



FAKULTÄT II – INFORMATIK, WIRTSCHAFTS- UND RECHTSWISSENSCHAFTEN
DEPARTMENT FÜR INFORMATIK

Verteilte kontinuierliche Einsatzplanung in Dynamischen Virtuellen Kraftwerken

Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Astrid Nieße

Gutachter:

Prof. Dr. Michael Sonnenschein
Prof. Dr. Dr. h. c. H.-Jürgen Appelrath
Prof. Dr. Hermann de Meer

Tag der Disputation: 17. April 2015

VORWORT

Vielen Menschen gebührt Dank für die Unterstützung und Begleitung bei der Erarbeitung dieser Dissertation, die ich im Rahmen meiner Tätigkeit am OFFIS – Institut für Informatik in Oldenburg anfertigen durfte.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Michael Sonnenschein danke ich ganz herzlich für die konstruktive Zusammenarbeit und kontinuierliche Betreuung. Er war für mich der perfekte PhD-Supervisor, der am Ende den Namen Doktorvater nicht nur nicht mehr scheute, sondern mehr als verdient: Herzlichen Dank!

Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. H.-Jürgen Appelrath danke ich für die uneingeschränkt vertrauensvolle Zusammenarbeit seit 2007 bis hin zur Übernahme der Gutachterrolle im Promotionsverfahren. Es ist nur möglich, sich eigenständig weiterzuentwickeln, wenn der Rahmen nicht zu eng gefasst wird und Freiheitsgrade genutzt werden dürfen. Herzlichen Dank auch an Herrn Dr. Christoph Mayer, der als Bereichsleiter im OFFIS wesentlichen Anteil an diesen Freiheitsgraden hatte. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nebel danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und für die aufmerksame Begleitung seit meiner ersten Tätigkeit bei der ChipVision Design Systems AG. Herr Prof. Dr. Hermann de Meer von der Universität Passau hat als externer Gutachter die Arbeit bewertet und wichtige Aspekte hinterfragt – für beides möchte ich mich herzlich bedanken. Herrn Dr.-Ing. Wilko Heuten danke ich für die Bereitschaft, sich als Mitglied der Prüfungskommission in das Promotionsverfahren einzubringen.

Vielen Kolleginnen und Kollegen möchte ich danken (die Unvollständigkeit dieser Liste sei mir schon jetzt verziehen): Dem Team aus Smart Nord, das sich immer wieder auf Begriffs- und Prozessdiskussionen eingelassen hat, sowie der ganzen damaligen Gruppe Energiemanagement und heutigen Gruppe Selbstorganisation und verteilte Optimierung im OFFIS-Forschungs- und Entwicklungsbereich Energie. Malte Otten und Marina Borchers haben durch ihre Abschlussarbeiten an der Konzeption der kontinuierlichen Einsatzplanung Anteil – vielen Dank für das gemeinsame Prüfen und Diskutieren von Wegen und Irrwegen.

Martin Tröschel hat als Kollege, Gruppenleiter und Freund die meisten Höhen und Tiefen begleitet. Natürlich hatte er Recht – am Ende hat man vor allem viel über sich selbst gelernt, und das wiegt wohl schwerer als die verteilten Algorithmen. Ohne die pragmatische Weisheit meines ehemaligen Kollegen Ontje Lünsdorf hätte ich versucht, viele Probleme zu lösen, die ich noch gar nicht hatte, und ohne Marita Blank, Stefan Scherfke und Carsten Wissing zu wenig gelacht, hinterfragt und verstanden. Christian Hinrichs hat mir geduldig

jede Nachfrage zu seiner Dissertation, auf der ich inhaltlich aufbauen durfte, beantwortet, überraschende Ergebnisse von allen Seiten mit mir beleuchtet sowie die KOMA-Script- und L^AT_EX-basierte Vorlage zu dieser Ausarbeitung zur Verfügung gestellt – herzlichen Dank. Ute Vogel danke ich für den beruhigenden Tee und die guten Gespräche in den entscheidenden Stunden des Zweifels. Jörg Bremer hat mich in den letzten Monaten der Schreibarbeit als Bürokollegin ertragen – für die Ruhe und die Komik zwischendurch sei ihm herzlich gedankt.

Meiner ehemalige Kollegin Ulrike Steffens möchte ich dafür danken, dass sie mich zur Bewerbung im OFFIS ermuntert hat, mich vor allem in der ersten harten Zeit der Gruppenleitung moralisch unterstützt hat und darin bestärkt hat, mich an dieses Projekt zu wagen.

Meinen Freundinnen Annabelle Jandrich, Jessica Lange und Karin Dedek danke ich dafür, dass sie mir die Nerven immer wieder beruhigt haben, wenn sie allzu blank lagen, und gleichzeitig mein Eremitentum in der Zeit des Schreibens geduldig ertragen haben. Allen dreien danke ich ganz besonders für die noch andauernde Begleitung in der schwierigen Zeit nach Abgabe der Dissertation.

Meiner Familie schließlich möchte ich besonderen Dank aussprechen. Meiner Mutter Hedwig für die Möglichkeiten, die sie mir und meinen Geschwistern geschaffen hat, und das wunderbare Zuhause, in dem wir aufwachsen durften. Meiner Schwester Bianca danke ich für den bedingungslosen Rückhalt über die ganze Zeit der Promotion. Beide waren und sind mir wesentliche Unterstützung in den letzten Monaten – wie gut, dass es Euch gibt. Meine Söhne Finn und Jann de Bruyn werden hoffentlich die Wissenschaft nicht allzu sehr verabscheuen, weil sie mich in den letzten Monaten des Jahres 2014 über Gebühr gefordert hat. Ich bin sehr froh, dass sie meine Begeisterung wahrnehmen und sich mit mir über die kleinen Erfolge freuen. Ich bin sehr dankbar, Euch auf Eurem Weg begleiten zu dürfen.

Meinem verstorbenen Mann Uwe de Bruyn gebührt sicherlich der größte Dank. Ich bin mir sicher, dass er darum weiß.

Zusammenfassung

Verteilte Koordinationsverfahren für die Steuerung realweltlicher Komponenten werden häufig dann für eine Anwendung in Betracht gezogen, wenn entweder die Komplexität der Steuerungsaufgabe deutlich zunimmt oder aber neue Anforderungen an die Funktionalität und Performanz des Systems gestellt werden, die durch eine herkömmliche Erweiterung des bisherigen Steuerungssystems nicht erfüllt werden können.

Im Kontext der elektrischen Energieversorgung, in dem sich die hier vorgelegte Arbeit bewegt, führt der Anspruch einer weitgehenden Dekarbonisierung der Stromerzeugung zu neuen Anforderungen an die Funktionalität der Leit- und Energiemanagementsysteme: Die erforderliche Flexibilisierung einer großen Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen, steuerbarer Lasten und Speicher im Nieder- und Mittelspannungsnetz erfordert neue IT-basierte Konzepte.

Dynamische Virtuelle Kraftwerke (DVPP) bündeln die Flexibilitäten dezentraler Energieanlagen für den Handel an heutigen Energiemärkten. Als Erweiterung des Konzeptes Virtueller Kraftwerke zeigen sie eine große Dynamik in Zusammensetzung und Betrieb. Mit Methoden aus dem Bereich selbstorganisierender und verteilter Systeme soll diese Dynamik in nutzbare Flexibilität umgewandelt werden. Systemimmanenter Bestandteil des DVPP-Betriebs sind Abweichungen vom vorab definierten Fahrplan einer Energieanlage: Prognoseabweichungen, Ausfälle sowie die Bereitstellung netzstabilisierender Dienste verhindern die Erfüllung der am Markt gehandelten Produkte. Aufgabe der kontinuierlichen Einsatzplanung ist es, eine neue oder angepasste Einsatzplanung zu ermitteln, mit der diese Abweichungen weitestgehend kompensiert werden. Mit DynaSCOPE wird in der hier vorgestellten Arbeit ein Verfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP vorgestellt, das dieses Problem in der untertägigen Betriebsführung zuverlässig löst. Für die Entwicklung von DynaSCOPE wurde die kontinuierliche Einsatzplanung als dynamisches verteiltes Constraint Problem betrachtet. In einem vollständig verteilten, heuristischen Verfahren detektieren und verarbeiten Software-Agenten, die eine Energieanlage in einem DVPP repräsentieren, auftretende Fahrplanabweichungen. Die gestufte Verarbeitung dieser Abweichungen ermöglicht die Dämpfung der Systemunruhe im von Ereignissen geprägten Betrieb dezentraler Energieanlagen.

Eingebettet ist die Entwicklung von DynaSCOPE in eine erste Iteration des u.a. im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensmodells SGAE (Smart Grid Algorithm Engineering) als Vorgehensmodell für die Entwicklung verteilter Algorithmen im Smart Grid.

Abstract

Distributed coordination approaches are often examined for applicability within control systems when either the control task gets much more complex or new functionality is required that cannot be implemented as an extension of the existing system.

The ongoing decarbonization of the electrical energy system leads to such a need of new functionality: The flexibility of the huge amount of distributed energy units and loads can only be accessed for services in the power system using new IT-based concepts. Dynamic Virtual Power Plants (DVPP) aggregate the flexibility of these units and address current energy markets. As an extension of the Virtual Power Plant concept they show much more dynamics in both aggregation of energy units and energy unit operation. For these tasks, distributed algorithms and self-organizing concepts are applied within DVPP. Whereas operation schedules are set up for all energy units within DVPP in a day-ahead planning procedure, incidents may render these schedules infeasible during execution, like deviation from prognoses, outages or ancillary service provision. As these incidents are typical for the addressed type of energy units, a continuous energy scheduling process is needed to ensure product fulfillment. In the work at hand, DynaSCOPE is presented as an approach for the task of continuous energy scheduling within DVPP. To develop DynaSCOPE, the scheduling task is considered as a distributed constraint optimization problem. Software agents representing single energy units solve the scheduling problem in a completely distributed heuristic approach. Using a stepped concept, several damping mechanisms are applied to allow minimum disturbance while continuously trying to fulfill the product as contracted at the market.

The development of DynaSCOPE has been embedded in a first iteration of *Smart Grid Algorithm Engineering* (SGAE) as a process model for the design and implementation of distributed algorithms in Smart Grid applications.

INHALTSVERZEICHNIS

Akronyme	XV
Symbole	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Anwendungskontext: Virtuelle Kraftwerke	3
1.2 Informatischer Kontext: Agentenbasierte Steuerungssysteme	4
1.3 Forschungskontext: Dynamische Virtuelle Kraftwerke	6
1.4 Zielsetzung: Verteilte kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP	10
1.5 Aufbau der Arbeit	12
2 Herangehensweise	13
2.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung	13
2.2 Vorgehensmodell	15
2.2.1 SGAM und Anforderungen an das Vorgehensmodell	16
2.2.2 Etablierte Herangehensweisen	19
2.2.3 Smart Grid Algorithm Engineering	21
2.3 Zuordnung Vorgehensmodell und Ergebnisse dieser Arbeit	25
3 Methodische Grundlagen	27
3.1 Scheduling	27
3.1.1 Klassifikation von Scheduling-Problemen	27
3.1.2 Planausführung, Planreparatur und Neuaufwurf	30
3.2 Constraint Satisfaction und Optimization	32
3.2.1 Definition	32
3.2.2 Beispiel: Kartenfärbeproblem	33
3.2.3 Verteilte Lösungsverfahren für COP	34
3.3 Agenten in verteilten Kontrollsystemen	35
3.3.1 Agenten und Agentensysteme	35
3.3.2 Agenten-Architekturen	37
3.3.3 Vermeidung von Unruhe	41
3.3.4 Beispiel: <i>Production 2000+</i>	43

4	Agentenbasierte Ansätze im Smart Grid	45
4.1	P-CASIT: Vorstellung des Ordnungsrahmens	46
4.2	Ansätze für den lokalen Abgleich von Erzeugung und Verbrauch	52
4.2.1	ISES und HomeBots	52
4.2.2	PowerMatcher	53
4.3	Ansätze für den stabilen Netzbetrieb	55
4.3.1	Microgrids: MGCC und MC	55
4.3.2	Agentenbasierte koordinierte Spannungs kontrolle	56
4.3.3	DEZENT	57
4.3.4	Immunsystem-inspiriertes Smart Grid Management	58
4.4	Ansätze für den fahrplanbasierten Betrieb dezentraler Komponenten	59
4.4.1	EPOS und ALMA	59
4.4.2	Holonische Virtuelle Kraftwerke	61
4.4.3	Autonomous Virtual Power Plants	62
4.4.4	COHDA	63
4.5	Zusammenfassung	63
5	Konzeptualisierung	67
5.1	Annahmen und Einschränkungen	67
5.2	Zeitmodell	68
5.3	Ebene der Einheiten	70
5.4	Ebene der Agenten	75
5.5	Ebene der Dynamischen Virtuellen Kraftwerke	79
5.6	Konstruktion des Problems der kontinuierlichen Einsatzplanung	84
6	Anforderungsanalyse und Design-Konzept	89
6.1	Zusammenfassende Anforderungsanalyse	89
6.1.1	Funktionale Anforderungen	89
6.1.2	Nicht-funktionale Anforderungen	92
6.2	Basisverfahren	95
6.2.1	Auswahl eines Basisverfahrens	95
6.2.2	COHDA	98
6.3	Modellierung der Anlagen-Flexibilität	104
6.4	Dekomposition und Erweiterungskonzept	106
7	DynaSCOPE – Verteilte kontinuierliche Einsatzplanung	113
7.1	Schritt 1: Umsetzung des Produktbezugs	113
7.1.1	Direkte Übertragung und Konvergenz-Problem	113
7.1.2	Lösungsansatz	117

7.1.3	Konkretisierung der Gütefunktion	124
7.1.4	Zusammenfassung	125
7.2	Schritt 2: Lokale Fahrplanauswahl	126
7.2.1	Sensitivität	126
7.2.2	Gebündelte Nachrichtenbearbeitung	129
7.2.3	Abbildung von Präferenzen im Suchraum	130
7.2.4	Integration in die Planungsheuristik	130
7.2.5	Zusammenfassung	131
7.3	Schritt 3: Konfiguration, Ereignisse und Umplanung	132
7.3.1	Agentenmodell	132
7.3.2	Konfiguration einer Einheit	135
7.3.3	Detektion von Ereignissen auf der lokalen Bewertungsebene	135
7.3.4	Verarbeitung eines Ereignisses auf der lokalen Planungsebene	142
7.3.5	Gestufte Verarbeitung auf der globalen Planungsebene	143
7.3.6	Umplanung	145
7.3.7	Zusammenfassung	150
7.4	DynaSCOPE: Verteilte kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP	151
7.4.1	Weltmodell	151
7.4.2	Übergeordnetes Prozessmodell	152
7.4.3	Ablauf aus Sicht eines Ereignis-detektierenden Agenten	155
7.4.4	Ablauf aus Sicht eines Ereignis-informierten Agenten	157
7.4.5	Rekonfiguration einer Einheit	158
8	Evaluation	161
8.1	Einführung	161
8.2	Evaluationssystem und prototypische Implementierung	163
8.3	Umsetzung des Produktbezugs im Basisverfahren	166
8.3.1	Hypothesenbildung, Szenario und Experimente	166
8.3.2	Prüfung der Performanz	170
8.3.3	Prüfung der Robustheit	171
8.3.4	Zwischenfazit	175
8.4	Fahrplanauswahl aus kontinuierlichem Suchraum	177
8.4.1	Hypothesenbildung, Szenario und Experimente	177
8.4.2	Performanz	178
8.4.3	Prüfung der Robustheit	179
8.4.4	Parameterstudie: Sensitivität bei Suchraumabfrage	186
8.4.5	Zwischenfazit	190
8.5	Abbildung von Kosten	191
8.5.1	Hypothesenbildung, Szenario und Experimente	191

8.5.2	Effekte auf lieferungsbezogene Qualität und Zusammensetzung . . .	193
8.5.3	Zwischenfazit	196
8.6	Berücksichtigung von Präferenzen	196
8.6.1	Hypothesenbildung, Szenario und Experimente	197
8.6.2	Effekte auf die anlagenlokale Qualität	199
8.6.3	Effekte auf die lieferungsbezogene Qualität	202
8.6.4	Zwischenfazit	203
8.7	Ereignisse und Umplanung	203
8.7.1	Hypothesenbildung, Szenario und Experimente	203
8.7.2	Agenten-Welt: Verlauf der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität	207
8.7.3	Physikalische Welt: Lieferungsbezogene Qualität	211
8.7.4	Zwischenfazit	213
8.8	Skalierbarkeit	216
8.8.1	Hypothesenbildung, Szenario und Experimente	216
8.8.2	Nachrichtenanzahl	220
8.8.3	Experimente E-SK-1 bis E-SK-4 (Umplanungsdauer)	222
8.8.4	Affiliationsmenge	227
8.8.5	Zwischenfazit	232
8.9	Zusammenfassende Bewertung und offene Fragen	232
9	Rahmenbedingungen für DVPP	237
9.1	Technologische Realisierungsoptionen	239
9.1.1	DVPP als Optimierungsparadigma	240
9.1.2	DVPP als Kontroll-Paradigma	240
9.2	Akteure, Komponenten und Kommunikationserfordernisse	243
9.2.1	Analyse der beteiligten Akteure	243
9.2.2	Analyse der Subprozesse	243
9.2.3	Abbildung auf das SGAM	248
9.3	Ableitung technologischer Anforderungen	249
9.3.1	Identifikation relevanter Technologiefelder	249
9.3.2	Ermittlung der erforderlichen Entwicklungsstufen	252
9.4	Auswertung und Zusammenfassung	255
10	Zusammenfassung und Schluss	259
10.1	Ergebnisse und Forschungsbeitrag	259
10.2	Erweiterbarkeit	262
10.3	Weiterführender Forschungsbedarf	265

A Anhang	267
A.1 Ergänzende Abbildungen	267
A.2 Weiterführende Daten zur Evaluation	268
A.3 Sequenzdiagramme zur Analyse der Anwendungsfall-Varianten	272
Abbildungsverzeichnis	277
Tabellenverzeichnis	281
Liste der Definitionen	283
Glossar	285
Literatur	295

AKRONYME

AM	Asset Management
AMI	Advanced metering infrastructure
BHKW	Blockheizkraftwerk
COHDA	Combinatorial Optimization Heuristic for Distributed Agents
COP	Constraint Optimization Problem
CSP	Constraint Satisfaction Problem
CVPP	Commercial Virtual Power Plant
DCOP	Distributed Constraint Optimization Problem
DEU	Verteilte Energieanlage (distributed energy unit)
DMS	Distribution Management System
DR	Demand response
DSM	Demand side management
DSO	Distribution System Operator
DVPP	Dynamic Virtual Power Plant
DynaSCOPE	Dynamic Scheduling Constraint Optimization for Energy Units
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FACTS	Flexible AC transmission system
GMA	Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik
IED	Intelligent Electronic Device

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
InteRRaP	InteRRaP (Hybride Agenten-Architektur)
JADE	JAVA Agent Development Framework
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
mosaik	mosaik (Smart Grid Simulationsframework)
PV	Photovoltaik
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SGAE	Smart Grid Algorithm Engineering
SGAM	Smart Grid Architectural Model
TAB	Technische Anschluss-Bedingungen
TVPP	Technical Virtual Power Plant
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VK	Virtuelles Kraftwerk
VPP	Virtual Power Plant
WAMS	Wide area management systems

SYMBOLE

Konzeptualisierung ([Kapitel 5](#))

a	Einheiten-Agent
A	Menge aller Einheiten-Agenten
\mathbb{A}_a	Affiliationsmenge des Agenten a
cep	Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung
con	Produktbeitrag
cs	Einsatzplan
D_a	Domäne des Agenten a
D	Menge aller Domänen
E	Menge der Kanten eines Graphen
gn	Netzanschlusspunkt
HC	Menge aller einheitenspezifischen Restriktionen
inc	Ereignis
INC	Menge aller Ereignisse
os	Fahrplan einer Einheit
OS	Menge aller möglichen Fahrpläne einer Einheit
res_p	Produktauflösung
p	Produkt
P	Menge aller Produkte
PG	Stromnetz
ψ	DVPP

Ψ	Menge aller DVPPs im Planungshorizont
sc_u	Präferenz-Funktion der Einheit u
SC	Menge aller einheitenspezifischen Präferenzen
t_{bu}	Basiseinheit der Zeit des betrachteten Systems
$t^{(i)}$	Zeitintervall
T_{pl}	Planungshorizont
$T_{pr}^{(s,t)}$	Produktzeitraum
u	Einheit
ua	Zuweisung einer Einheit zu einem Agenten (<i>unit assignment</i>)
U	Menge aller Einheiten
V	Menge der Knoten eines Graphen

Kontinuierliche Einsatzplanung ([Kapitel 7](#))

$coop_{\gamma_{\psi}^0}$	Kooperationsaufwand für die Initialplanung eines DVPP
$dur_{\gamma_{\psi}^0}$	Simulationsdauer der Initialplanung eines DVPP
δ_{msg}	Maximale Nachrichtenverzögerung
$\epsilon_{inc,a}$	Ereignisgrenze des Agenten a
$\epsilon_{s,a}$	Sensitivität des Agenten a bei lokaler Fahrplanwahl
η_a	Speicher der Ereignis-Informationen des Agenten a
$\eta_{a,\psi}$	Produktspezifischer Speicher der Ereignis-Informationen des Agenten a für DVPP ψ
f_{e_p}	Anteilige Produkterfüllung
γ	Lösungskandidat
γ_{ψ}	DVPP-Lösungskandidat
$\hat{\gamma}_{\psi}$	Neuer DVPP-Lösungskandidat
H_u	Historie einer Einheit

κ	Arbeitsgedächtnis
κ_{ψ}	Produktspezifisches Arbeitsgedächtnis
$\hat{\kappa}$	Erweitertes Arbeitsgedächtnis
$\hat{\kappa}_{\psi}$	Erweitertes DVPP-spezifisches Arbeitsgedächtnis
N_i	Nachbarschaft des Agenten a_i
$N_{i,\psi}$	Nachbarschaft des Agenten a_i für DVPP ψ
ν_{os}	Zählvariable eines Fahrplans
Ω	Konfiguration / wahrgenommener Systemzustand
Ω_{ψ}	Wahrgenommener DVPP-Zustand
ps	Produkt-Fahrplan eines Agenten
ps_{ψ}	Produkteinsatzplan eines DVPP
r_a	Reaktionsverzögerung des Agenten a
r_a^{min}	Minimale Reaktionsverzögerung des Agenten a
r_a^{max}	Maximale Reaktionsverzögerung des Agenten a
S_a	Suchraum des Agenten a bei lokaler Fahrplanwahl
$\sigma_p^{(k)}$	Produkterfüllung nach Planung bis zum Planungsintervall $t^{(k)}$
$\hat{\sigma}_p^{(k)}$	Erwartete Produkterfüllung bis zum Planungsintervall $t^{(k)}$
$\chi_p^{(k)}$	Produktabweichung im Planungsintervall $t^{(k)}$
ζ	Ziellastgang

1

EINLEITUNG

Verteilte Koordinationsverfahren für die Steuerung realweltlicher Komponenten kommen häufig dann zur Anwendung, wenn entweder die Komplexität der Steuerungsaufgabe deutlich zunimmt oder aber neue Anforderungen an die Funktionalität und Performanz des Systems gestellt werden, die durch eine herkömmliche Erweiterung des bisherigen Steuerungssystems nicht erfüllt werden können.

Die hier vorgestellte Arbeit bewegt sich im Kontext der Koordination von Erzeugung und Verbrauch in der elektrischen Energieversorgung.¹ In diesem Anwendungskontext sind beide Entwicklungen zu beobachten: Die **Komplexität der Steuerungsaufgabe** insbesondere auf der Ebene der Nieder- und Mittelspannungsebene (NS/MS) – d. h. auf Haushalts- und Gewerbeebene – nimmt sprunghaft zu, wenn dezentrale Energieanlagen, elektrische Speicher und steuerbare Lasten aktiv bewirtschaftet werden sollen. Der Antrieb für die aktive Bewirtschaftung findet sich darin, dass diese Komponenten **Flexibilität** für unterschiedliche energiewirtschaftliche und netztechnische Belange bereitstellen sollen – eine neue Anforderung an die Funktionalität der entsprechenden Leitsysteme, deren Sensorik und Aktorik sich bisher kaum bis in das Niederspannungsnetz erstreckt [AKM12].

Der erhöhte Bedarf an Flexibilität in Erzeugung und Verbrauch ergibt sich aus dem Anspruch einer weitgehenden Dekarbonisierung der Stromerzeugung, die beispielsweise in den Energieszenarien des deutschen Bundesumweltministeriums skizziert wurde [Bun12]: Mit der Abkehr vom durch thermische Großkraftwerke getragenen Energiesystem steigt der Bedarf an Flexibilität in allen Bereichen der Stromerzeugung und -versorgung. Mögliche Maßnahmen zur Flexibilisierung umfassen die folgenden Bereiche:

- **Konventioneller Kraftwerkspark:** Die verbleibenden konventionellen, fossil befeuerten Kraftwerke müssen dynamischer als bisher an die aktuelle Lastsituation angepasst werden. Das gilt insbesondere für thermische Kraftwerke, die anders als bisher auch im Teillastbereich und in wechselnden Betriebspunkten betrieben werden müssen [Bra+12]. Die so erschlossene Flexibilität wird von den Autoren der referenzierten Studie als zwingend erforderlich angesehen, um einen tatsächlichen Rückbau konventioneller Kraftwerkskapazität zu erlauben (ebd., S. 70).

¹Relevante Begriffe aus dem Bereich der Energiewirtschaft und -technik sind im Glossar am Ende der hier vorgelegten Arbeit erläutert.

- **Netzbetrieb:** Um das Stromnetz bei starker und schwankender Einspeisung weiterhin innerhalb zulässiger Betriebsgrenzen zu betreiben, können neue Betriebsmittel ins Netz integriert werden, die aufgrund ihrer technischen Eigenschaften diesen Anforderungen besser genügen als die bisher im Feld installierte Technik. Beispielhaft sei der regelbare Ortsnetztransformator (rONT) genannt, mit dem durch eine Anpassung der Spannungswerte im laufenden Betrieb schnell auf eine lokale Verletzung von Betriebsgrenzen reagiert werden kann [Hül+12]. Mit technischen Nachrüstungen dieser Art könnten der Netzausbaubedarf und entsprechende Investitionen deutlich reduziert werden [Büc+14]. Das so erschlossene Flexibilitätspotential wirkt somit kostensenkend.
- **Speicherbetrieb:** Während nicht-elektrische Speichersysteme wie Pumpspeicherkraftwerke schon lange einen wichtigen Beitrag für die Stabilisierung der elektrischen Energieversorgung leisten, wird die Einbindung elektrischer Speichersysteme auf unterschiedlichen Ebenen der Stromversorgung verstärkt diskutiert. Ein Überblick über unterschiedliche elektrische und nicht-elektrische Speichersysteme findet sich in [Bün+09]. Die Bedeutung von Speichern in Energieversorgungssystemen mit starker Durchdringung regenerativer Energieanlagen wird u.a. in [Ada+12] und [Hol+13] diskutiert; die Beiträge zur Flexibilisierung reichen dabei technologie- und installationsabhängig von der Optimierung des Eigenverbrauchs privat erzeugten Stroms aus Photovoltaik-Anlagen bis hin zur Bereitstellung von Regelenergie.
- **Erzeugung und Verbrauch auf NS- und MS-Ebene:** Mit Inkrafttreten des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG²) im Jahr 2000 wurde u.a. die bevorzugte Einspeisung des durch die entsprechenden Anlagen erzeugten Stroms in das Netz geregelt. Mit einem heute erreichten Anteil der Erneuerbaren Energien (EE) an der Bruttostromerzeugung von 24 %³ werden zunehmend Anreize für eine flexiblere und bedarfsgerechte Einspeisung gesetzt, die auch Möglichkeiten zur direkten Vermarktung von EE-Strom an den Energiemärkten umfassen. Ergänzend werden Mechanismen zur flexibleren Laststeuerung auch im Bereich der NS- und MS-Netze entwickelt, die sowohl eine direkte Steuerung von Lasten als auch indirekte, preisbasierte Ansätze umfassen und unter dem Begriff Demand Side Management (DSM) zusammengeführt werden. Das Flexibilitätspotential, das sich aus der Koordination von Erzeugung und Verbrauch im Nieder- und Mittelspannungsnetz ergibt, ist insbesondere für die tatsächliche Substitution konventioneller Kraftwerkskapazität erforderlich: Sollen EE nicht nur bilanziell einen wesentlichen

²Die verwendeten Akronyme und Symbole sind zu Beginn der Arbeit, im Anschluss an das Inhaltsverzeichnis, zusammengefasst aufgeführt.

³Quelle: AG Energiebilanzen. <http://www.ag-energiebilanzen.de/>, Stand 22.10.2014, zuletzt besucht am 9.12.2014.

Anteil der Energieversorgung darstellen, sondern thermische Großkraftwerke wie Kohlekraftwerke ersetzen, so müssen auch kurzfristige Bedarfe aus den Pool an dezentralen Energieanlagen (DEU, *distributed energy units*) gedeckt sowie Aufgaben des stabilen Netzbetriebes übernommen werden. Das so erschlossene Flexibilitätspotential ist wesentlich von der zunehmenden Durchdringung des Energiesystems durch Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) abhängig [Ape+12].

Durch eine Kopplung von Last- und Erzeugungsflexibilisierung soll ein volkswirtschaftliches Optimum zwischen dem sogenannten Lastfolgebetrieb einerseits (d. h. einer Abstimmung der Erzeugung auf den jeweils aktuellen Bedarf) und dem Erzeugungsfolgebetrieb andererseits (der Anpassung der Last an die aktuell verfügbare Stromerzeugung) erreicht werden. Der in Europa gewählte Weg, um dieses volkswirtschaftliche Ziel zu erreichen, spiegelt sich in der Ausgestaltung der heutigen Energiemärkte wider, die zunehmend Mechanismen für die Vermarktung von Flexibilitäten bereitstellen: So werden bereits seit Dezember 2011 auf dem deutschen Intraday-Markt 15-Minuten-Kontrakte gehandelt. Ab dem 9. Dezember 2014 können 15-Minuten-Kontrakte ergänzend auf dem Day-Ahead-Markt gehandelt werden. Ziel ist die »Bewertung von Flexibilität auf einem Markt, der stark von erneuerbaren Energien geprägt ist«⁴. Betreiber kleiner dezentraler Energieanlagen sind allerdings vom Handel an heutigen historisch von thermischen Großkraftwerken geprägten Energiemärkten ausgeschlossen: Markteintrittshürden wie beispielsweise Mindestkapazitäten verhindern die direkte Integration.

Es finden sich somit sowohl marktbasierende als auch infrastruktur- und anlagenbezogene Ansätze zur Flexibilisierung der elektrischen Energieversorgung. Zusammengefasst werden diese Ansätze meist unter dem Begriff *Smart Grid*, der u. a. von der Europäischen Technologieplattform gleichen Namens geprägt wurde [Eur06].⁵

1.1 ANWENDUNGSKONTEXT: VIRTUELLE KRAFTWERKE

Mit dem Virtuellen Kraftwerk (VK oder englisch VPP, *virtual power plant*) stellten Bitsch, Feldmann und Aumayr ein Konzept vor, um Markteintrittsbarrieren überschreiten zu können [BFA02]: Eine informationstechnische Aggregation dezentraler Energieanlagen (in frühen Projekten ausschließlich Erzeugungsanlagen, in aktuellen Projekten auch steuerbare Lasten und Speicher) wird durch ein entsprechendes System so geführt, dass es wie

⁴EPEX-Spot, 2013. *Preissignal auf 15-Minuten-Basis für den deutschen Markt gibt Flexibilität einen Wert*. Pressemitteilung, 13. November 2014. Verfügbar unter http://www.epexspot.com/de/presse/press-archive/details/press/_15-Minuten-Erffnungsauktion_auf_dem_Intraday_startet_am_9_Dezember_2014, zuletzt besucht am 9.12.2014.

⁵Die Deutsche Bundesnetzagentur weist in ihrem Positionspapier »Smart Grids – Smart Markets« auf die häufig fehlende Differenzierung zwischen marktbezogenen und netzbezogenen Mechanismen hin [Bun11]. Für die hier vorgestellte Arbeit ist der Unterschied nur von untergeordneter Bedeutung; daher wird der Begriff Smart Grid ohne weitere Differenzierung verwendet.

ein Kraftwerk vermarktet werden kann. In diesem Verständnis werden VK heute bereits im Bereich der Regelleistungsmärkte betrieben. Typischerweise wird nach dem Ziel des VK-Betriebs unterschieden: Dient die Aggregation der Anlagen der Bündelung von Kapazität für den Eintritt in Energiemärkte, so spricht man von ökonomischen VK, Virtuellen Handelskraftwerken oder CVPP (*commercial VPP*). Bei einem technischen VK oder TVPP (*technical VPP*) werden die gebündelten Anlagen im Betrieb hingegen für Ziele des stabilen Netzbetriebs optimiert [AMG10]. Ein in Deutschland prominentes Beispiel ist das sogenannte Kombikraftwerk, bei dem gezeigt werden konnte, dass die erforderlichen systemstabilisierenden Maßnahmen auch bei hohem Anteil regenerativer Stromerzeugung durch dezentrale Anlagen erbracht werden können [Kno+14].

