B1_2.1_WZ	80%	C1_1.2_WZ	70%	D1_4.3_WZ	90%	E1_4.1_WZ	90%	F1_5.1_WZ	80%	G1_3.3_WS	85%	H1_3.2_WZ	85%	I1_8.1_WZ	45%
	A1_1.1_WS	85%		C1_1.2_WS	70%	D1_4.3_WS	90%	E1_4.1_WS	90%	F1_5.1_WS	80%	G1_3.3_TR	85%	H1_3.2_WS	85%	I1_8.1_WS	45%	
2	A2_1.2_PA	80%	B2_2.2_PA	75%	C2_4.1_PA	85%	D2_5.1_PA	90%	E2_5.1_PA	85%	F2_3.1_UM	90%	G2_1.2_PA	70%	H3_7.2_UM	60%	I2_5.1_PA	90%
	A2_1.2_UM	80%	B2_2.2_UM	75%	C2_4.1_UM	85%	D2_5.1_UM	90%	E2_5.1_UM	85%	F2_3.1_WZ	90%	G2_1.2_UM	70%	H3_7.2_WZ	60%	I2_5.1_UM	90%
	A2_1.2_WZ	80%	B2_2.2_WZ	75%	C2_4.1_WZ	85%	D2_5.1_WZ	90%	E2_5.1_WZ	85%	F2_7.1_UM	80%	G2_1.2_WZ	70%	H3_7.2_WS	60%	I2_5.1_WZ	90%
	A2_1.2_WS	80%		C2_4.1_WS	85%	D2_5.1_WS	90%	E2_5.1_WS	85%	F2_7.1_WZ	80%	G2_1.2_WS	70%	H3_7.2_TR	60%	I2_5.1_WS	90%	
3	A3_1.3_PA	90%	B3_3.1_PA	75%	C3_5.1_UM	85%	D3_3.2_PA	90%	E3_3.2_PA	90%	F3_7.1_TR	85%	G3_5.1_PA	95%	H2_6.1_PA	80%	I3_3.2_PA	90%
	A3_1.3_UM	90%	B3_3.1_UM	75%	C3_5.1_WZ	85%	D3_3.2_UM	90%	E3_3.2_UM	90%			G3_5.1_UM	95%	H2_6.1_UM	80%	I3_3.2_UM	90%
	A3_1.3_WZ	90%	B3_3.1_WZ	75%	C3_5.1_WS	85%	D3_3.2_WZ	90%	E3_3.2_WZ	90%			G3_5.1_WZ	95%	H2_6.1_WZ	80%	I3_3.2_WZ	90%
					C3_5.2_UM	85%	D3_3.2_WS	90%	E3_3.2_WS	90%			G3_5.1_WS	95%	H2_6.1_WS	80%	I3_3.2_WS	90%
				C3_5.2_WZ	85%													
				C3_5.2_WS	85%													
4	A4_1.4_PA	80%	B4_1.2_MT	80%	C4_4.2_PA	80%	D4_6.1_PA	90%	E4_6.1_PA	90%	F4_1.2_MT	75%			H4_4.2_PA	90%	I4_8.2_PA	40%
	A4_1.4_UM	80%		C4_4.2_UM	80%	D4_6.1_UM	90%	E4_6.1_UM	90%	F4_9.1_MT	85%			H4_4.2_UM	90%	I4_8.2_UM	40%	
	A4_1.4_WZ	80%		C4_4.2_WZ	80%	D4_6.1_WZ	90%	E4_6.1_WZ	90%	F4_9.2_MT	85%			H4_4.2_WZ	90%	I4_8.2_WZ	40%	
	A4_1.4_WS	80%		C4_4.2_WS	80%	D4_6.1_WS	90%	E4_6.1_WS	90%					H4_4.2_WS	90%	I4_8.2_WS	40%	
5			B5_9.1_MT	60%			D5_7.1_PA	90%	E5_3.1_WS	65%					H5_9.1_MT	90%		
			B5_9.2_MT	90%			D5_7.1_UM	90%							H5_9.2_MT	90%		
							D5_7.1_WZ	90%							H5_9.3_MT	90%		
							D5_7.1_WS	90%										

Tabelle-Anhang H: Bewertung der zugeordneten Indikatoren für neue Umformverfahren

