



Universität Augsburg  
Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl  
Kernkompetenzzentrum  
Finanz- & Informationsmanagement  
Lehrstuhl für BWL, Wirtschaftsinformatik,  
Informations- & Finanzmanagement

**UNIA**  
Universität  
Augsburg  
University

Diskussionspapier WI-298

## Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen - Eine Analyse ökonomischer Zusammenhänge

von

Maximilian Röglinger, Nora Kamprath

Februar 2012

in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 82 (2012), 5

## **Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen – Eine Analyse ökonomischer Zusammenhänge**

Maximilian Röglinger, Nora Kamprath

**Zusammenfassung:** Seit der Einführung des Capability Maturity Models durch das Software Engineering Institute im Jahr 1991 haben sich Reifegradmodelle in zahlreichen Anwendungsdomänen etabliert, um den Entwicklungsstand einer bestimmten Klasse von Objekten zu erheben und Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Da die Verbesserung von Prozessen eine Hauptaufgabe des Prozessmanagements ist und seit Jahren eine Spitzenposition auf CIO-Agendas einnimmt, florieren Reifegradmodelle auch dort. Es besteht jedoch Unklarheit darüber, welche Reifegrade für einzelne Prozesse bzw. Prozessgruppen anzustreben sind. Zahlreiche Unternehmen verfolgen eine Reifegraderhöhung oder gar eine Reifegradmaximierung. In manchen Reifegradmodell-Spezifikationen wird zwar davon abgeraten, jedoch fehlen konkrete Empfehlungen. Auch die Wissenschaft bleibt eine Antwort schuldig. Vor diesem Hintergrund wird ein auf den Erkenntnissen der Wertorientierten Unternehmensführung aufbauendes, mathematisches Optimierungsmodell vorgeschlagen, um allgemeine ökonomische Zusammenhänge der Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen zu analysieren. Der handlungsleitende Charakter dieser Erkenntnisse wird am Beispiel von „CMMI for Services“ illustriert. Abschließend werden die Ergebnisse kritisch reflektiert sowie Implikationen für Forschung und Praxis herausgearbeitet.

**Schlüsselwörter:** Kontinuierliche Prozessverbesserung, Optimierungsmodell, Prozessmanagement, Reifegradmodell, Wertorientierte Unternehmensführung

**JEL-Classifikation:** C60, L21, L80

**Danksagung:** Dieser Artikel wurde durch die DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) im Rahmen der Projekte „Modellierung, Selbstkomposition und Selbstkonfiguration von Referenzprozessen auf Basis semantischer Konzepte (SEMPRO<sup>2</sup>)“ (BU 809/7-2) und „Integrated Enterprise Balancing (IEB)“ (BU 809/8-1) gefördert. Wir danken für die Unterstützung. Die Autoren bedanken sich zudem bei Herrn Professor Dr. Armin Heinzl sowie bei den drei anonymen Gutachtern für die konstruktiven Kommentare.

Dr. Maximilian Röglinger (korrespondierender Autor)  
FIM Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement  
Universität Augsburg, Universitätsstraße 12, 86159 Augsburg  
[maximilian.roeglinger@wiwi.uni-augsburg.de](mailto:maximilian.roeglinger@wiwi.uni-augsburg.de)

Dr. Nora Kamprath  
FIM Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement  
Universität Augsburg, Universitätsstraße 12, 86159 Augsburg  
[nora.kamprath@wiwi.uni-augsburg.de](mailto:nora.kamprath@wiwi.uni-augsburg.de)

## 1 Motivation und Forschungsgegenstand

In Forschung und Praxis gilt die Verbesserung von Prozessen als Hauptaufgabe des Prozessmanagements (vgl. Capgemini 2006, Gartner 2010, Hammer 2010, McKinsey 2008, Schmelzer/Sesselmann 2008, vom Brocke et al. 2011, Wolf/Harmon 2010). Mit seiner Aussage „*If you don't know where you are, a map won't help*“ (Wagner/Dürr 2008, S. 11) empfiehlt Watts S. Humphrey, der geistige Vater des Capability Maturity Models (CMM), vor der Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen den aktuellen Entwicklungsstand bestehender Prozesse zu erheben. Diese Empfehlung greift heute jedoch zu kurz. Unternehmen sind immer häufiger in der Lage, den Entwicklungsstand ihrer Prozesse und mögliche Verbesserungsmaßnahmen zu ermitteln. Unklar hingegen bleibt, welche Maßnahmen umgesetzt werden sollen und gemäß welcher Zielsetzung derartige Entscheidungen zu treffen sind (Hammer 2007, S. 52). Obige Aussage sollte daher lauten: „*Even if you know where you are and have a map, if you don't know where to go, you'll be lost.*“

Neben der Erhebung des Entwicklungsstands und der Identifikation von Verbesserungspotenzial versuchen Reifegradmodelle, einen Beitrag zur Bestimmung des „*where to go*“ zu leisten, indem sie einen im Vorfeld festgelegten Entwicklungspfad von einem Anfangsstadium bis hin zur „vollkommenen Reife“ vorschlagen (vgl. Becker et al. 2009, Gottschalk 2009, Kazanjian/Drazin 1989, Mettler 2011). Seit der Einführung des CMM durch das Software Engineering Institute (SEI) im Jahr 1991 haben sie sich in zahlreichen Anwendungsdomänen durchgesetzt und stoßen in Wissenschaft wie Praxis auf zunehmendes Interesse (vgl. Becker et al. 2010, Hood/Wiebel 2009, Paulk et al. 1993, Scott 2007). Aufgrund der hohen Bedeutung der Prozessverbesserung florieren Reifegradmodelle auch im Prozessmanagement (vgl. Baur et al. 2005, de Bruin et al. 2005, Harmon 2009, Rosemann/vom Brocke 2010). Neben proprietären Lösungen wird der CMM-Nachfolger Capability Maturity Model Integration (CMMI), dessen Nutzen durch mehrere Studien belegt ist (vgl. Foegen et al. 2007), am häufigsten in der Praxis angewandt (BPM&O Architects 2010, S. 10).

Unabhängig vom eingesetzten Reifegradmodell wird in der Praxis in Übereinstimmung mit dem Ziel der Prozessverbesserung i. d. R. eine Reifegraderhöhung angestrebt. So ist es bspw. in der Rüstungs- und Automobilindustrie sowie im Offshoring-Bereich gelebte Praxis, dass Auftraggeber in ihren Ausschreibungen definierte Mindestreifegrade von den Prozessen künftiger Lieferanten sowie deren kontinuierliche Verbesserung erwarten (vgl. de Bruin et al. 2005, Hörmann et al. 2006, Kneuper 2005, Tat Sze/Müller 2009, Wagner/Dürr 2008). Um sich gegenüber der Konkurrenz zu behaupten, streben zahlreiche Unternehmen sogar nach der „vollkommenen Reife“ und somit nach einer Reifegradmaximierung (Tat Sze/Müller 2009, S. 21). Die ökonomische Sinnhaftigkeit von Reifegraderhöhungen wurde bislang jedoch kaum untersucht. Entscheidungen über umzusetzende Prozessverbesserungsmaßnahmen und Reifegraderhöhungen werden vorwiegend auf Basis qualitativer Kriterien oder Plausibilitätsüberlegungen getroffen (vgl. Schmelzer/Sesselmann 2008, vom Brocke et al. 2009). Eine Ausrichtung an marktwirtschaftlichen Unternehmenszielen wird zwar gefordert, jedoch kaum umgesetzt (vgl. Buhl et al. 2011, Greb/Kneuper 2010, Mertens 1996). Vereinzelt findet man in Reifegradmodell-Spezifikationen die Empfehlung, aus ökonomischen Gründen von einer Umsetzung aller vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen abzusehen (Software Engineering Institute 2009a, S. 25). Konkrete Empfehlungen, welche Reifegrade angestrebt werden sollen und gemäß welcher Zielfunktion dies zu entscheiden ist, bleiben jedoch aus. Auch die Wissenschaft bleibt eine Antwort schuldig. So entwickeln Huang und Han (2006) ein Entscheidungsmodell, wie Prozessgebiete aus CMMI zu priorisieren sind. Hinweise, welche Reifegrade für diese Prozessgebiete anzustreben sind, werden nicht gegeben. Auch Kamprath und Röglinger (2011) schlagen ein Entscheidungsmodell vor. Dieses beschränkt sich allerdings

auf die initiale Einführung CMMI-basierter Reifegradmodelle und analysiert keine allgemeinen ökonomischen Zusammenhänge. Greb und Kneuper (2010) fordern eine an den Unternehmenszielen ausgerichtete Nutzung von Reifegradmodellen, elaborieren dies jedoch nur qualitativ. Insbesondere diejenigen Unternehmen, die bereits ein Reifegradmodell im Rahmen der Prozessverbesserung nutzen, riskieren somit Fehlinvestitionen. Vor diesem Hintergrund versucht die vorliegende Arbeit, einen Beitrag zu einer ökonomisch sinnvollen Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen – also dem „*where to go*“ – zu leisten. Dies führt zu folgender Forschungsfrage: *Wie bestimmen sich aus ökonomischer Sicht die für Prozesse bzw. Prozessgruppen anzustrebenden Reifegrade?*

Zur Beantwortung dieser Frage sind die ökonomischen Zusammenhänge der Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen zu untersuchen. Hierfür ist die Kenntnis relevanter Einflussgrößen und Wirkungszusammenhänge erforderlich (vgl. Fiedler 1964, King/Kraemer 1984). Derzeit existieren jedoch nur fragmentarische Erkenntnisse und keine Erklärungsmodelle. Als Forschungsansätze eignen sich daher bspw. Längsschnittstudien oder ein formal-deduktives Vorgehen (Diekmann 2009, S. 318, Wilde/Hess 2007, S. 282). In Längsschnittstudien liegt der Schwerpunkt darauf, Hypothesen über Einflussgrößen und Wirkungszusammenhänge mithilfe von Daten, die über einen längeren Zeitraum erhoben wurden, empirisch zu prüfen. Ein formal-deduktives Vorgehen geht von einer Menge begründeter Annahmen aus, auf deren Basis Aussagen über Einflussgrößen und Wirkungszusammenhänge abgeleitet und einer mathematischen Analyse unterzogen werden. Im Fall der vorliegenden Forschungsfrage überwiegen aus Sicht der Autoren die Vorteile eines formal-deduktiven Vorgehens. Die mathematische Analyse erlaubt es, allgemeine Zusammenhänge der Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen abzuleiten, die bei Zugrundelegung einer quantitativen, betriebswirtschaftlich fundierten Zielfunktion zu optimalen und ökonomisch sinnvollen Entscheidungen führen. Zudem können Trade-Offs zwischen Einflussgrößen expliziert werden. Entsprechend schlagen wir ein mathematisches Optimierungsmodell vor, das auf den Erkenntnissen der Wertorientierten Unternehmensführung aufbaut. Dies ist sinnvoll, da sich die Wertorientierung als Paradigma der Unternehmensführung in der betriebswirtschaftlichen Forschung und Praxis grundsätzlich etabliert hat (Coenenberg/Salfeld 2007, S. 3, Schultze/Hirsch 2005, S. 1) sowie im Prozessmanagement verstärkt gefordert wird (vgl. Buhl et al. 2011, vom Brocke et al. 2009).

Der verbleibende Teil des Beitrags gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 wird der theoretische Hintergrund aufgearbeitet. In Abschnitt 3 werden die ökonomischen Zusammenhänge der Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen mithilfe eines Optimierungsmodells untersucht. In Abschnitt 4 erfolgt eine beispielhafte Anwendung, um den handlungsleitenden Charakter der allgemeinen Erkenntnisse zu illustrieren. Abschließend werden in Abschnitt 5 Implikationen vorgestellt, die Ergebnisse kritisch reflektiert und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

## **2 Theoretischer Hintergrund**

Zunächst werden die Grundlagen von Reifegradmodellen eingeführt sowie einschlägige Anwendungsdomänen und Forschungsschwerpunkte skizziert. Danach werden die Grundlagen der Wertorientierten Unternehmensführung als theoretischer Überbau des Beitrags kurz dargestellt.

## 2.1 Grundlagen von Reifegradmodellen

Reifegradmodelle umfassen üblicherweise eine Folge von Entwicklungsstufen, sog. Reifegrade. Dadurch beschreiben sie einen antizipierten, gewünschten oder typischen Entwicklungspfad für eine bestimmte Klasse von Objekten (z. B. Prozesse) in einer bestimmten Anwendungsdomäne beginnend in einem Anfangsstadium bis hin zur „vollkommenen Reife“ (vgl. Becker et al. 2009, Gottschalk 2009, Kazanjian/Drazin 1989, Mettler 2011). Ihnen liegt somit eine stufen- bzw. lebenszyklusorientierte Denkweise zugrunde, die von einem linearen und irreversiblen Durchlaufen einer im Vorfeld festgelegten Reihenfolge von Entwicklungsstufen ausgeht (van de Ven/Poole 1995, S. 514). Typische Nutzungszwecke von Reifegradmodellen sind die Erhebung des aktuellen Entwicklungsstands (deskriptiv), das Ableiten von Verbesserungsmaßnahmen (präskriptiv) und das Durchführen von Benchmarkings (komparativ) (vgl. de Bruin et al. 2005, Iversen et al. 1999). Reifegrade sind durch Merkmale und zugehörige Merkmalsausprägungen definiert (Becker et al. 2009, S. 249). Sie repräsentieren aktuelle oder anzustrebende Fähigkeiten bzgl. einer Klasse von Objekten im Sinne von „repeatable patterns of action“ (vgl. Rosemann/de Bruin 2005, Wade/Hulland 2004).

Reifegradmodelle entstammen dem Qualitätsmanagement und der Softwareentwicklung. Einer der prominentesten Vertreter ist das CMM. Seit seiner Entstehung wurden mehr als 150 Reifegradmodelle vorgeschlagen (vgl. de Bruin et al. 2005). Allein das SEI entwickelte eine Reihe von CMM-Spezialisierungen, die im Jahr 2000 zum CMMI für die Softwareentwicklung zusammengeführt wurden. Darauf aufbauend entstanden vier weitere Reifegradmodelle, nämlich CMMI for Services (CMMI-SVC), CMMI for Development (vgl. Software Engineering Institute 2006), CMMI for Acquisition (vgl. Software Engineering Institute 2007) und People CMM (vgl. Software Engineering Institute 2009b). Im Umfeld der Softwareentwicklung wurden auch für Teil- und Querschnittsaufgaben Reifegradmodelle entwickelt (vgl. Burnstein et al. 1996, Visconti/Cook 1993). Einige weitere Anwendungsdomänen sind Organisationsformen (vgl. Covey/Hixon 2005, Software Engineering Institute 2009a), Informationssystem-Architekturen (vgl. Stutz/Aier 2008), IT-Management (vgl. Becker et al. 2009, IT Governance Institute 2009, Renken 2004), Wissensmanagement (vgl. Kulkarni/Freeze 2004) oder Projektmanagement (vgl. Crawford 2006).

Im Rahmen des Prozessmanagements sind Prozessreifegradmodelle und Prozessmanagement-Reifegradmodelle zu unterscheiden (vgl. Rosemann/vom Brocke 2010). Prozessreifegradmodelle beziehen sich auf Prozesse im Allgemeinen oder auf bestimmte Prozessstypen (vgl. de Bruin/Rosemann 2007). Beispiele sind das Business Process Maturity Model der Object Management Group (vgl. Object Management Group 2007) oder die CMMI-Reifegradmodelle. Prozessmanagement-Reifegradmodelle hingegen beziehen sich auf die Prozessmanagement-Fähigkeiten eines Unternehmens (Rohloff 2009, S. 133). Beispiele sind das Business Process Management Maturity Model (vgl. Rosemann/de Bruin 2005), das Reifegradmodell von Schmelzer und Sesselmann (2008) oder das Reifegradmodell für die öffentliche Verwaltung von Zwicker et al. (2010). In diesem Beitrag werden Prozessreifegradmodelle betrachtet.