Die Aufgaben eines VK-Systems umfassen u.a. die informationstechnische Vernetzung dezentraler Energieanlagen, die integrierte Optimierung des so definierten Anlagen-Pools, die Übermittlung von Leistungsvorgaben beispielsweise in Form von Fahrplänen sowie die kontinuierliche Überwachung und Steuerung im Fall von abweichendem Betriebsverhalten. Damit betrifft der Aufbau und Betrieb eines VK ganz unterschiedliche Ebenen wie die Anlagenkommunikation, die Algorithmik der verwendeten Optimierungsverfahren oder die Umsetzung der definierten energiewirtschaftlichen Rollen und Prozesse.

Die Architektur aktueller VK-Systeme orientiert sich am zentralen Steuerungsparadigma heutiger SCADA-Systeme (*supervisory control and data acquisition*): Die Betriebszustände der angeschlossenen Komponenten werden ausgelesen, an eine zentrale Optimierungskomponente übermittelt, in Steuerungssignale umgesetzt und die Komponenten nachfolgend wiederum konfiguriert. Die Konfiguration erfolgt meist mit Fahrplänen, die für festgelegte Zeitintervalle (typischerweise 15 Minuten) einen Verlauf der Betriebszustände im betrachteten Zeithorizont vorgeben und der vom anlagenseitigen Controller entsprechend umgesetzt werden muss.⁶

Eine automatisierte integrierte Optimierung und Betriebsführung der gebündelten Anlagen kann in einem solchen System nur für eine geringe Anzahl von Anlagen umgesetzt werden [Leh+13].

1.2 INFORMATISCHER KONTEXT: AGENTENBASIERTE STEUERUNGSSYSTEME

Mit dem Begriff Agent wird ein Software-Programm bezeichnet, das in der Lage ist, über Sensoren die Umgebung wahrzunehmen, das so erworbene Wissen ggf. intern zu modellieren, Entscheidungen aus diesem Wissen über den Weltzustand abzuleiten und über Aktoren Einfluss auf die Welt auszuüben [RN10]. Wesentliche Eigenschaft der Agenten ist ihre Fä-

⁶Eine Definition des Begriffs Fahrplan und weiterer relevanter Konzepte erfolgt im weiteren Verlauf der hier vorgelegten Arbeit.

higkeit, autonome Entscheidungen zu treffen und mit anderen Agenten zu kooperieren. Ein System von interagierenden Agenten wird als Agentensystem bezeichnet.⁷

Agenten-basierte Ansätze kommen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen für Steuerungsaufgaben zum Einsatz (ein vertiefender Einblick wird in [Abschnitt 3.3](#) gegeben). Der Fachausschuss *Agenten in der Automatisierungstechnik* der Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) von VDI und VDE empfiehlt die Anwendung Agenten-basierter Konzepte immer dann, wenn das zu steuernde System eine der folgenden Charakteristika aufweist [[VDI09](#)]:

- **Inhärente funktionale Verteilung:** Das System ist in Komponenten zerlegbar, die abgetrennte Aufgaben erfüllen, allerdings dabei von anderen Komponenten abhängig sind.
- **Strukturelle Veränderbarkeit:** Die Wechselbeziehungen der Komponenten ändern sich zur Laufzeit.
- **Komplexe, variable Abläufe:** Die Abläufe im System müssen zur Laufzeit angepasst werden.
- **Umfangreiche Koordinationsprozesse:** Es ist eine umfangreiche Koordination zwischen den Komponenten des Produktionsumfeldes erforderlich, um die Nutzung der Verfügung stehenden Ressourcen abzustimmen oder das gemeinsame Produktionsziel zu erreichen.

Eines der ersten Projekte, in dem Agentensysteme für eine Anwendung in der elektrischen Energieversorgung angewendet wurde, war das ISES-Projekt in den Jahren 1996 bis 1999 [[AYG96](#)]. Agenten wurden eingesetzt, um einen optimierten Abgleich von Erzeugung und Verbrauch bei unvollständigem Wissen, lokalen sowie globalen Betriebsrestriktionen und konfligierenden Zielen zu erreichen. In [[Gus99](#)] wird das entwickelte System als schnell, robust und effizient bezeichnet. Besonders auf die breite Anwendbarkeit des Ansatzes weisen die Autoren zum Projektabschluss hin.

Mittlerweile stellen Agenten-basierte Ansätze einen festen Bestandteil der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im VK-Bereich dar. Bezogen auf den Betrieb ergeben sich besondere Herausforderungen bei der Anwendung agentenbasierter Systeme in VK: In den *Communications of the ACM* heben Ramchurn et al. als relevante Forschungsfelder insbesondere die Aggregation der Anlagen, die verteilte kombinatorische Optimierung für die Planung des Vertriebs sowie die Entwicklung geeigneter Algorithmen für die Verteilung des generierten Mehrwertes hervor [[Ram+12](#)].

⁷Im Deutschen ebenfalls gebräuchlich ist der Begriff Multi-Agenten-System als direkte Übersetzung des englischen *multi agent system*. In dieser Arbeit wird entsprechend der Richtlinie VDI 2653 der Begriff Agentensystem verwendet [[VDI09](#)].

Mit diesen und verwandten Forschungsfeldern beschäftigt sich auch der Forschungsverbund »Smart Nord – Intelligente Netze Norddeutschland«⁸, der seit 2012 vom Land Niedersachsen gefördert wird. Eines der verbindenden Konzepte für viele Arbeiten des Forschungsverbundes ist das Dynamische Virtuelle Kraftwerk (DVPP), das im Folgenden vorgestellt wird.

1.3 FORSCHUNGSKONTEXT: DYNAMISCHE VIRTUELLE KRAFTWERKE

Für die Koordination verteilter Energieanlagen wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Ansätze aus dem Bereich der verteilten künstlichen Intelligenz vorgestellt, die Agentensysteme für die technische Umsetzung nutzen. Ein vertiefender Einblick mit entsprechenden Referenzen werden in [Kapitel 4](#) gegeben.

Im Forschungsverbund Smart Nord wurde das Konzept der Dynamischen Virtuellen Kraftwerke (DVPP) für die Erschließung des Flexibilitätspotentials dezentraler Energieanlagen (DEU, *distributed energy units*) entwickelt [[Nie+12](#)]. DEU umfassen dabei unterschiedliche Anlagentypen:

- Regenerative Energieanlagen wie Photovoltaik-Anlagen oder Windenergieanlagen,
- dezentrale, fossil betriebene Energieanlagen wie z. B. Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Anlagen, die durch die Kogeneration von Wärme und Strom eine hohe Effizienz aufweisen, sowie
- steuerbare Lasten, z. B. Wärmepumpen oder Gefrierschränke.

Innerhalb eines DVPP werden DEU durch Einheiten-Agenten (im Folgenden vereinfacht: Agenten) repräsentiert. Die Besonderheit Dynamischer Virtueller Kraftwerke liegt in der produktspezifischen Bündelung von DEU: In Abgrenzung zum klassischen VK-Konzept stellen DVPP keine statische VK-Konfiguration dar: Um die Flexibilität der aggregierten Anlagen möglichst gut vermarkten zu können, werden DEU abhängig von der aktuellen Marktsituation am Day-Ahead-Markt spezifisch für einzelne Produkte gebündelt. Im Extremfall ist es somit möglich, dass sich unterschiedliche DVPP für jedes Day-Ahead-Produkt bilden.⁹

Die hier betrachteten DVPP dienen der Bereitstellung von Wirkenergie und sind in einen übergreifenden marktbasieren Prozess eingebettet. In [Abbildung 1.1](#) ist dieser Prozess vereinfacht dargestellt: Die Marktprozesse betreffen zum einen den Handel von Wirkenergie (mittlerer Bereich in [Abbildung 1.1](#)), zum anderen Systemdienstleistungsmärkte (rechter

⁸<http://smartnord.de/>, zuletzt besucht am 9.12.2014

⁹DVPPs können auch für andere Produkte eingesetzt werden, wie z. B. im Bereich der Regelleistungsmärkte. Weitergehende Informationen finden sie in den Arbeiten von Blank et al. [[Bla+14](#)]. In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung von DVPPs für Day-Ahead-Märkte betrachtet.

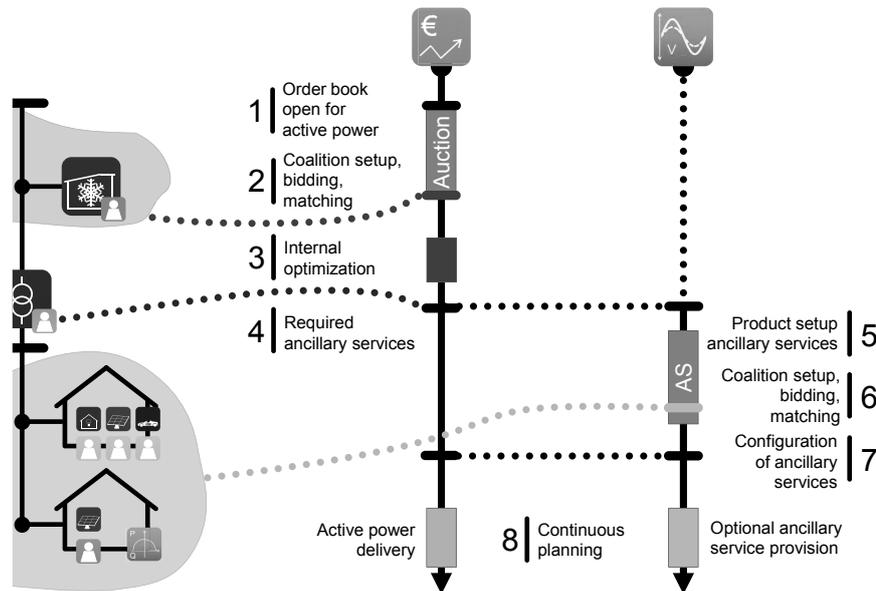


Abbildung 1.1: Marktinteraktion Dynamischer Virtueller Kraftwerke. Vereinfachte Übersicht über die Prozesse an Wirk- und Systemdienstleistungsmärkten. Quelle: [Son+15].

Bereich der Abbildung). In Schritt 1 und 2 bilden sich DVPP auf der Basis der aktuellen Marktsituation und bieten als Aggregation für entsprechende Produkte. Nach erfolgten Markt-Matching ist somit für jede Einheit bekannt, an welchen DVPP- und damit an welchen Produkten – sie beteiligt ist. In Schritt 3 wird eine DVPP-interne Optimierung durchgeführt: Für jede Einheit wird ein Fahrplan ermittelt. Sind die Fahrpläne aller Anlagen bekannt, so können etwaige Probleme im Netzbetrieb prognostiziert werden und Gegenmaßnahmen als Produkte am Systemdienstleistungsmarkt definiert werden (Schritte 5 bis 7). Im untertägigen Betrieb erfolgt schließlich die Umsetzung der Fahrpläne durch die Anlagen und somit die Lieferung der Produkte. Ein kontinuierlicher Planungsprozess sichert die Lieferung der Produkte bei einer Abweichung der Einheiten vom vorab spezifizierten Fahrplan (Schritt 8).

Mit dem DVPP-Konzept wird ein System skizziert, das die Eigenschaften einer inhärenten funktionalen Verteilung, der strukturellen Veränderbarkeit, der variablen Abläufe sowie der umfangreichen Koordinationsprozesse aufweist. Es wurde bereits dargestellt, dass der GMA Fachausschuss *Agenten in der Automatisierungstechnik* die Anwendung agentenbasierter Konzepte für solche Systeme empfiehlt. Für das DVPP-Konzept stellen Agenten als technologische Umsetzung verteilter Koordinationsmechanismen einen wesentlichen Bestandteil dar: Die DVPP-Prozesse beruhen auf der Anwendung selbstorganisierender, verteilter Koordinationsmechanismen. Zentrale Elemente sollen weitestgehend vermieden

werden, um eine größtmögliche Skalierbarkeit, Robustheit und Flexibilität des Systems zu erreichen.¹⁰ Das Auftreten von Fahrplanabweichungen wird weiterhin nicht als Störung, sondern als immanente Eigenschaft eines dynamischen Systems verstanden, wie es dem gängigen Verständnis in der Agententheorie entspricht [SGK05].

In **Abbildung 1.2** wird ein Überblick über die Prozesse gegeben, die für eine Agentenbasierte DVPP-Umsetzung der fahrplanbasierten Wirkleistungsbereitstellung erforderlich ist. Diese Prozesse sind als sequentielle Phasen zu verstehen, welche die Agenten jeweils DVPP-spezifisch durchlaufen. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [Nie+14a].

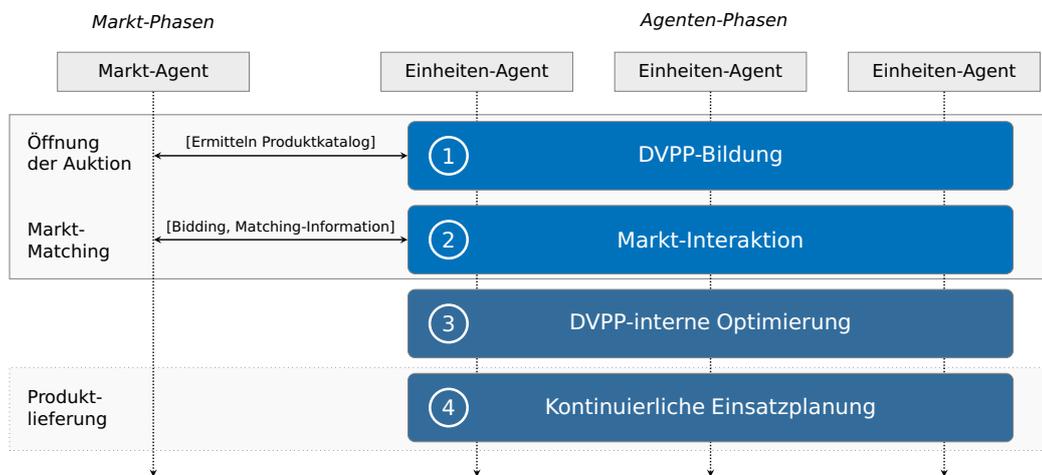


Abbildung 1.2: Markt- und DVPP-Prozesse in der Übersicht. Eigene Abbildung nach [Nie+14a].

1. **DVPP-Bildung:** Im ersten Schritt führen die Agenten in einem verteilten Verfahren die Aufgabe der DVPP-Bildung durch. Algorithmisch wird diese Aufgabe als *coalition structure generation* (CSG)-Problem betrachtet [MSR10]. Die DVPP-Bildung erfolgt auf Basis der am Markt möglichen Produkte, die als Produktkatalog erfragt werden.

¹⁰Der Forschungsbereich selbstorganisierender Systeme betrifft als interdisziplinärer Bereich nicht nur die Informatik, sondern weitere Bereiche wie die Mathematik, die Physik, die Biologie oder die Soziologie. Eine Definition dazu, was unter Selbstorganisation verstanden wird, findet sich entsprechend in jedem dieser Bereiche. Beispielfhaft sei auf die Arbeiten von Holzer et al. für den Bereich der Informatik und der formalen Beschreibung von Eigenschaften selbstorganisierender Systeme [HMB08], die Habilitationsschrift von Köhler-Bußmeier für eine informatisch geprägte Sicht auf Selbstorganisation in der Soziologie [Köh09] sowie auf das grundlegende Werk von Haken verwiesen, das im Bereich der Physik angesiedelt ist und dem ein deutlich anderes Verständnis zugrunde liegt [Hak83]. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich als anwendungsorientierte Arbeit auf eine Diskussion im Kontext verteilter und agentenbasierter Lösungsverfahren (siehe Kapitel 3). Für eine Einführung in Grundlagen der verteilten Algorithmen sei auf [Mat89] sowie [Lyn96] verwiesen.

2. **Markt-Interaktion:** In der zweiten Phase bieten die generierten DVPP am Markt (*Bidding*). Für jedes DVPP übernimmt ein frei wählbarer Sprecher diese Aufgabe. Nach Abschluss des Markt-Matchings, d. h. der Abbildung von Geboten auf Produkte nach einem entsprechenden Matching-Algorithmus, ist allen Agenten eines DVPP bekannt, welches Produkt – d. h. welcher Wirkleistungsverlauf – gemeinsam zu realisieren ist.

3. **DVPP-interne Optimierung:** Erst nach dem Markt-Matching ist festgelegt, welche DVPP zur Lieferung eines Produktes verpflichtet sind. Mit dieser Information sowie aktualisierten Prognosen zum Betriebsverhalten der aggregierten Einheiten führen die Agenten eines DVPP eine interne Optimierung durch. Möglich ist es beispielsweise, dass das Produkt nun zu geringeren Kosten geliefert werden kann. Ergebnis dieser Phase sind somit die Einsatzpläne, d. h. die Zuweisung eines Fahrplans für jede Einheit des DVPP. Algorithmisch handelt es sich bei diesem Problem um ein kombinatorisches Optimierungsproblem: Aufgabe ist es, für jeden Agenten aus der Menge prinzipiell umsetzbarer Fahrpläne einen solchen Fahrplan zu wählen, der sowohl die anlagenlokalen Präferenzen und Restriktionen berücksichtigt als auch die Produktlieferung sichert.¹¹ Den Abschluss dieser Phase bildet die Konfiguration der Einheiten mit den ermittelten Fahrplänen durch die Agenten.

4. **Kontinuierliche Einsatzplanung:** In der untertägigen Betriebsführung muss die Produktlieferung kontrolliert und gesichert werden. Ziel ist somit nicht etwa die unbedingte Einhaltung vorab konfigurierter Fahrpläne, sondern die beständige Anpassung des Anlagenbetriebs an veränderliche Bedingungen, insbesondere abweichendes Anlagenverhalten (Ereignisse). Besondere Bedeutung in der Betriebsführung haben Restriktionen und anlagenlokale Präferenzen. Algorithmisch ist die kontinuierliche Einsatzplanung somit einerseits als kombinatorisches Optimierungsproblem, andererseits als Constraint Problem zu betrachten.¹²

In [Abbildung 1.2](#) sind die für die Einsatzplanung relevanten Prozesse 3 und 4 dunkel unterlegt – auf diese Prozessschritte wird in späteren Abschnitten dieser Arbeit detaillierter eingegangen.

¹¹Eine Übersicht zu multikriteriellen kombinatorischen Optimierungsverfahren findet sich in [\[EG00\]](#). Die Umsetzung einer Einsatzplanung für VK in diesem Verständnis findet sich in den Arbeiten von Hinrichs, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit detaillierter eingegangen wird [\[Hin14\]](#).

¹²Eine detaillierte Betrachtung der Einsatzplanung als Constraint Problem findet sich im weiteren Verlauf der hier vorgelegten Arbeit. Grundlagen werden in [Kapitel 3](#) vorgestellt.

1.4 ZIELSETZUNG: VERTEILTE KONTINUIERLICHE EINSATZPLANUNG IN DVPP

In der Betriebsführung konventioneller Kraftwerke umfasst die untertägige Einsatzplanung die kostenoptimierte Bereitstellung von Wirkleistung sowie die Aktualisierung von Plänen aufgrund von Abweichungen der Anlagenzustände gegenüber dem vorab konfigurierten Fahrplan [Cra08]. Die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP ist mit diesem Problem eng verwandt. Die Integration von dezentralen, teils auf fluktuierenden Quellen beruhenden Anlagen sowie steuerbarer Lasten führt zu einer starken Dynamik im Anlagenbetrieb, die eine Dynamik in der DVPP-Steuerung gegenübergestellt werden muss, um das vereinbarte Produkt zu liefern. Die folgenden Gründe für eine Abweichung vom vorab konfigurierten Fahrplan (Ereignistypen) sind in DVPP zu erwarten:

- **Prognose-Abweichungen:** Zwischen der Konfiguration einer Einheit mit einem Fahrplan und dem Ende der Produktlieferung ändert sich das (erwartete und vorgegebene) Leistungsprofil der Einheit. Dieser Ereignistyp wird als Prognoseabweichung im weiteren Sinne eingestuft. Liefert eine Einheit weniger Strom, weil der Hausnutzer ein geändertes Verhalten zeigt (z. B. bei KWK-Anlagen ein geänderter Wärmebedarf), so liegt eine Abweichung von der (Wärme-)Verbrauchsprognose vor. Wenn eine PV-Anlage weniger Strom einspeist als auf Basis der Einstrahlungsprognose angenommen, so stellt das eine Abweichung von der Erzeugungsprognose dar. Prognoseabweichungen sind systemtypisch und im laufenden System häufig zu erwarten. Dementsprechend sind besonders effiziente Mechanismen erforderlich, um diese Ereignisse zu kompensieren.
- **Einheiten-Ausfall:** Bei einem Einheiten-Ausfall liefert die Anlage keinen Strom und hat keinen Einfluss auf die Spannung am Netzanschlussknoten. Der Ereignistyp eines Einheiten-Ausfalls unterscheidet sich bezüglich getroffener Annahmen und Detektion des Ereignisses nicht grundsätzlich von Prognose-Abweichungen, allerdings bieten sich weniger Möglichkeiten in der Einsatzplanung: Während bei noch betriebstüchtiger Einheit eine Kompensation des Ereignisses auch mit der Einheit selbst möglich sein kann, muss ein länger andauernder Ausfall durch eine Umplanung anderer Einheiten kompensiert werden.
- **Bereitstellung von Systemdienstleistungen:** Durch technischen Anschlussbedingungen (TAB) ist vorgegeben, ob und in welcher Form eine Einheit einen Beitrag zur Systemstabilisierung beitragen muss. TAB werden vom zuständigen Netzbetreiber veröffentlicht und sind für die Anschlussnehmer bindend. Bei Einheiten, die über Wechselrichter in das Stromnetz einspeisen, kann es sich z. B. um die Vorgabe eines $\cos(\phi)$ handeln, mit dem das Verhältnis von Wirk- und Scheinleistung beeinflusst

wird. Mit der Einbindung dezentraler Anlagen in Aufgaben der Systemstabilisierung ist es weiterhin möglich, dass systemstabilisierendes Verhalten dynamisch an den aktuellen Netzzustand angepasst wird [Bla+14]. Abweichungen im Wirkleistungsverhalten sind somit möglich. Die kontinuierliche Einsatzplanung muss in diesem Fall ebenfalls durch eine Umplanung der betroffenen bzw. anderer Einheiten kompensiert werden. Prinzipiell möglich ist es somit, dass es so zu Oszillationen kommt, wenn die Umplanung wiederholt den stabilen Netzbetrieb beeinträchtigt.

Aufgabe der kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP ist es, beim Eintreten von Ereignissen einen neuen, gültigen Einsatzplan zu ermitteln, der die Produkterfüllung so gut wie möglich annähert. Aufgabe im Rahmen dieser Arbeit ist es somit auch, detaillierte Anforderungen an diese Einsatzplanung zu spezifizieren und eine Methodik zu entwickeln, die die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP entsprechend dieser Anforderungen methodisch stützt. Verfahren aus dem Bereich verteilter, selbstorganisierender Systeme stehen im Zentrum des DVPP-Konzeptes und sollen daher auf ihre Anwendbarkeit geprüft werden.

Die **Forschungsfragen** des in dieser Arbeit vorgestellten Vorhabens lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- F1** Sind Verfahren aus dem Bereich der Selbstorganisation und Agentensysteme für die kontinuierliche Einsatzplanung Dynamischer Virtueller Kraftwerke anwendbar?
- F2** Welche anwendungsspezifischen Anpassungen und Erweiterungen bisher vorgestellter Verfahren sind erforderlich?
- F3** Welche Randbedingungen müssen gegeben sein, um eine solche verteilte kontinuierliche Einsatzplanung in der Praxis umzusetzen?

Das Ziel des hier vorgestellten Dissertationsvorhabens ist es somit, ein verteiltes Verfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP zu entwickeln, prototypisch zu implementieren und zu evaluieren. Es muss mindestens die folgenden Eigenschaften aufweisen:

Selbst-Diagnose: Das Verfahren muss ein DVPP in die Lage versetzen, Ereignisse zu erkennen, bezüglich ihrer Relevanz für die Produktlieferung zu bewerten und einen Handlungsbedarfs daraus abzuleiten. Erforderlich ist somit ein kontinuierliches Monitoring der Einheiten, das durch einen Abgleich mit dem im Fahrplan spezifizierten Betriebsverhalten ergänzt wird.

Selbst-Heilung: Das Verfahren muss ein DVPP in die Lage versetzen, nach Eintreten von Ereignissen und bei Ermittlung eines Handlungsbedarfes neue, gültige Fahrpläne zu generieren sowie diese an die Einheiten zu übermitteln. Anwendungsspezifische Restriktionen müssen dabei beachtet werden, so dass die neu generierten Fahrpläne durch die Anlagen

realisierbar sind und neue Ereignisse vermieden werden. Es ist zu ermitteln, ob damit eine Anforderung an eine Robustheit von Fahrplänen verbunden ist. Weitere im Anwendungskontext relevanten Optimierungskriterien, insbesondere die Kosten für die Bereitstellung eines Produktes, müssen in der Planung berücksichtigt werden.

1.5 AUFBAU DER ARBEIT

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird DynaSCOPE (*Dynamic Scheduling Constraint Optimization for Energy units*) als verteiltes Verfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung dezentraler Energieanlagen – Erzeuger, elektrische Speicher sowie steuerbare Lasten – entwickelt und vorgestellt. Dazu wird die Arbeit zunächst in einen wissenschaftstheoretischen Kontext gestellt und eine geeignete Herangehensweise für die Entwicklung verteilter Algorithmen im Smart Grid ermittelt ([Kapitel 2](#)). Die methodischen Grundlagen, die in [Kapitel 3](#) vorgestellt werden, bilden das Fundament für die Lösungssuche und -entwicklung. Der breitere Kontext Agenten-basierter Steuerungskonzepte im Smart Grid wird in [Kapitel 4](#) anhand des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ordnungsrahmens P-CASIT vorgestellt. In [Kapitel 5](#) wird das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP formal beschrieben. Anwendungskontext und Formalisierung führen zu Anforderungsanalyse und Design-Konzept ([Kapitel 6](#)).

Damit sind alle Grundlagen für die Entwicklung von DynaSCOPE gelegt; der schrittweise Aufbau des Verfahrens wird in [Kapitel 7](#) beschrieben. Die Ergebnisse der simulativen Evaluation werden in [Kapitel 8](#) vorgestellt und diskutiert. [Kapitel 9](#) widmet sich schließlich den Rahmenbedingungen für eine Umsetzung des Verfahrens im Feld anhand konkreter technologischer Realisierungsoptionen. Da die kontinuierliche Einsatzplanung einen Teilprozess innerhalb von DVPPs darstellt, werden hier auch die weiteren Prozesse der DVPP-Wertschöpfungskette behandelt. In der Zusammenfassung ([Kapitel 10](#)) werden der Forschungsbeitrag dieser Arbeit sowie offene Fragen mit anknüpfendem Forschungsbedarf diskutiert.

2

HERANGEHENSWEISE

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Anwendungs- und Forschungskontext der vorliegenden Arbeit dargestellt. Als Ergänzung zu dem so beschriebenen *WAS* soll nun das *WIE* vorgestellt werden: Im Folgenden wird daher zunächst diskutiert, in welchen **wissenschaftstheoretischen Kontext** sich die nachfolgend beschriebenen Arbeiten einbetten ([Abschnitt 2.1](#)). Aufbauend auf dieser Einordnung wird das u.a. im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte **Vorgehensmodell** vorgestellt ([Abschnitt 2.2](#)). Den Abschluss des Kapitels bildet eine Darstellung dazu, wie sich die im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellten Ergebnisse in das gewählte Vorgehensmodell einordnen ([Abschnitt 2.3](#)).

2.1 WISSENSCHAFTSTHEORETISCHE EINORDNUNG

Die Herangehensweise dieser Arbeit folgt dem Konzept des wissenschaftlichen Realismus, wie er unter anderem in [\[Psi99\]](#) dargestellt ist. Im ontologischen Verständnis des wissenschaftlichen Realismus existiert eine objektive Realität unabhängig von der durch den Menschen wahrnehmbaren subjektiven Realität. Diese objektive Realität kann nicht nur durch rationales Denken (wie im Rationalismus) erfasst werden, sondern auch durch Wahrnehmung, also auch empirische Untersuchungen, angenähert werden. Weiterhin nimmt der wissenschaftliche Realismus die Grundidee zur Falsifizierbarkeit nach Karl R. Popper auf [\[Pop76\]](#): Nach Poppers Verständnis kann eine Theorie aufgrund empirischer Untersuchungen nicht verifiziert, also für wahr erklärt werden. Eine Theorie wird vielmehr durch wiederholtes Widerlegen und nachfolgende Korrektur der aus ihr abgeleiteten Hypothesen weiterentwickelt. Die Klassifizierung als *wahr* oder *falsch* ist nach Popper nicht aus empirischen Untersuchungen abzuleiten, da diese Begriffe logische und damit nicht-empirische Beschreibungen darstellen. Dieser erkenntnistheoretische Pessimismus bedeutet in letzter Konsequenz, dass das Annähern der Wahrheit über eine Theorie nicht zielgerichtet möglich ist, sondern lediglich über Versuch und Irrtum erfolgen kann. Der wissenschaftliche Realismus, der dieser Arbeit zugrunde liegt, übernimmt dieses Verständnis nicht in dieser Konsequenz: Ihm liegt ein erkenntnistheoretischer Optimismus zugrunde, nach dem es möglich ist, eine Theorie mit empirischen Mitteln über inter-subjektiv nachvollziehbare, wiederholbare Bestärkung von abgeleiteten Hypothesen zu bestätigen. Der wissenschaftliche Realismus verbindet somit deduktive und induktive Ansätze des Erkenntnisgewinns.

Damit stellt er einen pragmatischen Ansatz des Wissensgewinns dar, der insbesondere in den angewandten empirischen Wissenschaften mittlerweile eine weite Verbreitung gefunden hat [Töp12]. Putnam begründet diesen Erfolg nachvollziehbar:

»Scientific realism is the only philosophy that doesn't make the success of science a miracle.« [Put75, S. 73]

Popper unterscheidet noch nicht zwischen den analytisch-deduktiven und den empirisch-induktiven Wissenschaften. Erst durch die Möglichkeiten zur rechnergestützten Evaluation großer Datenmengen und damit in der Zeit nach Popper erscheint ein realitätsnahes Abprüfen des Parameterraumes in experimentellen Untersuchungen überhaupt möglich. Auch diese Entwicklung rechtfertigt den Erfolg des wissenschaftlichen Realismus.

Der Evaluationsansatz dieser Arbeit (siehe Kapitel 8) verfolgt daher einen hybriden Ansatz (siehe Tabelle 2.1): Zum einen werden Hypothesen formuliert, die aus dem Forschungsziel und -gegenstand dieser Arbeit abgeleitet werden. Sie dienen dem Zweck, grundlegende Aussagen dieser Arbeit über ihre Falsifizierbarkeit überprüfbar zu machen. Damit beantwortet die Evaluation auf Basis von Hypothesen zunächst einmal das *ob* bei der Frage nach einer gültigen Lösung für ein Problem. Der empirischen Bewährung der Hypothesen, der Frage nach dem *wie gut* widmet sich der zweite Teil des Evaluationskonzeptes, in dem (teils anwendungsspezifische) Metriken zu Bewertung der Güte der Lösung entwickelt werden.

Insbesondere bei der Bewertung heuristischer Ansätze ist eine statistische Bewertung der Güte bezüglich definierter Metriken von großer Bedeutung: Entscheidend ist nicht etwa das eine Gegenbeispiel, das die Theorie endgültig widerlegt, sondern vielmehr eine zu erwartende mittlere Ergebnisgüte anhand definierter Qualitätsmerkmale. Die beiden Zweige

Tabelle 2.1: Evaluationsansatz dieser Arbeit

	(1) Falsifikation	(2) Gütebewertung
Fragestellung	Ist der Ansatz prinzipiell <i>geeignet</i> , das definierte Problem zu lösen?	<i>Wie gut</i> und abhängig von welchen Parametern kann der entwickelte Ansatz das Problem lösen?
Bewertungsmittel	Falsifizierbare Hypothesen	Metriken, Performanz-Indikatoren

des Evaluationsansatzes dieser Arbeit sind nur bedingt trennbar: Auch der erste Zweig, der einen Falsifikationsansatz verfolgt, dient letztlich der Bestärkung des Ansatzes darüber, dass die Hypothesen eben nicht widerlegt werden. Der Mehrwert dieser Herangehensweise liegt aber im Erkenntnisprozess auf dem Falsifikationszweig: Es ist erforderlich, sich Gedanken dazu zu machen, wie eine Hypothese denn überhaupt widerlegt werden könnte. Dieser

Prozess führt damit nicht nur zur Schärfung der Hypothesen, sondern auch zur Definition spezifischer Szenarien.¹

2.2 VORGEHENSMODELL

Während sich die wissenschaftstheoretische Einordnung vor allem auf die der Evaluation zugrunde liegende Herangehensweise der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze bezieht, soll im folgenden Abschnitt dargelegt werden, nach welchem Vorgehensmodell die Ergebnisse und Erkenntnisse erzielt bzw. gewonnen wurden.