Sub-Indikator	A	B	C	D	E	F	G	H	I	\bar{x}
1.1	A_1.1 (4)									85%
1.2	A_1.2 (4)	B_1.2 (1)	C_1.2 (4)			F_1.2 (1)	G_1.2 (5)			74%
1.3	A_1.3 (3)									90%
1.4	A_1.4 (4)									80%
2.1		B_2.1 (3)								80%
2.2		B_2.2 (3)								75%
3.1		B_3.1 (3)			E_3.1 (1)	F_3.1 (2)				78%
3.2				D_3.2 (4)	E_3.2 (4)			H_3.2 (5)	I_3.2 (5)	89%
3.3							G_3.3 (4)			85%
4.1			C_4.1 (4)		E_4.1 (4)					88%
4.2			C_4.2 (4)					H_4.2 (4)		85%
4.3				D_4.3 (4)				H_4.3 (4)		90%
5.1			C_5.1 (3)	D_5.1 (4)	E_5.1 (4)	F_5.1 (4)	G_5.1 (5)		I_5.1 (5)	88%
5.2			C_5.2 (3)			F_5.2 (4)				82%
6.1				D_6.1 (4)	E_6.1 (4)			H_6.1 (5)		86%
6.2				D_6.2 (4)	E_6.2 (4)			H_6.2 (5)		77%
7.1				D_7.1 (4)		F_7.1 (3)				86%
7.2								H_7.2 (4)		60%
8.1									I_8.1 (5)	45%
8.2									I_8.2 (5)	40%
9.1		B_9.1 (1)				F_9.1 (1)		H_9.1 (1)		78%
9.2		B_9.2 (1)				F_9.2 (1)		H_9.2 (1)		88%
9.3							G_9.3 (1)	H_9.3 (1)		75%

Tabelle-Anhang I: Subsumieren zu phasenspezifischen Werte

Perspektiven des Informationssystems für die bedarfsgerechte Reifegradmodellierung und -anwendung