Neben der Entwicklung von Reifegradmodellen befasst sich die Forschung mit einschlägigen Klassifikationsschemata, Gestaltungsprinzipien und Vorgehensmodellen (vgl. Becker et al. 2009, de Bruin et al. 2005, Mettler et al. 2010, Pöppelbuß/Röglinger 2011, van Steenbergen et al. 2010). Seit der Entwicklung der ersten Reifegradmodelle nimmt die Forschung jedoch auch eine kritische Perspektive ein. Es werden Schwachstellen aufgedeckt und Erweiterungen vorgeschlagen (vgl. Greb/Kneuper 2010, Huang/Han 2006, Kamprath/Röglinger 2011, Mettler/Rohner 2009, Purvis et al. 1998, Vitharana/Mone 2008). Die zentralen Kritikpunkte wurden bereits für die Vorgänger heutiger Reifegradmodelle formuliert und sind im Kern nach

wie vor gültig. Bspw. liegen zur sog. „Stage Hypothesis“ (vgl. Nolan 1973), die das Durchlaufen einer im Vorfeld festgelegten Reihenfolge von Entwicklungsstufen beschreibt, widersprüchliche empirische Ergebnisse vor (vgl. Benbasat et al. 1984, Prananto et al. 2003). Zudem konzentrieren sich die meisten Reifegradmodelle im Sinne von evolutionistischen Modellen auf die Reihenfolge der zu durchlaufenden Entwicklungsstufen und den Zustand „vollkommener Reife“ anstatt im Sinne von evolutionären Modellen auf Einflussgrößen und Wirkungszusammenhänge (vgl. King/Kraemer 1984, van de Ven/Poole 1995). Eine weiterführende Auflistung von Schwachstellen findet sich bei Pöppelbuß und Röglinger (2011). Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der empirisch-quantitativen Analyse des Zusammenhangs zwischen der Nutzung von Reifegradmodellen und dem Unternehmenserfolg (vgl. Ashrafi 2003, Jiang et al. 2004, Mathiassen/Sorensen 1996, Mithas et al. 2011, Ramasubba et al. 2008, Raschke/Ingraham 2010). Eine detaillierte Aufarbeitung der Forschungsschwerpunkte findet sich bei Becker et al. (2010).

## *2.2 Grundlagen der Wertorientierten Unternehmensführung*

In der betriebswirtschaftlichen Forschung und Praxis hat sich die Wertorientierung als Paradigma der Unternehmensführung grundsätzlich durchgesetzt (Coenenberg/Salfeld 2007, S. 3, Schultze/Hirsch 2005, S. 1). Bereits im Jahr 1986 legte Rappaport (1986) die theoretischen Grundlagen, die von Stewart und Stern (1991) und Copeland et al. (1990) erweitert wurden. Die ersten Überlegungen zum Shareholder-Value-Ansatz, der gewissermaßen ein wertorientiertes Derivat von Riegers (1928) Rentabilitätsvorstellung darstellt, sind bereits in den 1920er Jahren in der deutschsprachigen Literatur zu finden.

Ziel der Wertorientierten Unternehmensführung als Konkretisierung und Weiterentwicklung des Shareholder-Value-Ansatzes ist die Maximierung bzw. Steigerung des langfristigen Unternehmenswerts auf Unternehmensebene (Coenenberg/Salfeld 2007, S. 3). Der Unternehmenswert wird dabei auf Basis von auf den Entscheidungszeitpunkt diskontierten zukünftigen Zahlungsüberschüssen ermittelt und nicht als stichtagsbezogener, den Schwankungen des Kapitalmarkts unterliegender Marktwert (vgl. Coenenberg/Schultze 2002, Rappaport 1986). Aufgrund seiner langfristigen Ausrichtung ist das Paradigma der Wertorientierten Unternehmensführung mit dem Stakeholder-Value-Ansatz kompatibel (vgl. Albach 2001, Danielson et al. 2008). Da aufgrund der Diskontierung die zeitlich verzögerte Zahlungswirksamkeit von nichtmonetären Kennzahlen und Frühindikatoren zumindest indirekt berücksichtigt wird, gilt die Kompatibilität auch für die multiperspektivische Unternehmenssteuerung wie z. B. von Kaplan und Norton (1996) gefordert (Gneiser 2010, S. 96).

Letztendlich kann man erst dann von Wertorientierter Unternehmensführung sprechen, wenn alle betrieblichen Aktivitäten auf das Ziel der langfristigen Unternehmenswertsteigerung ausgerichtet sind (vgl. Drukarczyk 1997, Macharzina/Neubürger 2002). Somit reicht eine Betrachtung des Unternehmenswerts nicht aus. Ein Unternehmen muss ebenso in der Lage sein, den Wertbeitrag einzelner Aktivitäten zu ermitteln. Dies gilt auch im Rahmen der Prozessverbesserung (vgl. Buhl et al. 2011, vom Brocke et al. 2009). Um im betriebswirtschaftlichen Sinn wertorientiert zu sein, müssen Zahlungsstromgrößen, das mit der gewählten Entscheidungsalternative einhergehende Risiko sowie der Zeitwert des Geldes berücksichtigt werden (Coenenberg et al. 2003, S. 3 f.). Entscheidungen, deren Zielfunktion diesen Anforderungen genügen, sind investitions- und entscheidungstheoretisch fundiert und stützen das Ziel der nachhaltigen Unternehmenswertsteigerung.

### 3 Ökonomische Zusammenhänge der Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen

Im Folgenden werden mithilfe eines mathematischen Optimierungsmodells allgemeine ökonomische Zusammenhänge der Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen analysiert. Die Grundidee besteht darin, Reifegraderhöhungen als Investitionsprojekte mit Ein- und Auszahlungswirkungen zu interpretieren. Zunächst werden zentrale Begriffe, Notationselemente und Annahmen eingeführt. Die Annahmen abstrahieren von der Realwelt und spiegeln bewusste Modellierungsentscheidungen der Autoren wider, um den Blick auf die ökonomischen Zusammenhänge zu schärfen. Sie werden durch bestehende Literatur gestützt und/oder argumentativ begründet. Anschließend wird das Optimierungsmodell formuliert und gelöst.

#### 3.1 Annahmen und definitorische Grundlagen

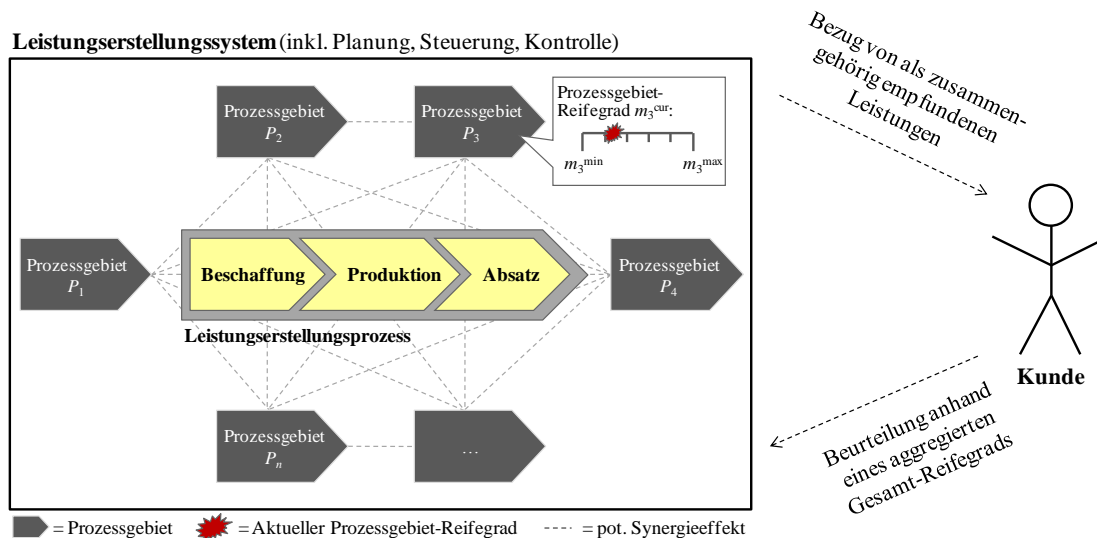
Betrachtet wird ein Unternehmen, das Leistungen am Markt anbietet. Leistungen sind Produkte, Dienstleistungen oder Produkt-Dienstleistungs-Bündel. Zur Ermittlung von Reifegraden und zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen greift das Unternehmen auf ein Prozessreifegradmodell zurück. Bei Prozessreifegradmodellen werden Reifegrade nicht den Leistungserstellungsprozessen, sondern den zugehörigen Planungs-, Steuerungs-, Kontroll- und Unterstützungsprozessen zugeordnet. Eine inhaltlich zusammengehörige Gruppe solcher Prozesse wird als Prozessgebiet bezeichnet. Beispiele sind „incident resolution and prevention“ und „service system development“ aus CMMI-SVC. Die implizite Annahme ist, dass durch eine Erhöhung der Prozessgebiet-Reifegrade – also durch die Implementierung der entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen – sowohl die Leistungserstellungsprozesse als auch die angebotenen Leistungen verbessert werden. Diejenigen Leistungserstellungsprozesse und Prozessgebiete, die aus Kundensicht als zusammengehörig empfundene Leistungen erstellen, werden als Leistungserstellungssystem bezeichnet (Abb. 1). Im Folgenden wird genau ein Leistungserstellungssystem betrachtet.

Meist wird davon ausgegangen, dass Reifegrade nur ganzzahlige Werte – bei CMMI z. B. 0 bis 5 (vgl. Software Engineering Institute 2009a) – annehmen können. Im Gegensatz dazu werden hier reellwertige Reifegrade verwendet, um eine stetige Optimierung zu ermöglichen. Da auch in der Praxis Reifegrade zwischen ganzzahligen Ausprägungen ausgewiesen werden (z. B. IT Governance Institute 2009, S. 21), stellt dieses Vorgehen keinen Widerspruch dar. Zudem ermöglicht eine stetige Optimierung feinere Analysen.

Entsprechend dem verwendeten Reifegradmodell setzt das Unternehmen bereits mehrere Prozessgebiete mit jeweils einem aktuellen Prozessgebiet-Reifegrad um (Abb. 1, links). Üblicherweise handelt es sich um eine Teilmenge der verfügbaren Prozessgebiete. Die Verwendung von Prozessgebiet-Reifegraden – wie im Folgenden der Fall – ist dann sinnvoll, wenn die im Prozessgebiet enthaltenen Einzelprozesse homogen umgesetzt werden, d. h. ihre Reife gering streut und der Prozessgebiet-Reifegrad eine sinnvoll verdichtende Größe im Sinne einer durchschnittlichen Reife darstellt. Andernfalls müsste die Optimierung auf der Aggregationsstufe von Einzelprozessen erfolgen, was jedoch kaum eine Reifegradmodell-Spezifikation unterstützt. Die Prozessgebiete des betrachteten Leistungserstellungssystems werden derart umgesetzt, dass eine Durchführung der enthaltenen Planungs-, Steuerungs-, Kontroll- und Unterstützungsprozesse gewährleistet ist.

Annahme A.1 Es werden  $n \in \mathbb{N}$  Prozessgebiete  $P_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) mit jeweils einem aktuellen Prozessgebiet-Reifegrad  $m_i^{\text{cur}} \in \mathbb{R}_0^+$  ( $m_i^{\text{min}} \leq m_i^{\text{cur}} \leq m_i^{\text{max}}$ ) umgesetzt. Dabei repräsentiert  $m_i^{\text{max}} \in \mathbb{R}^+$  den höchsten erreichbaren Prozessgebiet-Reifegrad;  $m_i^{\text{min}} \in \mathbb{R}_0^+$  ( $m_i^{\text{min}} < m_i^{\text{max}}$ ) ist der niedrigste Prozessgebiet-Reifegrad, bei dem eine Durchführung der in  $P_i$  enthaltenen Einzelprozesse gewährleistet ist.

Annahme A.2 Prozessgebiet-Reifegrade können um  $\Delta m_i$  ( $0 \leq \Delta m_i \leq m_i^{\text{max}} - m_i^{\text{cur}}$ ) erhöht werden. Im Sinne der Prozessverbesserung werden nur Reifegraderhöhungen betrachtet.



**Abb. 1** Zusammenhang zwischen Leistungserstellungsprozessen und Prozessgebieten (links), Interaktion zwischen Leistungserstellungssystem und Kunde (rechts)

Es wird davon ausgegangen, dass Kunden das Leistungserstellungssystem anhand ihres Gesamterlebnisses beurteilen (vgl. Heidemann et al. 2011). Bei Produkten umfasst das Gesamterlebnis vorwiegend die Qualität der Leistung, da Kunden normalerweise weder die internen Abläufe kennen noch wissen, welche Prozessgebiete umgesetzt wurden. Eine Ausnahme sind Industriekunden, die auch bei Produkten Einblick in die Leistungserstellungsprozesse und Qualitätssicherungssysteme haben können. Bei Dienstleistungen und Produkt-Dienstleistungsbündeln sind Kunden als externer Faktor in den Leistungserstellungsprozess sowie teilweise auch in dessen Planung, Steuerung und Kontrolle – d. h. in die Prozessgebiete selbst – eingebunden, weswegen dann auch deren Qualität in das Gesamterlebnis einfließen kann. Um dieses Gesamterlebnis aus Unternehmenssicht abzuschätzen, wird ein aggregierter Gesamt-Reifegrad verwendet (Abb. 1, rechts). Je Leistungserstellungssystem ist ein eigener Gesamt-Reifegrad auszuweisen und das Optimierungsmodell separat anzuwenden. Dabei sind Berührungspunkte z. B. in Form von mehrfach beteiligten Prozessgebieten oder unternehmensweiten Restriktionen zu berücksichtigen.

In der Literatur herrscht Uneinigkeit über die Ermittlung von Gesamt-Reifegraden. So unterscheiden CMMI und zahlreiche weitere Modelle zwischen Reife- und Fähigkeitsgraden, wobei erstere Gesamt-Reifegrade und letztere Prozessgebiet-Reifegrade gemäß der hier verwendeten Taxonomie darstellen (Software Engineering Institute 2009a, S. 19). Vereinfachend gilt bis Reifegrad 3: Um einen bestimmten Reifegrad ausweisen zu dürfen, müssen im Vorfeld festgelegte Prozessgebiete einen mindestens genauso hohen Fähigkeitsgrad aufweisen. Ab Reifegrad 4 gilt dies jedoch nicht mehr, sodass in der betrieblichen Praxis oftmals eine propri-



etäre Komplementierung und Konkretisierung erforderlich ist (z. B. Tat Sze/Müller 2009, S. 25). Hinzu kommt, dass Prozessgebiete je nach Unternehmen unterschiedlich wichtig für die Leistungserstellung (vgl. Huang/Han 2006) wie auch voneinander abhängig sein können (Software Engineering Institute 2009a, S. 35). So entstehen Synergieeffekte bei der Erhöhung von Prozessgebiet-Reifegraden, die sich in einer aus Kundensicht wahrnehmbaren Verbesserung des Gesamterlebnisses niederschlagen. Es gilt daher, bei der Konkretisierung des Gesamt-Reifegrads nicht nur Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen, sondern auch Synergieeffekte zu berücksichtigen. Der Gesamt-Reifegrad dient hier lediglich als Hilfsgröße zur Quantifizierung der ökonomischen Auswirkungen. Er liegt weder in einem Reifegradmodell-typischen Wertebereich noch eignet er sich zur Kommunikation mit externen Anspruchsgruppen.

Annahme A.3 Die Prozessgebiete  $P_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) sind unterschiedlich wichtig für die Leistungserstellung. Zudem bestehen zwischen manchen Prozessgebieten  $P_i$  und  $P_j$  ( $1 \leq i, j \leq n$  und  $i \neq j$ ) paarweise symmetrische Synergieeffekte. Beides findet sich in der  $n \times n$ -Matrix  $S$  wieder. Die  $s_{ij} \in \mathbb{R}_0^+$  stellen die Stärke des Synergieeffekts zwischen  $P_i$  und  $P_j$ , die  $s_{ii} \in \mathbb{R}^+$  die relative Bedeutung der Prozessgebiete dar.