Ein Vorgehensmodell dient dem Zweck, den gesamten Prozess von der Problembeschreibung über die Ideenfindung bis hin zum Lösungsdesign und dessen Bewertung hin strukturiert anzuleiten. In jeder Phase sollen geeignete Methoden angeboten werden, um das Entwicklungsrisiko in jeder Phase erkennbar und beherrschbar zu machen. Für die (kommerzielle) Software-Entwicklung haben sich unterschiedliche, anwendungsinvariante Vorgehensmodelle etabliert, die nicht nur die eigentliche Entwicklungsarbeit unterstützen, sondern auch qualitätssichernde Maßnahmen integrieren und Dokumentationspflichten des Auftragnehmers definieren. Die Anwendung verteilter Algorithmen für Fragestellungen im Smart Grid-Kontext ist von der (kommerziellen) Software-Entwicklung noch weit entfernt: So wurden in den letzten Jahren viele wissenschaftliche Arbeiten in diesem Kontext publiziert; die wenigsten Arbeiten sind aber bereits in Feldtests geprüft worden. Ein Überblick wird in [Kapitel 4](#) gegeben.

Der hier vorliegenden Arbeit liegt der Anspruch zugrunde, dass die Entwicklung von Smart Grid-Algorithmen bereits in frühen Entwicklungsphasen einen ingenieurmäßigen Anspruch verfolgen sollte, um den Transfer der erarbeiteten Konzepte ins Feld zu erleichtern. Insbesondere wegen der Einschränkungen regulatorischer und technischer Art ist eine frühe Beachtung dieser Aspekte – mithin keine Informatik-, sondern energiewirtschaftliche und -technische Inhalte – im Smart Grid-Kontext von besonderer Bedeutung, da sie beispielsweise die Datenverfügbarkeit deutlich einschränken können.

Die folgenden Abschnitte beschreiben in Kürze das Vorgehensmodell *Smart Grid Algorithm Engineering* (SGAE), das u.a. im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde und in [\[NTS13\]](#) ausführlich beschrieben ist. Im Verständnis der anwendungsorientierten Forschung nach [\[Gib+94\]](#) verfolgt SGAE einen transdisziplinären Ansatz und weist den einzelnen Phasen des Prozesses explizit Akteure als Experten eines relevanten Sachgebietes zu, um die Disziplinen-übergreifende Expertise geeignet einzubringen. Es unterstützt ein ingenieurmäßiges Vorgehen insofern, als es den Design- und Entwicklungsprozess über definierte Zwischenziele und Artefakte nachvollziehbar macht, ohne den kreativen Forschungsprozess, der diesen zugrunde liegt, definieren zu wollen. SGAE liegt in wissenschaftstheoretischer

¹In [Kapitel 8](#) wird dargelegt, wie der hybride Evaluationsansatz im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt wurde.

Hinsicht das bereits vorgestellte Konzept des wissenschaftlichen Realismus zugrunde (siehe [Abschnitt 2.1](#)).

SGAE wurde in einem dreistufigen Vorgehen entwickelt:

1. Anforderungsanalyse: Ableiten der Anforderungen an das Vorgehensmodell aus dem angestrebten Anwendungskontext.
2. Prüfen existierender Vorgehensmodelle: Abgleich definierter Anforderungen mit bereits im Anwendungskontext eingesetzten Vorgehensmodellen.
3. Anpassen eines existierenden Modells auf Basis definierter Anforderungen.

In den folgenden drei Abschnitten werden die Ergebnisse dieser drei Schritte zusammenfassend dargestellt.

2.2.1 SGAM und Anforderungen an das Vorgehensmodell

Als erster Schritt zur Auswahl bzw. zur Entwicklung eines geeigneten Vorgehensmodells werden Anforderungen auf Basis eines domänenspezifischen Referenzmodells, des *Smart Grid Architectural Model* (SGAM) hergeleitet[[Int08](#)].

Als erster Ansatz für eine Standardisierung von Entwicklungsprozessen für IT-basierte Systeme im Smart Grid zielt das SGAM darauf, die Interoperabilität von Automatisierungssystemen im Smart Grid bereits im Entwicklungsprozess abzusichern. [Abbildung 2.1](#) illustriert die drei Dimensionen des SGAM: Auf der Domänen-Dimension sind die Komponenten der Energiewandlung von Großkraftwerken bis hin zu dezentraler Stromerzeugung und Verbrauchern im privaten Bereich dargestellt. In der Dimension der Zonen werden die unterschiedlichen Management-Systeme von der Prozessebene über Unternehmenssoftware-Systeme bis hin zur Markt-Ebene dargestellt. Diese Dimension hebt die unterschiedlichen IT- und Automationssysteme hervor, über deren Grenzen hinweg die Steuerung erfolgen muss. So würden beispielsweise die Schutz- und Automationssysteme von Unterstationen in der Zonen-Dimension auf der Stationsebene und in der Domänen-Dimension auf der Verteilnetz-Ebene (*distribution*) allokiert werden. Die eigentlichen Funktionen und ihre Umsetzung in IT-Systemen über unterschiedliche Schnittstellen wird in der dritten Dimension der *interoperability layer* dargestellt. Kommunikation mit Feld-Komponenten ist als Basis-Funktionalität in den unteren Ebenen zu finden, während nach oben hin die Abstraktion der Modellierung zunimmt: Die standardkonforme Modellierung von Daten als Vorbedingung für Geschäftsprozessmodellierung findet sich auf der Informationsebene (*information layer*), abstraktere Modellierungen von Funktionen und Geschäftsprozessen auf den oberen Ebenen dieser Dimension.

Am Beispiel einer IT-basierten automatisierten Spannungskontrolle auf Ebene einer Ortsnetzstation soll verdeutlicht werden, wie vergleichbare Funktionen auf das SGAM abgebil-

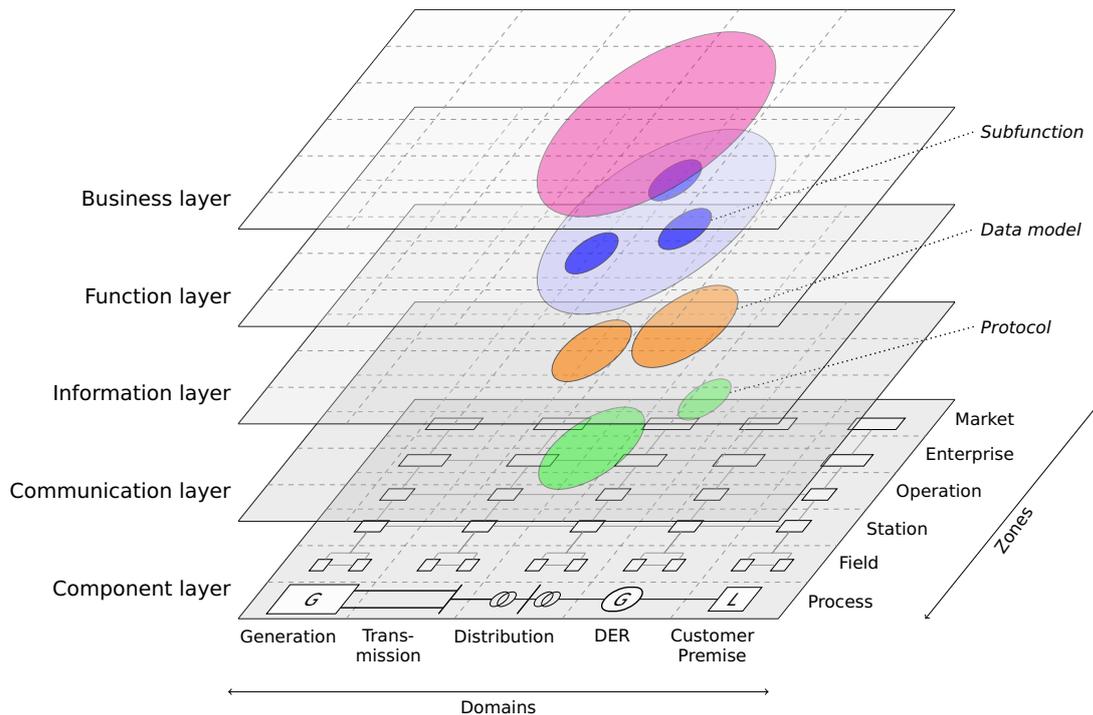


Abbildung 2.1: Smart Grid Architectural Model (SGAM). Eigene Abbildung nach [Int08].

det werden können: Abhängig von Messwerten des aktuellen Betriebszustandes des Verteilnetzes unterhalb der Unterstation sowie Prognosen über den weiteren Verlauf der Last- und Erzeugungssituation soll ein Stufensteller so beeinflusst werden, dass Abweichungen vom zulässigen Spannungsband proaktiv vermieden werden (siehe z. B. [Wit+09]). Ein solcher Ansatz erfordert nicht nur eine standardisierte Syntax zum Austausch von Steuersignalen, sondern weiterhin auch eine gemeinsame Semantik. Auf der Interoperabilitätsdimension werden vergleichbare Steuerungskonzepte daher im *function layer* angesiedelt.

Verteilte Algorithmen, wie sie im Kontext der hier vorgelegten Arbeit betrachtet werden, umfassen die Domänen von den Privat-Haushalten bis hin zu den Verteilnetzen.

Im Folgenden werden die Anforderungen dargestellt, die für die Auswahl bzw. Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Entwicklung verteilter Smart Grid-Algorithmen aus dem SGAM hergeleitet wurden. Für eine vertiefende Darstellung sei auf [NTS13] verwiesen.

Expertenwissen IT-basierte Steuerungsansätze umfassen mehrere Zonen im SGAM. Sie müssen daher Einschränkungen regulatorischer Art beachten, wie z. B. die eingeschränkte Nutzung von Daten durch definierte Akteure der Energiewirtschaft. Eine Beschreibung der Rollen und Akteure im europäischen Rahmen findet sich in [ent11]. Das Vorgehensmodell

sollte dabei unterstützen, Konflikte der zu entwickelnden Algorithmen mit regulatorischen Einschränkungen zu vermeiden, z. B. über frühzeitige Einbindung von Smart Grid-Experten (Anforderung 1).

Beachtung sicherheitskritischer Aspekte Insbesondere die Prozess-, Feld- und Stationsebene sind als sicherheitskritisch im Sinne eines Systembetriebs innerhalb der Betriebsgrenzen von Automatisierungskomponenten, Energiewandlungsanlagen und Netzkomponenten wie Transformatoren oder Stufenstellern einzuordnen. So müssen z. B. die Echtzeitanforderungen neuer IT-basierte Schutzkonzepte nicht nur empirisch geprüft, sondern ggf. formal nachgewiesen werden können. Das Vorgehensmodell sollte eine dedizierte Phase enthalten, in der sicherheitskritische Aspekte und Echtzeitanforderungen für die zu entwickelnde Anwendung geprüft werden (Anforderung 2).

Simulationsmodelle Aus Kosten- und Sicherheitsgründen können Steuerungsansätze im Smart Grid erst nach intensiver experimenteller Prüfung in erste Feldtests überführt werden. Die verwendeten Simulationsmodelle stellen dabei stellvertretende Instanzen der Komponentenebene sowie – im Falle einer Co-Simulation mit Abbildung der Kommunikation – der Kommunikationsebene dar. Das Vorgehensmodell sollte die Verwendung und ausgiebige Dokumentation geeigneter Simulationsmodelle vorsehen, um auf Basis dieser Dokumentation eine gezielte Auswahl existierender Modelle für Folgearbeiten zu erleichtern (z. B. zeitliche Auflösung und Schnittstellen-Anforderungen) (Anforderung 3).

Szenario-Design Während Simulationsmodelle als Instanzen von Komponenten betrachtet werden können, stellen Szenarien Instanzen der gesamten Komponenten-Dimension des SGAM dar. Viele Annahmen müssen getroffen werden, um die große Auswahl möglicher Parameterbelegungen jedes einzelnen Simulationsmodells so zu spezifizieren, dass ein Szenario entsteht, das als Input für ein Experiment verwendet werden kann. Daher kann weder ein einzelnes Szenario, noch ein großes Szenario-Set die Komponenten-Dimension in allen möglichen Ausprägungen darstellen. Zwangsläufig verlieren damit auch die experimentellen Ergebnisse den Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Ein methodisches Vorgehen zur geeigneten Generierung von Szenarien sowie ein einfacher Austausch von Szenarien im Evaluationssystem sind somit erforderlich, um die Übertragbarkeit der experimentell ermittelten Ergebnisse zu verbessern. Das Vorgehensmodell sollte sowohl ein methodisches Vorgehen zur Erstellung von Szenarien als auch eine Werkzeugunterstützung für den einfachen Austausch von Szenarien in der Evaluationsumgebung vorsehen, um ein *overfitting* der entwickelten Ansätze auf spezifische Parameterbelegungen zu vermeiden und den Gültigkeitsbereich der getroffenen Aussagen zu erweitern (Anforderung 4).

Wissensmanagement Die domänenspezifische Performanz verteilter Algorithmen, die von der Komponenten- bis zur Funktionsebene viele Ebenen des SGAM umfassen, kann im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden. Dennoch ist ein Vergleich mit vorangegangenen Ergebnissen hilfreich, um eine erste Klassifikation des Problems vorzunehmen. So lassen sich z. B. viele Scheduling-Probleme als kombinatorische Optimierungsprobleme fassen, von denen einige mit *branch-and-bound*-Algorithmen gut lösbar sind, andere aber Performanzprobleme aufweisen. Eine Dokumentation der experimentell gewonnenen Erkenntnisse kann helfen, geeignete Lösungsansätze für verwandte Probleme zu identifizieren. Typischerweise werden im Forschungskontext zwar die erfolgreichen Ergebnisse einer Arbeit, nicht aber die Rückschläge und Irrwege im dahinterliegenden Erkenntnisprozess dokumentiert. Gerade diese erscheinen aber besonders hilfreich, um bei zukünftigen Arbeiten schneller zu einer geeigneten Lösung zu kommen. Das Vorgehensmodell sollte daher – ergänzend zur wissenschaftlichen Publikation im Rahmen von Fachzeitschriften, Konferenzen und Dissertationen – eine Dokumentation der Zwischenergebnisse und Irrwege vorsehen (Anforderung 5).

2.2.2 Etablierte Herangehensweisen

Im folgenden Abschnitt werden existierende und etablierte Vorgehensmodelle, die bereits im Smart Grid-Kontext Verwendung finden, daraufhin geprüft, inwieweit sie die hier dargestellten Anforderungen abbilden.

Use-Case-Methodik

Als einzige anwendungsspezifische Methode aus dem Smart Grid-Kontext ist die sogenannte Use-Case-Methodik zu nennen [TGD13]. Bei dieser Vorgehensweise werden – ausgehend von der gewünschten Smart Grid-Funktionalität – relevante Akteure und beteiligte IT-Systeme mit Anwendungsfällen (*use cases*) auf das SGAM abgebildet. Dabei werden unterschiedliche Ebenen des SGAM gequert, so dass Anforderungen an die Interoperabilität der beteiligten Systeme strukturiert ermittelt werden. Das erwünschte Systemverhalten stellt also den Ausgangspunkt und wesentlichen Input der Use-Case-Methodik dar. Für die Entwicklung verteilter Smart Grid-Steuerungskonzepte im Rahmen angewandter Informatik-Forschung, wie sie im Zentrum der hier vorliegenden Arbeit stehen, ist diese Methodik nicht anwendbar, da das erwünschte Systemverhalten zunächst definiert werden muss und somit eines der Ergebnisse der Arbeit darstellt. Die Methodik zeigt bezüglich der in Abschnitt 2.2.1 definierten Anforderungen zwei wichtige Stärken: Durch die Abbildung auf das SGAM wird erforderliches Domänenwissen eingebracht (Anforderung 1). Anwendungsfälle als Werkzeug erleichtern zudem eine strukturierte Dokumentation der gewonnenen Erkenntnisse (Anforderung 5). Beide Aspekte können in die Erweiterung

eines geeigneten Vorgehensmodells eingebracht werden. Es sollte daher darauf geachtet werden, dass ein Übergang zur Use-Case-Methodik erleichtert wird, die Vorgehensmodelle somit aufeinander aufbauen können.

Design Science

Design Science [Hev+04] wurde für die anwendungsorientierte Forschung im Bereich der Informationssysteme beschrieben und wird auch in der Energieinformatik-Forschung mittlerweile weit verwendet. Es beschreibt anwendungsinvariant kein Vorgehensmodell, sondern bündelt Richtlinien für eine fundierte und vor allem artefaktfokussierte Forschung. Kern der Design Science sind sieben Richtlinien, die explizit auf unterschiedliche Aspekte des Forschungsprozesses eingehen, wie z. B. die Relevanz des bearbeiteten Praxisproblems, unterschiedliche Möglichkeiten zur Evaluation der entwickelten Lösungsansätze bzw. Software-Artefakte und einer Kommunikation der Ergebnisse im Forschungs- und Anwendungsumfeld.

Design Science erfüllt die in Abschnitt 2.2.1 definierten Anforderungen nicht explizit, da es kein Vorgehensmodell im eigentlichen Sinne darstellt, sondern vielmehr zur Herleitung eines geeigneten Vorgehens im Anwendungskontext auf Basis der formulierten Richtlinien auffordert. Daher soll das Vorgehensmodell diese Richtlinien berücksichtigen bzw. abbilden.

Algorithm Engineering

Mit dem iterativen Vorgehensmodell Algorithm Engineering beschreibt Sanders vier Phasen zur Entwicklung von Algorithmen in der anwendungsorientierten Informatik (siehe Abbildung 2.2) [San09]. Die Motivation für die algorithmische Forschung soll aus Problemen der angestrebten Anwendung gewonnen werden (siehe Abbildung 2.2: *realistic models*). Das Modell sieht insbesondere solche Phasen vor, in denen eine Kenntnis über die anwendungsinvariante Performanz der Algorithmen gewonnen und dokumentiert wird. Während in einer analytisch-deduktiven Phase (*analysis*, siehe den linken absteigenden Teil des Modells in Abbildung 2.2)) die sogenannten Performanzindikatoren (*performance indicators*) ermittelt werden, zielt die experimentell-induktive Phase (siehe den rechten aufsteigenden Teil des Modells in selbiger Abbildung) auf die Bewertung der Performanz in Bezug auf die realweltlichen Probleme. Dennoch ist Algorithm Engineering keine transdisziplinäre Forschung im Sinne Gibbons [Gib+94], da eine Einbindung von Anwendungsexperten nicht explizit vorgesehen ist. Eine qualifizierte Bewertung der anwendungsspezifischen Performanz der entwickelten Algorithmen kann daher in der experimentellen Phase nur bedingt vorgenommen werden. Stattdessen wird ein direkter Übergang aus diesem Vorgehensmodell in die Anwendungsentwicklung (*application engineering*) vorgeschlagen. Algorithm Engineering erfüllt insbesondere die in Abschnitt 2.2.1 definierten Anforderungen bzgl.

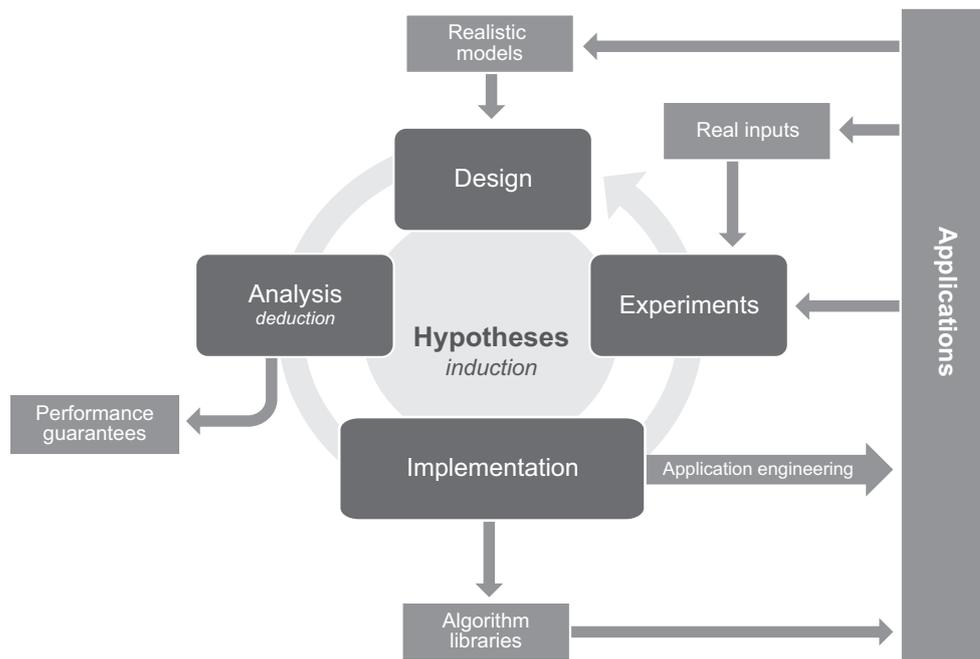


Abbildung 2.2: Algorithm Engineering, eigene Abbildung nach [San09].

der Beachtung sicherheitskritischer Aspekte (Anforderung 2) sowie der Dokumentation experimentell gewonnener Erkenntnisse (Anforderung 5). Als anwendungsorientiertes Phasenmodell definiert es die Grundlage für das im Folgenden beschriebene Vorgehensmodell Smart Grid Algorithm Engineering.

2.2.3 Smart Grid Algorithm Engineering

Um innerhalb eines Forschungs- und Entwicklungsprozesses eine Lösung zu entwickeln, die sich innerhalb der Rahmenbedingungen des Anwendungskontextes bewegt, sowie für die Bewertung der anwendungsspezifischen Performanz müssen entsprechende Expertinnen und Experten² eingebunden werden. Das Vorgehensmodell Smart Grid Algorithm Engineering (SGAE) definiert daher ergänzend zu den einzelnen Phasen die erforderlichen Rollen, aus denen sich das entsprechende Team zusammensetzen muss:

- **Algorithmen-Entwickler** (AE, *algorithm engineer*): Der Fokus von SGAE liegt auf der Entwicklung verteilter Algorithmen für einen spezifischen Anwendungskontext. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit in Bezug auf diese Algorithmen sollte daher von

²Im Folgenden wird auf die explizite Nennung der weiblichen und männlichen Form meist verzichtet; gemeint sind immer beide Geschlechter.

Personen mit einer entsprechenden Ausbildung, z. B. einem Informatik-Hintergrund, durchgeführt werden.

- **Domänen-Experte** (DE, *domain expert*): Abhängig von den im SGAM (siehe Abschnitt 2.2) abgedeckten Zonen und Domänen, welche die zu entwickelnde Lösung umfassen muss, müssen Experten mit dem entsprechenden Hintergrund (z. B. Energiemärkte, Schutzautomation oder Prozessleittechnik) einbezogen werden.
- **Experiment-Experte** (EE, *expert in experimental engineering*): Für den experimentell-induktiven Teil des Vorgehensmodells werden Experten für die Entwicklung und Evaluation von Simulationsmodellen, für das Design von Experimenten sowie für die statistische Auswertung von Simulationsergebnissen eingebunden.

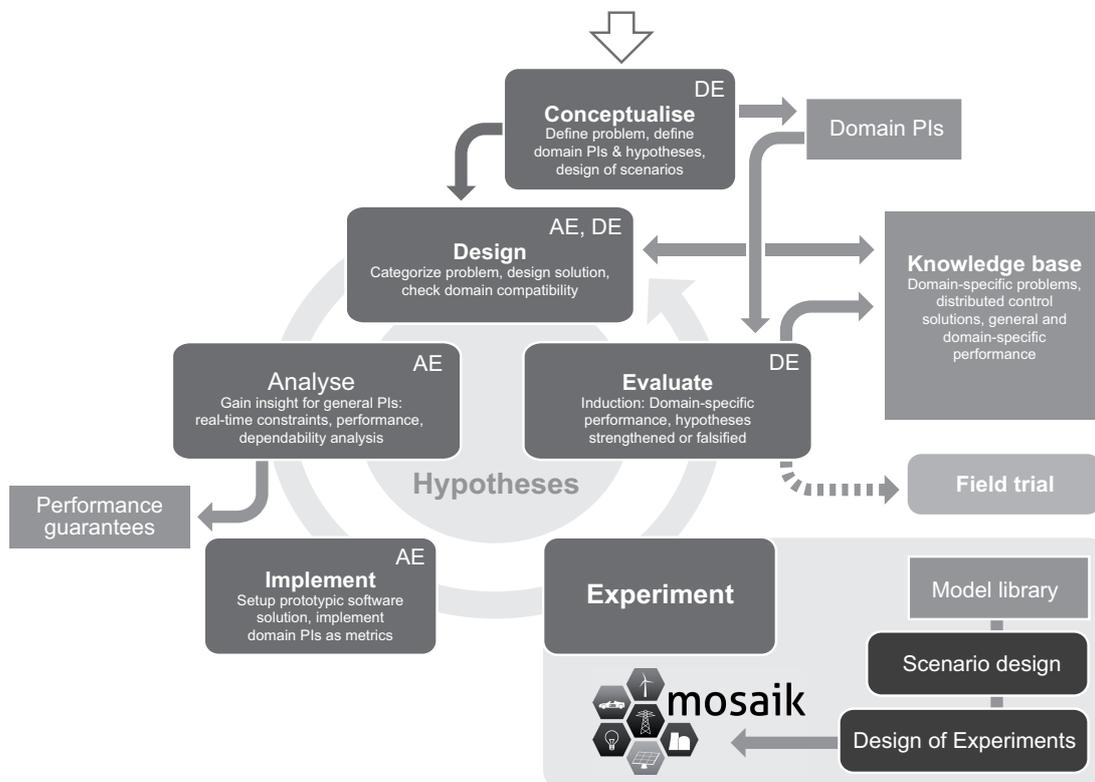


Abbildung 2.3: Smart Grid Algorithm Engineering (SGAE). Quelle: [NTS13]

In Abbildung 2.3 ist das Vorgehensmodell SGAE als domänenspezifische Erweiterung von Algorithm Engineering dargestellt. In [NTS13] werden die einzelnen Phasen sowie diesen zugeordnete Schritte im Detail dargestellt. Hier wird lediglich ein Überblick über das Modell gegeben und dargestellt, inwieweit es sich als Erweiterung aus den vorab dargestellten etablierten Herangehensweisen ergibt:

1. Um das zu lösende Anwendungsproblem aus dem Smart Grid-Kontext zu erfassen, wird eine Konzeptualisierungsphase eingeführt. In dieser Phase definieren Domänenexperten das Problem und die gewünschte domänenspezifische Performanz. Für eine im weiteren Verlauf des Vorgehensmodells zu entwickelnde Lösung werden erste Hypothesen entwickelt, die später dazu verwendet werden müssen, die prinzipielle Eignung der Lösung für das definierte Problem zu ermitteln (siehe Abschnitt 2.1).
2. In der Analysephase werden die domänenspezifischen Zeitgrenzen als Restriktionen (*hard constraints*) aufgenommen.
3. Der Aufbau einer dokumentierten Modellbibliothek soll die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in nachfolgenden Experimenten gewährleisten.
4. Die experimentelle Phase wird durch den Einsatz von Smart Grid-Simulationswerkzeugen gestützt. Die Evaluationsphase wird gesondert behandelt, da in dieser Phase – im Gegensatz zur experimentellen Phase – die Domänen-Experten eine Einschätzung der domänenspezifischen Performanz auf Basis der experimentell ermittelten Metriken vornehmen.
5. Teil der Evaluationsphase ist die organisationsinterne Dokumentation von Zwischenergebnissen und Fehlschlägen in einem geeigneten Format (d. h. ergänzend zur Ergebnispublikation in wissenschaftlichem oder anwendungsbezogenen fachlichem Kontext).

Weiterhin soll kurz darauf eingegangen werden, inwieweit SGAE die Richtlinien der Design Science (siehe Abschnitt 2.2.2) erfüllt. Dazu wird in Tabelle 2.3 dargestellt, wie SGAE die Einhaltung der Richtlinien unterstützt. Es wird dargestellt, dass ein Vorgehen nach SGAE ebenfalls ein Vorgehen im Sinne der Design Science ist.

Tabelle 2.2: Abbildung der Design Science Richtlinien nach [Hev+04] im SGAE-Vorgehensmodell

Design Science Richtlinie	Abbildung in SGAE
Entwicklung von Artefakten	SGAE sieht als iteratives Vorgehensmodell eine frühe Implementierung und experimentelle Evaluation vor. Als Artefakt entsteht sowohl der Algorithmus als auch dessen Umsetzung in einer ausgewählten Technologie.
Problem-Relevanz	Die Auswahl und Definition eines zu lösenden Problems wird von Domänen-Experten vorgenommen, so dass praxisrelevante Probleme identifiziert werden.
Evaluation	Nützlichkeit, Güte und Effizienz der entwickelten Lösungen werden über domänenspezifische Performanz-Indikatoren ermittelt.
Forschungsbeitrag	SGAE unterstützt einen Forschungsbeitrag sowohl als Artefakt als auch in methodischer Hinsicht über die Integration entsprechender Methoden zur Auswahl und Anpassung geeigneter Algorithmen.
Wissenschaftliche Stringenz	SGAE begünstigt ein methodisches Vorgehen über die einzelnen Phasen hinweg: So werden z. B. bereits in der Konzeptualisierungsphase Hypothesen entwickelt, die zur Evaluation der entwickelten Lösung am Ende des iterativen Modells vorgesehen werden. SGAE folgt dem Konzept des wissenschaftlichen Realismus.
Design als Suchprozess	Im Vorgehen nach SGAE beinhaltet die Suche nach einer geeigneten Lösung insbesondere die Beachtung domänenspezifischer Einschränkungen unter Verwendung der Methoden und Werkzeuge, die bereits aus vorangegangenen Arbeiten zur Verfügung stehen. Das iterative Vorgehen spiegelt dabei den Suchprozess wider, bei dem nicht nur die Nähe zur Praxis verkleinert werden soll, sondern auch eine fortschreitend verbesserte Qualität des Ergebnisses erreicht werden soll.
Publikation	In SGAE wird keine explizite Aussage zur Veröffentlichung von Ergebnissen getroffen. Als Vorgehensmodell für die anwendungsorientierte Forschung ist die Publikation von Ergebnissen, die sich aus allen Phasen des Modells speist, natürlicher Bestandteil des unterstützten Prozesses. Weiterhin sieht SGAE die – allerdings interne – Dokumentation von Fehlschlägen und Irrwegen vor, die für zukünftige Arbeiten im vergleichbaren Kontext hilfreich sind. Insofern unterstützt SGAE die Verbreitung gewonnener Erkenntnisse intern und extern.

2.3 ZUORDNUNG VORGEHENSMODELL UND ERGEBNISSE DIESER ARBEIT

SGAE unterstützt den Erkenntnis- und Entwicklungsprozess in der anwendungsorientierten Smart Grid-Forschung. Für den Leser oder die Leserin ist dabei eine chronologische Darstellung des Erkenntnisprozesses irrelevant, weshalb sich die Struktur der hier vorliegenden Arbeit auf die logische inhaltliche Abfolge fokussiert. Die Bezüge zum verwendeten Vorgehensmodell SGAE können dabei nur schlecht dargestellt werden, da im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit lediglich das Ergebnis des Prozesses, nicht der dahin führende Prozess dargelegt werden sollte. Daher wird in [Tabelle 2.3](#) lediglich kommentiert, wie sich die Abschnitte dieser Arbeit aus dem Prozessmodell ergeben, d. h. als Ergebnis welcher SGAE-Phase sie anzusehen sind. Nicht erkennbar ist in der hier vorgelegten Arbeit, inwieweit Praxispartner in die Diskussion der Annahmen und Rahmenbedingungen einbezogen wurden. Entsprechend des SGAE-Rollenkonzeptes wurden entsprechende Experten in der Konzeptualisierungsphase (zur Beschreibung des Problems), der Design-Phase (zum Abgleich mit den Rahmenbedingungen) und der Evaluationsphase (zur Definition der domänenspezifischen Performanz-Indikatoren) einbezogen.