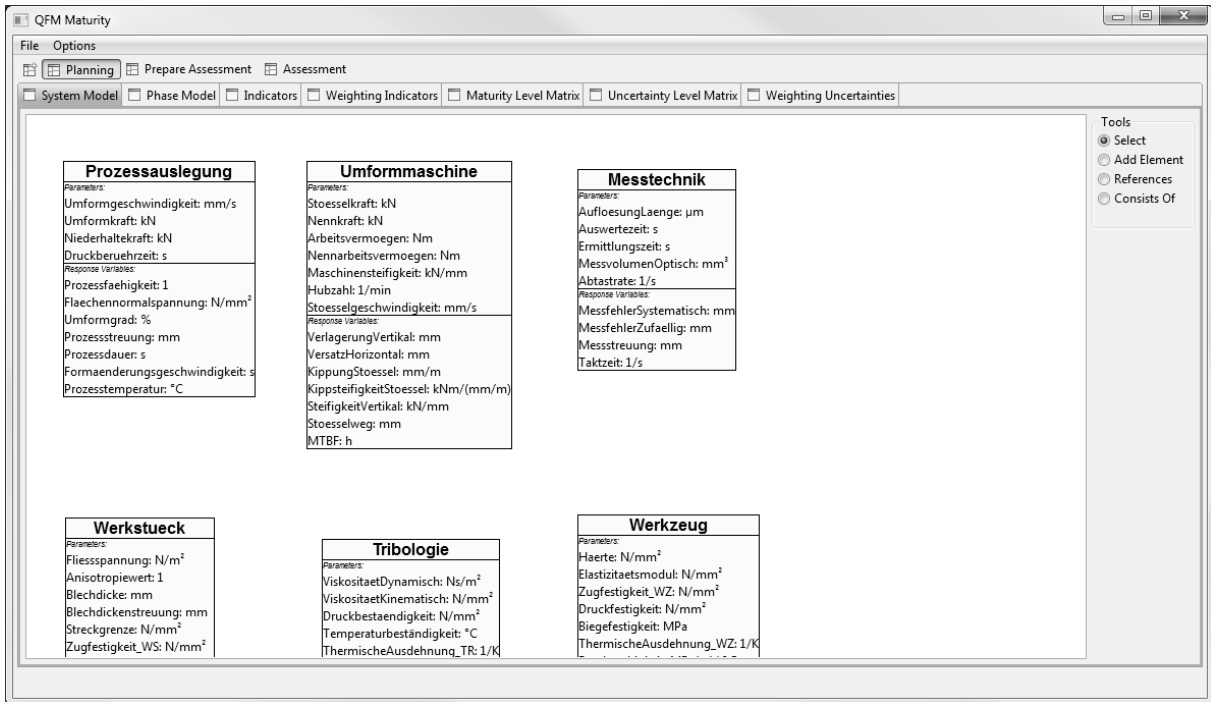


Bild-Anhang A: GUI zur Systemmodellierung

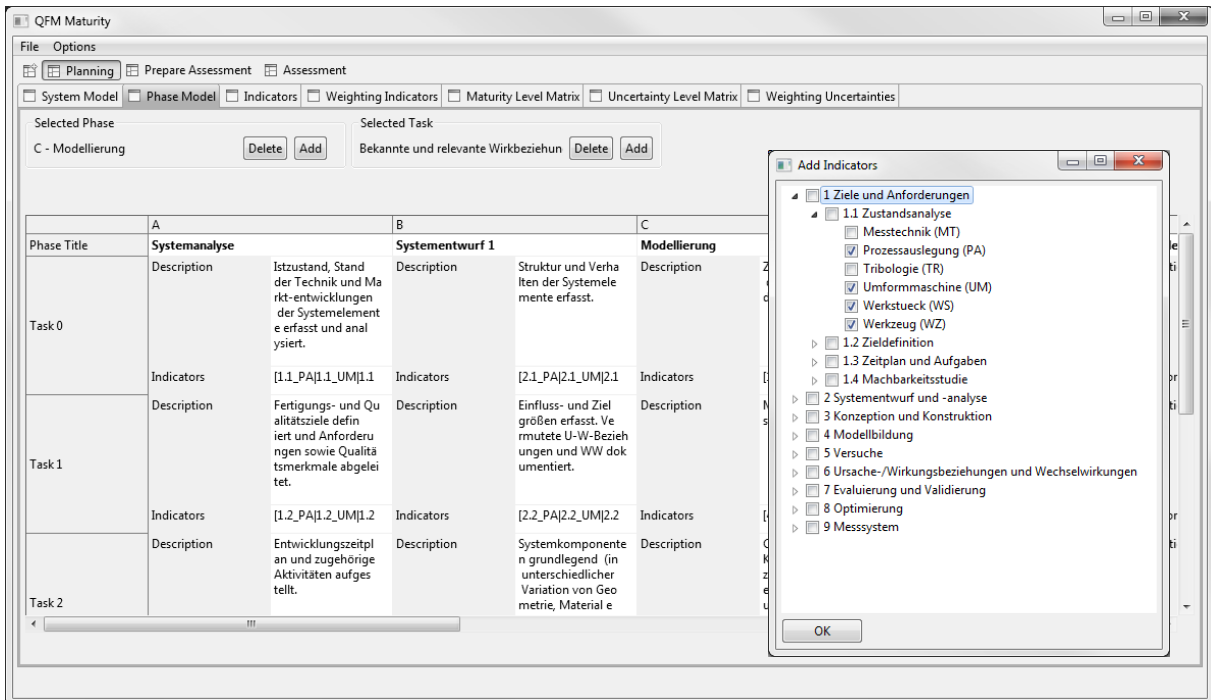


Bild-Anhang B: GUI zur Phasenmodellierung