Annahme A.4 Der aktuelle Gesamt-Reifegrad ist  $m^{\text{cur}} \in \mathbb{R}_0^+$  ( $m^{\text{cur}} \geq m^{\text{min}}$ ), wobei  $m^{\text{min}}$  den niedrigsten Gesamt-Reifegrad repräsentiert. Für die Erhöhung des Gesamt-Reifegrads  $\Delta m \in \mathbb{R}_0^+$  gilt  $\Delta m = f(\overline{\Delta m})$  mit  $\overline{\Delta m} = (\Delta m_1, \dots, \Delta m_n)^T$  und

$$f(\overline{\Delta m}) = \sum_{i=1}^n \Delta m_i \cdot s_{ii} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^{i,j=n} (\Delta m_i + \Delta m_j) \cdot s_{ij} \quad (1)$$

Gleichung (1) lässt sich wie folgt begründen: Der erste Summand steht für die direkten Auswirkungen aufgrund erhöhter Prozessgebiet-Reifegrade. Die additive Verknüpfung der gewichteten Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen ist gerechtfertigt, da die Prozessgebiete hier als unabhängig voneinander betrachtet werden können. Realweltlich interpretiert geben die  $s_{ii}$  an, um wie viele Einheiten sich der Gesamt-Reifegrad erhöht, wenn der Reifegrad des Prozessgebiets  $P_i$  um 1 erhöht wird. Der zweite Summand steht für die Auswirkungen aufgrund von Synergieeffekten. Die  $s_{ij}$  geben an, wie stark sich der Gesamt-Reifegrad zusätzlich erhöht, wenn die Prozessgebiet-Reifegrade von  $P_i$  und  $P_j$  in Summe um 1 erhöht werden. Durch die additive Verknüpfung von  $\Delta m_i$  und  $\Delta m_j$  sind die Synergieeffekte additiv separierbar. Sie werden auch dann berücksichtigt, wenn ausschließlich einer der beteiligten Prozessgebiet-Reifegrade erhöht wird. Dies ist sinnvoll, da gemäß (A.1) alle Prozessgebiete initial mindestens rudimentär umgesetzt werden und gemäß (A.2) nur Reifegraderhöhungen betrachtet werden. Zudem werden Synergieeffekte umso mehr berücksichtigt, je stärker die Prozessgebiet-Reifegrade erhöht werden. Aufgrund der Symmetrie gemäß (A.3) ist es für das Auftreten von Synergieeffekten unerheblich, welcher der beiden Prozessgebiet-Reifegrade erhöht wird. Dies wird ebenfalls durch die additive Verknüpfung abgebildet. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die Stärke der Synergieeffekte proportional zur kumulierten Verbesserung der beteiligten Prozessgebiet-Reifegrade ist. Durch die Summierung über die rechte obere Hälfte der Synergieeffekt-Matrix exklusive der Hauptdiagonalen fließen alle paarweisen Synergieeffekte ein.

Um die ökonomischen Zusammenhänge der Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen in Einklang mit dem Paradigma der Wertorientierten Unternehmensführung zu analysieren,

werden die erwarteten, risikoadjustierten Ein- und Auszahlungsbarwerte untersucht, die mit der Reifegraderhöhung einhergehen. Der Diskontierung im Rahmen der Barwertbildung wird ein risikoadjustierter Kalkulationszinssatz zugrunde gelegt (Steiner/Bruns 2007, S. 250). Im Folgenden werden Investitionsauszahlungen und – im Sinne einer Differenzinvestitionsbetrachtung (Perridon et al. 2009, S. 59-63) – zusätzliche Zahlungsüberschüsse aus dem laufenden Geschäft unterschieden.

Investitionsauszahlungen fallen für die Implementierung von Verbesserungsmaßnahmen an. Da sich die Investitionsauszahlungen nach Prozessgebiet unterscheiden können, sind Prozessgebiet-spezifische Auszahlungsfunktionen erforderlich. Dabei lässt sich eine stärkere Reifegraderhöhung nur durch Implementierung komplexerer oder mehrerer Verbesserungsmaßnahmen realisieren, was zu höheren Investitionsauszahlungen führt. Es ist davon auszugehen, dass die Implementierungskomplexität bei stärkerer Reifegraderhöhung überproportional zunimmt. Dies wird zum einen durch Erkenntnisse der Kostenrechnung gestützt, wonach „bei der Herstellung von komplexen Produktvarianten [...] ein deutlich höherer Bedarf an gemeinkostenverursachenden Aktivitäten [...] besteht“ (Fandel et al. 2007, S. 414). Zum anderen finden sich solche Verläufe auch in empirisch ermittelten Aufwandschätzmodellen aus dem Software Engineering (vgl. Boehm et al. 2000). Gründe im vorliegenden Zusammenhang sind der erhöhte Abstimmungsbedarf innerhalb bzw. zwischen Projektteams sowie die aufwändigere Integration mit bereits umgesetzten Verbesserungsmaßnahmen. Es gilt: Je höher der aktuelle Prozessgebiet-Reifegrad, desto höhere Investitionsauszahlungen verursacht eine betragsmäßig identische Reifegraderhöhung. Vereinfachend sind die Prozessgebiet-spezifischen Investitionsauszahlungen im gesamten Definitionsbereich also durch einen streng monoton steigenden und streng konvexen Verlauf charakterisiert.

Annahme A.5 Die erwarteten, risikoadjustierten Investitionsauszahlungsbarwerte (im Folgenden: Investitionsauszahlungen) für Reifegraderhöhungen  $\Delta m_i$  im Prozessgebiet  $P_i$  sind durch eine streng monoton steigende, streng konvexe und zweimal stetig differenzierbare Funktion  $O_{i|m_i^{\min}}^{\text{invest}}(\Delta m_i) \in IR_0^+$  charakterisiert. Es gilt:  $O_{i|m_i^{\min}}^{\text{invest}}(0) = 0$ .

Dabei gibt  $O_{i|m_i^{\min}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)$  an, welche Investitionsauszahlungen im Prozessgebiet  $P_i$  für eine Reifegraderhöhung ausgehend von  $m_i^{\min}$  anfallen. Gleichung (2) zeigt die Investitionsauszahlungen ausgehend von einem beliebigen aktuellen Prozessgebiet-Reifegrad. Anschaulich entspricht die dargestellte Transformation einer Verschiebung des Koordinatensystemursprungs auf die Ordinaten- und Abszissenwerte des aktuellen Prozessgebiet-Reifegrads.

$$O_{i|m_i^{\text{cur}}}^{\text{invest}}(\Delta m_i) = O_{i|m_i^{\min}}^{\text{invest}}(m_i^{\text{cur}} - m_i^{\min} + \Delta m_i) - O_{i|m_i^{\min}}^{\text{invest}}(m_i^{\text{cur}} - m_i^{\min}) \quad (2)$$

In Abhängigkeit von der Erhöhung einzelner Prozessgebiet-Reifegrade bzw. der daraus resultierenden Erhöhung des Gesamt-Reifegrads erzielt das Unternehmen zusätzliche Zahlungsüberschüsse aus dem laufenden Geschäft. Diese ergeben sich aus zusätzlichen laufenden Ein- und Auszahlungen.

Zusätzliche laufende Auszahlungen fallen für die Durchführung von Planungs-, Steuerungs-, Kontroll- und Unterstützungsprozessen an. Je mehr Verbesserungsmaßnahmen implementiert werden sollen – also je höher die angestrebte Prozessgebiet-Reifegraderhöhung ist –, desto höher sind die zusätzlichen laufenden Auszahlungen. Daraus resultiert ein streng monoton steigender Verlauf. Aufgrund des laufenden Abstimmungsaufwands mit bereits implementier-

ten Verbesserungsmaßnahmen sowie der Schwierigkeit, einen höheren Prozessgebiet-Reifegrad über die Zeit hinweg aufrechtzuerhalten, kann der Verlauf wie oben zudem als streng konvex charakterisiert werden. Da sich die zusätzlichen laufenden Auszahlungen einzelnen Prozessgebieten zuordnen lassen und nach Prozessgebiet unterscheiden können, sind erneut Prozessgebiet-spezifische Auszahlungsfunktionen erforderlich.

Zusätzliche laufende Einzahlungen resultieren u. a. aus der Zahlungsbereitschaft der Kunden für ein besseres Gesamterlebnis – also für einen höheren Gesamt-Reifegrad. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Kunden für höherwertige Leistungen und/oder reibungslosere Leistungserstellungsprozesse mehr zu zahlen bereit sind. Analog zu den Auszahlungen ergibt sich somit ein streng monoton steigender Verlauf. Jedoch ist gestützt durch das erste Gossen'sche Gesetz von einem abnehmenden Grenznutzen bzw. einem Sättigungseffekt auszugehen, der sich in einem streng konkaven Verlauf niederschlägt (vgl. Gossen 1854, Varian 2007). Durch Verbesserungen hinsichtlich Planung, Steuerung und Kontrolle lassen sich auch Einsparungen im Rahmen der Leistungserstellung realisieren. In der Praxis wird dies unter dem Begriff „Kosteneffizienz“ diskutiert (Tat Sze/Müller 2009, S. 21). Beispiele sind die Reduktion von Nacharbeiten und Ausschuss sowie geringere Schwankungen der Leistungsqualität bzw. Durchlaufzeit. Einsparungen werden hier nicht explizit betrachtet, sondern u. a. wegen fehlender Zuordenbarkeit zu Prozessgebieten vereinfachend den zusätzlichen laufenden Einzahlungen zugeschlagen.

**Annahme A.6** Die zusätzlichen erwarteten, risikoadjustierten Auszahlungsbarwerte aus dem laufenden Geschäft (im Folgenden: zusätzliche laufende Auszahlungen) aufgrund von Reifegraderhöhungen  $\Delta m_i$  im Prozessgebiet  $P_i$  sind durch eine streng monoton steigende, streng konvexe und zweimal stetig differenzierbare Funktion  $O_{i|m_i^{\min}}^{\text{op}}(\Delta m_i) \in IR_0^+$  charakterisiert. Es gilt:  $O_{i|m_i^{\min}}^{\text{op}}(0) = 0$ . Die zusätzlichen erwarteten, risikoadjustierten Einzahlungsbarwerte (im Folgenden: zusätzliche laufende Einzahlungen) aufgrund der Erhöhung des Gesamt-Reifegrads  $\Delta m = f(\overrightarrow{\Delta m})$  sind durch eine streng monoton steigende, streng konkave und zweimal stetig differenzierbare Funktion  $I_{m^{\min}}^{\text{op}}(f(\overrightarrow{\Delta m})) \in IR_0^+$  charakterisiert. Es gilt:  $I_{m^{\min}}^{\text{op}}(0) = 0$ . Die Differenz zwischen den zusätzlichen laufenden Ein- und Auszahlungen wird als zusätzliche laufende Zahlungsüberschüsse  $CF^{\text{op}}(\overrightarrow{\Delta m}) \in IR$  bezeichnet.

Wie oben ergeben sich die zusätzlichen laufenden Ein- bzw. Auszahlungen für eine Reifegraderhöhung ausgehend von einem beliebigen aktuellen Prozessgebiet- bzw. Gesamt-Reifegrad wie folgt:

$$O_{i|m_i^{\text{cur}}}^{\text{op}}(\Delta m_i) = O_{i|m_i^{\min}}^{\text{op}}(m_i^{\text{cur}} - m_i^{\min} + \Delta m_i) - O_{i|m_i^{\min}}^{\text{op}}(m_i^{\text{cur}} - m_i^{\min}) \quad (3)$$

$$I_{m^{\text{cur}}}^{\text{op}}(f(\overrightarrow{\Delta m})) = I_{m^{\min}}^{\text{op}}(m^{\text{cur}} - m^{\min} + f(\overrightarrow{\Delta m})) - I_{m^{\min}}^{\text{op}}(m^{\text{cur}} - m^{\min}) \quad (4)$$

Für die zusätzlichen laufenden Zahlungsüberschüsse gilt dann:

$$CF^{\text{op}}(\overrightarrow{\Delta m}) = I_{m^{\text{cur}}}^{\text{op}}(f(\overrightarrow{\Delta m})) - \sum_{i=1}^n O_{i|m_i^{\text{cur}}}^{\text{op}}(\Delta m_i) \quad (5)$$

Zuletzt stellt sich die Frage, gemäß welchem Ziel die optimalen Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen zu bestimmen sind.

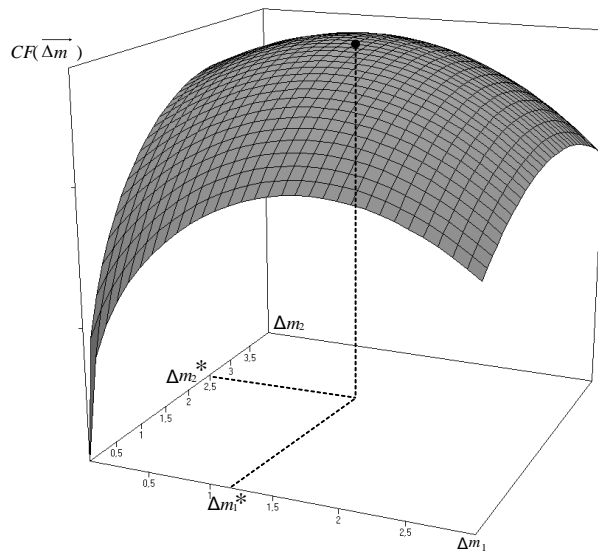
Annahme A.7 Im Einklang mit dem Paradigma der Wertorientierten Unternehmensführung strebt das Unternehmen nach einer Maximierung der gesamten zusätzlichen erwarteten, risikoadjustierten Zahlungsüberschussbarwerte  $CF(\overline{\Delta m}) \in IR$  (im Folgenden: gesamte zusätzliche Zahlungsüberschüsse). Diese ergeben sich als Differenz der zusätzlichen laufenden Zahlungsüberschüsse und der Investitionsauszahlungen.

### 3.2 Formulierung und Lösung des Optimierungsmodells

Anhand der Annahmen (A.1) bis (A.7) lassen sich die optimalen Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen  $\overline{\Delta m}^*$  durch Maximierung der gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse ermitteln. Dies entspricht folgender Zielfunktion:

$$MAX: CF(\overline{\Delta m}) = CF^{op}(\overline{\Delta m}) - \sum_{i=1}^n O_{i|m_i}^{invest}(\Delta m_i) \quad (6)$$

Abb. 2 vermittelt ein intuitives Verständnis der gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse für zwei Prozessgebiete.



**Abb. 2** Beispielhafter Verlauf der gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse für zwei Prozessgebiete

Ersetzt man die zusätzlichen laufenden Zahlungsüberschüsse durch ihre Bestandteile aus Gleichung (5), so ergibt sich:

$$CF(\overline{\Delta m}) = I_{m_{cur}}^{op}(f(\overline{\Delta m})) - \sum_{i=1}^n O_{i|m_i}^{op}(\Delta m_i) - \sum_{i=1}^n O_{i|m_i}^{invest}(\Delta m_i) \quad (7)$$

Zur Ermittlung der optimalen gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse werden zunächst die ersten partiellen Ableitungen bzgl. aller Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen gebildet, par-

tielle Randlösungen analysiert sowie Bedingungen und Charakteristika einer inneren Lösung geprüft. Die ersten partiellen Ableitungen lauten allgemein:

$$\frac{\partial CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} = \frac{\partial I_{m_i}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m_i} - \frac{\partial O_{i|m_i}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i} - \frac{\partial O_{i|m_i}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i} \quad (8)$$

Eine partielle linke Randlösung bzgl. eines Prozessgebiets  $P_i$  liegt vor, wenn es ökonomisch nicht sinnvoll ist, dessen Prozessgebiet-Reifegrad über  $m_i^{\text{cur}}$  hinaus zu erhöhen. Dies ist der Fall, wenn der aktuelle Prozessgebiet-Reifegrad bereits optimal ist oder (unwissentlich) darüber hinaus erhöht wurde. Zusätzliche Verbesserungsmaßnahmen werden dann nicht durch zusätzliche laufende Zahlungsüberschüsse gerechtfertigt. Mathematisch gesprochen besteht bzgl. eines Prozessgebiets  $P_i$  eine partielle linke Randlösung, wenn die entsprechende erste partielle Ableitung der gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse für alle Punkte mit  $\Delta m_i^0 = 0$  – also  $\overline{\Delta m}^0 = (\Delta m_1, \dots, \Delta m_i^0, \dots, \Delta m_n)^T$  – negativ oder null ist. Die Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen  $\Delta m_j$  ( $j \neq i$ ) sind beliebig in  $0 \leq \Delta m_j \leq m_j^{\text{max}} - m_j^{\text{cur}}$ , aber fest.

$$\frac{\partial CF(\overline{\Delta m}^0)}{\partial \Delta m_i^0} \leq 0 \quad \text{mit } \overline{\Delta m}^0 = (\Delta m_1, \dots, \Delta m_i^0, \dots, \Delta m_n)^T \text{ und } \Delta m_i^0 = 0 \quad (9)$$

Diese Bedingung kann für kein, ein oder mehrere Prozessgebiete erfüllt sein. Die optimalen Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen der betroffenen Prozessgebiete  $P_i$  sind  $\Delta m_i^* = 0$ . Ist diese Bedingung für alle Prozessgebiete einer Problem Instanz erfüllt, so liegt eine totale linke Randlösung vor. Blendet man im Weiteren die Prozessgebiete aus, bzgl. derer eine partielle linke Randlösung existiert, so reduziert sich die Anzahl der betrachteten Prozessgebiete auf  $0 \leq r \leq n$ . Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird im Folgenden eine von den  $r$  weiter betrachteten Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen abhängige Zahlungsüberschuss-Funktion verwendet.