Tabelle 2.3: Zuordnung Ergebnisse – SGAE-Vorgehensmodell

SGAE-Phase	Ergebnisse und Bezug zu Kapitel
<i>Conceptualise</i>	Problemdefinition, Zielsetzung (Kapitel 1 , Glossar) Hypothesen (Kapitel 8) Szenarien (Kapitel 8) Rahmenbedingungen (Kapitel 9)
<i>Design</i>	Algorithmische Einordnung (Kapitel 3 , Kapitel 5) Lösungsentwicklung (Kapitel 7)
<i>Analyse</i>	Identifikation anwendungsspezifischer Restriktionen (Abschnitt 1.4 , Abschnitt 6.1)
<i>Implement</i>	Prototypische Umsetzung (Abschnitt 8.2)
<i>Experiment</i>	Entwurf der Experimente (Kapitel 8)
<i>Evaluate</i>	Bewertung der Simulationsergebnisse (Kapitel 8)

SGAE beschreibt ein iteratives Vorgehen zur Entwicklung verteilter Smart Grid-Algorithmen. Im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit werden die Ergebnisse einer ersten Iteration beschrieben. Als wesentliche Aufgabe zu Beginn einer solchen Entwicklung wird es angesehen,

einen geeigneten algorithmischen Ansatz für das identifizierte Problem zu ermitteln und eine initiale Lösung zu entwickeln. Die Evaluation dient dazu, die prinzipielle Eignung der Lösung für das betrachtete Problem zu prüfen, erforderliche Anpassungen an die Lösung zu ermitteln und Leitfragen für Folgeaktivitäten – im SGAE-Sinn weitere Iterationen – herzuleiten.

3

METHODISCHE GRUNDLAGEN

Als Grundlage für die Konzeptualisierung des Problems der kontinuierlichen Einsatzplanung wird zunächst der Bereich des Scheduling vorgestellt, dem die Einsatzplanung **konzeptionell zugeordnet** werden kann ([Abschnitt 3.1](#)). Die Lösung vieler Einsatzplanungsprobleme in unterschiedlichen Anwendungskontexten beruht auf einer **Modellierung** als Constraint Satisfaction bzw. Constraint Optimization Problems (CSP/COP) – eine Vorstellung dieser Ansätze sowie der Gründe für und Grundsätze von verteilten **Lösungsverfahren** stellt den zweiten Abschnitt dieses Kapitels dar ([Abschnitt 3.2](#)). Die **technologische Umsetzung** verteilter Verfahren schließlich erfolgt häufig mit Hilfe von Agentensystemen. Eine Vorstellung relevanter Grundlagen in diesem Kontext stellt den Abschluss dieses Kapitels dar ([Abschnitt 3.3](#)).

3.1 SCHEDULING

Als Scheduling oder Ablaufplanung bezeichnet man den Prozess, eine begrenzte Menge von Ressourcen einer definierten Menge von Aufgaben (*jobs*) zuzuweisen [[Pin95](#)]. Unter diesem Verständnis ist Scheduling eine allgegenwärtige Tätigkeit – sie findet sich in so unterschiedlichen Bereichen wie bei der Koordination des Ablaufs von Bautätigkeiten, in der industriellen automatisierten Fertigung oder bei der Planung der Kometenmission Rosetta.¹ Die Gemeinsamkeiten der Probleme erscheinen zunächst begrenzt – dennoch sind aus dem Bereich des Scheduling seit den 1950er Jahren unterschiedliche Ansätze zur formalen Beschreibung und Kategorisierung entwickelt worden, um allgemein anwendbare Algorithmen entwickeln und anwenden zu können.

3.1.1 Klassifikation von Scheduling-Problemen

Mit der Klassifikation von Scheduling-Problemen nach Graham wurde ein Ansatz vorgestellt, der eine abstrakte Modellierung eines beliebigen Scheduling-Problems erlaubt [[Gra+79](#)]. Dabei wird die Beschaffenheit eines Scheduling-Problems über das Maschinenumfeld (α),

¹Die Mission Rosetta der europäischen Raumfahrtagentur ESA dient der erstmaligen direkten Erforschung eines Kometen durch eine Raumsonde. Über 10 Jahre nach Start der Sonde erfolgte die Landung im November 2014 (www.dlr.de/rosetta/, zuletzt besucht am 9.12.2014).

die Aufgaben-Eigenschaften (β) sowie die Optimalitätsfunktion (γ) mittels vorgegebener Charakteristika beschrieben. Erweiterungen zu diesem Ansatz integrieren die unterschiedlichen Ausprägungen des von Graham vorgeschlagenen Tripels in die Formalisierung [Bru07].

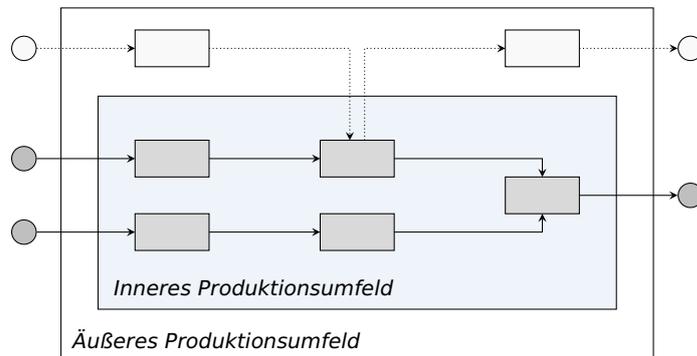
Die meisten realweltlichen Scheduling-Probleme unterliegen nicht nur einem, sondern mehreren Optimierungszielen – es handelt sich somit um Mehrziel-Optimierungsprobleme. Entsprechende Erweiterungen der Kategorisierung der Optimalitätsfunktion γ werden z. B. in [TB01] beschrieben.

Ein Produktionsumfeld – sei es nun der Maschinenpark einer Fabrik oder verteilte Einheiten eines VK – unterliegt grundsätzlich einer Vielzahl von Restriktionen. In der klassischen Tripel-Modellierung nach Graham sowie in den dargestellten Erweiterungen werden diese Restriktionen entweder dem Maschinenumfeld oder den Aufgaben-Eigenschaften zugeordnet und mit diesen Bereichen modelliert. Schwierigkeiten in der Modellierung der Restriktionen ergeben sich dann, wenn sie nicht nur das Produktionsumfeld betreffen, das für die Produktion unmittelbar erforderlich ist. In [Abbildung 3.1\(a\)](#) ist dieser Aspekt vereinfacht dargestellt: Das *innere Produktionsumfeld* wird für die Ausführung der aktuell betrachteten Aufgabe genutzt. Die Komponenten (z. B. Maschinen) des inneren Produktionsumfeldes sind in weitere Produktionsprozesse eingebunden (das *äußere Produktionsumfeld* in [Abbildung 3.1\(a\)](#)) – es handelt sich um ein sogenanntes *Mehrzweck-Produktionsumfeld*.

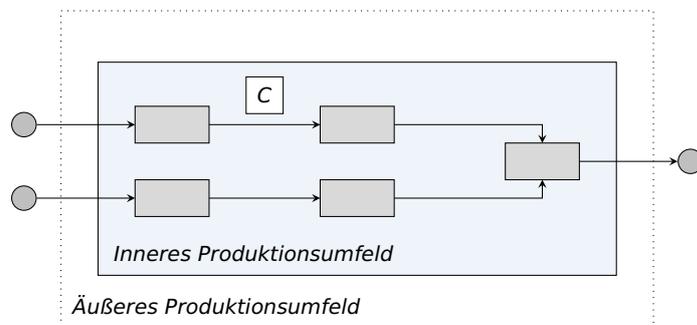
Um eine Planung im inneren Produktionsumfeld durchführen zu können, müssen somit auch die Restriktionen beachtet werden, die sich aus dem äußeren Produktionsumfeld ergeben. Zwei Ansätze sind möglich und können – abhängig von der Komplexität der Umgebung – gewählt werden:

- Bei einer **vollständigen Modellierung** wird die Systemgrenze erweitert und umfasst das äußere und innere Produktionsumfeld. Somit werden neben dem eigentlich betrachteten Prozess auch alle weiteren Prozesse modelliert, die im Mehrzweck-Produktionsumfeld ausgeführt werden müssen.
- In einer **restriktionsbasierten Modellierung** ([Abbildung 3.1\(b\)](#)) wird die Systemgrenze auf das innere Produktionsumfeld reduziert. Die Abhängigkeiten zu weiteren Prozessen werden über Restriktionen (*constraints*) modelliert. Eine solche Modellierung erlaubt auch die Abbildung weiterer Restriktionen und Präferenzen (beispielsweise ökologische oder ökonomische Aspekte).

Die Steuerung dezentraler Energieanlagen im Verteilnetz kann als ein solches Mehrzweck-Produktionsumfeld betrachtet werden: Die Energieanlagen haben – insbesondere bei einer Installation in Privathaushalten – nicht nur die Aufgabe, eine Energiemenge in das VK einzubringen. Sie sind eingebunden in unterschiedliche Prozesse, wie z. B. die Deckung eines thermischen Bedarfs bei KWK-Anlagen. Besonders deutlich wird dieser Aspekt dann,



(a) Äußeres und inneres Produktionsumfeld bei einer Mehrzweck-Produktionsumgebung.



(b) Reduktion der Systemgrenze über Constraints (C)

Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines Mehrzweck-Produktionsumfeldes: In Variante (a) erfolgt die vollständige Modellierung des inneren und äußeren Produktionsumfeldes. In Variante (b) werden die Restriktionen des äußeren Produktionsumfeldes über Constraints abstrahiert, so dass die Systemgrenze auf das innere Produktionsumfeld beschränkt werden kann.

wenn steuerbare Lasten in das VK eingebunden werden. Diese Anlagen sind in Nutzer-Prozesse eingebettet, deren Modellierung zum einen komplex und weiterhin auch aus Datenschutzgründen nicht immer erwünscht ist.

Für den Bereich der reaktiven Einsatzplanung in VK wurden bereits Ansätze aus dem Bereich des Scheduling übertragen [Trö10]. Dabei wurde der in [Abbildung 3.1\(b\)](#) dargestellte Weg gewählt: Tröschel stellt das Problem der Einsatzplanung als 5-Tupel dar und ergänzt die Maschinenumfeld und Aufgaben-Eigenschaften (im Kontext der reaktiven Einsatzpla-

nung den Ziellastgang) um den Planungshorizont, die Restriktionen (*hard constraints*, HC) und die Präferenzen (*soft constraints*, SC). Dieser Ansatz bietet gegenüber der klassischen Modellierung den Vorteil, dass Restriktionen und Präferenzen in der Lösungssuche getrennt betrachtet werden können. Mit einer solchen Modellierung kann das betrachtete Problem weiterhin als Constraint Optimization oder Satisfaction Problem (COP/CSP) gelöst werden. Grundlagen dazu werden in [Abschnitt 3.2](#) erläutert.

3.1.2 Planausführung, Planreparatur und Neuaufwurf

Direkt verbunden mit dem Scheduling ist die Frage nach der Planreparatur: Kann der initial erstellte Plan nicht ausgeführt werden, so muss ein Weg gefunden werden, das vorab definierte Ziel dennoch möglichst gut zu erreichen (im DVPP-Kontext: das Wirkleistungsprodukt zu erfüllen). Die Gründe dafür, dass der Plan nicht mehr gültig ist, sind spezifisch für den Anwendungskontext. In der Produktionsplanung kann es sich bei einer Störung z. B. um eine verzögerte Anlieferung von Material handeln, das für den Produktionsprozess benötigt wird. Im Kontext von DEU sind Abweichungen Normalität: Durch die Einbindung in Nutzerprozesse bei steuerbaren Lasten und die Dargebotsabhängigkeit regenerativer Energieanlagen ist mit einer Vielzahl von Planabweichungen zu rechnen.

Im Bereich der maschinellen Ablaufplanung wurden viele Arbeiten für die Reparatur von Plänen vorgestellt. In der bereits angeführten Arbeit von Tröschel wurde für den entsprechenden Prozess in Virtuellen Kraftwerken – die reaktive Einsatzplanung bei Auftreten von Störungen – ebenfalls ein Ansatz zur Planreparatur vorgestellt. Der Ansatz beruht darauf, einen nicht mehr gültigen Einsatzplan eines VK möglichst schnell in einen neuen, gültigen Einsatzplan zu überführen und dann kontinuierlich zu verbessern.

Nicht diskutiert wurde bisher, ob in jedem Fall eine Planreparatur dem Neuaufwurf einer Planung vorzuziehen ist. Diese Fragestellung wird im Folgenden genauer untersucht. Dazu werden die Gründe, die in der industriellen Fertigung für eine Planreparatur im Gegensatz zur Neuplanung vorgebracht werden, im Kontext der Einsatzplanung in DVPP bewertet. Die aufgeführten Begründungen sind u.a. [[Pin95](#)] und [[Hen98](#)] entnommen.

Maschinenbelastung In der industriellen Fertigung kann ein häufiger Wechsel der Betriebszustände die Lebensdauer der eingesetzten Maschinen verkürzen. Daher werden solche Pläne bevorzugt, die den einmal eingenommenen Betriebszustand der Anlage möglichst erhalten. Realisiert wird eine solche Auswahl über eine Planreparatur, die über möglichst wenige Änderungen einen gültigen neuen Plan ermittelt. Abstrahiert lässt sich für den Kontext der Einsatzplanung in DVPP die Anforderung übertragen, dass die Restriktionen und Präferenzen der verwendeten Anlagen in der Umplanung beachtet werden müssen.

Tabelle 3.1: Bewertung der Gründe für eine Bevorzugung der Planreparatur gegenüber einem Neuaufwurf der Planung aus der industriellen Fertigung im DVPP-Kontext.

Begründung für Planreparatur	Bewertung im DVPP-Kontext
Minimieren der Maschinenbelastung	Übertragbar: Eine anlagentypspezifische Beachtung der Restriktionen und Präferenzen ist erforderlich.
Minimieren des Planungsaufwands	Übertragbar: In voll-automatisierten Systemen ist insbesondere die Einhaltung der anwendungsspezifischen Zeitgrenzen erforderlich.
Berücksichtigung von Abhängigkeiten zu Zulieferungsprozessen	Nicht übertragbar: Für die Umsetzung eines Einsatzplanes in DVPP werden keine stofflichen Zulieferungsprozesse betrachtet.
Berücksichtigung von verknüpften Prozessen	Übertragbar: Einsatzpläne werden nicht nur auf den Energieanlagen, sondern auch auf dem Stromnetz umgesetzt. Ungünstige Betriebszustände des Stromnetzes können somit die Umsetzung eines neuen Planes verhindern.

Diese sind anlagentypspezifisch: So kann davon ausgegangen werden, dass das Verstellen des Anstellwinkels der Rotorblätter bei Windenergieanlagen zu einer erhöhten Belastung des Materials führt. Bei PV-Anlagen hängt dieser Aspekt v.a. von den Eigenschaften des Wechselrichters ab, so dass keine allgemeingültige Aussage möglich ist.

Planungsaufwand In der industriellen Fertigung wird angenommen, dass der Aufwand für die Wiederherstellung eines konsistenten Plans wesentlich kleiner ist als bei einem Neuaufwurf der Planung. Dieser Aspekt kann auf die Einsatzplanung in DVPP nicht direkt übertragen werden: In vollautomatisierten Systemen hängt der Planungsaufwand von den verwendeten Planungsalgorithmen und Lösungsräumen ab. Die verallgemeinerte Aussage, eine Planreparatur führe zu einer schnelleren Lösungsfindung, erscheint daher nicht möglich. Anwendungsspezifische Zeitgrenzen müssen eingehalten werden.

Zulieferungsprozesse Die Planung industrieller Fertigungsprozesse hängt wesentlich von der Anlieferung und dem Abtransport von Material ab. Diese Prozesse stellen ein wesentliches Optimierungskriterium dar. So ist ein großer Bereich der Just-In-Time-Logistik mit der Optimierung dieser Prozesse befasst. Bei nicht-stofflichen Prozessen ist dieser Aspekt nicht relevant: Die Zulieferung von Gas wird nicht als Optimierungskriterium innerhalb des DVPP-Kontextes angesehen. Biomasse-Anlagen sind dagegen wesentlich auf die An-

lieferung von Material angewiesen. Die Optimierung des Biomasse-Anlagenbetriebs stellt allerdings keine Aufgabe innerhalb der DVPP-Planung dar, da diese Anlagen durch ihre Größe bereits heute direkt in die Energiemärkte integriert werden können oder gesonderten Förderbedingungen unterliegen.

Verknüpfte Produktionsprozesse Auf den Aspekt miteinander verknüpfter Prozesse in einem Mehrzweck-Produktionsumfeld wurde bereits eingegangen. Für den Kontext der Einsatzplanung in DVPP kann neben den bereits dargestellten Aspekten weiterhin auf den Aspekt der Stromnetze eingegangen werden: Während nicht zuletzt aufgrund der in Deutschland vorgeschriebenen Trennung von bilanzieller Energieversorgung und Netzbetrieb in DVPPs eine reine bilanzielle Sicht umgesetzt wird, muss die tatsächliche physikalische Umsetzung der Einsatzpläne auf dem Stromnetz innerhalb der vorgegebenen Betriebsgrenzen erfolgen. Das DVPP-Konzept sieht es vor, die Einsatzpläne nach erfolgten Markt-Matching an die entsprechenden Netzbetreiber zu kommunizieren, um diesen eine Prüfung auf Zulässigkeit zu ermöglichen (siehe [Abschnitt 1.3](#)). Die Netzbetreiber können daraufhin Gegenmaßnahmen ergreifen bzw. vorbereiten, wenn kritische Netzzustände (z. B. Leitungsgenpässe) erwartet werden. Änderungen der vorab kommunizierten Pläne haben somit Rückwirkungen auch auf den Netzbetrieb. Die Prozesse der DVPP-Einsatzplanung und des Netzbetriebs sind in diesem Sinne eng miteinander verknüpft.

In [Tabelle 3.1](#) ist die Bewertung der Gründe für eine Planreparatur im DVPP-Kontext zusammenfassend dargestellt.

3.2 CONSTRAINT SATISFACTION UND OPTIMIZATION

Mit der separaten Modellierung von Restriktionen und Präferenzen ergibt sich die Möglichkeit, ein Problem als Constraint Problem zu modellieren. Insbesondere im Bereich der verteilten Algorithmen wurden viele Lösungsverfahren für Constraint Probleme vorgestellt. Zunächst wird daher im Folgenden vorgestellt, wie ein solches Problem definiert wird und anhand eines Beispiels erläutert. Die Darstellung orientiert sich im Wesentlichen an [\[SL09\]](#), [\[RN10\]](#) und [\[Yok01\]](#). Eine Einführung in den Bereich der Constraint Probleme mit Bezügen zur Energiewirtschaft findet sich weiterhin in [\[Peñ06\]](#).

3.2.1 Definition

Ein *Constraint Problem* wird beschrieben über eine Menge an Variablen, eine Menge von möglichen Werten dieser Variablen, sowie eine Menge von Constraints.

Die Variablen-Menge V wird definiert als $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. Die nicht-leere Menge möglicher Wert-Belegungen einer Variable X_i wird als Domäne D_i bezeichnet: $D_i = \{d_{i_1}, d_{i_2}, \dots, d_{i_n}\}$.

Weiterhin beinhaltet ein Constraint Problem eine Menge von Constraints C . Jedes Constraint beschreibt Abhängigkeiten in der zulässigen Wertbelegung zwischen einer definierten Untermenge aus V .

Die Belegung der Variablen mit Werten aus der jeweiligen Domäne wird als *Zustand* bezeichnet. Die Menge der Zustände für das so definierte Constraint Problem ist über das kartesische Produkt der Domänen ermittelbar: $S = D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$.

In der dargestellten Formalisierung lassen sich Constraint Satisfaction Probleme (CSP) beschreiben. Erfüllt ein Zustand alle in C definierten Constraints, so handelt es sich um eine *Lösung* des Problems. Erweitert man das Constraint Problem um eine Fitnessfunktion, so liegt ein *Constraint Optimization Problem* (COP) vor: Mit Hilfe der Fitnessfunktion ist es möglich, Zustände miteinander zu vergleichen. Optimierungsverfahren für COP bedienen sich dieser Fitnessfunktion, um eine Lösung aus der Menge zulässiger Zustände auszuwählen. In diesem Sinne kann ein CSP als Spezialfall eines COP angesehen werden, bei dem die Fitnessfunktion lediglich 0 oder 1 zurückliefert.

Ein *dynamisches* COP liegt vor, wenn sich die Domänen im Verlauf des Verfahrens ändern, somit eine ggf. vorab definierte Lösung nicht mehr über die geänderten Domänen realisieren lässt.

Constraints werden auf Untermengen der Variablenmenge V definiert. Eingängig ist die Visualisierung über Constraint-Graphen, bei der die Variablen die Knoten darstellen und eine Kante zwischen zwei Knoten genau dann eingefügt wird, wenn eine Restriktion die beiden entsprechenden Variablen betrifft.

3.2.2 Beispiel: Kartenfärbeproblem

Das Kartenfärbeproblem ist ein häufig angeführtes Beispiel zur Verdeutlichung von Constraint Problemen: Eine Landkarte mit politischen Grenzen soll so eingefärbt werden, dass zwei benachbarte Regionen nicht die gleiche Farbe aufweisen. In [Abbildung 3.2](#) sind zwei Instanzen des Kartenfärbeproblems mit dem entsprechenden Constraint-Graphen dargestellt.

In der ersten Problem Instanz ([Abbildung 3.2\(a\)](#)) sind vier Bereiche (Länder) so angeordnet, dass jeder Bereich an alle anderen Bereiche angrenzt. Der zugehörige Constraint-Graph ist somit *vollvermascht*: Die Restriktion führt dazu, dass bei der Auswahl einer Farbe für eine Region (d. h. der Belegung der Variable mit dem entsprechenden Wert) die Belegung aller anderen Variablen in Betracht gezogen werden muss. Die Restriktion ist in der betrachteten Problem Instanz somit *hochgradig*.

In der zweiten Problem Instanz ([Abbildung 3.2\(b\)](#)) sind die Bereiche hingegen so angeordnet, dass jeder Bereich höchstens an zwei andere Bereiche grenzt. Die Restriktionen betreffen somit maximal zwei Kanten des Constraint-Graphen. Restriktionen, die nur eine geringe Anzahl von Variablen betreffen, werden im Englischen als *low arity constraints*

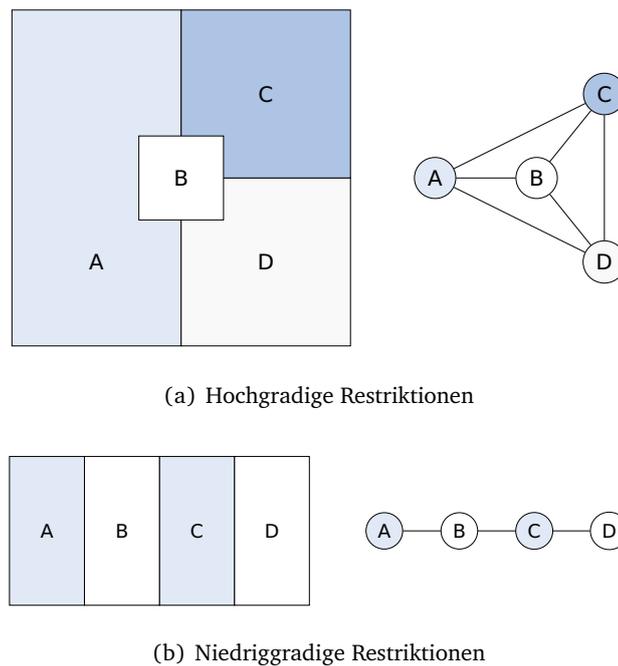


Abbildung 3.2: Beispiele für hoch- und niedriggradige Restriktionen anhand des Kartenfärbeproblems. Links wird jeweils die Probleminstanz dargestellt, rechts der dazugehörige Constraint-Graph. Die Einfärbungen dienen lediglich der Veranschaulichung, stellen gleichzeitig aber auch eine mögliche Lösung der entsprechenden Probleminstanz dar.

bezeichnet.

3.2.3 Verteilte Lösungsverfahren für COP

Verteilte Lösungsverfahren für Constraint Probleme werden nach [FY05] dann eingesetzt, wenn ein oder mehrere der folgenden Aspekte zum Tragen kommen:

- Die Kosten für die Übertragung der Informationen (Domänen und Restriktionen) werden als zu hoch angesehen.
- Die zur Lösung des Problems erforderlichen Informationen sollen aus Sicherheitsgründen nicht übertragen werden.
- Die Kosten für die Umsetzung redundanter Systeme zur Vermeidung von *single point of failure* (SPOF)-Problemen werden als zu hoch eingeschätzt.

Die Formalisierung eines verteilten Constraint Optimization Problems (*distributed COP*, DCOP) leitet sich direkt aus der COP-Formalisierung ab: Ein Agent vertritt genau eine

Variable. Diesem Agenten ist die Domäne bekannt, weiterhin die Restriktionen, denen die Auswahl eines Wertes aus seiner Domäne unterliegt.

Mit dieser Übertragung eines COP auf ein DCOP ist der einzelne Agent zunächst nur in der Lage, aus seiner Domäne eine Belegung für seine Variable zu wählen. Bezogen auf die in dieser Arbeit betrachtete Aufgabe der Einsatzplanung in DVPP heißt das, dass dem Agenten die Fahrpläne bekannt sind, die seine Einheit im betrachteten Zeitraum umsetzen könnte. Um aber zu bestimmen, ob ein gewählter Fahrplan den Restriktionen entspricht, so dass ein gültiger Einsatzplan aus der Auswahl des Fahrplans abgeleitet werden kann, benötigt der Agent weitere Informationen, die nur über einen Wissensaustausch mit anderen Agenten zu erhalten sind.

DCOP-Lösungsverfahren sind somit verteilte Algorithmen, die zur Lösungsfindung solcher Probleme eingesetzt werden können, bei denen Agenten mittels kooperativer Lösungssuche eine Belegung aller Variablen anhand einer definierten Fitnessfunktion ermitteln.

Unterschieden werden vollständige Verfahren, die das theoretische Optimum sicher erreichen können, und heuristische Ansätze, die ggf. gute, aber nicht zwingend optimale Lösungen erreichen. Vollständige Verfahren erreichen das theoretische Optimum entweder über die Kommunikation auf Basis des Constraint-Graphen (Ansatz a) oder über die Speicherung sämtlicher Lösungen (Ansatz b).

Im hier behandelten Problem der Einsatzplanung in DVPP müssen alle Agenten gemeinsam das definierte Produkt erbringen: Der Constraint-Graph ist somit vollvermascht. Der Koordinationsaufwand würde somit – bei Verwendung des Constraint-Graphen als Kommunikationsnetz (entsprechend Ansatz a) – extrem hoch. Die Vorhaltung sämtlicher Zwischenlösungen (Einsatzpläne) entsprechend Ansatz b bietet sich aus Gründen der Speicherkomplexität nicht an. Vollständige Verfahren sind daher für den hier betrachteten Kontext der Einsatzplanung nicht geeignet.

Für eine allgemeine Übersicht zu DCOP-Verfahren sei auf [Yok01] verwiesen. Einige Ansätze wurden bereits im Kontext der Einsatzplanung eingesetzt und evaluiert und werden daher in [Kapitel 4](#) diskutiert.

3.3 AGENTEN IN VERTEILTEN KONTROLLSYSTEMEN

3.3.1 Agenten und Agentensysteme

Mit dem Begriff Agent wird nach Russell und Norvig ein Software-Programm bezeichnet, das in der Lage ist, über Sensoren die Umgebung wahrzunehmen, das so erworbene Wissen ggf. intern zu modellieren, Entscheidungen aus diesem Wissen über den Weltzustand abzuleiten und diese über Aktoren in die Interaktion mit der Welt einzubringen [RN10]. Typischerweise werden die folgenden Agenten-Eigenschaften postuliert [WJ95]:

- **Autonomie:** Agenten sind in der Lage, ohne menschliche Eingriffe zu agieren und üben Kontrolle über ihre Aktionen und ihren internen Zustand aus.
- **Soziale Fähigkeiten:** Agenten sind in der Lage, über eine definierte Sprache mit anderen Agenten zu kommunizieren.
- **Reaktivität:** Agenten reagieren auf Änderungen ihrer Umgebung in einem zeitlichen Zusammenhang.
- **Proaktivität:** Agenten sind in der Lage, proaktiv mit der Welt in Austausch zu treten oder Aktionen in der Welt auszuüben.

Die Fähigkeit zu autonomem Verhalten ist eine wesentliche Eigenschaft des Agenten. Der Grad der Autonomie und die Art der Umsetzung einer autonomen Entscheidung führt weiterhin zur Unterscheidung von reaktiven, deliberativen und hybriden Agenten:

- Ein **reaktiver Agent** setzt einen sensorischen Input direkt in eine Handlung um, beispielsweise über die Anwendung von Regeln. Reaktive Agenten bilden daher nicht zwangsläufig ein Wissen über den Zustand ihrer Umgebung ab. Sie sind nicht in der Lage, proaktives Verhalten umzusetzen.
- Ein **deliberativer Agent** weist die Fähigkeit zur Planung auf: Er modelliert sowohl das Weltwissen in seinem sogenannten *Arbeitsgedächtnis* als auch seine Ziele, die er über die Planung von Aktionen umzusetzen sucht. Entscheidungen trifft er auf Basis seines Weltwissens. Deliberative Agenten können proaktiv mit ihrer Umgebung in Kontakt treten.
- Ein **hybrider Agent** verbindet die Eigenschaften reaktiver und deliberativer Agenten: Er kann sowohl direkt auf definierten sensorischen Input reagieren als auch solches Wissen in seinem Weltwissen ablegen und planerische Entscheidungen aus diesem Wissen ableiten. Gegenüber deliberativen Agenten haben hybride Agenten den Vorteil, dass sie sehr schnell reagieren können, z. B. zur Vermeidung kritischer Zustände.

Neben den dargestellten Definitionen und in der entsprechenden Fachliteratur diskutierten Präzisierungen erscheint im DVPP-Kontext eine weitere Differenzierung von Bedeutung: Agenten können einerseits zur **kooperativen Lösungssuche** eingesetzt werden, d. h. ihre Umgebung entspricht dem Agentensystem. In einer solchen Ausprägung stellen Agenten eine technische Umsetzung eines verteilten Lösungsverfahrens dar. Dem gegenüber stehen Agenten, die einen direkten Einfluss auf die physikalische Welt, beispielsweise Maschinen eines Produktionsumfeldes nehmen können. Im zweiten Fall handelt es sich um ein **Agenten-basiertes Kontrollsystem** [BJW04]. In [Abbildung 3.3](#) wird die Struktur eines solchen Kontrollsystems vereinfacht dargestellt: In der unteren Ebene befindet sich das

Produktionssystem (mit beispielhaftem Produktionsprozess). Jede Einheit des Produktionssystems wird über einen Agenten im Agentensystem repräsentiert. Aufgabe der Agenten ist es, die Einheiten zu steuern und zu überwachen. Innerhalb des Agentensystems kooperieren die Agenten, um den Produktionsprozess anhand einer oder mehrerer Zielfunktionen zu planen und zu optimieren.

Wird ein solches Agenten-basiertes Kontrollsystem ohne eine zentrale Instanz² umgesetzt, so wird es im Rahmen dieser Arbeit als **verteiltetes Kontrollsystem** bezeichnet.

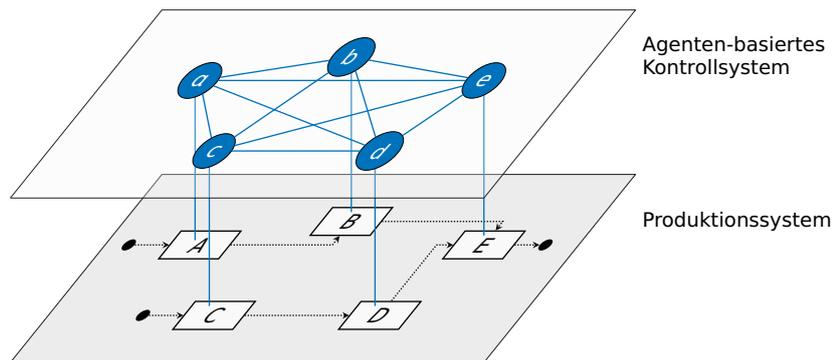


Abbildung 3.3: Kontrolle eines Produktionsprozesses über ein Agentensystem. Auf der Ebene des Produktionssystems finden sich die zu kontrollierenden Maschinen A bis E, die im Agenten-basierten Kontrollsystem durch die Agenten a bis e repräsentiert werden.

3.3.2 Agenten-Architekturen

Die Frage einer geeigneten Agenten-Architektur für ein Agenten-basiertes Kontrollsystem betrifft die drei Teilbereiche³:

1. Inter-Layer-Design: Die möglichen und erforderlichen Steuerungseingriffe des Kontrollsystems werden definiert. Die Interaktionsmöglichkeiten zwischen Kontroll- und Produktionssystem werden entworfen. Diese Design-Entscheidungen betreffen die Ausgestaltung der Verbindungen zwischen Produktions- und Kontrollsystem.
2. Intra-Agent-Design: Die Teilprozesse des Kontrollsystems werden Agententypen zugeordnet. Daraus abgeleitet wird für jeden Agententyp ein geeignetes Agentenmodell gewählt. Die interne Struktur der definierten Agententypen wird entworfen.