und Zuordnung der Indikatoren

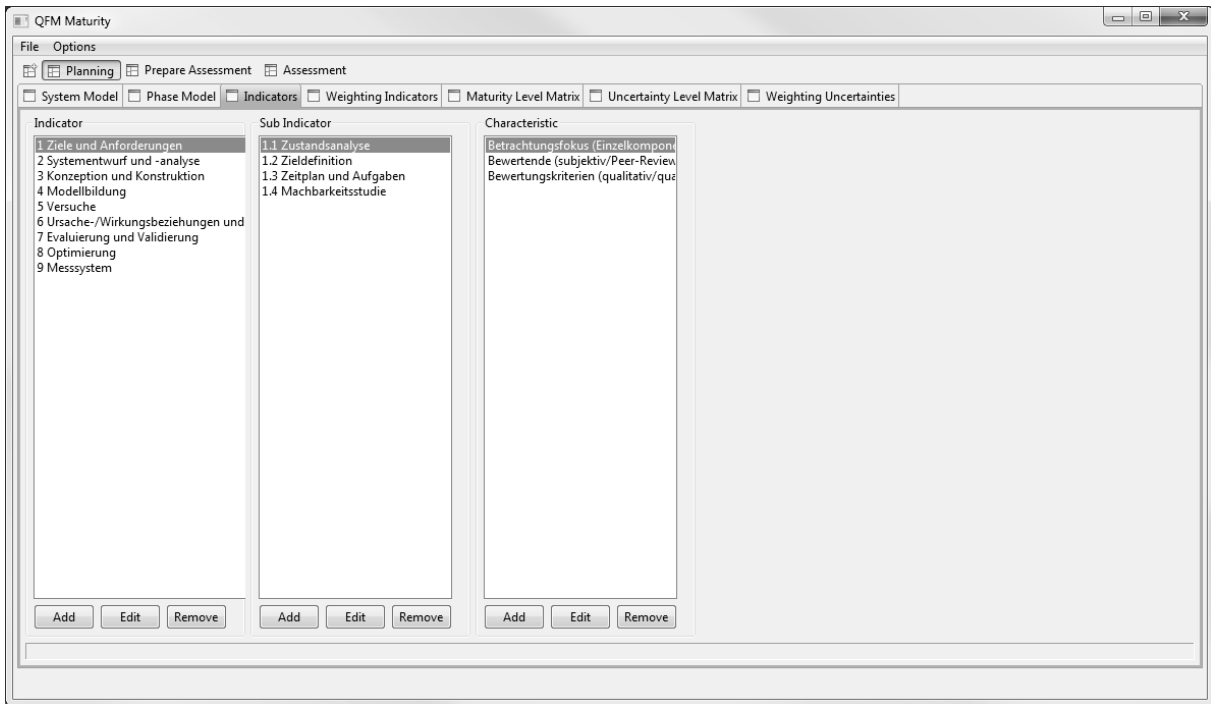


Bild-Anhang C: GUI zum Eruiieren der Indikatoren, Sub-Indikatoren und deren Merkmal