Eine partielle rechte Randlösung bzgl. eines Prozessgebiets  $P_i$  tritt auf, wenn es nach Implementierung aller verfügbaren Verbesserungsmaßnahmen ökonomisch sinnvoll wäre, weitere Verbesserungsmaßnahmen oder gerade keine mehr zu implementieren. Mathematisch gesprochen besteht bzgl. eines Prozessgebiets  $P_i$  eine partielle rechte Randlösung, wenn die entsprechende erste partielle Ableitung der gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse für alle Punkte mit  $\Delta m_i^{\text{max}} = m_i^{\text{max}} - m_i^{\text{cur}}$  – also  $\overline{\Delta m}^{\text{max}} = (\Delta m_1, \dots, \Delta m_i^{\text{max}}, \dots, \Delta m_r)^T$  – positiv oder null ist. Die Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen  $\Delta m_j$  ( $j \neq i$ ) sind beliebig in  $0 \leq \Delta m_j \leq m_j^{\text{max}} - m_j^{\text{cur}}$ , aber fest.

$$\frac{\partial CF(\overline{\Delta m}^{\text{max}})}{\partial \Delta m_i^{\text{max}}} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \text{mit } \overline{\Delta m}^{\text{max}} = (\Delta m_1, \dots, \Delta m_i^{\text{max}}, \dots, \Delta m_r)^T \\ \text{und } \Delta m_i^{\text{max}} = m_i^{\text{max}} - m_i^{\text{cur}} \end{array} \quad (10)$$

Auch diese Bedingung kann für kein, ein oder mehrere Prozessgebiete erfüllt sein. Die optimalen Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen der betroffenen Prozessgebiete  $P_i$  sind  $\Delta m_i^* = m_i^{\text{max}} - m_i^{\text{cur}}$ . Ist diese Bedingung für alle noch betrachteten Prozessgebiete erfüllt, so liegen ausschließlich partielle linke und rechte Randlösungen vor. Die Reihenfolge der Prüfung hat keine Auswirkungen auf das Ergebnis. Blendet man nun auch die Prozessgebiete aus, bzgl. derer eine partielle rechte Randlösung existiert, reduziert sich die Anzahl der betrachteten Prozessgebiete auf  $0 \leq t \leq r$ . Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird im Folgenden eine

von den  $t$  weiter betrachteten Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen abhängige Zahlungsüberschuss-Funktion verwendet.

Für die verbliebenen  $t$  Prozessgebiete ist eine innere Lösung zu finden. Ökonomisch betrachtet handelt es sich um die Prozessgebiete, für die zwar eine positive Reifegraderhöhung, jedoch nicht die Ausschöpfung des vollständigen Verbesserungspotenzials sinnvoll ist. Als Optimalitätsbedingung erster Ordnung müssen an dem Punkt, der die optimalen gesamten Zahlungsüberschüsse kennzeichnet – also  $CF^*(\overline{\Delta m}^*)$  –, alle ersten partiellen Ableitungen null sein.

$$\forall 1 \leq i \leq t: \frac{\partial CF(\overline{\Delta m}^*)}{\partial \Delta m_i^*} =! 0 \quad \text{mit } \overline{\Delta m}^* = (\Delta m_1^*, \dots, \Delta m_t^*)^T \quad (11)$$

Existiert eine mit Gleichung (11) konforme Belegung von  $\overline{\Delta m}^*$ , so ist als Optimalitätsbedingung zweiter Ordnung die Krümmung der gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse zu untersuchen. Es kann formal bewiesen werden (vgl. Anhang), dass  $CF(\overline{\Delta m})$  für die in (A.4) bis (A.6) zugrunde gelegten Funktionsverläufe im gesamten Definitionsbereich streng konkav ist. Bei  $CF^*(\overline{\Delta m}^*)$  handelt es sich somit um die einzige Extremstelle, genauer gesagt um ein Zahlungsüberschussmaximum. Die einzelne  $\Delta m_i^*$  ( $0 \leq i \leq t$ ) ergeben sich durch Lösung des Gleichungssystems der ersten partiellen Ableitungen. Unter Berücksichtigung von Randlösungen und inneren Lösungen gelten folgende Aussagen für  $\Delta m_i^*$ .

$$\Delta m_i^* = \begin{cases} 0, \text{ für } \frac{\partial CF(\overline{\Delta m}^0)}{\partial \Delta m_i^0} \leq 0 \\ m_i^{\max} - m_i^{\text{cur}}, \text{ für } \frac{\partial CF(\overline{\Delta m}^{\max})}{\partial \Delta m_i^{\max}} \geq 0 \\ \text{als innere Lösung zu bestimmen, sonst} \end{cases} \quad (12)$$

Die mathematische Analyse zeigt, dass eine Kultur der kontinuierlichen Reifegraderhöhung oder gar Reifegradmaximierung einer ökonomischen Grundlage entbehrt. Sie ist lediglich eine Randlösung. In konkreten Anwendungsfällen kann es durchaus sinnvoll sein, die Reifegrade einzelner Prozessgebiete nur moderat oder unter Umständen nicht zu erhöhen. Die aus ökonomischer Sicht optimale Reifegraderhöhung für ein Prozessgebiet liegt im Fall einer inneren Lösung dort, wo die Grenzzahlungsüberschüsse aus dem laufenden Geschäft die Grenzinvestitionsauszahlungen für die Implementierung weiterer Verbesserungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der individuellen Bedeutung für die Leistungserstellung und der Synergieeffekte gerade nicht mehr kompensieren.

#### 4 Beispielhafte Anwendung des Optimierungsmodells im Dienstleistungssektor

Das Optimierungsmodell wird nun anhand eines in der Praxis eingesetzten Prozessreifegradmodells beispielhaft anhand von CMMI-SVC angewandt. Das Beispiel bezieht sich nicht auf eine bereits erfolgte realweltliche Anwendung. Es zielt darauf ab, die grundlegenden Schritte der praktischen Anwendung sowie den handlungsleitenden Charakter der allgemeinen Erkenntnisse aus Abschnitt 3 zu illustrieren. Zunächst wird eine allgemeine Einführung in CMMI-SVC gegeben. Anschließend erfolgt die Anwendung des Modells.

## 4.1 CMMI for Services

Für das Beispiel wird auf das Prozessreifegradmodell CMMI-SVC v1.2 zurückgegriffen, das sich an Dienstleistungsunternehmen wendet. Dies bietet sich aus mehreren Gründen an: Erstens zählen die CMMI-Reifegradmodelle zu den am häufigsten in der Praxis Eingesetzten, ihre Spezifikationen sind öffentlich zugänglich, sie bilden die Grundlage für zahlreiche weitere Reifegradmodelle und sind nach Einschätzung der Autoren überdurchschnittlich detailliert ausgearbeitet (vgl. Becker et al. 2010, BPM&O Architects 2010). Zweitens sind Dienstleistungen ein hochaktuelles Forschungsgebiet und ein wirtschaftlich bedeutender Wachstumsmarkt. Drittens umfasst der dem CMMI-SVC zugrunde liegende Dienstleistungsbegriff sowohl klassisch betriebswirtschaftliche als auch (informations-) technische Dienstleistungen, was eine vielseitige Anwendung ermöglicht. Da die Spezifikation von CMMI-SVC in englischer Sprache vorliegt, werden die deutschsprachigen Ausführungen teilweise um die Originalbegriffe ergänzt. Vorab werden die relevanten Bestandteile von CMMI-SVC kurz vorgestellt. Dazu gehören die verfügbaren Prozessgebiete, Reife- und Fähigkeitsgrade sowie Ziele und Verbesserungsmaßnahmen (vgl. Software Engineering Institute 2009a).

CMMI-SVC umfasst 24 Prozessgebiete. Diese unterteilen sich in 16 allgemeine Prozessgebiete, die in allen CMMI-Reifegradmodellen enthalten sind, sieben dienstleistungsspezifische Prozessgebiete und eine sog. *Addition*. Die dienstleistungsspezifischen Prozessgebiete beziehen sich auf die Bereitstellung der zur Dienstleistungserbringung erforderlichen Ressourcen (*capacity and availability management*), die Wiederaufnahme der Dienstleistungserbringung nach schwerwiegenden Ausfällen (*service continuity*), die Entgegennahme von Dienstleistungsanfragen, die Vereinbarung entsprechender Leistungsniveaus und den Betrieb des Leistungserstellungssystems (*service delivery*), den Umgang mit und der Vorbeugung von Fehlern während des laufenden Betriebs (*incident resolution and prevention*), die Konzeption neuer Leistungserstellungssysteme (*service system development*), die Einführung bzw. Ablösung von Leistungserstellungssystemen für neue bzw. nicht mehr angebotene Dienstleistungen (*service system transition*) sowie die Entwicklung von Dienstleistungsstrategien (*strategic service management*).

CMMI-SVC unterscheidet Reife- und Fähigkeitsgrade (*maturity level* und *capability level*). Während Reifegrade die „Reife“ eines Unternehmens zur Kommunikation mit externen Anspruchsgruppen dokumentieren und anhand eines eigenen Rechenschemas zu ermitteln sind, beziehen sich Fähigkeitsgrade auf einzelne Prozessgebiete. Fähigkeitsgrade entsprechen den im Optimierungsmodell eingeführten Prozessgebiet-Reifegraden. Aus Konsistenzgründen wird im Weiteren von Fähigkeitsgraden gesprochen. CMMI-SVC umfasst sechs Fähigkeitsgrade: unvollständig (0), initial (1), gemanagt (2), definiert (3), quantitativ gemanagt (4) und optimierend (5). Die in einem Prozessgebiet enthaltenen Planungs-, Steuerungs-, Kontroll- und Unterstützungsprozesse werden ab einem Fähigkeitsgrad von 1 durchgeführt. Dies korrespondiert mit der Erreichung der dem Prozessgebiet zugewiesenen spezifischen Ziele (*specific goals*) und der Umsetzung der damit verbundenen spezifischen Verbesserungsmaßnahmen (*specific practices*). Es gilt:  $m_i^{\min} = 1$  und  $m_i^{\max} = 5$ .

Für die Prozessverbesserung auf Basis von Fähigkeitsgraden schlägt CMMI-SVC die sog. „continuous representation“ vor (vgl. Software Engineering Institute 2009a). Wie im Optimierungsmodell werden hier Prozessgebiete ausgewählt, aktuelle Fähigkeitsgrade ermittelt und anzustrebende Fähigkeitsgraderhöhungen bestimmt. Die zentrale Idee der „continuous representation“ ist die Institutionalisierung (*institutionalization*) (Software Engineering Institute 2009a, S. 57). Ziel ist es, durch das Durchlaufen der Fähigkeitsgradfolge für mehrere Prozessgebiete die Qualität und Zuverlässigkeit des Leistungserstellungsprozesses derart zu stei-

gern, dass diese auch in Stresssituationen mit immer höherer Wahrscheinlichkeit auf gleichbleibendem Niveau sichergestellt ist. Jedem Fähigkeitsgrad sind ein generisches Ziel (*generic goal*) und generische Verbesserungsmaßnahmen (*generic practices*) zugeordnet. Letztere werden teilweise für einzelne Prozessgebiete konkretisiert. Ein Fähigkeitsgrad darf dann ausgewiesen werden, wenn das entsprechende generische Ziel erreicht ist, was die Implementierung der entsprechenden generischen Verbesserungsmaßnahmen erfordert.

#### 4.2 Beispielhafte Anwendung des Optimierungsmodells

Möchte ein Unternehmen, das CMMI-SVC nutzt und bereits einen Teil der Prozessgebiete umsetzt, die optimalen Fähigkeitsgraderhöhungen anhand des Optimierungsmodells ermitteln, so sind folgende Schritte pro Prozessgebiet durchzuführen:

1. Verbesserungsmaßnahmen konkretisieren und zu Projekten bündeln
2. Auszahlungen operationalisieren
3. Investitionsauszahlungen schätzen
4. Zusätzliche laufende Auszahlungen schätzen
5. Auszahlungen durch stetige Funktionen approximieren

Anschließend sind folgende Prozessgebiet-übergreifende Schritte durchzuführen:

6. Einzahlungen operationalisieren
7. Zusätzliche laufende Einzahlungen schätzen
8. Einzahlungen durch eine stetige Funktion approximieren
9. Bedeutung der einzelnen Prozessgebiete für die Leistungserstellung schätzen
10. Synergieeffekte zwischen Prozessgebieten schätzen
11. Optimale Fähigkeitsgraderhöhungen und Verbesserungsmaßnahmen ermitteln

Im verbleibenden Teil des Abschnitts werden die genannten Schritte für einen fiktiven IT-Dienstleister durchlaufen. Da die generischen Verbesserungsmaßnahmen unternehmensspezifisch konkretisiert und zu Projekten gebündelt werden müssen, werden die entsprechenden Schritte lediglich schematisch ausgearbeitet. Dasselbe gilt für die Operationalisierung von Ein- und Auszahlungen.

Betrachtet wird ein fiktiver IT-Dienstleister, der betriebliche Standardsoftware mit Customer-Relationship-Management- und Enterprise-Resource-Planning-Funktionalität zunächst gemäß der Anforderungen seiner Kunden konfiguriert und anschließend als Software as a Service betreibt. Aufgrund seines großen Kundenstamms ist es für den IT-Dienstleister wichtig, Leistungen zuverlässig zu den vereinbarten Leistungsniveaus zu erbringen, auf operative Fehler bei kundenseitigen Nutzern zügig zu reagieren, mit komplexen Anforderungen umzugehen und das tatsächliche Leistungsniveau kontinuierlich zu überwachen. Daher wurden bei der Einführung von CMMI-SVC folgende Prozessgebiete ausgewählt (in Klammern sind die aktuellen Fähigkeitsgrade angegeben, die Ausprägungen werden weiter unten erläutert):

- $P_1$ : Incident Resolution and Prevention ( $m_1^{\text{cur}} = 1,00$ )
- $P_2$ : Service Delivery ( $m_2^{\text{cur}} = 1,67$ )
- $P_3$ : Organizational Process Performance ( $m_3^{\text{cur}} = 2,00$ )
- $P_4$ : Requirements Management ( $m_4^{\text{cur}} = 1,33$ )

Im Planungshorizont ist weder vorgesehen, zusätzliche Prozessgebiete einzuführen noch bestehende Prozessgebiete abzuschaffen. Der IT-Dienstleister steht im Rahmen einer Prozess-



verbesserungsinitiative vor der Frage, um wie weit er die Fähigkeitsgrade ausgehend vom Status quo erhöhen und welche Verbesserungsmaßnahmen er umsetzen soll.