²Auf den Aspekt der Zentralität bzw. Dezentralität wird in [Kapitel 4](#) detaillierter eingegangen.

³Die nachfolgende Darstellung erfolgt in Anlehnung an die DACS-Methodik zum Entwurf agentenbasierter Kontrollsysteme [[BJW04](#)].

3. Intra-Layer-Design: Die Interaktionen zwischen den Agenten werden spezifiziert und geeignete Interaktionsprotokolle ausgewählt und angepasst. Die Design-Entscheidung betreffen die Ausgestaltung der Beziehungen und Interaktion zwischen den Agenten.

Für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP werden die Aspekte des Inter-Layer-Design im Rahmen einer Anforderungsanalyse abgeleitet (siehe [Abschnitt 6.1](#)). Das Intra-Agent-Design leitet sich aus der Aufgabe ab, die die Agenten zu erfüllen haben. Diese Aspekte werden somit mit der kontinuierlichen Einsatzplanung als Prozess gemeinsam entwickelt (siehe [Abschnitt 7.3.1](#)). Die Auswahl und Anpassung geeigneter Interaktionsmöglichkeiten wird bei der schrittweisen Entwicklung der kontinuierlichen Einsatzplanung durchgeführt.

Die kontinuierliche Einsatzplanung erfordert eine planerische Interaktion der Agenten; sie müssen somit ein deliberatives Verhalten aufweisen. Erst im Rahmen der Anforderungsanalyse und Umsetzung kann – beispielsweise anhand der zeitlichen Anforderungen – ermittelt werden, ob diese auch reflexive Anteile integrieren müssen. Im Folgenden wird daher die InteRRaP-Architektur vorgestellt, die für die Umsetzung hybrider Agenten entwickelt wurde.

Weiterhin stellt die *Observer/Controller(O/C)*-Architektur einen relevanten Architektur-Ansatz aus dem Forschungskontext selbstorganisierender Systeme dar [[Ric+06b](#)]. Sie adressiert eine andere Ebene als InteRRaP: Ziel ist es, ein selbstorganisierendes System in eine beobachtende und kontrollierende Umgebung einzubetten, um eine *kontrollierte Selbstorganisation* zu erreichen. Auch diese Architektur wird daher nachfolgend erläutert. Für eine Übersicht und Abgrenzung weiterer Agenten-Architekturen sei auf die entsprechenden Grundlagen-Werke verwiesen, insbesondere auf [[Wei13](#)].

Bussmann, Jennings und Wooldridge weisen darauf hin, dass es keine allgemeingültige Architektur eines Agenten-basierten Kontrollsystems geben kann:

»The overall architectures of most agent-based control systems are similar in that they all require resource, transportation and sometimes workpiece agents, but in detail these agents have quite different functionality and employ quite different interaction protocols to achieve their goals. [...] Different control applications will thus require different agent-based control designs.« [[BJW04](#), S. 50]

Die Umsetzung eines Kontrollsystems stellt somit immer eine Anpassung bestehender Konzepte an die Anforderungen des betrachteten Produktionsprozesses dar. Für eine bezüglich der Diskussion um die richtige Auswahl der Agentenarchitektur relevante Publikation sei auf [[Mül99](#)] verwiesen.

InteRRaP Die InteRRaP-Architektur wurde für die Entwicklung hybrider Agenten vorgestellt [[MP93](#)]. Es handelt sich um eine vertikal geschichtete Architektur (siehe [Abbildung 3.4](#)). Kern des InteRRaP-Ansatzes ist es, sowohl die Verhaltensregeln als auch das

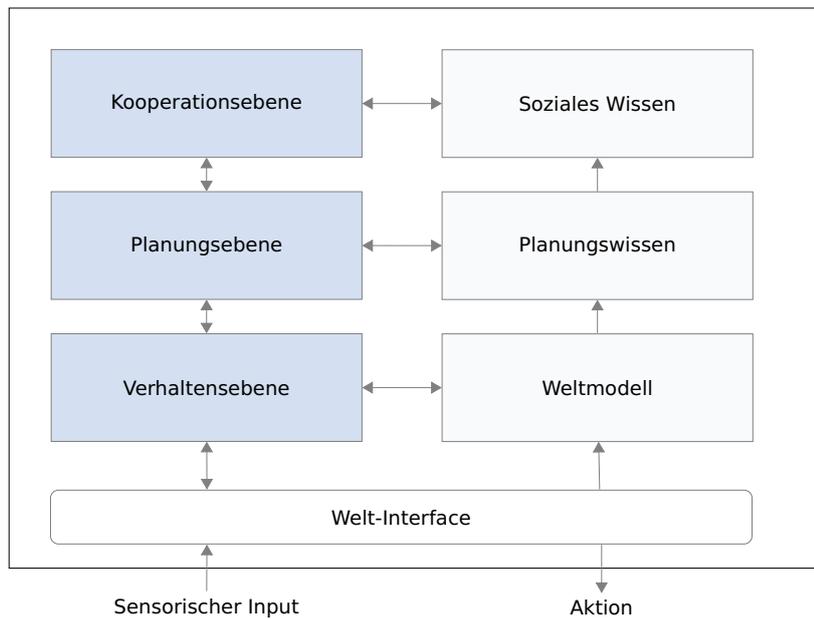


Abbildung 3.4: InteRRaP-Architektur für hybride Agenten. Abbildung angepasst nach [Woo13].

Wissen eines Agenten in einer geschichteten Architektur abzubilden. Von unten nach oben steigt dabei der Grad der Abstraktion an: Die untere Ebene bildet die Rohdaten ab, die dem Agenten zur Verfügung stehen (z. B. Messwerte der Einheit der physikalischen Welt, über die der Agent sensorischen Input erhält) sowie Regeln für eine direkte Ableitung von Aktionen auf Basis dieser Rohdaten. Kann ein Agent nicht direkt Aktionen ableiten, so wird der sensorische Input zur Weiterverarbeitung an die Planungsebene weitergeben, d. h. der Agent führt eine Planung durch anhand des Wissens, das ihm über die anderen Agenten zur Verfügung steht. Ist auch hier keine vollständige Verarbeitung möglich, so tritt der Agent in Austausch mit den anderen Agenten des Agentensystems – die Verarbeitung erfolgt somit auf der Kooperationssebene.

Die InteRRaP-Architektur stellt somit eine logische Schichtenarchitektur dar, in der sowohl Weltwissen als auch Verhaltensebenen nach Abstraktionsgrad und reaktiven bzw. deliberativem Verhalten getrennt modelliert werden können. Dieses Architekturkonzept wird beim Entwurf der kontinuierlichen Einsatzplanung daher wieder aufgegriffen und angepasst. Als Kritik an der in [Abbildung 3.4](#) gewählten und gängigen InteRRaP-Darstellung soll angebracht werden, dass die Interaktion mit der Agentenwelt nicht als Input eingebracht, sondern vollständig in der Kooperationssebene gekapselt wird. Diese Art der Dar-

stellung erscheint für Kontrollsysteme, in denen Input sowohl aus der physikalischen Welt (sensorischer Input) als auch aus der Agentenwelt bei dem Agenten eintreffen kann, wenig intuitiv.

Observer/Controller-Architektur Die Anwendung vollständig verteilter Systeme autonomer Komponenten zielt oft darauf, ein emergentes Verhalten zu erreichen, d. h. ein Systemverhalten, das sich nicht als direkte Folge aus dem individuell spezifizierten Verhalten der einzelnen Bestandteile des Systems, sondern nur aus dem Gesamtverhalten aller Komponenten ergibt. Neben den erwünschten und damit aus Sicht des Entwicklers positiven Emergenzeigenschaften, zeigen die Systeme bisweilen auch unerwünschte Effekte. Um ein solches negatives Verhalten des Gesamtsystems zu vermeiden, wurden unterschiedliche Ansätze vorgestellt, beispielsweise Entwicklungsprinzipien und -methoden für selbstorganisierende Systeme, mit denen gewünschtes Emergenzverhalten ingenieurmäßig entwickelt werden soll [PB05], [Ste+14]. Neben solchen prozessbezogenen Ansätzen wurden auch ergänzende Architekturentwürfe vorgestellt wie die *Observer/Controller(O/C)*-Architektur, die aus dem Forschungskontext des Organic Computing heraus vorgestellt wurde [Ric+06b].⁴

Leitidee hinter der O/C-Architektur ist eine kontrollierte Selbstorganisation: Ein selbstorganisierendes System wird in einen beobachtenden und kontrollierenden Regelkreis eingebettet. In [Abbildung 3.5](#) ist der prinzipielle Aufbau eines solchen Systems dargestellt: Die Architektur besteht aus drei Komponenten:

- **SuOC** (*system under observation and control*): Verteiltes System, dessen selbstorganisierendes Verhalten kontrolliert werden soll.
- **Observer**: Beobachtungskomponenten, die definierte Werte anhand eines Beobachtungsmodells vom SuOC abfragt, initial bewertet und aggregiert.
- **Controller**: Kontrolleinheit, die Kontrollimpulse ermittelt und an das SuOC weitergibt.

Der Prozess ist in der vereinfachten Sicht direkt ablesbar: Der Observer ermittelt Sensorwerte, die in einem Beobachtungsmodell (*observer model*) definiert sind, vom verteilten System. Diese Sensorwerte werden initial bewertet und aggregiert als Systemindikatoren an den Controller weitergegeben.

Der Prozess innerhalb des Controllers kann sehr komplex ausgestaltet sein, beruht aber immer darauf, dass die Systemindikatoren auf die definierten Systemziele hin geprüft werden und Kontrollimpulse abgeleitet werden. Diese werden in das verteilte System eingebracht. Die Bewertung des Controllers kann durch Zielfunktionen beeinflusst werden; an

⁴Eine Einführung in das Organic Computing Umfeld findet sich in [MMW04].

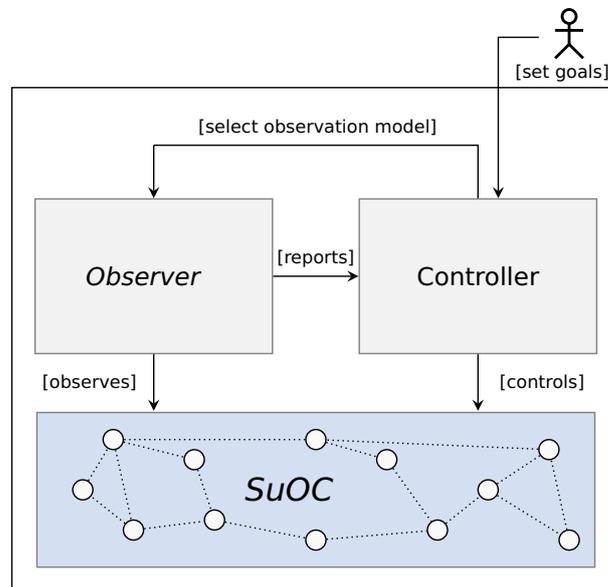


Abbildung 3.5: Observer/Controller-Architektur. SuOC: *system under observation and control*. Erläuterung siehe Text. Quelle: Vereinfachte Darstellung nach [Ric+06b].

dieser Stelle ist auch menschliche Interaktion möglich. Im Systembetrieb kann sich – abhängig von der Ausgestaltung des Controllers – der Bedarf an Sensordaten und -auflösung ändern. Diese Aspekte werden im Beobachtungsmodell definiert, das der Controller daher als Vorgabe für den Observer festlegt.

Das Prinzip des lernenden Systems ist fest in der O/C-Architektur verankert: Der Controller speichert historische Werte und lernt, welchen Einfluss die zuvor gesetzten Kontrollimpulse auf das System hatten. Unbedingt erforderlich ist somit ein internes Zeitmodell, das es dem Controller erlaubt, Kontrollimpulse und Systemverhalten miteinander in Beziehung zu setzen.

Mit der O/C-Architektur ist es möglich, ein selbstorganisierendes System in eine erweiterte Systemumgebung einzubringen, die die Vorteile verteilter Systeme in der Lösungssuche mit den Vorteilen klassischer Regelsysteme verbindet.

3.3.3 Vermeidung von Unruhe in Agenten-basierten Kontrollsystemen

Insbesondere in reaktiven verteilten Systemen sollte vermieden werden, dass das System durch die Bearbeitung von detektierten Störungen oder Ereignissen dauerhaft in Planungs-

prozesse eingebunden ist: Wenn ein Agent aufgrund eines sensorischen Inputs eine Umplanung beginnt und diese den anderen Agenten mitteilt, können diese mit ihrem so aktualisierten Weltwissen ebenfalls eine Umplanung durchführen. Die Information über diese Umplanung wird weitere Agenten zur Umplanung veranlassen usw.

Durfee und Zilberstein weisen daraufhin, dass eine solche kaskadierende Umplanung nicht zwangsläufig zu besseren Ergebnissen führt, insbesondere bei Abwägung des Kommunikations- und Berechnungsaufwands [DZ13]. Für kontinuierlich planende Agentensysteme stellen sie eine Reihe von Mechanismen vor, die der Dämpfung einer solchen Unruhe dienen. Das Grundprinzip beruht darauf, dass geprüft wird, ob für einzelne Entscheidungsprozesse der Agenten auf die Aktualität des Weltwissens des entsprechenden Agenten verzichtet werden kann. Die vorgeschlagenen Einschränkungen der Aktualität der im Agentensystem verteilten Information sind im Anwendungskontext zu prüfen. Besonders relevant für die verteilte Umsetzung der kontinuierlichen Einsatzplanung erscheinen die folgenden Mechanismen [DZ13, S. 530 f]:

- **Abstraktion:** Für die Entscheidungsfindung in planenden Agentensystemen ist es nicht unbedingt erforderlich, dass die Agenten sich über alle Änderungen ihrer eigenen Planung informieren. Der Grad der Abstraktion ergibt sich aus dem gemeinsam zu erbringenden Ziel: Führt eine lokale Planänderung zu keinem Unterschied in Bezug auf das globale Ziel, so ist es nicht erforderlich, die anderen Agenten über diese Änderung zu informieren.
- **Asynchronizität:** Agenten in verteilten Systemen, die ihre Pläne abhängig von einem sensorischen Input anpassen, verfügen nicht immer über vollständiges oder aktuelles Weltwissen. Zur Dämpfung von Unruhe ist es sinnvoll, dass die Agenten trotzdem Entscheidungen treffen können. Insbesondere muss dabei darauf geachtet werden, dass die Konvergenz der kooperativen Lösungssuche nicht gefährdet wird.
- **Gedämpfte Responsivität:** Wenn Agenten eine Änderung ihres Planes vornehmen, die auch in der abstrakten Sicht eine Änderung darstellt und somit die Entscheidungsfindung anderer Agenten beeinflussen kann, ist zu prüfen, ob mit Hilfe von Toleranzbereichen eine Vermeidung solcher Nachrichten erfolgen kann, die nur geringfügige Änderungen im Plan mitteilen. Ein solches Toleranzband kann nur auf Basis empirischer Untersuchungen definiert werden.

Die vorgestellten Mechanismen werden bei der Entwicklung der kontinuierlichen Einsatzplanung auf ihre Eignung hin geprüft.

3.3.4 Beispiel: *Production 2000+*

Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine beispielhafte Vorstellung von einer der ersten erfolgreichen Entwicklungen Agenten-basierter Kontrollsysteme in der industriellen Fertigung. Im Projekt *Production 2000+* wurde in den Jahren 1996 bis 1999 ein solches System für die Steuerung einer Fertigungsstraße für Zylinderköpfe gebaut [BS00], [SB01]. Unter Führung von DaimlerChrysler und mit starker Industriebeteiligung wurde ein neues Layout einer Fertigungsstraße entwickelt, das mit herkömmlichen Steuerungssystemen nicht hätte kontrolliert werden können: Robustheit und Skalierbarkeit werden als wesentlichen Anforderungen genannt, die zur Anwendung der Agententechnologie führten.

Das agentenbasierte Kontrollsystem der Fertigungsstraße basierte auf Ausschreibungen, die ein sogenannter Werkstück-Agent, somit der Repräsentant des Werkstücks, initiiert und von den weiteren Agententypen Transport-Agent und Maschinen-Agent adressiert werden konnten.

Das entwickelte System war in den Jahren 1999 bis 2004 in der normalen Produktion im Einsatz und zeigte eine höhere Flexibilität, Robustheit und Skalierbarkeit als die gängigen Systeme. Das Projekt *Production 2000+* sei nur als Beispiel dafür angeführt, dass vollständig verteilte Agentensysteme die hohen technischen Ansprüche eines industriellen Umfeldes erfüllen können.⁵

⁵Die Gründe, warum sich das System bei DaimlerChrysler dennoch nicht durchgesetzt hat, werden in [SB07] diskutiert.

4

AGENTENBASIERTE ANSÄTZE IM SMART GRID

Vor fast zwanzig Jahren wurden die ersten noch heute relevanten Arbeiten zu agentenbasierten Ansätzen im Stromsektor veröffentlicht: Die Arbeiten von u.a. Akkermans, Ygge und Gustavsson aus dem ISES-Projekt zeigen bereits die thematische Breite einer Anwendung agentenbasierter Systeme im Smart Grid, ihre Vorteile als auch die technischen und gesellschaftlichen Herausforderungen, die eine Umsetzung in der Praxis mit sich bringen würden [AYG96]. In den *Communication of the ACM* fasst Gustavsson die Projektergebnisse zusammen: Das entworfene Konzept eines Agentensystems für lokalen Lastausgleich mit Hilfe von sogenannten HomeBots weise eine von herkömmlichen Leitsystemen nicht erreichte Skalierbarkeit, Flexibilität, Adaptivität, Konfigurierbarkeit und breite Anwendbarkeit auch für andere Anwendungsfelder auf [Gus99].

Die Vielfalt der Publikationen im Kontext agentenbasierter Ansätze im Smart Grid, die seit diesen Arbeiten vorgestellt wurde, ist immens. Sie umfasst viele Disziplinen – von Energie- und Elektrotechnik, Regelungs- und Automatisierungstechnik über Systemtheorie bis hin zu Informatik-Bereichen wie Künstliche Intelligenz, Modellierung und Simulation, selbstorganisierende Systeme, verteilte Algorithmen und Organic Computing. Die Arbeiten unterscheiden sich weiterhin stark in ihrer Nähe zur Umsetzung, den technischen Anforderungen und in ihrer Passfähigkeit in den energiewirtschaftlichen Kontext – in manchen Projekten liegt der Fokus auf den algorithmischen Arbeiten [RRJ09], in anderen auf der Umsetzbarkeit innerhalb der heutigen energiewirtschaftlichen Rollen [Bel+11] oder auf der Umsetzbarkeit mit heute verfügbaren Automationssystemen [ZV12]. Auch im Grad der Verteiltheit der Systeme im Sinne des zugrunde liegenden Koordinationsparadigmas und der Verteiltheit von Informationen im System unterscheiden sich die Ansätze erheblich: Die Spannbreite reicht von zentralen Systemen, in denen die Agenten lediglich das Anlagen-Gateway realisieren, über hierarchische Systeme [Leh10] bis hin zu vollständig verteilten Konzepten [HLS14]. Manche Arbeiten stellen das Ergebnis von Forschungsarbeiten im Rahmen von Dissertationen dar, die im wesentlichen Einzelarbeiten darstellen [Ric06], hinter anderen finden sich EU-weite Projektkonsortien oder DFG-Forschergruppen [ASR13].

In den folgenden Abschnitten wird zunächst der Ordnungsrahmen P-CASIT vorgestellt, der eine Darstellung agentenbasierter Ansätze im Smart Grid anhand definierter Charakteristika motiviert. Im Anschluss wird eine Auswahl wichtiger agentenbasierter Konzepte

in Smart Grids vorgestellt. Soweit die veröffentlichten Arbeiten es erlauben, werden die in P-CASIT definierten Charakteristika dabei aufgegriffen. Die Auswahl geht über den engeren algorithmischen Kontext der kontinuierlichen Einsatzplanung in Dynamischen Virtuellen Kraftwerken hinaus und umfasst auch solche Arbeiten, die – aus unterschiedlichen im jeweiligen Abschnitt diskutierten Gründen – für die hier vorgelegte Arbeit als relevant erachtet werden. Die Arbeiten werden jeweils unter dem Namen des Ansatzes, dem Namen des jeweiligen Forschungsprojektes oder unter einem möglichst sprechend gewählten Kurztitel aufgeführt. Die Ansätze werden nach der jeweiligen durch die Agenten bearbeiteten Aufgabe zusammengefasst. Zwangsläufig wird eine solche Kategorisierung den Ansätzen nicht gerecht, die eine breitere Anwendbarkeit aufweisen. Bei diesen Ansätzen wird auf die Anwendbarkeit für andere Problemstellungen explizit hingewiesen.

4.1 P-CASIT: EIN ORDNUNGSRAHMEN ZUR VERGLEICHENDEN DARSTELLUNG AGENTENBASIERTER ANSÄTZE IM SMART GRID

Im gewählten Vorgehensmodells SGAE wird die Prüfung existierender Verfahren für das zu behandelnde Problem im Anwendungskontext betont. So ist es gute wissenschaftliche Praxis, bei der Entwicklung oder Weiterentwicklung eines Algorithmus oder seiner Anwendung auf ein definiertes Problem vorab darzustellen, inwieweit bereits existierende Ansätze genutzt oder angepasst werden können. Auf die Vielfalt agentenbasierter Ansätze in Smart Grids wurde bereits hingewiesen. Während Übersichtsartikel wie beispielsweise [Vrb+14] zwar einen Einblick in die Vielfalt der Ansätze geben können, wurde bisher allerdings kein übergreifender Ordnungsrahmen vorgestellt, der eine vergleichende Gegenüberstellung unterschiedlicher Ansätze erlauben würde. Es wird als wünschenswert angesehen, bei der weiteren Entwicklung agentenbasierter Ansätze alle Charakteristika zu veröffentlichen, die es erlauben, möglichst viel über die Konzeption, Umsetzung und Eigenschaften des Ansatzes im angestrebten Anwendungskontext zu erfahren. Solche übergeordneten Ordnungsrahmen wurden beispielsweise für DCOP-Algorithmen vorgestellt [Cha+11].

Im Folgenden wird der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ordnungsrahmen P-CASIT zur Klassifizierung agentenbasierter Ansätze im Smart Grid vorgestellt, der diesen Zielen dienen soll. Der Ordnungsrahmen besteht aus sechs Fragen, durch deren Beantwortung die Einordnung des Ansatzes erfolgt. Er bezieht sich auf das adressierte Problem im Smart Grid, die Art der Koordination der Agenten, das Agentenmodell, die Eigenschaften der Lösung, die die Agenten ermitteln, die Modellierung lokaler Informationen sowie die zeitlichen Eigenschaften des Systems. Mit dem Ordnungsrahmen P-CASIT und den aufgeworfenen Fragen wird kein Anspruch an Vollständigkeit zur Beschreibung agentenbasierter Ansätze

im Smart Grid erhoben. So wird beispielsweise vollständig von der tatsächlichen Umsetzung der Kommunikation zwischen den Agenten (physikalisches Kommunikationsnetzwerk) abstrahiert, da es in der hier betrachteten Arbeit nicht tiefergehend betrachtet wird (siehe [Abschnitt 5.1](#)). Der Ordnungsrahmen dient vielmehr einem strukturierten Vorgehen bei der Aufbereitung dieser Arbeiten und kann daher an entsprechende weiterreichende Fragestellungen angepasst werden.

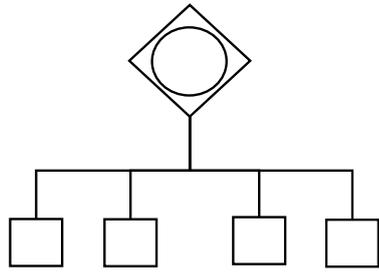
P (problem): Welches Problem wird gelöst? Die über Agentensysteme adressierten Koordinationsaufgaben im Smart Grid reichen von der fahrplanbasierten Wirkleistungsplanung [[Hin14](#)], dem Supply-Demand Matching [[Kok+05](#)], der Spannungshaltung [[Hat08](#)], der verteilten Behebung instabiler Netzzustände [[FB12](#)] bis hin zur Bündelung dezentraler Anlagen in VK für die Frequenzhaltung [[PFR09](#)]. Als wesentliches Unterscheidungskriterium im Smart Grid sollte dargestellt werden, ob das Stromnetz als solches in die Modellierung eingeht oder vollständig davon abstrahiert wird. Insbesondere die nicht-funktionalen Anforderungen wie beispielsweise Security, Skalierbarkeit und Performanz hängen von der Einbettung in einen Anwendungskontext ab – es ist nicht empfehlenswert, zwei Ansätze bewertend zu vergleichen, die Probleme mit unterschiedlicher Ausprägung dieser Anforderungen adressieren. Es empfiehlt sich daher, zunächst das zu lösende Problem zu beschreiben und alle nachfolgenden Charakteristika unter dieser angestrebten Anwendung zu betrachten¹.

C (coordination): Welches Koordinationsparadigma wird umgesetzt? Eine wesentliche Design-Entscheidung beim Entwurf eines Agentensystems betrifft die Struktur, anhand derer die Agenten miteinander kommunizieren und eine Lösung für das betrachtete Problem ermittelt wird. Das Koordinationsparadigma betrifft somit einerseits die Organisation der Kommunikation als auch die Art der Lösungssuche. In manchen Arbeiten werden diese Aspekte getrennt dargestellt [[HL05](#)]. Obwohl die getrennte Darstellung präziser ist, wird sie nur in wenigen Arbeiten aufgegriffen. In der hier gewählten Darstellung werden beide Aspekte zusammenfassend betrachtet, wobei – anders als in der Kategorisierung nach [[Hin14](#), S. 27 ff] – innerhalb der dargestellten Koordinationsparadigmen die Ausprägung der Aspekte Lösungssuche und Entscheidungsfindung genauer spezifiziert werden. Unterschieden wird jeweils, welche Agenten des Systems (bzw. auf welcher Hierarchieebene) ein Lösungskandidat für das betrachtete Problem ermittelt werden kann und welche Agenten eine Entscheidung für einen Lösungskandidaten treffen können. Auf diese Weise soll der Informationsverlust durch die Zusammenfassung von Organisations- und Koordinationsparadigma kompensiert werden.

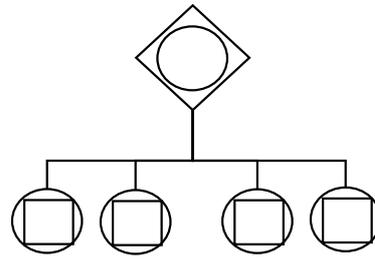
Unterschieden werden die folgenden Koordinationsparadigmen (siehe [Abbildung 4.1](#)):

¹Dieser Sachverhalt wird symbolisch durch den Bindestrich im Akronym P-CASIT verdeutlicht.

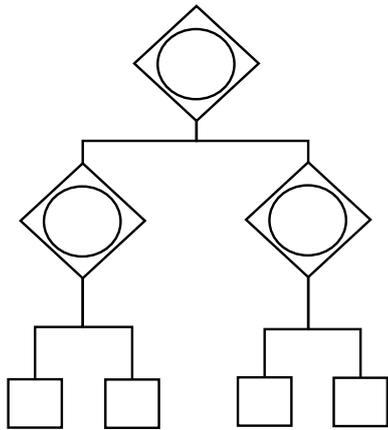
- K1 Zentrale Lösungssuche und Entscheidung:** Eine zentrale Instanz entscheidet auf Basis von globalem Systemwissen über die Lösung des betrachteten Problems. Systeme, die unter diesem Paradigma realisiert werden, sind typischerweise nicht agentenbasiert umgesetzt. Die Reduktion auf die Übertragung von Mess- und Setzwerten zwischen zentraler Instanz und gesteuerter Komponente der physikalischen Welt (siehe [Abbildung 4.1\(a\)](#)) entspricht nicht der Definition des intelligenten Agenten, die der hier vorgelegten Arbeit zugrunde liegt (siehe [Abschnitt 3.3](#)).
- K2 Dezentrale Lösungssuche mit zentraler Entscheidung:** In Systemen, die unter diesem Koordinationsparadigma entwickelt werden, entscheidet eine zentrale Instanz über die Annahme einer ermittelten Lösung. Die Ermittlung der Lösung ergibt sich aber aus der dezentralen Lösungssuche der beteiligten Agenten. Auf diese Weise werden die Informationen über mögliche Belegungen (z. B. die Menge möglicher Fahrpläne für die vom Agenten repräsentierte Energieanlage) ausschließlich lokal vorgehalten, während die lokal gewählten Belegungen an die zentrale Komponente kommuniziert werden (siehe [Abbildung 4.1\(b\)](#)).
- K3 Hierarchische Lösungssuche und Entscheidung:** Dieses Koordinationsparadigma erweitert das Paradigma der zentralen Lösungssuche um eine Hierarchisierung: In Smart Grids typischerweise orientiert an der netztopologischen Struktur werden auf mehreren Ebenen die Entscheidungen über die Belegungen für die untergeordneten Komponenten gewählt. Auf der jeweiligen Ebene hat die übergeordnete Instanz vollständiges Wissen über die möglichen Belegungen der zugeordneten Komponenten (siehe [Abbildung 4.1\(c\)](#)).
- K4 Dezentrale Lösungssuche mit hierarchischer Entscheidung:** Diese Variante erweitert das Paradigma der dezentralen Lösungssuche mit zentraler Entscheidung um ein Hierarchisierungskonzept. Die Lösungssuche erfolgt Einheiten-lokal, während auf den Hierarchisierungsstufen jeweils die Entscheidung über die Annahme der aggregierten Lösung der untergeordneten Einheiten erfolgt (siehe [Abbildung 4.1\(d\)](#)).
- K5 Dezentrale Lösungssuche mit verteilter Entscheidung:** In diesen Systemen ist als Erweiterung der dezentralen Lösungssuche mit hierarchischer Entscheidung eine Kommunikation nicht nur zwischen unter- und übergeordneten Agenten möglich, sondern weiterhin zwischen den Agenten einer Hierarchisierungsebene (siehe [Abbildung 4.1\(e\)](#)).
- K6 Vollständig verteilte Lösungssuche und Entscheidung:** Die Agenten führen gemeinsam eine koordinierte Lösungssuche und Entscheidung durch (siehe [Abbildung 4.1\(f\)](#)).



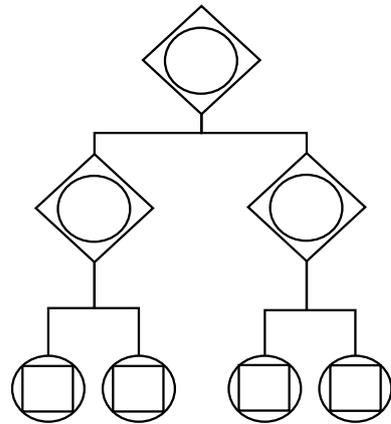
(a) K1: Zentrale Lösungssuche und Entscheidung



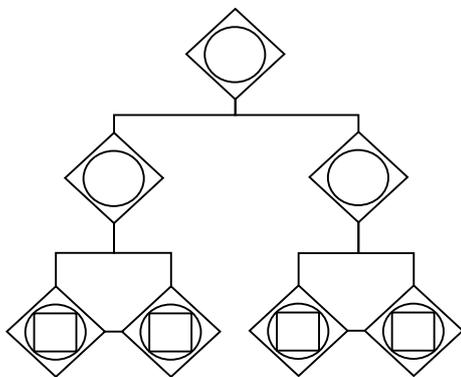
(b) K2: Dezentrale Lösungssuche mit zentraler Entscheidung



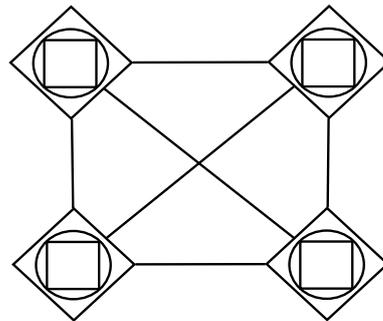
(c) K3: Hierarchische Lösungssuche und Entscheidung



(d) K4: Dezentrale Lösungssuche mit hierarchischer Entscheidung



(e) K5: Dezentrale Lösungssuche mit verteilter Entscheidung



(f) K6: Vollständig verteilte Lösungssuche und Entscheidung

Abbildung 4.1: Koordinationsparadigmen im beschriebenen Ordnungsrahmen. Symbole:
 □ Fähigkeit zur Ermittlung des lokalen Zustandes, ○ Fähigkeit zur Lösungssuche, ◇ Fähigkeit zur Entscheidungsfindung.