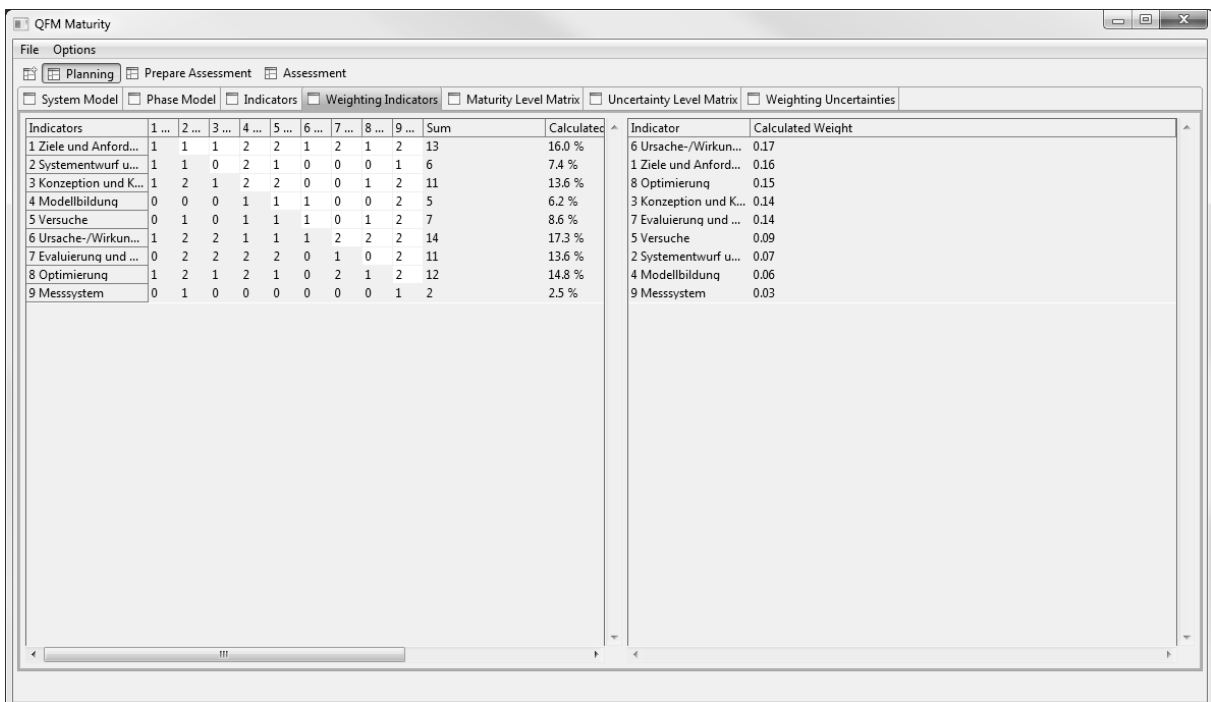


Bild-Anhang D: GUI zum paarweisen Vergleich der Indikatoren

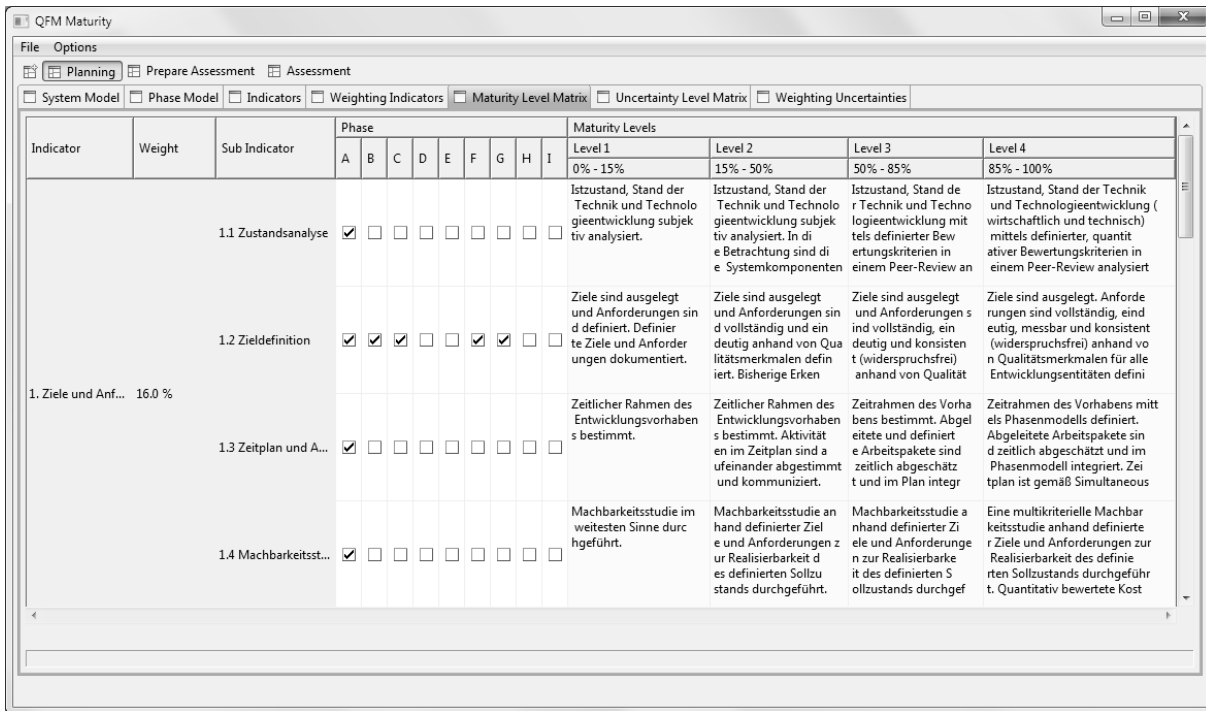


Bild-Anhang E: GUI für die Reifegrad-Kennwert-Matrix