In Schritt 1 wurden je generischem Ziel drei Projekte definiert. Somit ist für jedes Prozessgebiet in Abhängigkeit vom aktuellen Fähigkeitsgrad ein Teil der folgenden diskreten Fähigkeitsgraderhöhungen relevant: 0,00; 0,33; 0,67; 1,00; 1,33; 1,67; 2,00; 2,33; 2,67; 3,00; 3,33; 3,67; 4,00 (Tab. 1). Liegt nach der stetigen Optimierung die optimale Fähigkeitsgraderhöhung eines Prozessgebiets zwischen zwei diskreten Ausprägungen, so ist die betragsmäßig Niedrigere zu wählen. Dort kompensieren die zusätzlichen laufenden Einzahlungen in jedem Fall die Investitionsauszahlungen und die zusätzlichen laufenden Auszahlungen.

In den Schritten 2 bis 5 werden die Investitionsauszahlungen und die zusätzlichen laufenden Auszahlungen operationalisiert, für jedes Prozessgebiet in diskreter Form geschätzt und durch stetige Funktionen approximiert. Zur methodischen Unterstützung kann auf Verfahren der Zieloperationalisierung und Projektplanung (vgl. Bernecker/Eckrich 2003, Klein/Scholl 2004) sowie auf Aufwandsschätzverfahren aus dem Software Engineering (z. B. Function Points oder COCOMO II) zurückgegriffen werden (vgl. Balzert 1998, Boehm et al. 2000). Obwohl pro Prozessgebiet nur die Auszahlungswerte für Fähigkeitsgraderhöhungen jenseits des aktuellen Fähigkeitsgrads bestimmt werden müssten, ist es für die spätere Approximation sinnvoll, auch die Auszahlungen für die Erreichung des aktuellen Fähigkeitsgrads zu dokumentieren. Das Ergebnis zeigen Tab. 1 und Tab. 2 jeweils mit den  $m_i^{\min}$  als Bezugspunkte. Für das Beispiel wurden vereinfachend Auszahlungswerte gewählt, die sich aus stetigen Auszahlungsfunktionen ergeben und somit problemlos approximieren lassen. Im vorliegenden Fall wurden die Auszahlungen auf Basis von Polynomen zweiten Grades – genauer gesagt deren aufsteigenden Ästen – gebildet, wobei auch andere Funktionstypen (z. B. die Exponential-Funktion) zulässig sind. Die Funktionen zeigt Tab. 3. Eine Approximation der diskreten Auszahlungsreihen kann z. B. unter Zuhilfenahme der Regressionsanalyse erfolgen. Zu beachten ist, dass es zu Schätzfehlern kommen kann, wenn die Verbesserungsmaßnahmen pro Fähigkeitsgrad zu einer jeweils stark unterschiedlichen Anzahl an Projekten gebündelt werden – z. B. 10 Projekte von Fähigkeitsgrad 1 auf 2, jedoch nur 2 Projekte von Fähigkeitsgrad 2 auf 3.

**Tab. 1** Investitionsauszahlungen (mit den  $m_i^{\min}$  als Bezugspunkte)

Generisches Ziel bzw. Fähigkeitsgrad	Teilprojekt	$\Delta m_i$	$O_{1 m_1^{\min}}^{\text{invest}}(\Delta m_1)$ (in TEUR)*	$O_{2 m_2^{\min}}^{\text{invest}}(\Delta m_2)$ (in TEUR)*	$O_{3 m_3^{\min}}^{\text{invest}}(\Delta m_3)$ (in TEUR)*	$O_{4 m_4^{\min}}^{\text{invest}}(\Delta m_4)$ (in TEUR)*
1	---	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Teilprojekt 2.1	0,33	1,75	0,99	1,43	4,18
	Teilprojekt 2.2	0,67	5,15	2,69	3,81	8,94
	Teilprojekt 2.3	1,00	10,00	5,00	7,00	14,00
3	Teilprojekt 3.1	1,33	16,37	7,97	11,07	19,50
	Teilprojekt 3.2	1,67	24,53	11,71	16,17	25,62
	Teilprojekt 3.3	2,00	34,00	16,00	22,00	32,00
4	Teilprojekt 4.1	2,33	44,99	20,95	28,71	38,82
	Teilprojekt 4.2	2,67	57,91	26,73	36,53	46,30
	Teilprojekt 4.3	3,00	72,00	33,00	45,00	54,00
5	Teilprojekt 5.1	3,33	87,61	39,93	54,35	62,14
	Teilprojekt 5.2	3,67	105,29	47,75	64,89	70,98
	Teilprojekt 5.3	4,00	124,00	56,00	76,00	80,00

\* mit  $m_i^{\min} = 1$  ( $1 \leq i \leq 4$ )

**Tab. 2** Zusätzliche laufende Auszahlungen (mit den  $m_i^{\min}$  als Bezugspunkte)

Generisches Ziel bzw. Fähigkeitsgrad	Teilprojekt	$\Delta m_i$	$O_{1 m_1^{\min}}^{\text{op}}(\Delta m_1)$ (in TEUR)*	$O_{2 m_2^{\min}}^{\text{op}}(\Delta m_2)$ (in TEUR)*	$O_{3 m_3^{\min}}^{\text{op}}(\Delta m_3)$ (in TEUR)*	$O_{4 m_4^{\min}}^{\text{op}}(\Delta m_4)$ (in TEUR)*
1	---	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Teilprojekt 2.1	0,33	1,10	2,31	1,21	1,20
	Teilprojekt 2.2	0,67	3,14	5,37	2,91	3,58
	Teilprojekt 2.3	1,00	6,00	9,00	5,00	7,00
3	Teilprojekt 3.1	1,33	9,74	13,29	7,53	11,50
	Teilprojekt 3.2	1,67	14,50	18,39	10,59	17,28
	Teilprojekt 3.3	2,00	20,00	24,00	14,00	24,00
4	Teilprojekt 4.1	2,33	26,38	30,27	17,85	31,80
	Teilprojekt 4.2	2,67	33,86	37,41	22,27	40,98
	Teilprojekt 4.3	3,00	42,00	45,00	27,00	51,00
5	Teilprojekt 5.1	3,33	51,02	53,25	32,17	62,10
	Teilprojekt 5.2	3,67	61,22	62,43	37,95	74,68
	Teilprojekt 5.3	4,00	72,00	72,00	44,00	88,00

\* mit  $m_i^{\min} = 1$  ( $1 \leq i \leq 4$ )

In den Schritten 6 bis 8 werden die zusätzlichen laufenden Einzahlungen operationalisiert, in diskreter Form ermittelt und durch eine stetige Funktion approximiert. Die hier zugrunde liegende Funktion lautet:  $I_{m^{\min}}^{\text{op}}(\Delta m) = I_{m^{\min}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m})) = 175 \cdot \sqrt{f(\overline{\Delta m})}$ . Auch hier sind andere Funktionstypen (z. B. die Logarithmus-Funktion) zulässig.

**Tab. 3** Stetige Auszahlungsfunktionen (mit den  $m_i^{\min}$  als Bezugspunkte)

$i$	Investitionsauszahlungen $O_{i m_i^{\min}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)^*$		Zusätzliche laufende Auszahlungen $O_{i m_i^{\min}}^{\text{op}}(\Delta m_i)^*$	
	Funktion	1. Ableitung	Funktion	1. Ableitung
1	$7 \cdot \Delta m_1^2 + 3 \cdot \Delta m_1$	$14 \cdot \Delta m_1 + 3$	$4 \cdot \Delta m_1^2 + 2 \cdot \Delta m_1$	$8 \cdot \Delta m_1 + 2$
2	$3 \cdot \Delta m_2^2 + 2 \cdot \Delta m_2$	$6 \cdot \Delta m_2 + 2$	$3 \cdot \Delta m_2^2 + 6 \cdot \Delta m_2$	$6 \cdot \Delta m_2 + 6$
3	$4 \cdot \Delta m_3^2 + 3 \cdot \Delta m_3$	$8 \cdot \Delta m_3 + 3$	$2 \cdot \Delta m_3^2 + 3 \cdot \Delta m_3$	$4 \cdot \Delta m_3 + 3$
4	$2 \cdot \Delta m_4^2 + 12 \cdot \Delta m_4$	$4 \cdot \Delta m_4 + 12$	$5 \cdot \Delta m_4^2 + 2 \cdot \Delta m_4$	$10 \cdot \Delta m_4 + 2$

\* mit  $m_i^{\min} = 1$  ( $1 \leq i \leq 4$ )

In den Schritten 9 und 10 werden die Bedeutung der einzelnen Prozessgebiete für die Leistungserstellung und Synergieeffekte untersucht (Tab. 4). Zu diesem Zweck können die CMMI-SVC-Spezifikation und Experten innerhalb des Unternehmens herangezogen werden. Der Spezifikation lassen sich grundsätzliche Aussagen zum Zusammenwirken von Prozessgebieten entnehmen. Experten können das tatsächliche Zusammenwirken aus der Vergangenheit heraus beurteilen und so helfen, Aussagen über Synergieeffekte ableiten und deren Stärke zu quantifizieren. Bzgl. der Bedeutung einzelner Prozessgebiete kann auf frühere Forschungsarbeiten zurückgegriffen werden (vgl. Huang/Han 2006). Vereinfachend gelten hier die Prozessgebiete als gleichwichtig ( $s_{11} = s_{22} = s_{33} = s_{44} = 1$ ).

**Tab. 4 Synergieeffekt-Matrix**

$P_i \backslash P_j$	1	2	3	4
1	1,00	0,20	0,40	0,00
2		1,00	0,00	0,10
3			1,00	0,10
4				1,00

Abschließend sind in Schritt 11 die optimalen Fähigkeitsgraderhöhungen zu ermitteln. Dazu müssen zunächst die in Tab. 3 gezeigten Auszahlungsfunktionen, die noch die  $m_i^{\min}$  als Bezugspunkte haben, gemäß der Gleichungen (2) und (3) auf die  $m_i^{\text{cur}}$  bezogen werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die  $m_i^{\min} = 1$  sind. Das Ergebnis zeigt Tab. 5. Vergleicht man die Funktionen, so sieht man, dass sich durch diese Transformation die (Grenz-) Auszahlungen in Abhängigkeit von der Differenz zwischen  $m_i^{\text{cur}}$  und  $m_i^{\min}$  erhöht haben. Entsprechend ändern sich die Gleichungen für  $i = 1$  nicht, da  $m_1^{\text{cur}}$  und  $m_1^{\min}$  übereinstimmen.

**Tab. 5 Stetige Auszahlungsfunktionen (mit den  $m_i^{\text{cur}}$  als Bezugspunkte)**

$i$	Investitionsauszahlungen $O_{i m_i^{\text{cur}}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)$		Zusätzliche laufende Auszahlungen $O_{i m_i^{\text{cur}}}^{\text{op}}(\Delta m_i)$	
	Funktion	1. Ableitung	Funktion	1. Ableitung
1	$7 \cdot \Delta m_1^2 + 3 \cdot \Delta m_1$	$14 \cdot \Delta m_1 + 3$	$4 \cdot \Delta m_1^2 + 2 \cdot \Delta m_1$	$8 \cdot \Delta m_1 + 2$
2	$3 \cdot \Delta m_2^2 + 6 \cdot \Delta m_2$	$6 \cdot \Delta m_2 + 6$	$3 \cdot \Delta m_2^2 + 10 \cdot \Delta m_2$	$6 \cdot \Delta m_2 + 10$
3	$4 \cdot \Delta m_3^2 + 11 \cdot \Delta m_3$	$8 \cdot \Delta m_3 + 11$	$2 \cdot \Delta m_3^2 + 7 \cdot \Delta m_3$	$4 \cdot \Delta m_3 + 7$
4	$2 \cdot \Delta m_4^2 + 13,33 \cdot \Delta m_4$	$4 \cdot \Delta m_4 + 13,33$	$5 \cdot \Delta m_4^2 + 5,33 \cdot \Delta m_4$	$10 \cdot \Delta m_4 + 5,33$

Ebenso ist die Einzahlungsfunktion gemäß Gleichung (4) anzupassen. Es ergibt sich:

$$I_{m^{\text{cur}}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m})) = 175 \cdot \sqrt{2,8 + f(\overline{\Delta m})} - 291,3 \quad (13)$$

Der minimale und der aktuelle Gesamt-Reifegrad lassen sich über Gleichung (1) ermitteln. Im Gegensatz zu den Auszahlungsfunktionen existieren für die Einzahlungsfunktion aufgrund der Synergieeffekte vier erste partielle Ableitungen, nämlich:

$$\frac{\partial I_{m^{\text{cur}}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m_i} = \frac{87,5}{\sqrt{2,8 + f(\overline{\Delta m})}} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \quad (14)$$

Auf Basis von Tab. 5, Tab. 4, Gleichung (14) und Gleichung (8) können die ersten partiellen Ableitungen der gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse gebildet werden.

$$\frac{\partial CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_1} = \frac{140}{\sqrt{2,8 + f(\overline{\Delta m})}} - [22 \cdot \Delta m_1 + 5] \quad (15)$$

$$\frac{\partial CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_2} = \frac{113,75}{\sqrt{2,8 + f(\overline{\Delta m})}} - [12 \cdot \Delta m_2 + 16] \quad (16)$$

$$\frac{\partial CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_3} = \frac{131,25}{\sqrt{2,8 + f(\overline{\Delta m})}} - [12 \cdot \Delta m_3 + 18] \quad (17)$$

$$\frac{\partial CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_4} = \frac{105}{\sqrt{2,8 + f(\overline{\Delta m})}} - [14 \cdot \Delta m_4 + 18,67] \quad (18)$$

Ökonomisch interpretiert repräsentieren die Minuenden der ersten partiellen Ableitungen die Grenzeinzahlungen aus dem laufenden Geschäft am Punkt  $\overline{\Delta m}$  bei einer marginalen Erhöhung der  $\Delta m_i$ . Die Subtrahenden repräsentieren die entsprechenden Grenzauszahlungen aus der Investitionstätigkeit und dem laufenden Geschäft.

Zusätzlich soll beachtet werden, dass ein Großkunde bzgl. Prozessgebiet  $P_1$  den maximalen Fähigkeitsgrad fordert, weswegen eine Fähigkeitsgraderhöhung von  $\Delta m_1 = 4,00$  umgesetzt werden muss. Das Optimierungsmodell wurde prototypisch in Microsoft Excel umgesetzt. Die Lösung erfolgt anhand des Solver-Add Ins. Für die optimalen Fähigkeitsgraderhöhungen ergibt sich nach stetiger Optimierung:  $\Delta m_1 = 4,00$ ,  $\Delta m_2 = 1,22$ ,  $\Delta m_3 = 1,45$  und  $\Delta m_4 = 0,69$ . Korrigiert man diese unter Berücksichtigung der möglichen diskreten Ausprägungen, so ergibt sich:  $\Delta m_1 = 4,00$ ,  $\Delta m_2 = 1,00$ ,  $\Delta m_3 = 1,33$  und  $\Delta m_4 = 0,67$ . Die gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse betragen 78,08 TEUR.

Das Ergebnis lässt sich wie folgt interpretieren: Der Fähigkeitsgrad von  $P_1$  wird wie gefordert um  $\Delta m_1 = 4,00$  erhöht. Entsprechend sind die Prozessverbesserungsprojekte 2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 5.2 und 5.3 umzusetzen. Allerdings ist die Umsetzung dieser Großkundenanforderung ökonomisch nicht sinnvoll, da trotz der höchsten Grenzeinzahlungen die Grenzauszahlungen vergleichsweise stark steigen und damit insbesondere für starke Fähigkeitsgraderhöhungen hohe Werte annehmen (Gleichung 15). Gäbe es die Anforderung nicht, so würde der Fähigkeitsgrad von  $P_1$  lediglich um  $\Delta m_1 = 1,67$  erhöht und es könnte ein gesamter zusätzlicher Zahlungsüberschuss in Höhe von 141,96 TEUR erzielt werden. Dann müsste allerdings auch der potenzielle Verlust des Großkunden in den zusätzlichen laufenden Einzahlungen berücksichtigt werden. Der Fähigkeitsgrad von  $P_2$  wird um  $\Delta m_2 = 1,00$  erhöht, weswegen die Prozessverbesserungsprojekte 2.3, 3.1 und 3.2 umzusetzen sind. Der Fähigkeitsgrad von  $P_3$  wird um  $\Delta m_3 = 1,33$  erhöht, weswegen die Prozessverbesserungsprojekte 3.1, 3.2, 3.3 und 4.1 umzusetzen sind. Diese starke Erhöhung trotz eines höheren aktuellen Fähigkeitsgrads lässt sich dadurch erklären, dass die Grenzeinzahlungen recht hoch sind und die Grenzauszahlungen im Vergleich dazu eher gering steigen (Gleichung 17). Der Fähigkeitsgrad von  $P_4$  wird um  $\Delta m_4 = 0,67$  erhöht. Es sind die Prozessverbesserungsprojekte 2.2 und 2.3 umzusetzen. Diese eher geringe Erhöhung ist darin begründet, dass  $P_4$  die geringsten Grenzeinzahlungen aufweist und die Grenzauszahlungen aufgrund des hohen konstanten Glieds und der eher starken Steigung bereits bei einer kleinen Fähigkeitsgraderhöhung hoch sind (Gleichung 18). Deutlich wird dies im Vergleich mit  $P_3$ . Dort sind sowohl die Grenzeinzahlungen höher als auch die Grenzauszahlungen niedriger, weswegen eine stärkere Fähigkeitsgraderhöhung ökonomisch gerechtfertigt ist.