Bereits vorab soll angemerkt werden, dass im Smart Grid-Kontext häufig ein hierarchisches Paradigma gewählt wird, dass sich an der netztopologischen Struktur orientiert [Leh10], [Hat14]. Auf die unterschiedlichen Ausprägungen wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels detailliert eingegangen.

A (*agent modelling and implementation*): Wie wurden die Agenten modelliert und implementiert? In [Abschnitt 3.3](#) wurden bereits unterschiedliche Agentenmodelle dargestellt, die für Aufgaben unterschiedlicher Komplexität verwendet werden. Für die Nachvollziehbarkeit der Darstellung eines agentenbasierten Ansatzes in Smart Grids sollte eine Kategorisierung des Agentenmodells anhand dieser Modelle vorgenommen werden. Weiterhin werden sehr unterschiedliche Ansätze bezüglich der Aufteilung unterschiedlicher Funktionalitäten auf einzelne Agenten vorgenommen: Während im Extremfall nur genau ein Agent eine Einheit für alle Aufgaben repräsentiert, können Funktionalitäten in unterschiedlichen Agenten (mit unterschiedlichen Fähigkeiten und Eigenschaften) gekapselt werden. Häufig werden dabei die Aufgaben der einheitenlokalen Modellierung von Flexibilitäten und die Aufgaben der kooperativen Lösungssuche mit anderen Agenten in einzelnen Agenten gekapselt. Zweiter Bestandteil dieser Frage ist die Art der Implementierung der Agenten. Soweit möglich, sollten Angaben zur technologischen Umsetzung der Agenten gemacht werden: Die Spannweite reicht von einer reinen Simulation des Agentensystems auf einem zentralen Server bis hin zur Umsetzung der Agenten auf einheitenlokalen Modulen im Feld.

S (*solution*): Welche Eigenschaften hat die ermittelte Lösung? Bezogen auf die Lösungsfindung sollte beantwortet werden, ob es sich um ein vollständiges Verfahren handelt, d. h. ob das theoretische Optimum durch das Verfahren erreicht wird. Diese Eigenschaft wird häufig als Kriterium angeführt, wenn der Einsatz dezentraler oder zentraler Ansätze abgewogen wird [Hat14, S. 32 ff.]. Auch für stark kostenorientierte Problemstellungen wie es beispielsweise das Unit Commitment Problem darstellt, werden heuristische Verfahren eingesetzt, die nicht notwendigerweise das globale Optimum erreichen [Pad04]. Von Bedeutung ist in diesem Fall der Abstand der Lösung vom theoretischen Optimum, der allerdings innerhalb anwendungsspezifischer Untersuchungen meist nicht zu ermitteln ist. Eine Untersuchung der Eigenschaften des entwickelten Ansatzes anhand synthetischer Probleminstanzen ist in diesem Fall empfehlenswert.

I (*local information*): Wie wird die einheiten-lokale Information modelliert? Bei der Anwendung agentenbasierter Ansätze in Smart Grids muss der Modellierung einheitenlokaler Informationen besondere Bedeutung beigemessen werden. Diese Informationen können einen sehr hohen Detailgrad erreichen, wenn z. B. der thermisch-elektrische Be-

darf eines Haushaltes auf Basis der örtlichen Gegebenheiten wie der Gebäudehülle, der Raumnutzung etc. modelliert wird. Sollen diese Informationen im Rahmen eines zentralen Koordinationsparadigmas umgesetzt werden, so werden nicht nur ggf. datenschutzrechtlich relevante Informationen kommuniziert, sondern weiterhin die Komplexität der Lösungsfindung im zentralen System extrem erhöht. Es existieren sehr unterschiedliche Ansätze zur Lösung dieses Problems, von denen an dieser Stelle nur drei exemplarisch aufgeführt werden:

- **Hierarchisierung:** In manchen Ansätzen wird eine detaillierte Modellierung, die sogar vorhersagefähige Modelle enthalten kann, in ein System mit dezentraler Lösungssuche und hierarchischer oder zentraler Entscheidung eingebettet. Die Komplexität der Lösungssuche ist somit auf die lokale Ebene reduziert. Ein solcher Ansatz wird beispielsweise von Romanos u.a. in [Rom+10] beschrieben.
- **Modellabstraktion:** Anstatt für die Entscheidungsfindung eine detaillierte Simulation der betrachteten Einheit zu verwenden, können mögliche Betriebszustände in einem abstrahierten Modell abgebildet werden. So wird beispielsweise im stützvektorbasierten Konzept nach Bremer auf Basis einer Trainingsdatenmenge ein abfragefähiges Modell trainiert und kann nachfolgend anstelle des Einheitenmodells in Optimierungsverfahren eingebettet werden [BS13a].
- **Zustandsabstraktion:** Für das durch die Agenten zu lösende Problem ist es ggf. nicht erforderlich, die Betriebszustände der betrachteten Einheit selbst abzubilden. So verwendet Pournaras ein auf andere Weise abstrahiertes Modell, indem er die möglichen Betriebszustände thermischer Einheiten auf vereinfachte Komfort-Level abbildet [Pou13].

Da die Art der Modellierung der einheiten-lokalen Informationen wesentlichen Einfluss auf die Möglichkeiten des Koordinationsansatzes hat, sollte diese für eine bessere Vergleichbarkeit der Ansätze grundsätzlich ebenfalls diskutiert werden.

T (time): Welches zeitliche Verhalten wird angestrebt bzw. erreicht? Die durch das jeweilige Verfahren einzuhaltenen Zeitgrenzen können zumeist direkt aus dem zu lösenden Problem abgeleitet werden. Diese Information sollte gemeinsam mit dem im entwickelten Ansatz erreichten zeitlichen Verhalten dargestellt werden. Für die meisten Anwendungen müssen dafür zunächst Annahmen zur Umsetzung auf den entsprechenden Komponenten getroffen werden, da während der Entwicklung insbesondere im Forschungsumfeld die konkrete Umsetzung im Feld meist noch unklar ist oder unterschiedliche Umsetzungsvarianten möglich sind. Die jeweiligen Annahmen bezüglich der tatsächlichen Berechnungs- und Kommunikationszeiten sollten daher dargestellt werden.

In den folgenden Abschnitten wird eine Auswahl agentenbasierter Ansätze im Smart Grid einzeln vorgestellt, wobei der Ordnungsrahmen P-CASIT als Leitfaden dient. In der Zusammenfassung erfolgt eine Gegenüberstellung anhand ausgewählter Charakteristika.

4.2 ANSÄTZE FÜR DEN LOKALEN ABGLEICH VON ERZEUGUNG UND VERBRAUCH

4.2.1 ISES und HomeBots

Das Konzept der sogenannten HomeBots wurde innerhalb des Projektes ISES entwickelt, ein von der Europäischen Union von 1996 - 1999 gefördertes Forschungsprojekt unter Leitung des schwedischen Forschungsinstituts EnerSearch AB [AYG96]. Neben den Forschungspartnern der Universitäten Amsterdam, Karlskrona/Ronneby, Linköping, Lund und Uppsala beteiligten sich u.a. ABB, EDF, IBM Utility and Energy Services, Sydkraft und die damalige PreussenElektra AG finanziell. Im Fokus des Projektes stand die Anwendung neuer Informatik-Methoden im Energiekontext und ihre Erprobung in Feldtests. Motiviert waren die Arbeiten insbesondere durch die mit Projektbeginn eingeführte Liberalisierung des Strommarktes in Schweden, so dass die Sponsoren an der Entwicklung neuer IT-basierter Geschäftsmodelle im liberalisierten Markt interessiert waren.

Die verteilte Lastkontrolle elektrischer Verbraucher im Verteilnetz stellte einen Schwerpunkt des Projektes dar: Zwei unterschiedliche Agentensysteme wurden entworfen, implementiert und simulativ sowie in einem kleinskaligen Pilotversuch getestet: Mit dem HomeBots-Konzept werden steuerbare elektrische Lasten durch Agenten repräsentiert und interagieren an elektronischen Marktplätzen [Gus99]. Das Agentensystem folgt in seiner Struktur dem hierarchischen Aufbau des Verteilnetzes. Das System folgt Koordinationsparadigma K3 (Dezentrale Lösungssuche mit zentraler Entscheidung). Im Rahmen einer prädiktiven Planung verhandeln die Agenten vorab, zu welchen Preisen sie sich an Lastmanagement-Aktionen beteiligen würden. Ein Auktionator vertritt jeweils eine netztologisch gebündelte Menge von Agenten. Im Nachgang des Markt-Matchings (zentrale Entscheidungsfindung) werden die Agenten über die verhandelte Energiemenge informiert. Die Agenten müssen dieses Ergebnis nun in einem Fahrplan umsetzen, wozu sich im Abschlussbericht des Projektes die folgenden Informationen finden:

»The awarded power must be scheduled over time, such that (i) the agreed amount of power is delivered averaged over time, while (ii) at the same time fluctuations and on/off switching costs are minimized. Computationally, this is a matter of satisfying a number of simultaneous constraints. Also this process is carried out automatically, and special algorithms have been developed for this scheduling of power delivery.« [ES99, S. 91]

Details zu algorithmischen Umsetzung des Scheduling-Prozesses finden sich nicht.

Neben dem HomeBots-Ansatz, bei dem alle Lasten von einzelnen Agenten repräsentiert werden, wurde weiterhin ein Heimenergiemanagement-Konzept zur energetischen Optimierung von Gebäuden entwickelt. Über unterschiedliche Agenten-Typen, die auch individuelle Nutzer mit ihren Präferenzen repräsentieren, wurden Beleuchtung und Heizung abhängig von Nutzerpräferenzen gesteuert. Das System wurde mit Hilfe von Power Line Communication (PLC) umgesetzt. Die Einbindung dieser Agenten in ein Agentensystem bleibt unklar, so dass für diesen Ansatz keine weitere Charakterisierung vorgenommen werden kann.

Zu den algorithmischen Ansätzen, die innerhalb des Projektes ISES und für die HomeBots entwickelt wurden, finden sich nur wenige Veröffentlichungen, die es nicht erlauben, von den Erfahrungen aus dem Projekt zu lernen. Die Erfahrungen dieses ersten Projektes, in dem explizit die agentenbasierte Umsetzung hervorgehoben wird, sind (u.a. über die beteiligten Universitäten und Forscher) in die nachfolgend beschriebenen Projekte eingegangen.

4.2.2 PowerMatcher

Der PowerMatcher-Ansatz wurde zunächst innerhalb des Projektes CRISP² entwickelt und mittlerweile in unterschiedlichen Forschungsprojekten auch im Rahmen von Feldtests eingesetzt (z. B. INTEGRAL³, SmartHouse/SmartGrid⁴, EcoGrid⁵). PowerMatcher verfolgt einen marktbasieren Energiemanagement-Ansatz für das Verteilnetz. Wie auch im HomeBots-Ansatz werden alle Einheiten durch einen eigenen sogenannten *local device agent* (im Folgenden: Einheiten-Agent) repräsentiert. Eine Gruppe von Einheiten-Agenten wird durch einen *concentrator agent* (im Folgenden: Konzentrator) vertreten, der die Einheiten-Agenten gegenüber dem *auctioneer agent* (im Folgenden: Auktionator) vertritt. Anders als im DV-PP-Konzept basiert PowerMatcher auf einer statischen Hierarchie. Die Einheiten-Agenten kommunizieren ihre Gebote, die aus einem Energiebedarf oder -angebot und einem Preis für das nächste Intervall bestehen. Die Dauer dieses Intervalls und damit die zeitliche Auflösung der Verhandlungen ist konfigurierbar; für das Supply-Demand-Matching wird eine Minuten-Auflösung angegeben.

Der Konzentrator fasst die Gebote zusammen und gibt sie an den Auktionator weiter, der Markt-Matching und Preisbildung durchführt und zurückgibt. Die Konzentratoren treten gegenüber dem Auktionator als Einheiten-Agenten auf und kapseln die repräsentierten Einheiten-Agenten vollständig gegenüber der nächsthöheren Ebene ab. Das Agentensystem aus Einheiten-Agenten, Konzentratoren und einem Auktionator wird als *cluster* bezeichnet (deutsch: Verbund). Ohne weitere Ergänzungen wird innerhalb eines Verbundes ein

²<http://www.crisp.ecn.nl/>, zuletzt besucht am 9.12.2014

³<http://www.integral-eu.com/>, zuletzt besucht am 9.12.2014

⁴<http://www.smarthouse-smartgrid.eu/>, zuletzt besucht am 9.12.2014

⁵<http://www.eu-ecogrid.net/>, zuletzt besucht am 9.12.2014

Abgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch angestrebt, dass sogenannte lokale Supply-Demand(SD)-Matching.

Der Auktionator selbst interagiert wiederum mit einem übergeordneten Auktionator und vertritt so den Verbund, so dass ein hierarchisches System elektronischer Marktplätze entsteht (Koordinationsparadigma K4: Dezentrale Lösungssuche mit hierarchischer Entscheidung). Da in einem solchen System innerhalb einer Verhandlungsrunde alle Hierarchien durchlaufen werden müssen, ist für diesen Ansatz eine gemeinsame Taktung der Agenten auf allen Hierarchieebenen erforderlich, dessen Genauigkeit sich u.a. aus der Länge des Planungsintervalls ergibt.

Mit der Einführung des *objective agent* in späteren Veröffentlichungen wurde der PowerMatcher-Ansatz vom Anwendungsfall des Supply-Demand-Matchings auf die Integration weiterer Optimierungsziele erweitert, wie z. B. die interne Koordination eines VK (siehe die Feldtest-Ergebnisse in [Kam+10]). PowerMatcher wird nun als »general purpose coordination mechanism« [Kok10, S. 1682] vorgestellt, mit dem unterschiedliche Optimierungsziele umgesetzt werden können. Der zeitliche Horizont der Verhandlungen betrifft im Supply-Demand-Matching das direkt bevorstehende Intervall und umfasst somit nicht das Problem der prädiktiven Einsatzplanung im Sinne einer fahrplanbasierten Wirkleistungssteuerung. Allerdings schreibt Kok in seiner Dissertation:

»If the cluster has to operate as a virtual power plant, for example, it needs to follow a certain externally provided setpoint schedule.« [Kok13, S. 150]

Zur Umsetzung dieses Einsatzplanes innerhalb eines Verbundes und somit der prädiktiven Planung, der algorithmischen Herangehensweise und der Art der Umsetzung wird lediglich auf die Implementierung des *objective agent* verwiesen. Die PowerMatcher-Arbeiten aus diesem Kontext lassen sich daher nicht auf die fahrplanbasierten Wirkleistungssteuerung übertragen. Für die Umsetzung in Feldtests sind die PowerMatcher-Arbeiten allerdings wegweisend: So konnte nicht nur gezeigt werden, dass die Steuerung der Einheiten keine Komfort-Einbußen der Hausbewohner mit sich bringt, sondern weiterhin, dass die technologische Umsetzung auf einem eingebettetem Linux-basierten System für 5 \$ pro Installation möglich ist [INT11]. Details zur Grundlage dieser äußerst optimistischen Schätzung finden sich nicht.

Abschließend soll angemerkt werden, dass die PowerMatcher-Agenten ebenso wie auch in den meisten anderen hier vorgestellten Ansätzen gegenüber Unternehmenssoftware als Service agieren und sich so in eine Service-orientierte Architektur (SOA) einfügen können.⁶

⁶Für eine Diskussion zu den Parallelen zwischen SOA- und agentenbasierten Ansätzen in Smart Grids sowie entsprechender Arbeiten sei auf [Vrb+14] verwiesen.

4.3 ANSÄTZE FÜR DEN STABILEN NETZBETRIEB

4.3.1 Microgrids: MGCC und MC

Ein weiterer agentenbasierter Ansatz für Kontrollaufgaben im Smart Grid wurde innerhalb der von der Europäischen Union geförderten Projekte Microgrids⁷ und More Microgrids⁸ entwickelt und in Feldtests erprobt [Hat08]. Kern des Konzeptes sind die sogenannten Microgrids, die folgendermaßen definiert werden:

»Microgrids comprise LV [*low voltage* (Anmerkung der Autorin)] distribution systems with distributed energy resources (DER) (micro-turbines, fuel cells, PV, etc.) together with storage devices [...] and flexible loads. Such systems can be operated in a non-autonomous way, if interconnected to the grid, or in an autonomous way, if disconnected from the main grid. The operation of microsources in the network can provide distinct benefits to the overall system performance, if managed and coordinated efficiently.« [Hat14, S. 4]

Microgrids sind somit nicht etwa ausschließlich im Inselbetrieb, d. h. ohne Kopplung zum weiteren Verteil- und Übertragungsnetz betriebene Netzbereiche, sondern ein Konzept für den stabilen Betrieb aktiver Verteilnetze bei optimierter Integration dezentraler, v.a. regenerativer Energieanlagen.

Kernelement der Microgrids ist der *micro grid central controller* (MGCC). Dieser Agent berechnet alle für das jeweilige netztopologisch definierte Microgrid (meist ein Mittelspannungsnetz) notwendigen Maßnahmen, die sich – abhängig von den regulatorischen Vorgaben und dem Markt-Modell – stark unterscheiden können. In nicht liberalisierten Märkten mit vertikal integrierten EVU können die Aufgaben des Netzbetriebs und der Belieferung der Kunden mit Elektrizität in einer integrierten Optimierung durch den MGCC-Agenten durchgeführt werden. In liberalisierten Märkten wird u.a. der Betrieb der Microgrids innerhalb eines Erzeuger-Verbraucher-Verbundes, vergleichbar mit einem Genossenschaftsmodell vorgeschlagen.

Die dezentralen Erzeuger, steuerbaren Lasten sowie elektrischen Speicher eines Microgrids werden durch sogenannte *microsource controller* (MC)-Agenten repräsentiert. Die Aufgaben, die durch einen MC-Agenten erfüllt werden können, hängen davon ab, ob ein zentraler oder in Teilen dezentraler Koordinationsansatz gewählt wird:

- Zentraler Ansatz: Die Aufgabe des lokalen Abgleichs von Erzeugung und Verbrauch, die Erstellung von Prognosen sowie die Überwachung des stabilen Netzbetriebs wird vom MGCC durchgeführt. Die MC-Agenten übermitteln lediglich Messwerte an den MGCC-Agenten.

⁷<http://www.microgrids.eu>

⁸<http://www.microgrids.eu/micro2000/>

- Dezentraler Ansatz: Last- und Erzeugungsprognose sowie die Überwachung des stabilen Netzbetriebs liegt weiterhin in der Verantwortung des MGCC-Agenten. Die MC-Agenten nehmen an Ausschreibungen des MGCC-Agenten teil und bieten somit auf die Umsetzung von Vorgaben. Es handelt sich somit um eine Ergänzung der zentralen Kontrolle des Microgrids.

Die wesentlichen Arbeiten mit dem Fokus auf lokalen Abgleich von Erzeugung und Verbrauch und dem stabilen Netzbetrieb auch im Inselnetz-Betrieb beruhen auf dem zentral-hierarchischen Ansatz, bei dem alle MC-Agenten direkt mit dem jeweiligen MGCC-Agenten interagieren und von diesem die Vorgaben für die einzunehmenden Betriebspunkte der Anlage erhalten. In den Feldversuchen, die innerhalb des Projektes More Microgrids auf der griechischen Insel Kythnos, in Deutschland (Mannheim) und in den Niederlanden (Zutphen) durchgeführt wurden und in denen u.a. die Schwarzstartfähigkeit eines Microgrids mit Hilfe eines elektrischen Speichers aufgezeigt wurde, wurde der hierarchische Ansatz verfolgt. Für den Zusammenschluss mehrerer Microgrids zu einem Multi-Microgrid übernimmt der sogenannte *central autonomous management controller* (CAMC)-Agent die Aufgaben des MGCC-Agenten innerhalb eines hierarchischen Ansatzes (Koordinationsparadigma 2: Hierarchische Lösungssuche und Entscheidung). Für die dezentrale Umsetzung des Microgrid-Konzeptes mit kooperierenden MC-Agenten finden sich keine Arbeiten zur Einsatzplanung.

Eine Besonderheit bezüglich der Modellierung der verfügbaren Flexibilitäten in den Microgrids stellt der *single agent thermal model predictive controller* (SAT-MPC)-Agent dar, der ebenfalls in einem Microgrid-Feldtest eingesetzt wurde [Rom+10]. Der Ansatz beruht auf einem bezüglich des thermischen und elektrischen Bedarfs vorhersagefähigen Anlagenmodell für ein Haus. Auf diese Weise kann eine zeitliche Verschiebung der Klimatisierung so umgesetzt werden, dass sie die Anforderungen an ein Peak Shaving unter Beachtung der Komfortanforderungen der Nutzer erfüllt. Der Ansatz zeigt einen wesentlichen Vorteil dezentraler Ansätze: Der SAT-MPC-Agent nutzt für seine Entscheidungsfindung eine detaillierte Modellierung der thermischen und elektrischen Gebäudeeigenschaften, die in einem zentralen System bei einer hohen Anzahl von Häusern vermutlich nicht umsetzbar wäre. Durch die Verwendung eines vorhersagefähigen Modells können zusätzliche Flexibilitäten ermittelt und eingesetzt werden. Zur Integration des SAT-MPC-Agenten in ein Agentensystem finden sich keine Informationen.

4.3.2 Agentenbasierte koordinierte Spannungskontrolle

Im Kontext des von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojektes FENIX und in Teilen finanziert durch Schneider Electric entwickelte Olivier Richardot an der Universität Grenoble ein Agentensystem zur koordinierten Spannungskontrolle [Ric06]. Der Ansatz soll die sekundäre Spannungsregelung ergänzen bzw. in Teilen ersetzen, indem Wirk- und Blindleistung dezentraler Einheiten gezielt beeinflusst werden. Anders als beim PowerMatcher-

Ansatz werden die betrachteten Einheiten (dezentrale Erzeugungsanlagen) nicht über interagierende Agenten repräsentiert: Richardot skizziert ein hierarchisches Agentensystem, bei dem die Berechnung der erforderlichen Veränderungen für alle Netzbereiche zentral erfolgt und dann auf einer netztechnisch unterliegenden Ebene (z. B. auf der Ebene des Ortsnetztransformators) auf die entsprechenden Einheiten als Anforderungen an Wirk- und Blindleistungsverhalten aufgeschlüsselt wird. Der zentrale Agent, der die Berechnungen durchführt, wird als *centrale virtuelle* (virtuelle Zentrale) bezeichnet. Während in der nur in französischer Sprache verfügbaren Dissertation die Umsetzung des Ansatzes mit einem Agentensystem dargestellt ist, fokussieren die weiteren Veröffentlichungen von Richardot die koordinierte Spannungshaltung als Alternative zur sekundären Spannungsregelung sowie das Problem der optimierten Messstellenauswahl zur Umsetzung des Ansatzes bei unvollständig umgesetzter Messinfrastruktur [Ric+06a], [Ric+09].

Durch die zentral umgesetzte Optimierung und die streng hierarchische Konzeption des Systems kann weder bezüglich der Funktionalität noch der Informationshaltung von einem verteilten System gesprochen werden: Es handelt sich um einen Ansatz nach Koordinationsparadigma K3 (hierarchische Lösungssuche und Entscheidung). Der von Richardot entwickelte Ansatz stellt allerdings eine der ersten Arbeiten dar, in denen ein agentenbasierter Ansatz für Aufgaben des stabilen Netzbetriebes mit hohen Lokalitätsanforderungen eingesetzt wird.⁹ Das System wird explizit als alternativer Ansatz zu einer mit hohen Kosten verbundenen Ertüchtigung des Netzes mit Stufenstellern im Verteilnetz dargestellt. Die Argumentation entspricht der auch den DVPPs zugrunde liegenden Idee, IT-basierte Ansätze für die Flexibilisierung der Einheiten im Verteilnetz zu entwickeln und so u.a. Investitionen im Stromnetz zu vermeiden.

4.3.3 DEZENT

In einem interdisziplinären Projekt mit Wissenschaftlern aus Informatik und Elektrotechnik förderte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) die Projekte DEZENT und DEZENT-NET¹⁰ in den Jahren 2006 bis 2011. Ziel der Projekte war die Entwicklung von neuartigen Kontrollkonzepten zum optimierten Betrieb bestehender Energieversorgungsnetze unter Nutzung der in den Verteilnetzen verfügbaren Flexibilität steuerbarer Erzeuger und Verbraucher.

Kernergebnis des DEZENT-Projektes ist ein Realzeit-Agentensystem für die Koordination der dezentralen Einheiten im Rahmen eines lokalen Supply-Demand-Matchings [Leh10]. Ähnlich wie im Projekt ISES (siehe [Abschnitt 4.2.1](#)) werden die Einheiten-Agenten anhand

⁹In den letzten Jahren wurden viele Ansätze zu Spannungsregelung im Verteilnetz vorgestellt. Exemplarisch sei auf die Arbeiten aus dem Projekt NetzQ verwiesen: In [Wit+09] wird ein System vorgestellt, das mit 4-Quadrantenbetrieb-fähigen Wechselrichtern an realen PV-Anlagen eine vergleichbare Funktionalität umgesetzt.

¹⁰<http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/132875187>, zuletzt besucht am 9.12.2014

der Netztopologie aggregiert: Für jede Spannungsebene werden die Agenten zu einem Bilanzkreis zusammengefasst und durch einen Bilanzgruppenmanager (BGM)-Agenten repräsentiert. Dieser Ansatz setzt sich bis zur Hochspannungsebene fort: Auf der jeweils nächsthöheren Spannungsebene werden sämtliche darunterliegenden BGM-Agenten wiederum zu einem Bilanzkreis zusammengefasst. Einheiten- und BGM-Agenten sind sogenannte Koordinationsagenten; ähnlich wie beim MGCC-Agenten aus dem Projekt Microgrids (siehe [Abschnitt 4.3.1](#)) wird somit durch einen hierarchisierten Ansatz eine Kapselung der Einheiten erreicht. Ergänzt wird das Agentensystem um den Agententyp der sogenannten *Bedingten Konsumenten und Produzenten*, über den flexible Erzeuger und Verbraucher repräsentiert werden.

Die Agenten führen nun in definierten Zeitspannen (Runden, Zyklen und Perioden) eine marktbasierendes Abstimmung aus, bei dem beginnend mit der Niederspannungsebene auf jeder Spannungsebene zunächst lokal Erzeugung, Verbrauch sowie vorhandene Flexibilitäten so aufeinander abgestimmt werden, dass der lokale Überschuss in der Erzeugung bzw. Strombedarf minimiert werden. Jeweils zehn Runden pro Spannungsebene werden durchgeführt, in denen die Agenten Gebote an den BGM-Agenten senden und von diesem Preisinformationen erhalten. Abgestimmt wird das Betriebsverhalten für die nächsten 500 ms, so dass für diese Abstimmung ebenfalls maximal 500 ms zur Verfügung stehen. Die Agenten beziehen die Kosten für ihre Gebote mithilfe individueller Bietstrategien ein. Verbleibende Überschüsse bzw. Bedarfe werden von Zyklus zu Zyklus über den BGM-Agenten an die jeweils darüberliegende Spannungsebene weitergegeben und müssen ggf. auf der Ebene der Hoch- und Höchstspannungsnetze ausgeglichen werden. Es handelt sich um einen Ansatz nach Koordinationsparadigma K4 (dezentrale Lösungssuche mit hierarchischer Entscheidung).

Mit DEZENT wurde erstmalig ein agentenbasiertes lokales Supply-Demand-Matching mit Realzeit-Anforderungen im Sekundenbereich umgesetzt. Die Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch über die betrachteten vier Hierarchieebenen des Systems wurden innerhalb von 40 ms erreicht. Erweiterungen des Systems um die Nutzung von Flexibilitäten sowie eine vorausschauende Detektion und Vermeidung instabiler Netzzustände führten zu Laufzeiten unterhalb von 500 ms.

4.3.4 Immunsystem-inspiriertes Smart Grid Management

Im u.a. vom US-amerikanischen Department of Energy geförderten F&E-Projekt »West Virginia Super Circuit« wird ein agentenbasierter Ansatz für die Umsetzung eines stabilen Netzbetriebs verfolgt. Ziel des Projektes ist der Einsatz von Agentensystemen für die Detektion, Vorhersage und Behebung von Fehlerzuständen im Verteilnetz in Feldtests.

In den Arbeiten von Belcami und Feliachi, die die Grundlage für die agentenbezogenen Arbeiten in dem Projekt bilden, wird ein Ansatz aus dem Schnittbereich der verteilten

künstlichen Intelligenz und naturinspirierter Algorithmen dargestellt [BF10]. Das Agentenmodell orientiert sich am Prinzip des menschlichen Immunsystems, das – nach Darstellung der Autoren – ein natürliches Agentensystem darstelle:

»The Immune System is a highly organized, distributed and intelligent Multi Agent System which is acting as independent agents.« [FB12]

Die Konzeption des Agentensystems überträgt die Funktionen des Immunsystems auf die Aufgaben der Fehlerdetektion und -behebung. Das zugrunde liegende Koordinationsparadigma weist eine dezentrale Lösungssuche mit verteilter Entscheidung auf (K5) und stellt somit den ersten Ansatz unter diesem Paradigma in diesem Anwendungsbereich dar. Die Agenten, die an unterschiedlichen Netzkomponenten platziert werden und dort messtechnisch an das Stromnetz angeschlossen sind, kommunizieren direkt und koordinieren sich bei Detektion eines Netzbetriebs außerhalb der zulässigen Betriebsgrenzen über mögliche Behebungsstrategien. Kann der Fehler nicht lokal behoben werden, so wird er zur Bearbeitung an die übergeordnete Hierarchieebene weitergegeben.

Das Agentensystem wurde zunächst unter Verwendung des Agenten-Frameworks JADE implementiert und simulativ bewertet sowie anschließend in einer Laborumgebung mit jeweils einem Agenten pro Mikroprozessor umgesetzt. In dieser Umgebung konnte eine Wiederherstellung der Stromversorgung über die koordinierte Umschaltung innerhalb von 500 ms erreicht werden.

Mit dem skizzierten Anwendungsbereich liegt das Agentensystem außerhalb des Forschungsgegenstandes der hier vorgestellten Arbeit. Als relevantes Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird es hier aufgeführt, da es die breite Anwendbarkeit agentenbasierter und verteilter Systeme im Smart Grid aufzeigt und weiterhin das Interesse der Industrie an den dargestellten Ansätzen belegt. Die für Smart Grids neue Umsetzung eines Immunsysteminspirierten Agentensystems führte weiterhin zu einem bisher nicht dargestellten Koordinationsparadigma, dass sich ggf. auch für andere Anwendungsbereiche eignen kann.

4.4 ANSÄTZE FÜR DEN FAHRPLANBASIERTE BETRIEB DEZENTRALER KOMPONENTEN

4.4.1 EPOS und ALMA

Die Dissertation von Evangelos Pournaras wird durch die Forschungsfrage geleitet, ob auf der Basis eines verteilten und über ein Kommunikationsnetzwerk verbundenen Systems modulare und rekonfigurierbare übergeordnete Dienste (engl.: *services*) erbracht werden können [Pou13]. Pournaras verfolgt dabei das Konzept der *overlay networks* [And+05], die von der physikalischen Kommunikationsinfrastruktur abstrahieren und somit eine logische,

virtuelle Netzwerkstruktur darstellen. Die Verbindungen in dieser virtuellen Netzwerkstruktur müssen im Feld auf einer oder mehreren physikalischen Kommunikationsverbindungen umgesetzt werden. Während das physikalische Kommunikationsnetz als statisch angesehen werden kann, ist eine dynamische Anpassung des virtuellen Netzwerks abhängig von der durch die dezentralen Komponenten zu bewältigenden Aufgabe umsetzbar. Die Vorteile virtueller Netzwerke für die gemeinsame Umsetzung übergeordneter Dienste durch dezentrale Komponenten wurde bereits in einigen Anwendungsbereichen aufgezeigt [KS10]. Pournaras überträgt den Ansatz auf Anwendungen im Smart Grid.

Mit EPOS und ALMA werden zwei unterschiedliche Konzepte zur dezentralen Lastflexibilisierung mit Hilfe von *overlay networks* entwickelt: EPOS (*energy plan overlay self-stabilization*) dient der vorausschauenden Koordination elektrischer Lasten, die über einen thermischen Speicher in ihrer Leistungsaufnahme verschoben werden können wie z. B. Kühlschränke und Boiler. Pournaras skizziert ein hierarchisches Agentensystem, das sich in seiner Struktur dynamisch an die aktuell zu erbringende Aufgabe anpassen kann – hier setzt sich dieser Ansatz deutlich von den bisher dargestellten Konzepten statisch hierarchisierter Agentensysteme ab. Die Agenten senden jeweils eine Menge möglicher Fahrpläne an ihren Repräsentanten auf der übergeordneten Ebene. Dieser wählt mittels eines *brute force*-Ansatzes die optimale Aggregation als Auswahl jeweils eines Fahrplanes pro untergeordnetem Agent aus und sendet diese wiederum an die nächsthöhere Ebene. Wird auf der obersten Ebene bezogen auf die globale Zielfunktion keine ausreichende Qualität erreicht, so wird das Verfahren wiederholt. Obwohl über die dynamisierte Baumstruktur hierarchisch aufgebaut, findet sich hier somit eine Variante von Koordinationsparadigma K2 mit dezentraler Lösungssuche mit zentraler Entscheidung: Die Agenten treffen zwar selbst eine Lösungswahl, der zentralen Instanz liegen aber diese Informationen in nicht-aggregierter Form vor – eine überraschende und nicht weiter erläuterte Design-Entscheidung bei einem hierarchischen System, bei dem aus der nicht-aggregierten Information keine weiterreichende Entscheidung abgeleitet wird.