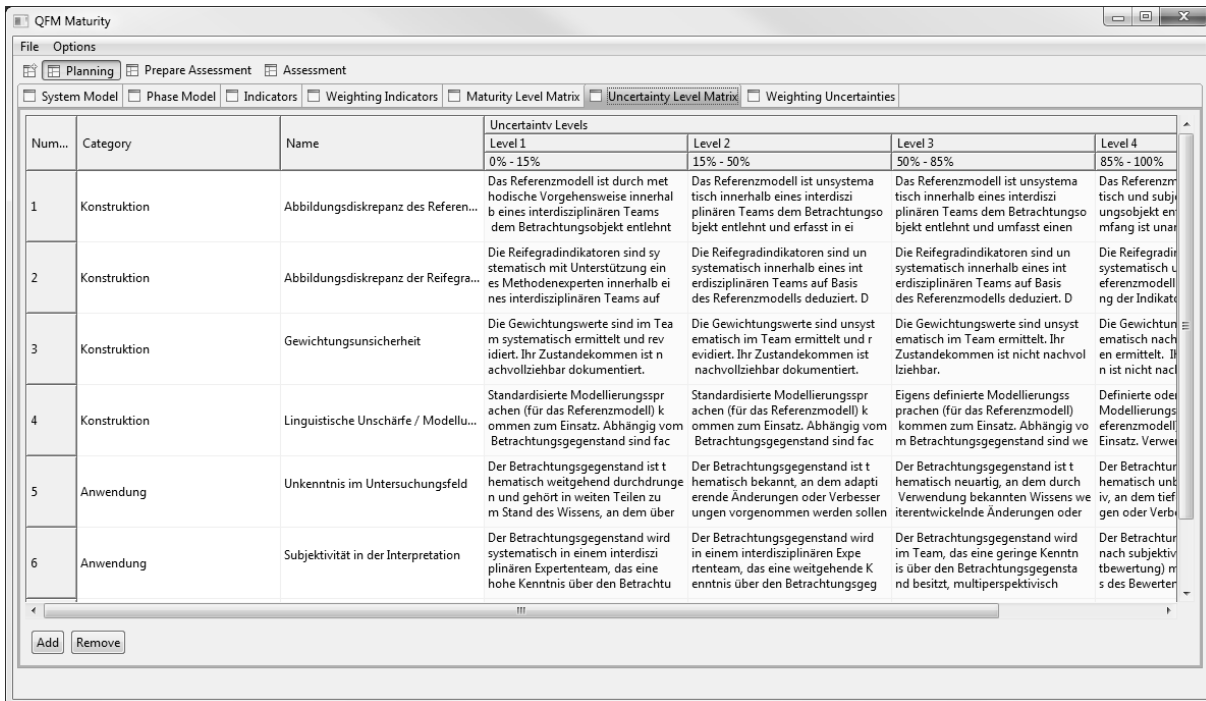


Bild-Anhang F: GUI für die Unsicherheit-Kennwert-Matrix

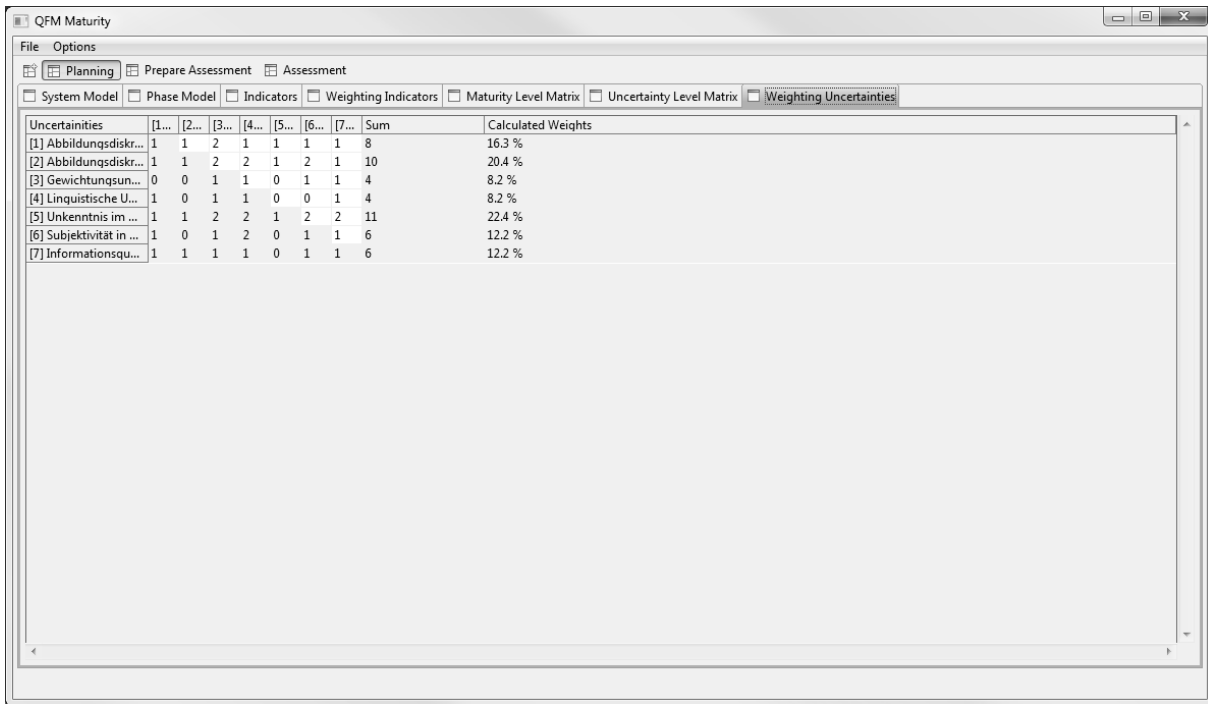