Zusammenfassend hat der fiktive IT-Dienstleister durch Anwendung des Optimierungsmodells konkrete Empfehlungen gewonnen, wie stark die Fähigkeitsgrade der einzelnen Prozessgebiete unter ökonomischen Gesichtspunkten zu erhöhen sind. Auch die zusätzliche Restriktion eines Großkunden konnte berücksichtigt werden. Werden die Empfehlungen des Optimierungsmodells umgesetzt, so sind erwartungsgemäß barwertig 164,55 TEUR zu investieren.

Entsprechend fallen 103,66 TEUR an zusätzlichen laufenden Auszahlungen an. Die zusätzlichen laufenden Einzahlungen betragen 346,29 TEUR. Die gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse belaufen sich wie erwähnt auf 78,08 TEUR. Ebenfalls wurde gezeigt, dass in diesem Fall ein vollständiges Ausschöpfen des Verbesserungspotenzials im Sinne einer Reifegradmaximierung für kein Prozessgebiet ökonomisch sinnvoll ist – auch wenn es für  $P_1$  gefordert wurde. Hätte das Unternehmen eine Reifegradmaximierungsstrategie verfolgt, so wären gesamte zusätzliche Zahlungsüberschüsse in Höhe von -49,41 TEUR entstanden.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Abschließend werden zunächst Limitationen aufgezeigt, um dem Leser die Möglichkeit zu geben, diese bei der Interpretation der nachgelagerten Ausführungen zu berücksichtigen. Nach einer kurzen Zusammenfassung und Darstellung der wesentlichen Erkenntnisse werden weiterer Forschungsbedarf sowie Implikationen für die Praxis herausgearbeitet.

### *5.1 Limitationen*

Die ökonomischen Zusammenhänge und die Anwendbarkeit des Optimierungsmodells weisen folgende Limitationen auf:

1. Im Sinne der Prozessverbesserung berücksichtigt das Optimierungsmodell lediglich Reifegraderhöhungen. Nicht betrachtet wurde, ob es ökonomisch sinnvoll sein kann, den Reifegrad einzelner Prozesse bzw. Prozessgruppen zu verringern. Es ist durchaus denkbar, dass Unternehmen, die in der Vergangenheit Verbesserungsmaßnahmen ohne eine konkrete oder mit einer nicht an der langfristigen Unternehmenswertsteigerung ausgerichteten Zielsetzung umgesetzt haben, „über das Ziel hinausgeschossen“ sind. Insbesondere bei partiellen linken Randlösungen ist unklar, ob anstatt eines Beibehaltens des aktuellen Reifegrads eine Verringerung sinnvoll wäre. Des Weiteren wurde einschränkend davon ausgegangen, dass sich die Menge der umgesetzten Prozesse bzw. Prozessgruppen im Untersuchungszeitraum nicht verändert.
2. Bislang wird das Risiko einzelner Entscheidungsalternativen anhand eines risikoadjustierten Kalkulationszinses berücksichtigt (Risikozuschlagsmethode). Komplexe Abhängigkeitsstrukturen und Diversifikationseffekte fließen daher nicht in die Entscheidung ein.
3. In Bezug auf die Anwendung des Optimierungsmodells liegt die Hauptschwierigkeit in der Schätzung bzw. Operationalisierung der Ein- und Auszahlungsfunktionen sowie der Datenbeschaffung. Einerseits können trotz theoretischer Begründung reale Funktionsverläufe von den im Modell angenommenen, idealtypischen Eigenschaften abweichen. Andererseits ist es möglich, dass reale Werte nicht befriedigend durch stetige Funktionen approximierbar sind.
4. Eine weitere Herausforderung besteht darin, ein Reifegradmodell zu identifizieren, das nicht nur zur Anwendungsdomäne passt, sondern auch hinreichend detailliert ausgearbeitete Verbesserungsmaßnahmen umfasst. Diesbezüglich gibt es erheblichen Handlungsbedarf, denn zahlreiche Reifegradmodelle – auch im Prozessmanagement – beschränken sich auf Erhebungskriterien für Reifegradausprägungen und überlassen das Ableiten von Verbesserungsmaßnahmen dem Modellnutzer.

## 5.2 Zusammenfassung und wesentliche Erkenntnisse

Im Rahmen dieses Beitrags wurde untersucht, wie sich aus ökonomischer Sicht die für Prozesse bzw. Prozessgruppen anzustrebenden Reifegrade bestimmen. Dazu wurden Reifegraderhöhungen als Investitionsprojekte interpretiert und mithilfe eines mathematischen Optimierungsmodells allgemeine ökonomische Zusammenhänge abgeleitet. Es galt, diejenige Reifegrad-Konfiguration zu ermitteln, welche die gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse maximiert. Dazu wurden die erwarteten, risikoadjustierten Investitionsauszahlungsbarwerte den zusätzlichen erwarteten, risikoadjustierten Ein- und Auszahlungsbarwerten aus dem laufenden Geschäft gegenübergestellt. Auf Basis theoretischer Vorarbeiten wurde argumentiert, dass im vorliegenden Zusammenhang Auszahlungsverläufe idealtypisch streng monoton steigend und streng konvex, Einzahlungsverläufe hingegen streng monoton steigend und streng konkav sind. Für ebensolche Verläufe konnte bewiesen werden, dass genau eine optimale Reifegrad-Konfiguration existiert und dass es sich dabei um ein Zahlungsüberschussmaximum handelt.

Eine zentrale Erkenntnis ist, dass das Zahlungsüberschussmaximum nur in Ausnahmefällen aus einer maximalen Reifegraderhöhung resultiert. Dies gilt für einzelne Prozesse bzw. Prozessgruppen wie auch für das Leistungserstellungssystem als Ganzes. In konkreten Anwendungsfällen ist vielmehr anzuraten, die Reifegrade einzelner Prozesse bzw. Prozessgruppen nur moderat zu erhöhen. Auch das Beibehalten des aktuellen Reifegrads kann sinnvoll sein. Die aus ökonomischer Sicht optimale Reifegraderhöhung für einen Prozess bzw. eine Prozessgruppe liegt im Fall einer inneren Lösung dort, wo die Grenzzahlungsüberschüsse aus dem laufenden Geschäft die Grenzinvestitionsauszahlungen für die Implementierung weiterer Verbesserungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der individuellen Bedeutung für die Leistungserstellung und der Synergieeffekte gerade nicht mehr kompensieren.

Mit seiner quantitativen und an der langfristigen Unternehmenswertsteigerung ausgerichteten Zielfunktion leistet das Optimierungsmodell einen Beitrag zur Wertorientierung im Prozessmanagement (vgl. Buhl et al. 2011, vom Brocke et al. 2009) sowie zu einer an den Unternehmenszielen ausgerichteten Nutzung von Prozessreifegradmodellen (vgl. Greb/Kneuper 2010, Software Engineering Institute 2009a). Gleichzeitig dient das Optimierungsmodell als Schablone für eine Entscheidungslogik, die für Reifegradmodelle mit präskriptivem Nutzungszweck gefordert wird (vgl. Pöppelbuß/Röglinger 2011).

Da gemäß dem Paradigma der Wertorientierten Unternehmensführung sämtliche betrieblichen Aktivitäten am Ziel der langfristigen Unternehmenswertsteigerung auszurichten sind, gelten die ökonomischen Zusammenhänge nicht nur für Prozessreifegradmodelle. Vielmehr lassen sie sich auf alle Reifegradmodelle übertragen, die folgende Eigenschaften aufweisen: Zum einen müssen in Analogie zu Prozessgebieten und Leistungserstellungssystemen mehrere Aggregationsstufen der Reifung unterschieden werden können. Zum anderen müssen in Analogie zu Prozessgebieten mehrere „Themenbereiche“ (sog. *capability areas*) existieren, hinsichtlich derer eine Reifegraderhöhung möglich und deren Zusammenwirken gesamthaft bewertbar ist. Diese Eigenschaften werden von zahlreichen Reifegradmodellen erfüllt (vgl. de Bruin et al. 2005, Fraser et al. 2002). Hinzu kommt, dass die zugrundegelegten Funktionsverläufe Gültigkeit besitzen müssen, was nach Einschätzung der Autoren aufgrund deren theoretischer Fundierung in vielen Fällen gegeben sein dürfte. In jedem Fall sind die Ein- und Auszahlungsfunktionen in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendungsdomäne zu operationalisieren.

## 5.3 Weiterer Forschungsbedarf

Die Limitationen des Optimierungsmodells motivieren weitere Forschung:

1. Ein aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht vielversprechendes Forschungsfeld ist die ökonomische Sinnhaftigkeit von Reifegradverringerungen. Zum einen weil die Eigenschaft des irreversiblen Durchlaufens einer Entwicklungsstufenfolge im Sinne der zugrundeliegenden stufen- bzw. lebenszyklusorientierten Denkweise einer kritischen Prüfung unterzogen würde. Zum anderen weil im Falle der ökonomischen Sinnhaftigkeit ein zusätzlicher Hebel zur Unternehmenswertsteigerung aufgezeigt würde. Weiterhin könnte betrachtet werden, dass sich die Menge an umgesetzten Prozessen bzw. Prozessgruppen im Planungszeitraum ändert. Die für eine Berücksichtigung beider Punkte erforderliche abschnittsweise Definition der Ein- und Auszahlungsfunktionen sowie die explizite Betrachtung einzelner Zeitpunkte würden die Komplexität des Modells erheblich erhöhen und womöglich eine allgemeine Lösung verhindern.
2. Zur Abbildung von Abhängigkeitsstrukturen und Diversifikationseffekten könnte das Optimierungsmodell in Richtung der Risikoanalyse (Risikoabschlagsmethode), einer barwertigen Sicherheitsäquivalentmethode, weiterentwickelt werden (Bamberg et al. 2006, Bamberg et al. 2004). Reifegradanpassungen wären dann bspw. hinsichtlich der erwarteten Zahlungsüberschussbarwerte, deren Streuung, Abhängigkeiten und der Risikopräferenz der Entscheidungsträger zu bewerten.
3. Wie diskutiert können in der Praxis die tatsächlichen Ein- und Auszahlungswerte von den idealtypischen Funktionseigenschaften abweichen. Zudem erweist sich eine direkte Erhebung als schwierig. Künftige Forschungsarbeiten könnten sich daher der Anwendbarkeit des Optimierungsmodells widmen.
4. Das Optimierungsmodell wurde bislang keiner realweltlichen Evaluation unterzogen. Es wäre aufschlussreich, inwieweit die Bewertung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen auf Basis ökonomisch fundierter Prozessreifegradmodelle – also einer Kombination aus ökonomischer Theorie und Erfahrungswissen – bessere Ergebnisse erzielt als andere Instrumente der Prozessverbesserung.

#### *5.4 Implikationen für die Praxis*

Es konnte gezeigt werden, dass eine Kultur der kontinuierlichen Reifegraderhöhung oder gar Reifegradmaximierung einer ökonomischen Grundlage entbehrt. Sie ist nicht mit dem Ziel der langfristigen Unternehmenswertsteigerung kompatibel und birgt die Gefahr von Fehlinvestitionen. Die vereinzelt vorzufindende, bislang jedoch nicht wissenschaftlich untersuchte Empfehlung, von einem pauschalen Anstreben des höchsten Reifegrads abzusehen, konnte bekräftigt und gemäß den obigen Ausführungen präzisiert werden.

Die allgemeinen Erkenntnisse haben handlungsleitenden Charakter für die Praxis. Einschlägige Hinweise wurden in Abschnitt 4 gegeben. Es ist zu empfehlen, bei der Planung von Prozessverbesserungsmaßnahmen im Allgemeinen und von Reifegraderhöhungen im Speziellen soweit möglich die einschlägigen Ein- und Auszahlungswirkungen zu berücksichtigen und in Investitionsrechnungen einfließen zu lassen. Es ist jedoch nicht zwingend erforderlich, die theoretischen Annahmen des Optimierungsmodells vollständig zu übernehmen. Vielmehr kommt es auf pragmatische Lösungen an, die dem Grundgedanken der allgemeinen Erkenntnisse Rechnung tragen und differenziertere Entscheidungen als eine kontinuierliche Reifegraderhöhung bzw. Reifegradmaximierung ermöglichen.

Sollten reale Funktionsverläufe von den idealtypischen Funktionseigenschaften abweichen oder sich Schwierigkeiten bei der Ermittlung stetiger Funktionsverläufe ergeben, dann kann bspw. eine diskrete Variante des Optimierungsmodells angewandt werden. Schlimmstenfalls wären dann für alle Kombinationen an pro Prozess bzw. Prozessgruppe möglichen Verbesserungsmaßnahmen bzw. -projekten die gesamten zusätzlichen Zahlungsüberschüsse zu berechnen. Sollte die Datenbeschaffung für Ein- und Auszahlungswerte Schwierigkeiten bereiten, so kann auf nichtmonetäre Analysemethoden wie bspw. Punktwertverfahren zurückgegriffen werden.

Aus Sicht der Autoren sollte bei der praktischen Anwendung der Unterschied zwischen Investitions- und Betriebsperspektive einerseits sowie Prozessgebiet- und Leistungserstellungssystemebene andererseits bedacht werden. Zudem ist zu bedenken, dass wegen der mangelnden verursachungsgerechten Zuordenbarkeit von Einzahlungen zu Prozessgebieten eine Betrachtung auf Leistungserstellungssystemebene zu erfolgen hat. Wissen über potenzielle Synergieeffekte und die individuelle Bedeutung einzelner Prozesse bzw. Prozessgruppen für die Leistungserstellung erhöht die Entscheidungsqualität zusätzlich. Die Unterscheidung zwischen Investitions- und Betriebsperspektive bzw. Prozessgebiet- und Leistungserstellungssystemebene kann genutzt werden, um (Prozess-) Verbesserungsmaßnahmen im Allgemeinen zu bewerten und zu priorisieren. Hierfür sind die zu untersuchenden Verbesserungsmaßnahmen vorab in eine inhaltliche Reihenfolge zu bringen und die zugrunde gelegten Funktionsverläufe auf Gültigkeit zu prüfen. Dadurch erhöht sich nicht nur die Transparenz solcher Entscheidungen, sondern auch deren Ausrichtung an den übergeordneten Unternehmenszielen.

Abschließend ist festzuhalten, dass mithilfe des Optimierungsmodells allgemeine und ökonomisch fundierte Erkenntnisse hinsichtlich der für Prozesse bzw. Prozessgruppen anzustrebenden Reifegrade – also dem „*where to go*“ – gewonnen werden konnten. Dadurch reduzieren sich die in der Praxis bestehende Bewertungsunsicherheit und die Gefahr von Fehlinvestitionen. Zudem dient das Optimierungsmodell als Schablone für wertorientierte Entscheidungen im Prozessmanagement und bildet einen Ausgangspunkt für künftige Forschungsarbeiten.