Ein globales Optimum ist bei begrenzter Anzahl an Iterationen und dynamischer Rekonfigurationen nur theoretisch erreichbar.

Mit ALMA (*adaptive load management by aggregation*) wird – ergänzend zur prädiktiven Planung mit EPOS – ein Verfahren für die reaktive Planung vorgestellt. In einem vollständig verteilten Verfahren, das auf dem *gossiping*-Ansatz beruht¹¹, ist eine kurzfristige Anpassung des Lastverhaltens auf Basis dynamisch definierter lokaler Komfort-Level möglich. Die Anpassung soll u.a. dann erfolgen, wenn es zur kurzfristiger Überschuss-Einspeisung kommt. Die Evaluation wurde auf Basis von Daten aus dem »Olympic Peninsula Smart Grid Demonstration Project« durchgeführt [Ham+07].

Die präsentierten Ergebnisse erlauben keine Aussage über die Eignung des Verfahrens

¹¹Eine Beschreibung des *gossiping*-Ansatzes ist beispielsweise [KS07] zu entnehmen.

für den Kontext der kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP: Aus der Darstellung des Verfahrens geht nicht hervor, wie die Agenten ihr Verhalten untereinander abstimmen, um kommunizierte Anpassungsbedarfe koordiniert zu erfüllen. So bleibt unklar, wie beispielsweise vermieden werden soll, dass alle Agenten gleichzeitig auf einen Anpassungsbedarf reagieren. Weiterhin soll das Verfahren zwar auf EPOS aufbauen und somit auch die vorab abgestimmten Pläne übernehmen, es ist aber unklar, wie sich die kurzfristigen Anpassungen auf die Planerfüllung auswirken und negative Rückwirkungen vermieden werden können. Abschließend ist dennoch festzuhalten, dass mit ALMA erstmalig ein vollständig verteiltes Verfahren (Koordinationsparadigma K6) für die kurzfristige Anpassung dezentraler Komponenten vorgestellt wurde.

4.4.2 Holonische Virtuelle Kraftwerke

Das Konzept der aktiven Einsatzplanung in Holonischen Virtuellen Kraftwerken von von Martin Tröschel im Rahmen seiner Dissertation an der Universität Oldenburg vorgestellt [Trö10]. Eingebettet war die Arbeit in den Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN), einem interdisziplinären Forschungsprojekt (u.a. aus Elektrotechnik, Energietechnik und Informatik) in dem die optimierte Integration dezentraler Erzeugungsanlagen in das Stromnetz am Beispiel von Mikro-KWK-Anlagen untersucht wurde. Entsprechend wurde die Evaluation des vorgestellten Ansatzes mit simulierten Mikro-KWK-Anlagen durchgeführt, ohne dass der Ansatz selbst auf diesen Anlagentyp beschränkt wäre.

Fokus der aktiven Einsatzplanung ist die Reaktion auf Prognose-Abweichungen oder Anlagen-Ausfälle: Ein nicht mehr realisierbarer Einsatzplan eines Virtuellen Kraftwerkes muss so umgestaltet werden, dass der initial angestrebte Ziellastgang möglichst genau erfüllt wird. Tröschel überträgt für diese Aufgabe Ansätze aus dem Bereich der maschinellen Ablaufplanung in den Bereich des Energiemanagements und beschreibt einen agentenbasierten Ansatz, bei dem Pläne – ausgehend von einer möglichst schnell ermittelten ersten gültigen Lösung – kontinuierlich verbessert werden.

Die Einheiten werden über ein kombiniertes Agenten-Konzept repräsentiert: Die sogenannten *Ressourcen-Agenten* überwachen und steuern die ihnen zugeordnete Einheit und sind für die Detektion eines Ereignisses zuständig. Bezogen auf diese Aufgabe handelt es sich somit um eine verteilte Umsetzung. Ist eine Abweichung aufgetreten, so wird die Aufgabe der Ereignis-Bearbeitung an die sogenannten *Auftragsagenten* weitergegeben. Diese Agenten können zwei unterschiedliche Rollen einnehmen: Die *Head-Agenten* führen die Koordination der Verhandlungen zur Bearbeitung von Ereignissen für jeweils eine Gruppe von *Body-Agenten* durch. Da die Agenten innerhalb einer Gruppe nicht in einem kompetitiven Verhältnis stehen, handelt es sich nicht um einen marktbasieren Ansatz, sondern um eine sogenannte moderierte Gruppe [HL05]. Der Ansatz enthält mit dem Head-Agenten als Moderator Bestandteile zentraler Ansätze. Da diese Rolle dynamisch durch einen beliebigen

Auftragsagenten eingenommen werden kann, ist der Ansatz – anders als bei statischer Zuweisung einer zentralen Instanz – bei einem Ausfall eines Head-Agenten deutlich weniger anfällig.

Das Agentensystem wird als adaptive holonische Struktur konzipiert, d. h. wie bei EPOS (Abschnitt 4.4.1) wird die interne Struktur des Agentensystems zur Laufzeit angepasst. Können Abweichungen vom Fahrplan innerhalb einer Gruppe nicht erfolgreich bearbeitet werden, stößt der entsprechende Head-Agent Verhandlungen mit anderen Head-Agenten über eine Reorganisation der Gruppen an.

Der Ansatz der aktiven Einsatzplanung in Holonischen Virtuellen Kraftwerken kann bezüglich des umgesetzten Koordinationsparadigmas als dezentrale Lösungssuche mit hierarchischer Entscheidung eingestuft werden (K4).

4.4.3 Autonomous Virtual Power Plants

Das Konzept der *Autonomous Virtual Power Plants* (AVPP) wurde als Anwendungsbereich aus der seit 2009 von der DFG geförderten Forschergruppe OC-TRUST¹² heraus vorgestellt [And+10]. Der Schwerpunkt der Arbeiten der Forschergruppe liegt auf der Entwicklung von Mechanismen für die Vermeidung schadhafte Verhaltens in selbstorganisierenden Systemen [SR12]. Smart Grids als sicherheitskritische Systeme stellen einen Anwendungsbereich der Forschergruppe dar.

AVPP bündeln dezentrale Erzeugungsanlagen in einem hierarchischen Konzept entlang der netztopologischen Struktur. Übergeordnetes Ziel ist es dabei, Erzeugung und Verbrauch im Rahmen eines fahrplanbasierten Betriebs von Erzeugungsanlagen und Speichern möglichst in Einklang zu bringen. AVPP setzen ein dezentral-hierarchisches Koordinationsparadigma um (K4): Auf jeder Ebene wird in einem marktbasieren Verfahren über die Fahrplan-Gebote der aggregierten Einheiten entschieden, wobei das Optimierungsziel in der Deckung des prognostizierten lokalen Bedarfs liegen kann, prinzipiell aber auch ein anderer Ziellastgang möglich wäre. Diese beiden bzgl. der energiewirtschaftlichen Rollen und Geschäftsmodelle vollständig unterschiedlichen Ansätze werden nicht weiter spezifiziert und liegen nicht im Fokus der Forschergruppe. Der AVPP-Ansatz könnte somit auch als ein Ansatz für lokalen Abgleich von Erzeugung und Verbrauch aufgefasst werden (Abschnitt 4.2)).

Der hierarchische Ansatz wird um ein Dynamisierungskonzept ergänzt [ASR13]: AVPP können dann zusammengefasst werden, wenn das Markt-Matching innerhalb mehrerer AVPP unterhalb einer definierten Zeitgrenze erfolgen kann und somit prinzipiell mehr Zeit zur Ermittlung einer besserer Lösung zur Verfügung stehen würde. Wird eine definierte obere Zeitgrenze überschritten, so reorganisieren sich die aggregierten Einheiten zu neuen Untergruppen. Das betrachtete *set partitioning*-Problem löst somit zur Laufzeit die Aufgabe

¹²http://www.isse.uni-augsburg.de/en/projects/projects_reif/oc-trust/, zuletzt besucht am 9.12.2014

der Verbundbildung, allerdings nicht – wie in DVPP – orientiert an möglichen Produkten, sondern anhand der Netztopologie. Anders als bei EPOS (siehe [Abschnitt 4.4.1](#)) und den Holonischen Virtuellen Kraftwerken (siehe [Abschnitt 4.4.2](#)) erfolgt die dynamische Aggregation aber nicht losgelöst von der Netztopologie.

Das Agentensystem greift das *trust*-Konzept auf, um schädliches Verhalten einzelner Agenten zu sanktionieren bzw. zu verhindern [[Ste+10](#)]. Die Agenten weisen somit deutlich erweiterte soziale Fähigkeiten auf, die über die notwendigen Eigenschaften von Agenten in markt-basierten Ansätzen hinausgehen. Die agenten-interne Modellierung des Wissens über andere Agenten des Systems ist in einem *trust*-basierten System zwingend erforderlich.

Bezogen auf die Einsatzplanung wird ein deutlich anderer Ansatz verfolgt als in DVPPs: Da der Planungsaufwand als zu aufwendig angesehen wird, soll eine wiederholte Einsatzplanung bzw. Umplanung möglichst vermieden werden. Angewendet werden Methoden aus dem Bereich der *robust optimization*, z. B. über die Modellierung möglicher Ereignisse mittels Szenariobäumen [[ASR14](#)]. Die zugrunde liegende These, dass eine Umplanung möglichst zu vermeiden sei, wird nicht detaillierter begründet.

4.4.4 COHDA

COHDA (*Combinatorial Optimization Heuristic for Distributed Agents*) wurde von Christian Hinrichs im Rahmen seiner Dissertation für die Einsatzplanung dezentraler Erzeuger und Verbraucher im Smart Grid an der Universität Oldenburg entwickelt [[Hin14](#)]. Die Besonderheit des Verfahrens besteht im gewählten Koordinationsparadigma: In einem vollständig verteilten heuristischen Verfahren führen die Agenten eines Verbundes eine gemeinsame Optimierung durch (Koordinationsparadigma K6). Hinrichs fokussiert in der Darstellung der Heuristik auf die Einsatzplanung und den fahrplanbasierten Betrieb dezentraler Komponenten: Die kooperierenden Agenten ermitteln – auf Basis eines initial kommunizierten Ziellastganges – eine gemeinsame Realisation auf Basis einer individuellen Fahrplanauswahl. Adressiert wird die prädiktive Planung statischer Aggregationen von Einheiten.

Das Verfahren wird im Rahmen der Auswahl eines Basisverfahrens für die kontinuierliche Einsatzplanung diskutiert und daher hier nicht detaillierter dargestellt.

4.5 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Abschnitt wurden agentenbasierte Koordinationsansätze im Smart Grid dargestellt. Ziel war es, eine solche Darstellung zu finden, die es erlaubt – trotz der Vielfalt unterschiedlicher Anwendungen und Umsetzungen – von den bereits durchgeführten Arbeiten zu lernen. Dazu wurde P-CASIT als Mittel zur vergleichenden Darstellung dieser Ansätze vorgestellt. Soweit auf Basis der veröffentlichten Arbeiten möglich, wurden die Arbeiten anhand der in P-CASIT definierten sechs Leitfragen beschrieben. In [Tabelle 4.1](#)

wird eine Übersicht der vorgestellten Ansätze in Bezug auf einige Kategorien gegeben. Die Auswahl ergibt sich aus dem Schwerpunkt der hier vorgelegten Arbeit sowie der verfügbaren Information. Mit keinem der vorgestellten Verfahren kann das theoretische Optimum sicher erreicht werden. Eine detailliertere Darstellung der Eigenschaften der Lösung (S) ist in einer tabellarischen Übersicht nicht sinnvoll möglich; daher wird auf die Gegenüberstellung dieses Charakteristikums verzichtet. Für die Aspekte des Zeitverhaltens (T) leitet sich das erforderliche Verhalten aus dem betrachteten Problem her, während das tatsächliche Zeitverhalten nur unter gleichen Hardware-Bedingungen dargestellt werden sollte und daher ebenfalls in der Übersicht nicht aufgenommen wird.

		P		C	A	I
		Netzbetrachtung		Koord.	E/A	Flex.
		Topologie	Zustand			
LSDM	HomeBots	✓	✓	K3	m:1	H
	PowerMatcher	✓	(✓)	K4	m:1	H
Netzbetrieb	MGCC/CAMC	✓	✓	K3	m:1	H
	V-Agenten	✓	✓	K3	m:1	H
	DEZENT	✓	✓	K4	m:1	H
	Immuns. A.	(✓)	✓	K5	m:1	?
FP-Betrieb	EPOS	(✓)	×	K2	1:n	Z-A
	ALMA	×	×	K6	1:n	Z-A
	Hol. VK	×	×	K4	1:n	H
	AVPP	✓	×	K4	1:1	H
	COHDA	×	×	K6	1:1	M-A

Tabelle 4.1: Vorgestellte agentenbasierte Ansätze im Überblick. P, C, A und I bezieht sich auf die entsprechenden Leitfragen aus P-CASIT, denen die dargestellten Inhalte zuzuordnen sind. Koord.: Koordinationsansatz, E/A: Verhältnis Einheiten zu Agenten, Flex.: Modellierung anlagenlokaler Flexibilität, LSDM: Lokales Supply-Demand-Matching, FP-Betrieb: fahrplanbasierter Betrieb, ✓: Betrachtung Netztopologie bzw. Netzzustand, ×: Keine Betrachtung Netztopologie bzw. Netzzustand, Kn: Koordinationsansatz n, H: Abstraktion entlang Hierarchisierungsebenen, Z-A: Zustandsabstraktion, M-A: Modellabstraktion, ?: unbekannt oder Einordnung nicht möglich

Es wurde festgestellt, dass agentenbasierte Ansätze in den unterschiedlichsten Bereichen des Smart Grid eingesetzt wurden. Grob eingeordnet wurden sie in die Bereiche des lokalen

Supply-Demand-Matchings, des stabilen Netzbetriebs sowie des fahrplanbasierten Betriebs für die Vermarktung einer Anlagenaggregation.

Die meisten Ansätze folgen in einer Hierarchisierung der Agentensysteme der Topologie des elektrischen Netzes. Eine Besonderheit stellt das Immunsystem-inspirierte Smart Grid Management dar: Es ergänzt die aus dem Netz generierte Hierarchie des Agentensystems um zusätzliche Möglichkeiten der Kommunikation innerhalb einer Ebene und verwendet somit auch ein anderes Koordinationsparadigma (K 5).

Die Holonischen VK und die AVPP definieren unterschiedliche dynamische Hierarchisierungskonzepte. Bei den AVPP folgt dabei auch eine zur Laufzeit adaptierte Hierarchie immer der Netztopologie.

Für alle in [Abbildung 4.1](#) (S. 49) dargestellten Koordinationsparadigmen (mit Ausnahme des zentralen Ansatzes, der nicht im Fokus dieser Darstellung steht) wurden Beispiele gefunden. Lediglich ALMA und COHDA setzen einen vollständig verteilten Ansatz nach Koordinationsparadigma K6 um. Die Umsetzung des Agentenmodells wird in allen Ansätzen sehr unterschiedlich gehandhabt. In keinem der aktuelleren Ansätze wurde der Bezug zu gängigen Agentenarchitekturen wie z. B. dem BDI-Konzept oder der InteRRaP-Architektur hergestellt. Die jeweils durch Agenten repräsentierten Einheiten werden entweder nur durch einen oder durch mehrere, nach Aufgaben differenzierten Agenten modelliert. Bei einer m:1-Umsetzung werden meist alle Einheiten eines Hauses von einem Agenten repräsentiert. Eine 1:1 oder 1:n-Umsetzung findet sich in den Fällen, in denen das Netz nicht betrachtet wird: Wird der Zustand des Netzes nicht betrachtet, z. B. bei Betrieb eines ökonomischen VK, so ist es nicht erforderlich, alle Erzeuger und Verbraucher im Agentensystem zu repräsentieren. Der Unterschied zwischen einer 1:1 und 1:n-Umsetzung kann nicht prinzipiell bewertet werden: Paralleles Verhalten kann auch innerhalb eines Agenten umgesetzt werden. Vorgehensmodelle zur Entwicklung agentenbasierter Kontrollsysteme wie die DACS-Methode empfehlen die Aufteilung von abgrenzbaren Funktionen in Agenten u.a. nach erforderlichen Informationen [[BJW04](#)].

Die Abbildung der möglichen Betriebszustände der betrachteten Komponenten zeigt anwendungsabhängig ebenfalls eine große Vielfalt, wie die Verwendung abstrahierter Modelle oder die Abstraktion vom eigentlichen Anlagenzustand, allerdings ist hier ein Vergleich deutlich erschwert, da dieses Thema seltener im Zentrum der Veröffentlichungen steht.

Für den Bereich der prädiktiven und reaktiven Einsatzplanung dezentraler Einheiten wurden ebenfalls unterschiedliche Arbeiten vorgestellt. Mit ALMA, den Holonischen VK, dem AVPP-Ansatz sowie COHDA wurden Ansätze identifiziert, die als Basisverfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP in Frage kommen. Diese Ansätze werden im weiteren Verlauf der Arbeit daher noch einmal vergleichend diskutiert und auf ihre Eignung für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP bewertet (siehe [Kapitel 6](#)).

5

KONZEPTUALISIERUNG

Im nun folgenden Kapitel wird das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung in Dynamischen Virtuellen Kraftwerken formal erfasst. Dazu werden zunächst die **Annahmen und Einschränkungen** dargestellt, die für den DVPP-Gesamtkontext definiert wurden ([Abschnitt 5.1](#)). Relevante **Zeitbegriffe** werden nachfolgend definiert ([Abschnitt 5.2](#)). Anschließend erfolgt die **Konzeptualisierung entlang eines Ebenenmodells**: Zunächst werden Konzepte auf der Ebene der betrachteten Energieanlagen beschrieben ([Abschnitt 5.3](#)). Die Repräsentation der Einheiten erfolgt auf der Ebene der Agenten ([Abschnitt 5.4](#)). Die Definition erforderlicher Konzepte auf der darüberliegenden Ebene der DVPPs findet sich in [Abschnitt 5.5](#). Abschließend wird das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung in [Abschnitt 5.6](#) formal gefasst.

5.1 ANNAHMEN UND EINSCHRÄNKUNGEN

Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben ist eingebettet in den bereits vorgestellten Forschungsverbund Smart Nord. Als interdisziplinärer Forschungskontext ergab sich somit die Möglichkeit, viele anwendungsbezogene Fragestellungen mit Experten der entsprechenden Fachrichtungen zu diskutieren. Das DVPP-Konzept wurde für einen Teil der Arbeiten in Smart Nord frühzeitig als verbindendes Konzept entwickelt [[Son+12](#)]. Ziel war es dabei, die Prozesse der DVPP-Bildung, Marktinteraktion und Planung mindestens konzeptuell zu integrieren. Daher wurden frühzeitig Annahmen getroffen, die letztlich eine Vereinfachung und Abstraktion der Realität darstellen und so die Komplexität der betrachteten integrierten DVPP-Wertschöpfungskette reduzieren. Diese werden im Folgenden als Annahmen aufgeführt.

- A1** Eine Einheit ist kommunikationstechnisch angeschlossen oder wird über eine übergeordnete virtuelle Einheit abstrahiert.
- A2** Jede so definierte Einheit wird durch einen (Einheiten-)Agenten repräsentiert.
- A3** Ein Agent hat mindestens lesenden Zugriff auf die ihm zugeordnete Einheit. Für Planungszwecke kann ein Agent den aktuellen Betriebszustand auslesen. Ist die Einheit steuerbar, so kann der Agent einen Fahrplan an die Einheit übermitteln.

- A4 Die kommunikationstechnische Infrastruktur wird nicht betrachtet. Gleichwohl wird nicht davon ausgegangen, dass Nachrichten zum vorgesehen Zeitpunkt und in der vorgegebene Reihenfolge bei einem Agenten eintreffen.
- A5 DVPPs werden am Vortag (am Day-Ahead-Markt) gebildet. Mit Beginn der kontinuierlichen Planung sind somit alle Zugehörigkeiten eines Agenten zu unterschiedlichen DVPPs bekannt.
- A6 Agenten gehören in einem 15-Minuten-Intervall nur einem DVPP an. Es gibt somit keine zeitliche Überschneidung der DVPP-Zugehörigkeit.
- A7 Gehört ein Einheiten-Agent in einem 15-Minuten-Intervall einem DVPP an, so muss er die Erzeugung bzw. den Verbrauch innerhalb dieses Intervalls vollständig über das DVPP vermarkten bzw. decken. Es wird somit auch angenommen, dass regenerative Energieanlagen abgeregelt werden können, wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist.

5.2 ZEITMODELL

Für das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung muss zunächst der Bezug der Systemzeit zur realweltlichen Zeit so hergestellt werden, dass (simulierte oder tatsächliche) Energieanlagen zum richtigen Zeitpunkt konfiguriert werden und im Zuge eines Monitorings der Anlagen ermittelte Messwerte auf die richtige Planungszeit abgebildet werden. Daher soll zunächst das dieser Arbeit zugrunde liegende Zeitmodell definiert werden, auf das sich die Konzeptualisierung im weiteren Verlauf bezieht. Das Zeitmodell sollte dabei so gefasst werden, dass eine Abbildung auf Arbeiten mit anderer zeitlicher Granularität prinzipiell möglich ist, ohne die Modellierung zu verändern. So soll es z. B. möglich sein, die bereits dargelegten Prozesse innerhalb der Wertschöpfungskette dynamischer Virtueller Kraftwerke (siehe 1.3) mit solchen Prozessen zu verknüpfen, die für die Bereitstellung von Systemdienstleistungsprodukten erforderlich sind und eine deutlich höhere zeitliche Auflösung aufweisen.¹ In Abbildung 5.1 werden die folgenden Definitionen des Zeitmodells zueinander in Beziehung gesetzt und dem Anwendungskontext dieser Arbeit entsprechend parametrisiert.

Zunächst wird die systemweit kleinste Zeiteinheit definiert, die sogenannte Basiseinheit der Zeit:

Definition 5.1 (Basiseinheit der Zeit)

Sei t_{bu} eine systemweite Basiseinheit der Zeit und t_i ein in t_{bu} angegebener Zeitwert. t_i

¹Die nachfolgenden Definitionen des Zeitmodells wurden gemeinsam mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern innerhalb des Projektkontextes von Smart Nord (siehe Kapitel 1) entwickelt.

wird abgebildet auf die Menge realweltlicher Zeitpunkte, die durch das Intervall $[t_i, t_i + t_{bu})$ umfasst und verkürzt als $T_{i,rt}$ notiert wird. Die Zuweisung von der Systemzeit auf die realweltliche Zeit erfolgt durch die Funktion τ :

$$\tau : T \rightarrow \mathcal{P}(\mathbb{R}), \tau(t_i) \mapsto T_{i,rt}$$

Die kontinuierliche realweltliche Zeit wird somit über die Systemzeit in t_{bu} diskretisiert und bedient sich daher o.B.d.A. der Diskretisierungskonzepte der realweltlichen Zeit, z.B. Minuten oder Stunden.

Innerhalb eines Systems werden Abschnitte der Realzeit zusammengefasst zu sogenannten Planungsintervallen, die von der gleichen Länge sind, d. h. über die Basiseinheit definiert werden können: So kann ein Planungsintervall z. B. 15 Minuten umfassen.

Definition 5.2 (Planungsintervall)

Ein Planungsintervall $t^{(i)}$ sei definiert als das halboffene Intervall

$$t^{(i)} = [t_{i \cdot \Delta t}, t_{(i+1) \cdot \Delta t}),$$

$$0 \leq i \leq i_{max}, i \in \mathbb{N}_+$$

mit $\Delta t \in \mathbb{N}_+$ als Differenz der oberen und unteren Intervallgrenze eines **Planungsintervalls** in der Basiseinheit der Zeit t_{bu} und i_{max} als Anzahl der Planungsintervalle im betrachteten Zeitausschnitt.

Abschließend sei der aktuell betrachtete Zeitausschnitt definiert, d. h. der zeitliche Horizont, der systemweit von einem Zeitpunkt aus betrachtet werden kann².

Definition 5.3 (Planungshorizont)

Der aktuelle **Planungshorizont** sei definiert wie folgt:

$$T_{pl} = (t^{(0)}, t^{(1)}, \dots, t^{(i_{max})})$$

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden zeitliche Bezüge immer zur Systemzeit wie hier definiert angenommen. Eine Übertragung auf die entsprechende Realzeit ist über das dargestellte Modell möglich. Soweit nicht anders angegeben, wird weiterhin die nachfolgende Parametrierung des Zeitmodells angenommen, die dem energiewirtschaftlichen Kontext dieser Arbeit mit einer Fahrplanauflösung von 15 Minuten entspricht (siehe Abschnitt 1).

²Die Notation der Formalisierung wird durch den Bezug zum Planungsintervall im Folgenden die zeitbezogenen Indizes über hochgestellte Indizes, alle anderen Indizes durch Tiefstellung darstellen.

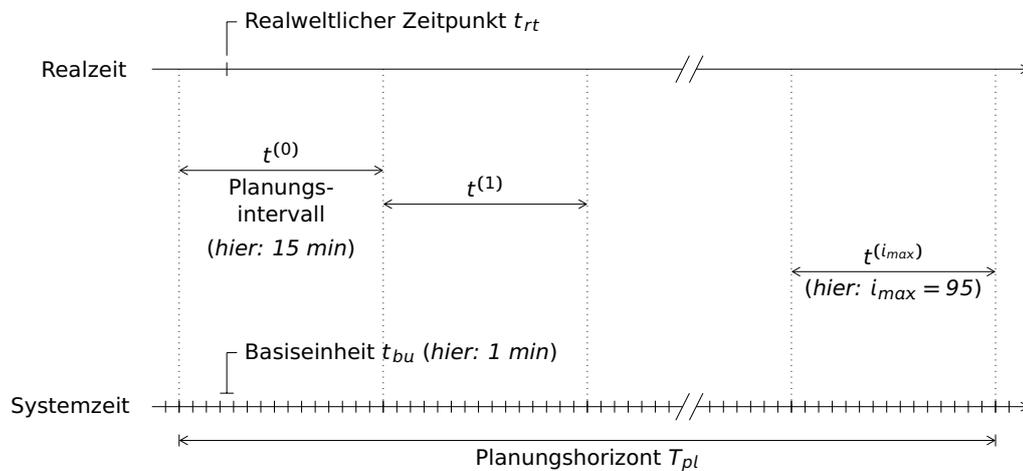


Abbildung 5.1: Zeitmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung

Definition 5.4 (Zeitmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung)

Das Zeitmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung sei – aufbauend auf den Definitionen 5.1 bis 5.3 – wie folgt definiert:

- $t_{bu} = 1\text{min}$ (Basiseinheit der Zeit)
- $\Delta t = 15\text{min}$ (Differenz obere und untere Intervallgrenze des Planungsintervalls)
- $i_{max} = 95$ (Anzahl der Planungsintervall im Planungshorizont)

Der Planungshorizont umfasst einen vollständigen Tag, aufgeteilt in 96 Planungsintervalle. Die kleinste innerhalb des Systems betrachtete Zeiteinheit beträgt eine Minute.

5.3 EBENE DER EINHEITEN

Das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung betrifft die Planung von Einheiten, die über einen Netzanschlusspunkt mit dem Stromnetz verbunden sind.

Definition 5.5 (Stromnetz)

Ein Stromnetz PG (power grid) wird betrachtet als Graph $PG = (V_G, E_G)$, mit den **Netzknoten** V_G als Menge der Knoten des Graphen (vertices) $V_G = \{v_{G,1}, \dots, v_{G,n}\}$ und

den **Leitungen** E_G als Menge der Kanten (*edges*) E_G :

$$E_G = \{(v_{G,i}, v_{G,j}) \subseteq V_G \mid 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\}$$

Definition 5.6 (Einheit)

Eine Einheit u (*unit*) ist als technische Anlage physikalisch über einen Netzanschlusspunkt an ein Stromnetz PG angeschlossen und kann Einfluss auf Strom oder Spannung haben. Es sei U die Menge aller Einheiten.

Der **Netzanschlusspunkt** einer Einheit und somit der Bezug zum Stromnetz wird dargestellt über die Funktion gn (*grid node*):

$$gn : U \rightarrow V_G, gn(u) = v_{G,j}$$

Eine Einheit kann unterschiedliche Betriebszustände annehmen, was sich im Stromnetz als Änderung in Wirk- und Blindleistungseinspeisung bzw. -bezug auswirken kann³. Für das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP ist das Wirkleistungsverhalten von Bedeutung. Der mögliche Verlauf der Betriebszustände wird im Planungshorizont diskretisiert in Fahrplänen abgebildet.

Definition 5.7 (Betriebszustand)

Der Betriebszustand einer Einheit u im Planungsintervall $t^{(i)}$ bezeichnet die durchschnittlich gelieferte Energiemenge in diesem Planungsintervall und ist definiert als $e_u^{(i)}$. Er sei gegeben durch die folgende Funktion:

$$e_u : T_{pl} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$e_u(t^{(i)}) = e_u^{(i)}$$

Die Folge der innerhalb des Planungshorizontes dem aktuellen Planungsintervall $t^{(i)}$ bereits vorangegangenen Betriebszustände sei definiert als

$$\overline{e_u^{(i)}} = \begin{cases} (e_u^{(0)}, e_u^{(1)}, \dots, e_u^{(i-1)}) & 0 < i \leq i_{max} \\ () & i = 0 \end{cases}$$

Die Folge der vorangegangenen Betriebszustände ist somit genau dann die leere Folge, wenn das erste Zeitintervall betrachtet wird.

³Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird meist von der Wirkleistungseinspeisung gesprochen. Diese Formulierung bezieht immer auch den Fall des Bezugs von Wirkleistung mit ein, der über ein negatives Vorzeichen als Lieferung abgebildet werden kann.

Verbunden mit dem Betriebszustand einer Einheit sind bestimmte Kosten, die sich unterschiedlich zusammensetzen können: Bei einem erdgasbefeuerten Blockheizkraftwerk bestimmen die Brennstoffkosten einen Teil der Kosten. Bei einer Windenergieanlage mit fester Einspeisevergütung kann dagegen ein Abregeln mit Kosten verbunden sein. Für elektrische Lasten werden – analog zur Abbildung des Leistungsbezugs – negative Kostenwerte verwendet. Die Kosten werden zusammenfassend über die einheitenspezifische Kostenfunktion dargestellt.

Definition 5.8 (Kostenfunktion)

Die Kosten für das Einnehmen eines Betriebszustandes $e_u^{(i)}$ sind definiert über die einheitenspezifische Kostenfunktion c_u :

$$c_u : T_{pl} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, c_u(e_u^{(i)}) = c_u^{(i)}$$

Es ist zu beachten, dass über den Zeitbezug des Betriebszustandes dieser auch für die Kostenfunktion gilt⁴.

Die Betriebszustände, die als Ergebnis einer Planung im Planungshorizont eingenommen werden sollen, werden in Fahrplänen abgebildet.

Definition 5.9 (Fahrplan)

Der Fahrplan os_u (*operation schedule*) einer Einheit u weist jedem Planungsintervall im Planungshorizont eine durchschnittlich gelieferte Energiemenge zu:

$$os_u : T_{pl} \rightarrow \mathbb{R}, os_u(t^{(i)}) = e_u^{(i)}$$

Die bei Abfahren des Fahrplans eingespeiste oder bezogene Energiemenge ist definiert wie folgt:

$$e_{os_u} = \sum_{i=0}^{i_{max}} os_u(t_{pl}^{(i)})$$

Die Menge aller (ausführbaren und nicht ausführbaren) Fahrpläne einer Einheit u im betrachteten Planungshorizont wird bezeichnet als OS_u .

Eine Einheit kann unterschiedliche Betriebszustände abhängig von den vorangegangenen Betriebszuständen sowie ihrer technischen Möglichkeiten und ihrer Auslegung annehmen. Sie unterliegt dabei technischen Beschränkungen, die einen Betriebszustand als nicht zulässig oder zulässig charakterisieren können.

⁴Eine Abhängigkeit zu allen vorangegangenen Betriebszuständen wird nicht hergestellt. An dieser Stelle reduziert diese Formalisierung damit zwar die Möglichkeiten zur Abbildung der Kostenstruktur, entspricht aber dem Forschungsziel, das keine detaillierte Entwicklung und Evaluation von Kostenfunktionen beinhaltet.