Bild-Anhang G: GUI zum paarweisen Vergleich der Unsicherheitsfaktoren

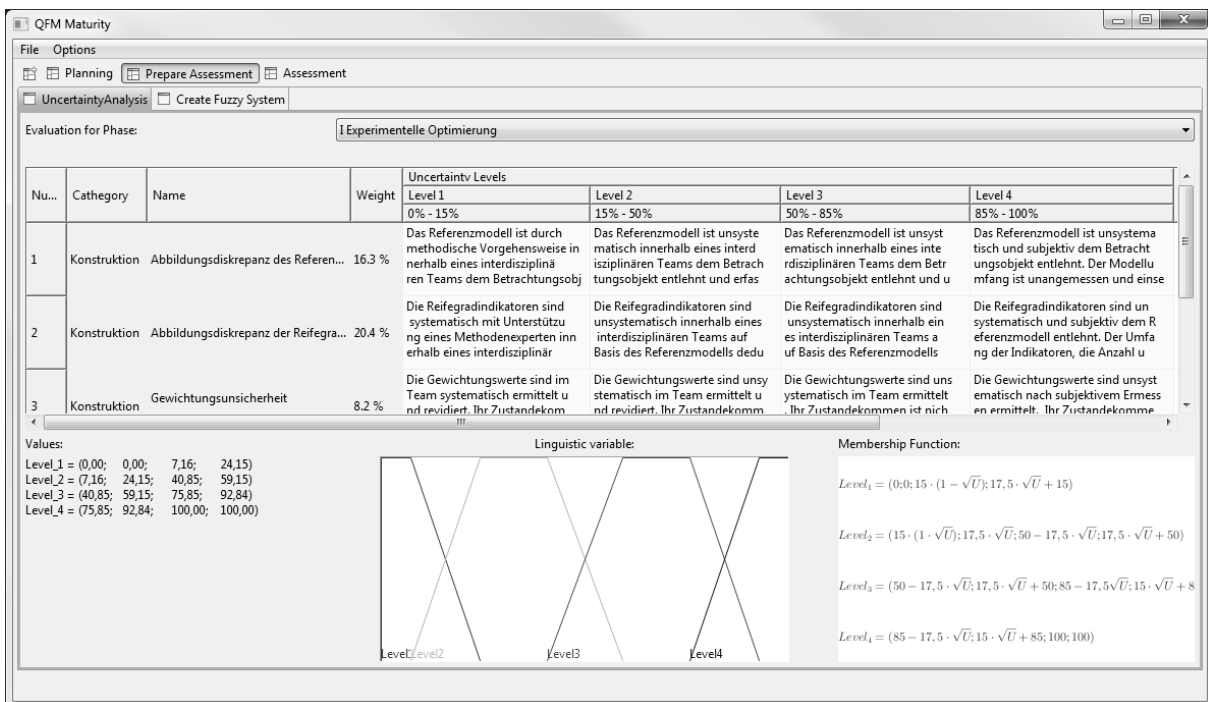


Bild-Anhang H: GUI zur phasenabhängigen Auslegung der linguistischen Eingangsvariablen