## Literatur

- Albach H (2001) Shareholder Value und Unternehmenswert - Theoretische Anmerkungen zu einem aktuellen Thema. Zeitschrift für Betriebswirtschaft 71(6):643-674
- Ashrafi N (2003) The impact of software process improvement on quality: in theory and practice. Information & Management 40(7):677-690
- Balzert H (1998) Lehrbuch der Software-Technik. Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung. Spektrum, Heidelberg
- Bamberg G, Dorfleitner G, Krapp M (2006) Unternehmensbewertung unter Unsicherheit: Zur entscheidungstheoretischen Fundierung der Risikoanalyse. Zeitschrift für Betriebswirtschaft 76(3):287-307
- Bamberg G, Dorfleitner G, Krapp M (2004) Zur Bewertung risikobehafteter Zahlungsströme mit intertemporaler Abhängigkeitsstruktur. Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis 56(2):101-118
- Baur A, Merten T, Lörcher M (2005) Handlungsanleitung zur Entwicklung der Prozessreife in prozessorientierten Unternehmen. WEKA MEDIA, Kissing
- Becker J, Knackstedt R, Pöppelbuß J (2009) Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management: Vorgehensmodell und praktische Anwendung. WIRTSCHAFTSINFORMATIK 51(3):249-260
- Becker J, Niehaves B, Pöppelbuß J, Simons A (2010) Maturity Models in IS Research. In: Johnson R, De Villiers C (eds) Proceedings of the 18th European Conference on Information Systems, Pretoria
- Benbasat I, Dexter A, Drury D, Goldstein R (1984) A Critique of the Stage Hypothesis: Theory and Empirical Evidence. Communications of the ACM 27(5):466-475
- Bernecker M, Eckrich K (2003) Handbuch Projektmanagement. Oldenbourg, München
- Boehm BW, Abts C, Windsor Brown A, Chulani S, Clark BK, Horowitz E, Madachy R, Reifer D, Steece B (2000) Software Cost Estimation with COCOMO II. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey
- BPM&O Architects (2010) Umfrage Status Quo Prozessmanagement 2009/2010. [http://www.bpmo.de/bpmo/export/sites/default/de/know\\_how/downloads/Status\\_Quo\\_Prozessmanagement\\_2009-2010.pdf](http://www.bpmo.de/bpmo/export/sites/default/de/know_how/downloads/Status_Quo_Prozessmanagement_2009-2010.pdf). Abruf am 2011-03-07
- Buhl HU, Röglinger M, Stöckl S, Braunwarth K (2011) Wertorientierung im Prozessmanagement – Forschungslücke und Beitrag zu betriebswirtschaftlich fundierten Prozessmanagement-Entscheidungen. WIRTSCHAFTSINFORMATIK 53(3):163-172
- Burnstein I, Suwanassart T, Carlson CR (1996) Developing a Testing Maturity Model for software test processevaluation and improvement. In: Proceedings of the 9th International Quality Week Conference, San Francisco. S 581-589
- Capgemini (2006) Trends in der Versicherungswirtschaft - Industrialisierung nimmt Gestalt an. [http://origin.at.capgemini.com/m/at/tl/Trends\\_in\\_der\\_Versicherungswirtschaft.pdf](http://origin.at.capgemini.com/m/at/tl/Trends_in_der_Versicherungswirtschaft.pdf). Abruf am 2011-26-04
- Coenenberg AG, Mattner GR, Schultze W (2003) Wertorientierte Steuerung: Anforderungen, Konzepte, Anwendungsprobleme. In: Rathgeber A, Tebroke H, Wallmeier M (eds) Finanzwirtschaft, Kapitalmarkt und Banken. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, S 1-24

- Coenenberg AG, Salfeld R (2007) Wertorientierte Unternehmensführung: Vom Strategieentwurf zur Implementierung. 2. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Coenenberg AG, Schultze W (2002) Unternehmensbewertung: Konzeptionen und Perspektiven. Die Betriebswirtschaft 62(6):597-621
- Copeland TE, Koller T, Murrin J (1990) Valuation: measuring and managing the value of companies. Wiley, New York
- Covey R, Hixon D (2005) The Creation and Use of an Analysis Capability Maturity Model. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA436426>. Abruf am 2010-07-17
- Crawford JK (2006) The Project management maturity model. Information Systems Management 23(4):50-58
- Danielson MG, Heck JL, Shaffer DR (2008) Shareholder Theory - How Opponents and Proponents Both Get It Wrong. Journal of Applied Finance 18(2):62-66
- de Bruin T, Freeze R, Kulkarni U, Rosemann M (2005) Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. In: Proceedings of the 16th Australasian Conference on Information Systems, Sydney
- de Bruin T, Rosemann M (2007) Using the Delphi technique to identify BPM capability areas. In: Proceedings of the 18th Australasian Conference on Information Systems (ACIS), Toowoomba
- Diekmann A (2009) Empirische Sozialforschung. 20. Aufl.,rororo, Hamburg
- Drukarczyk J (1997) Wertorientierte Unternehmenssteuerung. Besprechung des Shareholder-Value-Ansatzes von Rappaport. Zeitschrift für Bankrecht und Bankwirtschaft 9(3):217-226
- Fandel G, Fey A, Heuft B, Pitz T (2007) Kostenrechnung. 2. Aufl., Springer, Berlin
- Fiedler FE (1964) A Contingency Model of Leadership Effectiveness. Advances in Experimental Social Psychology 1:149-190
- Foegen, M, Battenfeld, J, Raak, C (2007) CMMI-ein Werkzeug zur Prozessverbesserung. <http://www.computerwoche.de/management/it-strategie/590892>. Abruf am 2010-03-19
- Fraser P, Moultrie J, Gregory M (2002) The use of maturity models/grids as a tool in assessing product development capability. In: IEEE International Engineering Management Conference, Cambridge, S 244-249
- Gartner (2010) Leading in Times of Transition: The 2010 CIO Agenda. [http://drishtikone.com/files/2010CIOAgenda\\_ExecSummary.pdf](http://drishtikone.com/files/2010CIOAgenda_ExecSummary.pdf). Abruf am 2010-06.04
- Gneiser M (2010) Value-Based CRM - The Interaction of the Triad of Marketing, Financial Management, and IT. Business & Information Systems Engineering 2(2):95-103
- Gossen HH (1854) Entwicklung der Gesetze des menschlichen Verkehrs, und der daraus fließenden Regeln für menschliches Handeln. Vieweg, Braunschweig
- Gottschalk P (2009) Maturity levels for interoperability in digital government. Government Information Quarterly 26(1):75-81
- Greb T, Kneuper R (2010) Unternehmenszielorientierte Prozessverbesserung mit CMMI. HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik (273):97-105
- Hammer M (2010) What is Business Process Management? In: vom Brocke J, Rosemann M (eds) Handbook on Business Process Management 1. Introduction, Methods, and Information Systems. Springer, Heidelberg, S 3-16

- Hammer M (2007) Der große Prozess-Check. *Harvard Business Manager* 29(5):35-52
- Harmon, P (2009) Process Maturity Models. [http://www.bptrends.com/publicationfiles/spotlight\\_051909.pdf](http://www.bptrends.com/publicationfiles/spotlight_051909.pdf). Abruf am 2011-07-19
- Heidemann J, Kamprath N, Müller A (2011) Die Integration des Kunden in Geschäftsprozesse – ein ökonomisches Modell und dessen Anwendung am Beispiel eines Versicherungsunternehmens. In: Bernstein A, Schwabe G (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Wirtschaftsinformatik*, Zürich, S 119-128
- Hood C, Wiebel R (2009) *Optimieren von Requirements Management & Engineering mit dem HOOD Capability Model*. Springer, Berlin
- Hörmann K, Dittmann L, Hindel B, Müller M (2006) *SPICE in der Praxis*. dpunkt.verlag, Heidelberg
- Huang S, Han W (2006) Selection priority of process areas based on CMMI continuous representation. *Information & Management* 43(3):297-307
- IT Governance Institute (2009) *CobIT 4.0 - Deutsche Ausgabe*. [http://www.isaca.ch/files/DO5\\_COBIT/CobIT%204.0%20Deutsch.pdf](http://www.isaca.ch/files/DO5_COBIT/CobIT%204.0%20Deutsch.pdf). Abruf am 2010-06-04
- Iversen J, Nielsen PA, Norbjerg J (1999) Situated assessment of problems in software development. *The DATA BASE for Advances in Information Systems* 30(2):66-81
- Jiang J, Klein G, Hwang H, Huang J, Hung S (2004) An exploration of the relationship between software development maturity and project performance. *Information & Management* 31(3):279-288
- Kamprath N, Röglinger M (2011) Ökonomische Planung von Prozessverbesserungsmaßnahmen – Ein modelltheoretischer Ansatz auf Grundlage CMMI-basierter Prozessreifeegradmodelle. In: Bernstein A, Schwabe G (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Wirtschaftsinformatik*, Zürich, S 109-118
- Kaplan RS, Norton DP (1996) *The Balanced Scorecard: Translating Strategy Into Action*. Harvard Business School Press, Boston
- Kazanjian K, Drazin R (1989) An empirical test of a stage of growth progression model. *Management Science* 35(12):1489-1503
- King JL, Kraemer KL (1984) Evolution and organizational information systems: an assessment of Nolan's stage model. *Communications of the ACM* 27(5):466-475
- Klein R, Scholl A (2004) *Planung und Entscheidung*. Vahlen, München
- Kneuper R (2005) CMMI zur Lieferantenauswahl - Bewertung von Assessmentergebnissen. *HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik* (246):93-103
- Kulkarni U, Freeze R (2004) Development and validation of a knowledge management capability assessment model. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Information Systems*. Washington, S 657-670
- Macharzina K, Neubürger H (2002) Wertorientierte Unternehmensführung. In: 55. Deutscher Betriebswirtschaftler-Tag, Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Mathiassen L, Sorensen C (1996) The capability maturity model and CASE. *Information Systems Journal* 6(3):195-208
- McKinsey (2008) *Global Survey Results. IT's unmet potential*. McKinsey Quarterly 17(4):1-9
- Mertens P (1996) Process Focus Considered Harmful? *WIRTSCHAFTSINFORMATIK* 38(4):446-447

- Mettler T (2011) Maturity Assessment Models: A Design Science Research Approach. *International Journal of Society Systems Science* 3(1/2):81-98
- Mettler T, Rohner P (2009) Situational maturity models as instrumental artifacts for organizational design. In: Vaishnavi V, Purao S (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology*, Philadelphia
- Mettler T, Rohner P, Winter R (2010) Towards a Classification of Maturity Models in Information Systems. In: D'Atri A, De Marco M, Braccini AM, Cabiddu F (eds) *Management of the Interconnected World*. Springer, S 333-340
- Mithas S, Ramasubba N, Sambamurthy V (2011) How Information Management Capability Influences Firm Performance. *MIS Quarterly* 35(1):237-256
- Nolan R (1973) Managing the computer resource: a stage hypothesis. *Communications of the ACM* 16(7):399-405
- Object Management Group (2007) *Business Process Maturity Model (BPMM), Beta 1*. <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?dte/2007-07-02>. Abruf am 2010-03-19
- Paulk MC, Curtis B, Chrissis MB, Weber CV (1993) Capability maturity model, version 1.1. *IEEE Software* 10(4):18-27
- Perridon L, Steiner M, Rathgeber A (2009) *Finanzwirtschaft der Unternehmung*. 15. Aufl., Vahlen, München
- Pöppelbuß J, Röglinger M (2011) What makes a useful maturity model? A framework for general design principles for maturity models and its demonstration in business process management. In: *Proceedings of the 19th European Conference on Information Systems*, Helsinki
- Prananto A, McKay J, Marshall P (2003) A study of the progression of e-business maturity in Australian SMEs: Some evidence of the applicability of the stages of growth for e-business model. In: *Proceedings of the PACIS*, Adelaide S 68-80
- Purvis R, Santiago J, Sambamurthy V (1998) An analysis of excluded IS processes in the capability maturity model and their potential impact. *Journal of End User Computing* 10(1):20-29
- Ramasubba N, Mithas S, Kemerer C (2008) Work Dispersion, Process-based Learning, and Offshore Software Development Performance. *MIS Quarterly* 32(2):437-458
- Rappaport A (1986) *Creating Shareholder Value: the new standard for business performance*. Free Press, New York
- Raschke RL, Ingraham LR (2010) Business Process Maturity's Effect on Performance. In: *Proceedings of the 16th Americas Conference on Information Systems*, Lima
- Renken J (2004) Developing an IS/ICT management capability maturity framework. In: South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists (eds) *Proceedings of the 2004 annual research conference of the South African institute of computer scientists and information technologists on IT research in developing countries*. South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists, Republic of South Africa, S 53-62
- Rieger W (1928) *Einführung in die Privatwirtschaftslehre*. Krische, Nürnberg
- Rohloff M (2009) Case Study and Maturity Model for Business Process Management Implementation. *Business Process Management LNCS* 5701128-142
- Rosemann M, de Bruin T (2005) Towards a business process management maturity model. In: Bartmann D, Rajola F, Kallinikos J, Avison D, Winter R, Ein-Dor P, Becker J, Bodendorf F,

- Weinhardt C (eds) Proceedings of the 13th European Conference on Information Systems, Regensburg, S 521-532
- Rosemann M, vom Brocke J (2010) The Six Core Elements of Business Process Management. In: vom Brocke J, Rosemann M (eds) Handbook on Business Process Management 1. Springer, Berlin, S 107-122
- Schmelzer HJ, Sesselmann W (2008) Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. 6. Aufl., Hanser, München
- Schultze W, Hirsch C (2005) Unternehmenswertsteigerung durch wertorientiertes Controlling. Vahlen, München
- Scott JE (2007) Mobility, business process management, software sourcing, and maturity model trends: propositions for the IS organization of the future. Information Systems Management 24(2):139-145
- Software Engineering Institute (2009a) CMMI for Services, Version 1.2. <http://www.sei.cmu.edu/reports/09tr001.pdf>. Abruf am 2009-06-04
- Software Engineering Institute (2009b) People CMM, Version 2.0. <http://www.sei.cmu.edu/reports/09tr003.pdf>. Abruf am 2010-03-01
- Software Engineering Institute (2007) CMMI for Acquisition, Version 1.2. <http://www.sei.cmu.edu/reports/07tr017.pdf>. Abruf am 2010-03-01
- Software Engineering Institute (2006) CMMI for Development, Version 1.2. <http://www.sei.cmu.edu/cmmi/tools/dev>. Abruf am 2010-03-01
- Steiner M, Bruns C (2007) Wertpapiermanagement. 9. Aufl., Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart
- Stewart GB, Stern JM (1991) The quest for value: the EVA management guide. 27. Aufl., HarperBusiness, New York
- Stutz M, Aier S (2008) Vorgehensmodell zur fachlichen Bewertung serviceorientierter Architekturen. In: Bichler M, Hess T, Krcmar H, Lechner U, Matthes F, Picot A (eds) Multikonferenz Wirtschaftsinformatik. GITO, Berlin, S 989-999
- Tat Sze C, Müller M (2009) Reifegradmodell verbindet Prozesse mit Geschäftszielen. Qualität und Zuverlässigkeit 54(1):21-25
- van de Ven A, Poole MS (1995) Explaining Development and Change in Organizations. Academy of Management Review 20(3):510-540
- van Steenbergem M, Bos R, Brinkkemper S, van de Weerd I, Bekkers W (2010) The Design of Focus Area Maturity Models. In: Winter R, Zhao L, Aier S (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology. Springer, Heidelberg, S 317-332
- Varian HR (2007) Grundzüge der Mikroökonomik. 7. Aufl., Oldenbourg, München
- Visconti M, Cook C (1993) Software system documentation process maturity model. In: Proceedings of the 1993 ACM conference on Computer science. ACM, New York, 352-357
- Vitharana P, Mone M (2008) Measuring critical factors of software quality management: development and validation of an instrument. Information Resources Management Journal 21(2):18-37
- vom Brocke J, Becker J, Braccini AM, Butleris R, Hofreiter B, Kapočius K, De Marco M, Schmidt G, Seidel S, Simons A, Skopal T, Stein A, Stieglitz S, Suomi R, Vossen G, Winter R,