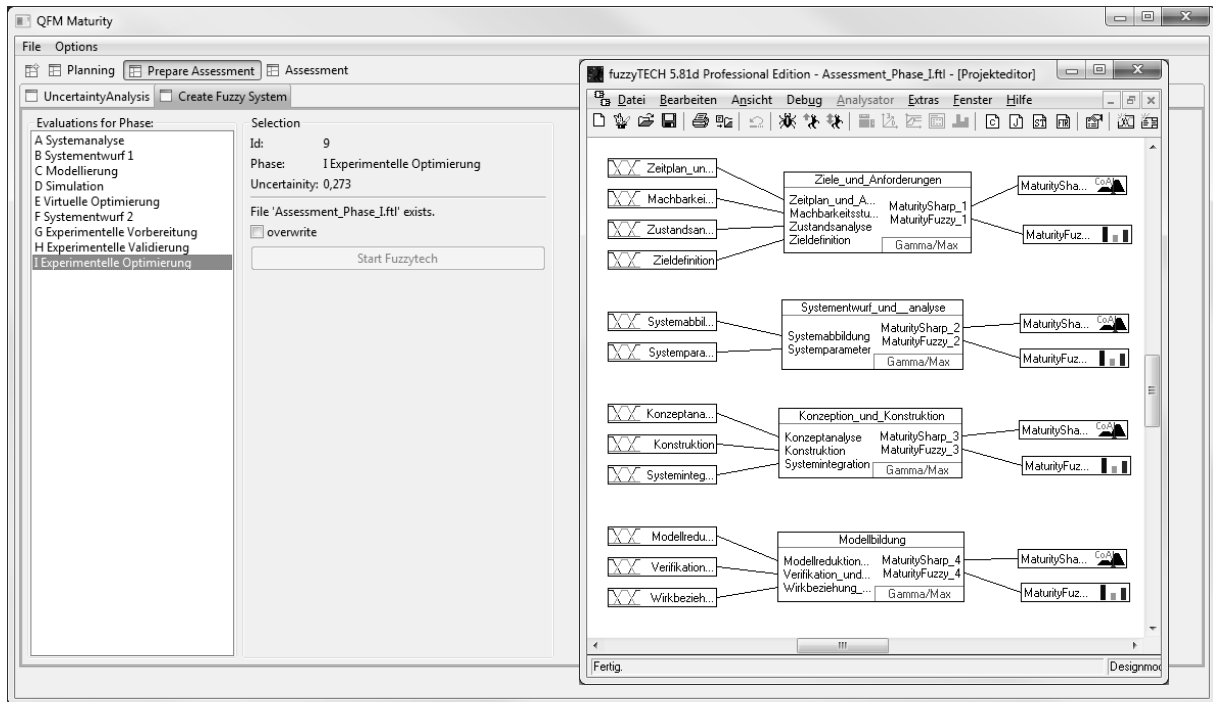


Bild-Anhang I: GUI zur Initiierung von fuzzyTECH

QFM Maturity - Assessment

Evaluation: A Systemanalyse

Maturity Levels	Level 2	Level 3	Level 4	Assessment
Level 1 0% - 15%	15% - 50%	50% - 85%	85% - 100%	
Istzustand, Stand der Technik und Technologieentwicklung subjektiv analysiert.	Istzustand, Stand der Technik und Technologieentwicklung subjektiv analysiert. In die Betrachtung sind die Systemkomponenten unabhängig voneinander, ohne deren Wechselwirkung erfasst.	Istzustand, Stand der Technik und Technologieentwicklung mittels definierter Bewertungskriterien in einem Peer-Review analysiert. Der Betrachtungsfokus erfasst alle technisch relevanten Systemkomponenten (inkl. Wechselwirkungen).	Istzustand, Stand der Technik und Technologieentwicklung (wirtschaftlich und technisch) mittels definierter, quantitativer Bewertungskriterien in einem Peer-Review analysiert. Der Betrachtungsfokus liegt systemübergreifend auch auf angrenzende...	<p>1.1_PA 85 %</p> <p>1.1_UM 85 %</p>

Evaluate

Bild-Anhang J: GUI zur Bewertung der Sub-Indikatoren

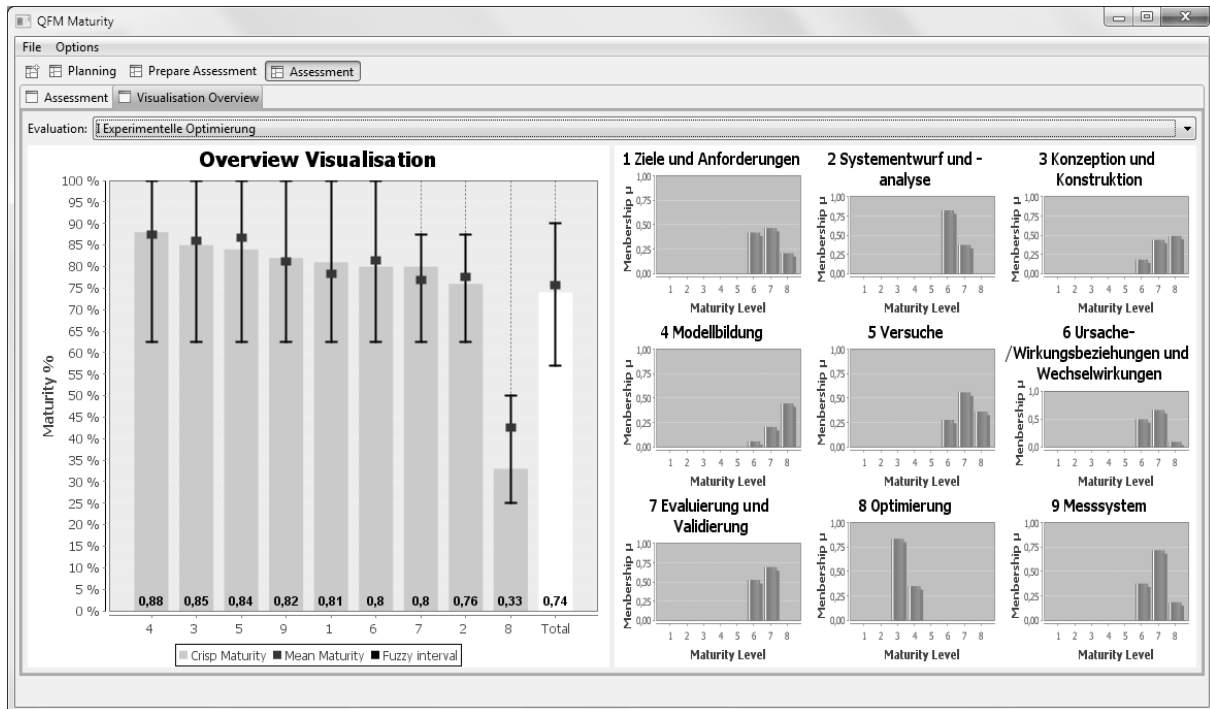


Bild-Anhang K: GUI zur Ausgabe und Visualisierung der phasenabhängigen Reifegradwerte