Wrycza S (2011) Current and future issues in BPM research: a European perspective from the ERCIS meeting 2010. *Communications of the AIS* 28(1):393-414

vom Brocke J, Sonnenberg C, Simons A (2009) Wertorientiertes Prozessmanagement: State-of-the-Art und zukünftiger Forschungsbedarf. In: Hansen HR, Karagiannis D, Fill HG (eds) *Business Services: Konzepte, Technologien, Anwendungen*. Proceedings der 9. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik. Österreichische Computer Gesellschaft, Wien, S 253-262

Wade M, Hulland J (2004) The Resource-Based View and Information Systems Research: Review, Extension, and Suggestions for Future Research. *MIS Quarterly* 28(1):107-142

Wagner KW, Dürr W (2008) Reifegrad nach ISO/IEC 15504 (SPICE) umsetzen. Carl Hanser, München

Wilde T, Hess T (2007) Forschungsmethoden der Wirtschaftsinformatik - Eine empirische Untersuchung. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK* 49(4):280-287

Wolf C, Harmon P (2010): The State of Business Process Management 2010. [http://www.bptrends.com/members\\_surveys/deliver.cfm?report\\_id=1004&target=2009%20BPTrends%20State%20of%20Market%20Rept%20-FINAL%20PDF%20CAP%202-1-10.pdf&return=surveys\\_landing.cfm](http://www.bptrends.com/members_surveys/deliver.cfm?report_id=1004&target=2009%20BPTrends%20State%20of%20Market%20Rept%20-FINAL%20PDF%20CAP%202-1-10.pdf&return=surveys_landing.cfm). Abruf am 2011-07-22

Zwicker J, Fettke P, Loos P (2010) Business Process Maturity in Public Administration. In: vom Brocke J, Rosemann M (eds) *Handbook on Business Process Management 2*. Springer, Heidelberg, S 369-400

### **Business process improvement with maturity models – An analysis of economic relationships**

**Abstract:** Since the Software Engineering Institute has published the Capability Maturity Model in 1991, maturity models evolved into a commonly used instrument for assessing the state of a specific class of objects and for identifying improvement measures. As process improvement is a core task of business process management and takes top positions on CIO agendas, maturity models are prospering in this domain as well. However, it remains unclear which maturity levels should be aspired for distinct processes or process groups. Numerous companies strive for increasing or even maximizing maturity levels. Some maturity model specifications contain oppositional advice, but lack concrete recommendations. Even academia provides no answers. Against this background, we propose a mathematical optimization model that builds on insights from value-based management in order to analyze general economic relationships of process improvement with maturity models. The guiding effects of these relationships are illustrated using the example of “CMMI for Services”. We conclude by discussing limitations and by pointing out theoretical as well as managerial implications.

**Keywords:** Continuous process improvement, Optimization model, Business process management, Maturity Model, Value-based Management

## Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen – Eine Analyse ökonomischer Zusammenhänge

(Anhang)

### Anhang A: Analyse der Krümmung von $CF(\overline{\Delta m})$

Als Optimalitätsbedingung zweiter Ordnung ist die Krümmung von  $CF(\overline{\Delta m})$  zu untersuchen. Dazu sind zunächst die zweiten partiellen Ableitungen zu bilden (siehe Anhang B).

$$\forall 1 \leq i, j \leq n \wedge i \neq j: \frac{\partial^2 CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} = \frac{\partial^2 I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial^2 \Delta m} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_j}$$

$$\forall 1 \leq i \leq n: \frac{\partial^2 CF(\overline{\Delta m})}{\partial^2 \Delta m_i} = \frac{\partial^2 I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial^2 \Delta m} \cdot \left( \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \right)^2 - \frac{\partial^2 O_{i|m_i}^{\text{op cur}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i}^{\text{invest cur}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i}$$

Es fällt auf, dass sich die zweiten partiellen Ableitungen nur dahingehend unterscheiden, ob zweimal nach derselben Prozessgebiet-Reifegraderhöhung oder nach zwei unterschiedlichen Prozessgebiet-Reifegraderhöhungen differenziert wird. Da es sich bei den ersten partiellen Ableitungen von  $f(\overline{\Delta m})$  um Konstanten positiven Vorzeichens ohne Einfluss auf die Krümmung von  $CF(\overline{\Delta m})$  handelt (siehe Anhang C), ist folgende Kurzschreibweise möglich:

$$\forall 1 \leq i, j \leq n: \frac{\partial^2 I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial^2 \Delta m} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_j} \stackrel{\text{def}}{=} x$$

$$\forall 1 \leq i \leq n: \frac{\partial^2 O_{i|m_i}^{\text{op cur}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} + \frac{\partial^2 O_{i|m_i}^{\text{invest cur}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} \stackrel{\text{def}}{=} y_i$$

Für die Hesse-Matrix an einer beliebigen, aber festen Stelle  $\overline{\Delta m} = (\Delta m_1, \dots, \Delta m_n)^T$  gilt:

$$H_{CF}(\overline{\Delta m}) = \begin{pmatrix} x - y_1 & \dots & x \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x & x & x - y_n \end{pmatrix}$$

Aufgrund von (A.4) bis (A.6) gilt  $x < 0$  und  $y_j > 0$  ( $1 \leq j \leq n$ ). Alle Elemente der Hesse-Matrix sind somit negativ. Durch vollständige Induktion lässt sich beweisen, dass die Hauptunterdeterminanten wie folgt berechnet werden können (siehe Anhang D). Dabei bezeichnen die  $H_{CF,k}$  die oberen linken  $k \times k$ -Hauptuntermatrizen von  $H_{CF}(\overline{\Delta m})$ .

$$\det(H_{CF,k}) = (-1)^{k+1} \cdot \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j \right) + (-1)^k \cdot \prod_{j=1}^k y_j$$



Beide Summanden sind positiv für gerade  $k$  und negativ für ungerade  $k$ . Dies gilt somit für den gesamten Term, weswegen die Vorzeichen der Hauptunterdeterminanten alternieren. Die Hesse-Matrix ist somit an einer beliebigen, aber festen Stelle  $\overline{\Delta m}$  und damit im gesamten Definitionsbereich negativ definit (vgl. Opitz 2004). Entsprechend ist  $CF(\overline{\Delta m})$  im gesamten Definitionsbereich streng konkav. Daraus folgt, dass  $CF^*(\overline{\Delta m}^*)$  die einzige Extremstelle und ein Zahlungsüberschussmaximum ist.

## Anhang B: Ermittlung der partiellen Ableitungen von $CF(\overline{\Delta m})$

Ausgangspunkt ist Gleichung (7):

$$CF(\overline{\Delta m}) = I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m})) - \sum_{i=1}^n O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i) - \sum_{i=1}^n O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)$$

### 1. Ermittlung der ersten partiellen Ableitungen

$$\begin{aligned} \frac{\partial CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} &= \frac{\partial I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m_i} - \frac{\partial O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i} - \frac{\partial O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i} = \\ &= \frac{\partial I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} - \frac{\partial O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i} - \frac{\partial O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i} \end{aligned}$$

Hinweis: Die zweite Zeile ergibt sich durch Anwendung der Kettenregel.

### 2. Ermittlung der zweiten partiellen Ableitungen

a) Für  $\frac{\partial^2 CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j}$  mit  $1 \leq i, j \leq n$  und  $i \neq j$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 CF(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} &= \frac{\frac{\partial I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m} \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i}}{\partial \Delta m_j} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i\text{cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} = \\ &= \frac{\partial^2 I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m \partial \Delta m_j} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} + \frac{\partial I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m} \cdot \frac{\partial^2 f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} = \\ &= \frac{\partial^2 I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial^2 \Delta m} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_j} + \frac{\partial I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m} \cdot \frac{\partial^2 f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} = \\ &= \frac{\partial^2 I_{m\text{cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial^2 \Delta m} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_j} \end{aligned}$$

Hinweis: Die Subtrahenden aus Zeile 1 entfallen, da sie wegen  $i \neq j$  wie Konstanten abgeleitet werden. Die zweite Zeile ergibt sich durch Anwendung der Produktregel, die dritte Zeile durch Anwendung der Kettenregel. Der zweite Summand aus Zeile 3 entfällt, da alle zweiten partiellen Ableitungen von  $f(\overline{\Delta m})$  null sind (siehe Anhang C).



b) Für  $\frac{\partial^2 CF(\overline{\Delta m})}{\partial^2 \Delta m_i}$  mit  $1 \leq i \leq n$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 CF(\overline{\Delta m})}{\partial^2 \Delta m_i} &= \frac{\frac{\partial I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i}}{\partial \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} = \\
 &= \frac{\partial^2 I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m \partial \Delta m_i} \cdot \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} + \frac{\partial I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m} \cdot \frac{\partial^2 f(\overline{\Delta m})}{\partial^2 \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} = \\
 &= \frac{\partial^2 I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial^2 \Delta m} \cdot \left( \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \right)^2 + \frac{\partial I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial \Delta m} \cdot \frac{\partial^2 f(\overline{\Delta m})}{\partial^2 \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} = \\
 &= \frac{\partial^2 I_{m \text{ cur}}^{\text{op}}(f(\overline{\Delta m}))}{\partial^2 \Delta m} \cdot \left( \frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} \right)^2 - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{op}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i} - \frac{\partial^2 O_{i|m_i \text{ cur}}^{\text{invest}}(\Delta m_i)}{\partial^2 \Delta m_i}
 \end{aligned}$$

Hinweis: Die zweite Zeile ergibt sich durch Anwendung der Produktregel, die dritte Zeile durch Anwendung der Kettenregel. Der zweite Summand aus Zeile 3 entfällt, da alle zweiten partiellen Ableitungen von  $f(\overline{\Delta m})$  null sind (siehe Anhang C).

### Anhang C: Ermittlung der partiellen Ableitungen von $f(\overline{\Delta m})$

Ausgangspunkt ist Gleichung (1):

$$f(\overline{\Delta m}) = \sum_{i=1}^n \Delta m_i \cdot s_{ii} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^{i,j=n} (\Delta m_i + \Delta m_j) \cdot s_{ij}$$

1. Ermittlung der ersten partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i} = s_{ii} + \sum_{j=i+1}^{j=n} s_{ij} + \sum_{j=1}^{j=i-1} s_{ji}$$

Hinweis: Anschaulich werden in den ersten partiellen Ableitungen folgende Werte der Synergieeffekt-Matrix zu  $s_{ii}$  addiert: alle Werte der  $i$ -ten Zeile ab der  $(i+1)$ -ten Spalte sowie alle Werte der  $i$ -ten Spalte bis zur  $(i-1)$ -ten Zeile.

2. Ermittlung der zweiten partiellen Ableitungen (mit  $1 \leq i, j \leq n$ )

$$\frac{\partial^2 f(\overline{\Delta m})}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} = 0$$

## Anhang D: Ermittlung der Hauptunterdeterminanten $\det(H_{CF,k})$

Um eine geschlossene Formel zur Ermittlung der Hauptunterdeterminanten zu finden, erweist es sich als hilfreich, zunächst ein Beispiel für ein kleines  $n$  zu betrachten:

Beispiel:  $n = 3$

$$H_{CF}(\overline{\Delta m}) = \begin{pmatrix} x - y_1 & x & x \\ x & x - y_2 & x \\ x & x & x - y_3 \end{pmatrix}$$

$$\det(H_{CF,1}) = x - y_1$$

$$\det(H_{CF,2}) = -xy_1 - xy_2 + y_1y_2$$

$$\det(H_{CF,3}) = xy_1y_2 + xy_1y_3 + xy_2y_3 - y_1y_2y_3$$

Das Beispiel legt folgende Vermutung nahe: Die Hauptunterdeterminante  $\det(H_{CF,k})$  umfasst einen Summanden, der aus dem  $k$ -elementigen Produkt der  $y_j$  besteht ( $1 \leq j \leq k$ ). Das Vorzeichen dieses Summanden ist negativ für ungerade  $k$ , positiv für gerade  $k$ . Die Hauptunterdeterminante umfasst zudem  $k$  weitere Summanden, von denen jeder das Produkt aus  $x$  und  $(k-1)$  unterschiedlichen  $y_j$  darstellt ( $1 \leq j \leq k$ ). Das Vorzeichen jedes dieser Summanden ist positiv für ungerade  $k$ , negativ für gerade  $k$ . Wird  $k$  um 1 erhöht, so wird  $\det(H_{CF,k})$  zum einen mit  $(-1)$  und mit  $y_{k+1}$  multipliziert. Zum anderen kommt ein neuer Summand hinzu, der aus dem Produkt von  $x$  mit den ersten  $k$   $y_j$  besteht ( $1 \leq j \leq k$ ). Das Vorzeichen dieses Summanden ist positiv für gerade  $k$ , negativ für ungerade  $k$ .

Träfe diese Vermutung zu, so ließen sich die Hauptunterdeterminanten  $\det(H_{CF,k})$  der  $n \times n$ -Matrix  $H_{CF}(\overline{\Delta m})$  für beliebige  $k \in \mathbb{N}$  ( $k \leq n$ ) anhand folgender Formel berechnen:

$$\det(H_{CF,k}) = (-1)^{k+1} \cdot \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j \right) + (-1)^k \cdot \prod_{j=1}^k y_j$$

Die allgemeine Gültigkeit dieser Formel lässt sich wie folgt durch vollständige Induktion beweisen:

Basisschritt:

$$\det(H_{CF,1}) = (-1)^{1+1} \cdot \sum_{i=1}^1 \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^1 y_j \right) + (-1)^1 \cdot \prod_{j=1}^1 y_j = x - y_1$$

Induktiver Schritt:  $\det(H_{CF,k}) = \det(H_{CF,k+1})$

$$\det(H_{CF,k}) = (-1)^{k+1} \cdot \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j \right) + (-1)^k \cdot \prod_{j=1}^k y_j \Rightarrow$$

$$\det(H_{CF,k+1}) = (-1)^{k+2} \cdot \sum_{i=1}^{k+1} \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{k+1} y_j \right) + (-1)^{k+1} \cdot \prod_{j=1}^{k+1} y_j$$

Beweis:

$$\det(H_{CF,k+1}) = \det(H_{CF,k}) \cdot (-1) \cdot y_{k+1} + (-1)^k \cdot x \cdot \prod_{j=1}^k y_j =$$

$$= \left[ (-1)^{k+1} \cdot \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j \right) + (-1)^k \cdot \prod_{j=1}^k y_j \right] \cdot (-1) \cdot y_{k+1} + (-1)^k \cdot x \cdot \prod_{j=1}^k y_j =$$

$$= \left[ (-1)^{k+2} \cdot y_{k+1} \cdot \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j \right) + (-1)^{k+1} \cdot y_{k+1} \cdot \prod_{j=1}^k y_j \right] + (-1)^k \cdot x \cdot \prod_{j=1}^k y_j =$$

$$= \left[ (-1)^{k+2} \cdot y_{k+1} \cdot \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j \right) + (-1)^k \cdot x \cdot \prod_{j=1}^k y_j \right] + (-1)^{k+1} \cdot y_{k+1} \cdot \prod_{j=1}^k y_j$$

Da  $(-1)^k = (-1)^{k+2}$ , kann die Gleichung wie folgt transformiert werden:

$$\det(H_{CF,k+1}) = (-1)^{k+2} \cdot \left[ y_{k+1} \cdot \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j \right) + x \cdot \prod_{j=1}^k y_j \right] + (-1)^{k+1} \cdot \prod_{j=1}^{k+1} y_j =$$

$$\begin{aligned}
&= (-1)^{k+2} \cdot \left[ \sum_{i=1}^k \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{k+1} y_j \right) + x \cdot \prod_{j=1}^k y_j \right] + (-1)^{k+1} \cdot \prod_{j=1}^{k+1} y_j = \\
&= (-1)^{k+2} \cdot \sum_{i=1}^{k+1} \left( x \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{k+1} y_j \right) + (-1)^{k+1} \cdot \prod_{j=1}^{k+1} y_j
\end{aligned}$$

q. e. d.

Somit ist  $\det(H_{CF,k})$  gemäß obiger Formel wahr für alle  $k \in \mathbb{N}$  (mit  $k \leq n$ ).

## Literatur

Opitz O (2004) Mathematik: Lehrbuch für Ökonomen. 9. Aufl., Oldenbourg, München