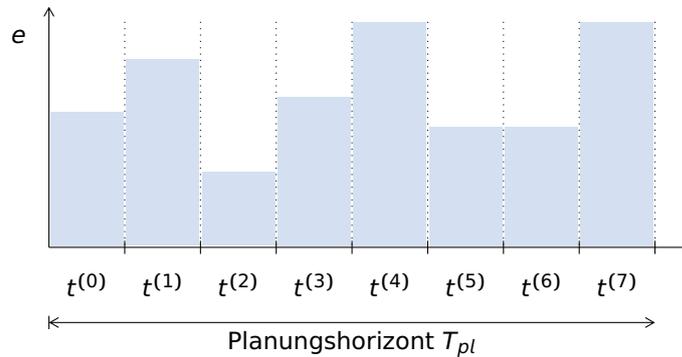


Abbildung 5.2: Der Fahrplan einer Einheit weist jedem Planungsintervall $t^{(i)}$ im Planungshorizont eine zu liefernde Energiemenge e zu (vereinfachte Darstellung).

Definition 5.10 (Betriebsconstraint)

Ein **Betriebsconstraint** $oc_u^{(i)}$ (operation constraint) der Einheit u im Planungsintervall $t^{(i)}$ sei definiert über die Funktion oc_u , die einem Betriebszustand einen Wert bezüglich seiner einheitentechnischen Durchführbarkeit zuordnet, und zwar abhängig von den vorangegangenen Betriebszuständen:

$$oc_u(\overline{e_u^{(i)}}, e_u^{(i)}) \rightarrow \{0, 1\}$$

so dass $oc_u(\overline{e_u^{(i)}}, e_u^{(i)}) = 1$, falls der Betriebszustand dem Betriebsconstraint im betrachteten Intervall $t^{(i)}$ nicht widerspricht, bzw. $oc_u(\overline{e_u^{(i)}}, e_u^{(i)}) = 0$, falls der Betriebszustand dem Betriebsconstraint widerspricht.

Die Menge aller Betriebsconstraints einer Einheit u im Planungshorizont ist definiert als $OC_u = \{oc_u^{(i)} \mid 0 \leq i \leq i_{max}\}$.

Einheiten unterliegen in ihrem Betrieb weiterhin Restriktionen des Netzes, die sich auf die Nutzung des Netzanschlussknotens beziehen.

Definition 5.11 (Netz-Constraint)

Ein **Netz-Constraint** $gc_u^{(i)}$ (grid constraint) sei definiert über die Funktion gc_u , die dem Betriebszustand einer Einheit einen Wert bezüglich seiner Durchführbarkeit in Hinblick

auf die netztechnischen Beschränkungen im Planungsintervall $t^{(i)}$ zuordnet:

$$gc_u : T_{pl}, \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$$

$$gc_u(e_u^{(i)}) = gc_u^{(i)}$$

so dass $gc_u(t^{(i)}, e_u^{(i)}) = 1$, falls der Betriebszustand dem Netzconstraint nicht widerspricht, bzw. $gc_u(e_u^{(i)}) = 0$, falls der Betriebszustand dem Netzconstraint widerspricht.

Die Menge aller Netzconstraints einer Einheit im Planungshorizont ist definiert als $GC_u = \{gc_u^{(i)} \mid 0 \leq i \leq i_{max}\}$.

Definition 5.12 (Zulässigkeit eines Fahrplans)

Die Vereinigungsmenge der Betriebs- und Netz-Constraints sei definiert als HC (*hard constraints*), ein nicht weiter differenziertes Element aus dieser Menge sei als hc bezeichnet. Die Zulässigkeit eines Fahrplans ad (*admissibility*) sei dargestellt über die Funktion:

$$ad : OS \rightarrow \{0, 1\},$$

$$ad(os_u) = 1 : \forall hc_u \in HC_u, 0 \leq i \leq i_{max} : hc_u(e_u^{(i)}) = 1$$

Der Fahrplan os_u ist also **zulässig**, wenn alle Betriebs- und Netzconstraints der Einheit u in diesem Fahrplan erfüllt werden.

Einheiten können neben den angegebenen Restriktionen auch Präferenzen bzgl. der Fahrpläne aufweisen. Die Präferenzen stellen somit *soft constraints* dar. Jedem Fahrplan wird somit nach seinem Grad der Erfüllung der Präferenzen ein Wert zugeordnet. Ein höherer Wert bezeichnet dabei eine stärkere Berücksichtigung der Präferenzen. Die so erfassten Constraints können auch betriebswirtschaftliche Werte abbilden⁵.

Definition 5.13 (Präferenzen)

Die einheitenspezifische Funktion sc_u ordne einem Fahrplan os_u im Planungshorizont T_{pl} eine Präferenz sc_{os_u} zu, so dass

$$sc_u : T \times OS_u \rightarrow [0, 1]$$

$$sc_u(T_{pl}, os_u) = sc_{os_u}, \forall os_u \in OS_u$$

⁵Es ist somit möglich, dass nicht zulässigen Fahrplänen ein Wert bzgl. der Erfüllung der Präferenzen zugeordnet wird. Die Betrachtung der *hard constraints* erfolgt unabhängig von dieser Bewertung – der Zusammenhang ist im Lösungsansatz zu entwickeln.

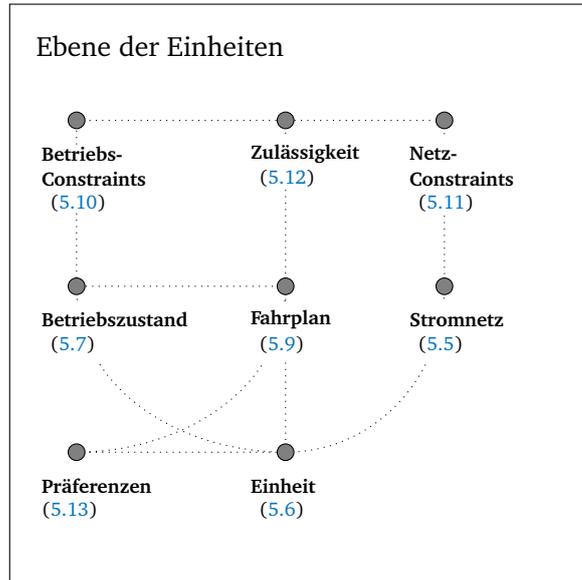


Abbildung 5.3: Übersicht über wesentliche Definitionen auf der Ebene der Einheiten. Gepunktete Verbinder zeigen die wesentlichen Querbezüge zwischen den Definitionen auf.

Die Menge aller einheitenspezifischen Präferenzen im aktuellen Planungshorizont sei mit SC bezeichnet.

Abbildung 5.3 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge der wesentlichen Begriffsdefinitionen auf der Ebene der Einheiten.

5.4 EBENE DER AGENTEN

Einheiten werden über ihnen zugeordnete Agenten informationstechnisch repräsentiert. Daher gibt es zu jeder im Rahmen der kontinuierlichen Einsatzplanung betrachteten Einheit einen Einheiten-Agenten. Einheiten, die nicht über einen Einheiten-Agenten verfügen, können daher nicht Teil von Verbänden sein und werden daher hier nicht betrachtet (siehe Annahmen und Einschränkungen in [Abschnitt 5.1](#)).

Definition 5.14 (Einheiten-Agent)

Sei $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ eine endliche nichtleere Menge von Agenten. Jedem Agenten a_i ist eine nicht-leere Teilmenge \bar{U} von Einheiten $u_i \in U$ gemäß der Zuweisung ua (*unit assignment*) zugeordnet:

$$ua : A \rightarrow \mathcal{P}(U), ua(a_i) \mapsto \bar{U}, \bar{U} \subseteq U$$

Die Summe der Kosten aller Einheiten eines Agenten a für das Einnehmen der in den Fahrplänen definierten Betriebszustände im Planungsintervall $t^{(i)}$ sei definiert als:

$$c_a^{(i)} = \sum_{u_k \in \bar{U}} c_{u_k}^{(i)}, ua(a) \mapsto \bar{U}$$

Für ein einfacheres Verständnis wird im Folgenden davon ausgegangen, dass ein Agent genau eine Einheit vertritt. Die Definitionen gelten ohne Beschränkung auch für den Fall, dass ein Agent mehrere Einheiten vertritt.

Eine Einheit kann in einem Planungshorizont unterschiedliche Fahrpläne (siehe Definition 5.9) abfahren. Die Menge der zulässigen Fahrpläne der Einheit im Planungshorizont wird als **Domäne** eines Einheiten-Agenten bezeichnet.

Definition 5.15 (Domäne)

Die Domäne eines Einheiten-Agenten (und damit die Grundlage für die Planung des Einheiten-Agenten) sei definiert als Menge aller zulässigen Fahrpläne des betrachteten Planungshorizontes:

$$D_a = \{os_u \in OS_u \mid ad(os_u) = 1, ua(a) = u\}$$

Die Menge D der Domänen aller Agenten des betrachteten Systems ist gegeben durch:

$$D = \{D_a \mid a \in A\}$$

Über die Einheiten-Agenten können Verbünde gebildet werden, die eine Teilmenge aller verfügbaren Einheiten-Agenten darstellen. Der Einsatzplan weist dabei jedem Einheiten-Agenten des Verbundes einen Fahrplan zu, den dieser mit der durch ihn abstrahierten Einheit abzubilden hat.

Definition 5.16 (Verbund)

Ein Verbund c (*cluster*) ist eine endliche, nicht-leere Menge von Agenten. Die Vereinigungsmenge C aller Verbünde ist eine Untermenge der Menge aller Agenten A :

$$C = \bigcup c \subseteq A$$

Innerhalb eines Planungshorizontes seien Verbünde disjunkt^a.

^aZur Diskussion überschneidungsfreier Verbünde siehe Abschnitt 5.1.

Definition 5.17 (Einsatzplan)

Der Einsatzplan cs (*cluster schedule*) eines Verbundes c weist jedem Einheiten-Agenten a einen Fahrplan os aus der Domäne des Einheiten-Agenten zu:

$$cs : A \rightarrow D$$

$$cs(a_m) \mapsto os_{u_n}, ua(a_m) = u_n$$

Die Menge aller möglichen Einsatzpläne, die sich aus den Domänen aller Agenten im Planungshorizont ergibt, sei definiert als CS .

Zwischen der initialen Einsatzplanung im Rahmen der Verbundbildung und dem Zuschlag, den ein Verbund für ein Produkt erhalten hat (siehe Abschnitt 1.3), kann es aus unterschiedlichen Gründen dazu kommen, dass eine Einheit den vorgegebenen Fahrplan nicht befolgen kann. Der Eintritt einer solchen Abweichung hat Einfluss auf das Wirkleitungsverhalten einer Einheit in einem oder mehreren Planungsintervallen und kann weiterhin Einfluss auf die Kosten haben, zu denen eine Einheit in einem Planungsintervall eine definierte Energiemenge zur Verfügung stellen kann. Dabei werden in der hier vorgelegten Arbeit ausschließlich solche Fahrplanabweichungen betrachtet, die die physikalische Einheit selbst betreffen; Ausfälle der erforderlichen Kommunikation werden nicht betrachtet (siehe Abschnitt 5.1).

Auf der Ebene der Agenten kann diese Abweichung durch ein entsprechendes Monitoring der Einheit erkannt werden und wird dann als Ereignis eingestuft, wenn der ursprünglich gewählte Fahrplan nicht mehr umgesetzt werden kann. Ein Ereignis hat zur Folge, dass der Agent mindestens den bisher gewählten Fahrplan, eventuell alle Fahrpläne aus seiner bisherigen Domäne ab dem Zeitpunkt des Ereignisses nicht mehr wählen kann, da das Ereignis die Domäne des Agenten verändert.

Definition 5.18 (Ereignis)

Sei ein Agent a Teil des Verbundes c , und os_u der aktuell im Einsatzplan gewählte Fahrplan des Agenten: $cs(a) = os_u$. Ein **Ereignis** $inc_a^{(i)}$ (*incident*) weist dem Agenten a im Planungsintervall $t^{(i)}$ eine neue Domäne D_a^* zu, die den Fahrplan os_u nicht mehr enthält:

$$inc(t^{(i)}, D_a) = D_a^*,$$

$$os_u \notin D_a^*$$

Die neue Domäne D_a^* ist somit in mindestens einem Element verschieden von der bisherigen Domäne D_a .

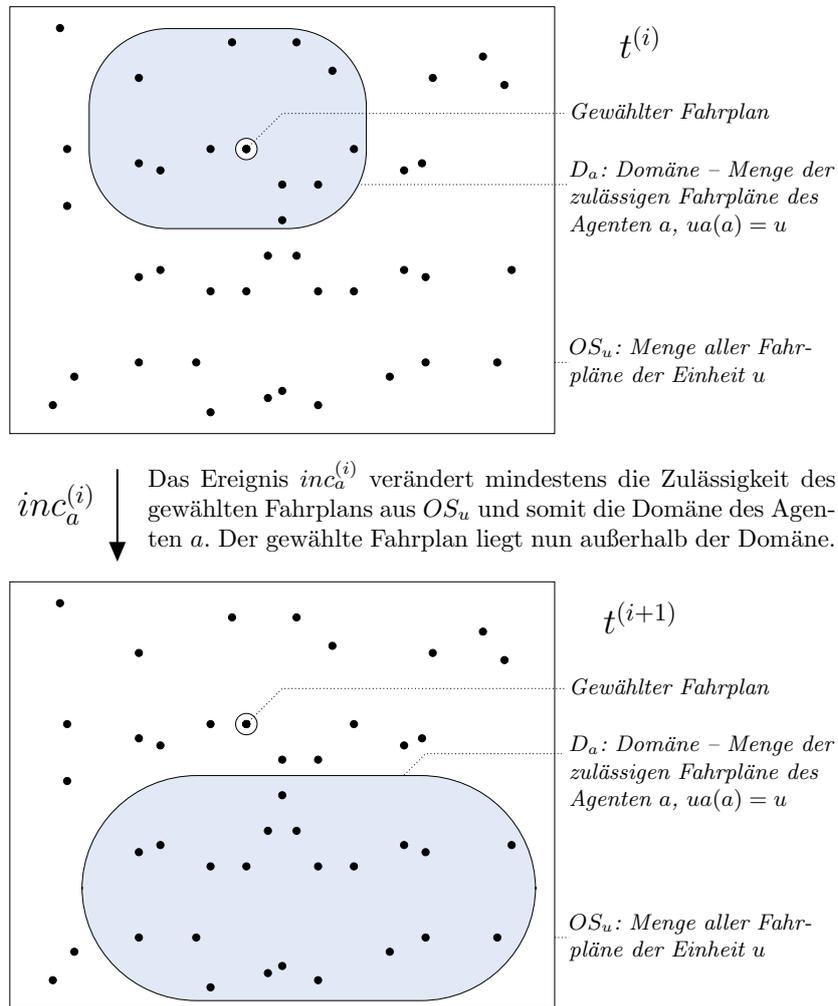


Abbildung 5.4: Einfluss eines Ereignis auf die Zulässigkeit der Fahrpläne

Die Menge der Ereignisse, die alle in DVPPs zusammengefassten Agenten innerhalb des Planungshorizontes betreffen, sei bezeichnet als INC.

Abbildung 5.5 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge der wesentlichen Begriffsdefinitionen auf der Ebene der Agenten und Verbände.

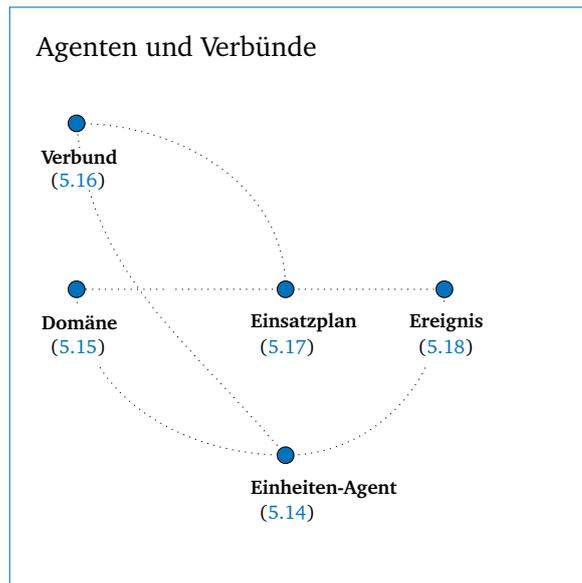


Abbildung 5.5: Übersicht über wesentliche Definitionen auf der Ebene der Agenten und Verbände. Gepunktete Verbinder zeigen die wesentlichen Querbezüge zwischen den Definitionen auf.

5.5 EBENE DER DYNAMISCHEN VIRTUELLEN KRAFTWERKE

Für das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung sind weiterhin die Produkte von Bedeutung, für die eine Aggregation von Einheiten am Markt bereits den Zuschlag erhalten hat und die daher in einer vorgegebenen Zeit, dem Produktzeitraum, geliefert werden müssen.

Definition 5.19 (Produktzeitraum)

Ein Produkt p habe einen **Lieferbeginn** $t_{pr}^{(s)}$ und ein **Lieferende** $t_{pr}^{(t)}$, jeweils beschrieben durch das entsprechende Planungsintervall. Der **Produktzeitraum** $T_{pr}^{(s,t)}$ umfasse diese beiden Intervalle und alle eingeschlossenen Planungsintervalle:

$$T_{pr}^{(s,t)} = (t^{(s)}, t^{(s+1)}, \dots, t^{(t)}),$$

$$0 \leq p \leq q \leq i_{max}$$

Die Menge aller möglichen Produktzeiträume im Planungshorizont sei definiert als T_{pr} .

Ein Produktzeitraum ist in Produktintervalle gegliedert, die sich durch die Produktauflösung aus dem Produktzeitraum ergeben:st

Definition 5.20 (Produktauflösung, Produktintervall)

Die Produktauflösung sei eine Zahl $res_p \in \mathbb{N}^+$ für die gilt:

$$1 \leq res_p \leq t - s + 1$$

Sie bestimme das Verhältnis der Anzahl der Planungsintervall im Produkthorizont zur Anzahl der Produktintervalle durch die folgende Definition des Produktintervalls $t_{pr}^{(i)}$:

$$t_{pr}^{(i)} = (t^{(i)}, t^{(i+1)}, \dots, t^{(i+res_p-1)})$$

Mit dieser Definition enthält ein Produkt somit $\frac{t-s+1}{res_p}$ Produktintervalle.

Umfasst ein Produkt somit eine Stunde, ein Planungsintervall 15 Minuten und das Produkt hat eine Stundenauflösung, so ergibt sich $res_p = 4$ mit nur einem Produktintervall.⁶

Definition 5.21 (Produkt)

Ein Produkt p weise jedem Produktintervall $t_{pr}^{(i)}$ des Produktzeitraums eine Energiemenge e_p zu:

$$p : \{t_{pr}^{(i)} | t_{pr}^{(i)} \in T_{pr}\} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$p(t_{pr}^{(i)}) \mapsto e_p,$$

Die Menge aller möglichen Produkte im Planungshorizont sei mit P bezeichnet.

Während die Lieferung der Wirkenergie wie beschrieben über eine Einheit erfolgt, wird der Bezug zum Produkt über den Einheiten-Agenten hergestellt. Dazu wird der Begriff des Produktbeitrages verwendet, der den Teil des Fahrplans innerhalb des Planungshorizontes beschreibt, der den Produkthorizont umfasst. Somit beschreibt der Produktbeitrag die Energiemenge, die ein Einheiten-Agent über seine Einheit für ein Produkt zur Verfügung stellt.⁷

Definition 5.22 (Produktbeitrag)

Der **Produktbeitrag** $con_{a,i}$ (*contribution*) eines Agenten a zum Produktintervall $t_{pr}^{(i)}$ sei

⁶Mit der Definition von Produktintervallen ist es möglich, sogenannte Blockprodukte zu definieren, d. h. Produkte über einen längeren Zeitraum, in denen eine definierte Energiemenge möglichst gleichmäßig bereitgestellt wird. Die Granularität der Vorgabe kann über das Verhältnis von Produktintervallen zu Planungsintervallen definiert werden.

⁷Mit dieser Formalisierung werden solche Produkte ausgeschlossen, die aus nicht zusammenhängenden Blöcken bestehen (kombinatorische Produkte). Weiterhin kann ein Einheiten-Agent in einem Zeitintervall seine Energiemenge für nur ein Produkt zur Verfügung stellen (siehe [Abschnitt 5.1](#)).

definiert über die Funktion

$$\begin{aligned} \text{con} &: \{t_{pr}^{(i)} | t_{pr}^{(i)} \in T_{pr}^{(s,t)}\} \times A \rightarrow \mathbb{R}, \\ \text{con}(i, a) &= \sum_{j=i}^{i+\text{res}_p-1} e_u^{(j)}, \quad ua(a) = u, \end{aligned}$$

Sie beschreibt die Energiemenge e_u , die ein Einheitenagent a durch seine Einheit u im Produktintervall $t_{pr}^{(i)}$ zur Verfügung stellt. Der Produktbeitrag eines Agenten a zum Produkt p wird verkürzt als $\text{con}_{a,p}$ bezeichnet und bezeichnet die Summe der Produktbeiträge der Produktintervalle. Die Kosten für den Produktbeitrag des Agenten ergeben sich als Summe der Kosten pro Intervall des Produktzeitraums und werden verkürzt als $c(\text{con}_{a,p})$ bezeichnet.

Für die weiteren Definitionen wird zur vereinfachten Darstellung angenommen, dass das betrachtete Produkt nur ein Produktintervall umfasse ($\frac{t-s+1}{\text{res}_p} = 1$). Der Produktbeitrag eines Agenten sei in diesem Fall als $\text{con}_{a,p}$ bezeichnet

DVPPs bündeln Einheiten über die zugeordneten Agenten spezifisch für die Lieferung eines Produktes. Sie stellen somit die produktspezifische Spezialform der Verbünde dar.

Definition 5.23 (DVPP)

Sei p ein Produkt mit einem Produktzeitraum $T_{pr}^{(s,t)}$. Ein Dynamisches Virtuelles Kraftwerk (DVPP) ψ weist einem Verbund $c \in C$ ein Produkt p zu, so dass die Energiemenge des Produktes durch den Verbund im Produktzeitraum bereit gestellt wird.

$$\begin{aligned} \psi &: C \rightarrow P, \quad \psi(c) \mapsto p, \\ e_p &= \sum_{a \in c} \text{con}(p, a) \end{aligned}$$

Die Menge aller möglichen DVPPs ψ im Planungshorizont wird mit Ψ gefasst.

Es ist somit möglich, dass für jedes Produkt unterschiedliche Aggregationen von Einheiten-Agenten als DVPP definiert werden, die das entsprechende Produkt unter den aktuellen Rahmenbedingungen am besten erfüllen. Das zugrunde liegende algorithmische Problem der optimierten Aufteilung einer Menge von Agenten zu einer definierten Struktur ist nicht Thema dieser Arbeit, stellt aber als der kontinuierlichen Einsatzplanung vorangehender Schritt eine Voraussetzung des hier behandelten Problems dar (siehe die Beschreibung des integrierten DVPP-Prozesses in [Abschnitt 1.3](#)). Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass sich bereits DVPP ausgebildet haben, die ihrer Produktverpflichtung nachkommen müssen. Für die Agenten eines Verbundes, dem als DVPP ein Produkt zugewiesen ist, wird anstelle

der vollständigen Notation

$$a \in c : \psi(c) \mapsto p$$

als verkürzte Schreibweise die Notation $a \in \psi$ verwendet und entsprechend von *Agenten eines DVPP* gesprochen. Das DVPP ψ , das sich auf das Produkt p bezieht, wird verkürzt als ψ_p notiert.

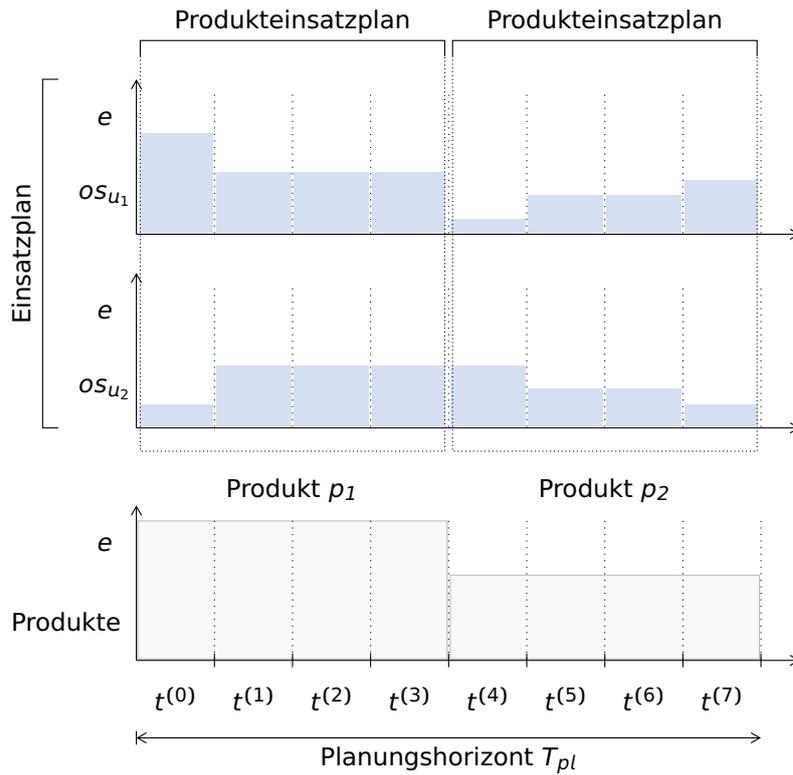


Abbildung 5.6: Fahrpläne, Produkte und Produkteinsatzpläne.

Definition 5.24 (Produktbeiträge des DVPP)

Die Produktbeiträge aller Agenten eines DVPP werden in der Menge CON_ψ zusammengefasst:

$$CON_\psi = \{con_{a,p} \mid a \in \psi\}$$

Die Kosten c_ψ des DVPP für die Lieferung des Produktes p seien definiert als:

$$c_\psi = \sum_{con_{a,p} \in CON_\psi} c(con_{a,p})$$

Die Menge aller Produktbeiträge aller Agenten im betrachteten Planungshorizont sei als CON bezeichnet.

Definition 5.25 (Umplanungsansatz)

Ein Umplanungsansatz rsa (*rescheduling approach*) sei eine Funktion, die einem DVPP ψ neue Produktbeiträge auf Basis der Menge der (ggf. neuen) Domänen D_a der beteiligten Einheiten-Agenten und deren bisheriger Produktbeiträge zuweise:

$$rsa : D \times CON \rightarrow CON^*$$

$$rsa(D_\psi, CON_\psi) = CON_\psi^*,$$

$$D_\psi = \{D_a \mid a \in \psi\}$$

mit CON_ψ^* als Menge der neuen Produktbeiträge des DVPP.

Die Umplanung nach einem Umplanungsansatz rsa führt im Idealfall dazu, dass keine Abweichung in der Wirkleistungslieferung vorliegt, das Produkt also wie vereinbart geliefert wird.

Definition 5.26 (Produktabweichung)

Sei die Abweichung einer Wirkleistungslieferung (Produktabweichung δ_{pr}) von einem DVPP ψ definiert als

$$\delta_{pr} = e_p - e_p^*,$$

mit

$$e_p^* = \sum_{a \in c} con^*(p, a)$$

als erwarteter Energiemenge, die auf Basis der neuen Produktbeiträge des DVPP geliefert würde.

Die Umsetzung eines Produktes ist mit Kosten verbunden, die sich aus den Kosten der am Verbund beteiligten Einheiten ergibt (siehe Definition 5.7).

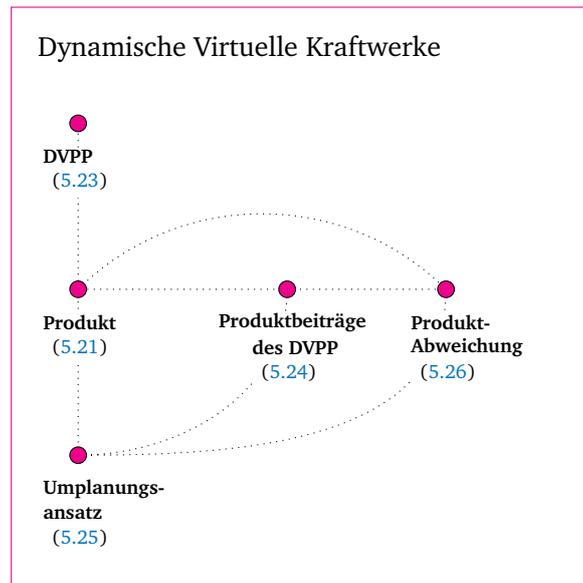


Abbildung 5.7: Übersicht über wesentliche Definitionen auf der DVPP-Ebene. Gepunktete Verbinder zeigen die wesentlichen Querbezüge zwischen den Definitionen auf.

Definition 5.27 (Umplanungskosten)

Sei die Änderung der lieferungsbezogenen Kosten eines DVPP (Umplanungskosten κ) definiert als

$$\kappa_{\psi} = c_{\psi} - c_{\psi}^*,$$

mit c_{ψ}^* als erwarteten Kosten, die für das Abfahren des neuen Produkteinsatzplans entstehen würden.

Abbildung 5.7 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge der wesentlichen Begriffsdefinitionen auf der Ebene der Dynamischen Virtuellen Kraftwerke.

5.6 KONSTRUKTION DES PROBLEMS DER KONTINUIERLICHEN EINSATZPLANUNG

In Abbildung 5.8 werden die Zusammenhänge der wesentlichen Begriffsdefinitionen über die Ebenen der Einheiten, der Agenten und Verbünde sowie der Dynamischen Virtuellen Kraftwerke dargestellt. An einigen Stellen, an denen ein Begriff einer Ebene eine entsprechende Definition auf einer anderen Ebene aufweist, sind Verbindungen zwischen den Ebenen eingefügt. So entspricht z. B. der Fahrplan auf der Einheitenebene dem Einsatzplan auf der Agenten- und Verbund-Ebene sowie dem Produkt-Einsatzplan auf der DVPP-Ebene.

Die Verbindungen zwischen den Ebenen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur unvollständig dargestellt, erfassen aber die wesentlichen konzeptionellen Verknüpfungen.

Die Ziele der kontinuierlichen Einsatzplanung wurden bereits diskutiert (siehe Abschnitt 1.4). Aus ihnen lassen sich die folgenden Optimierungskriterien für den zu entwickelnden Umplanungsansatz ableiten:

- Minimieren der **Produktabweichung** δ_{pr} ,
- Minimieren der **Umplanungskosten** κ_{ψ} , d.h. der Kosten, die durch die Umplanung zusätzlich für ein DVPP entstehen,
- Maximieren der Berücksichtigung der **anlagenspezifischen Präferenzen** SC

Die Entwicklung eines Umplanungsansatzes *rsa*, der die oben genannten Kriterien berücksichtigt, ist die Kernaufgabe dieser Arbeit.

In den vorangegangenen Abschnitten wurden mit Hilfe von drei konzeptionellen Ebenen – der Einheitenebene, der Ebene der Agenten und Verbünde sowie der Ebene der dynamischen Virtuellen Kraftwerke – Begriffe definiert, die zur Definition des Problems der kontinuierlichen Einsatzplanung erforderlich sind. Es wurde dargestellt, wie der Bezug von Einheiten zu Agenten und Verbänden definiert ist, wie die Einsatzpläne sich aus den Fahrplänen der Einheiten zusammensetzen und wie – aufbauend auf diesen Begriffen – Dynamische Virtuelle Kraftwerke und Produkte abgebildet werden. Es wurde weiterhin definiert, wie Abweichungen vom Fahrplan auf Einheiten-Ebene als Ereignisse auf Agenten-Ebene eine Umplanung auslösen können, wenn das Produkt, zu dessen Lieferung sich das DVPP marktseitig verpflichtet hat, nicht geliefert werden kann. Es wurde definiert, dass eine solche Umplanung nur auf solchen Fahrplänen erfolgen darf, die der Einheit auch tatsächlich möglich sind, also in den Domänen der entsprechenden Einheiten-Agenten abgebildet sind.

Mit diesen Voraussetzungen ergibt sich als Planungsgrundlage für die kontinuierliche Einsatzplanung:

Definition 5.28 (Planungsgrundlage für die kontinuierliche Einsatzplanung für dynamische Virtuelle Kraftwerke)

Gegeben sei die Planungsgrundlage für die kontinuierliche Einsatzplanung *cep* (*continuous energy planning*), definiert als 8-Tupel:

$$cep = (\Psi, T_{pl}, D, P, CON, INC, HC, SC)$$

Sie besteht aus der Menge der Dynamischen Virtuellen Kraftwerken Ψ , die es innerhalb des Planungshorizontes T_{pl} im System gibt, der Menge der Domänen aller beteiligten

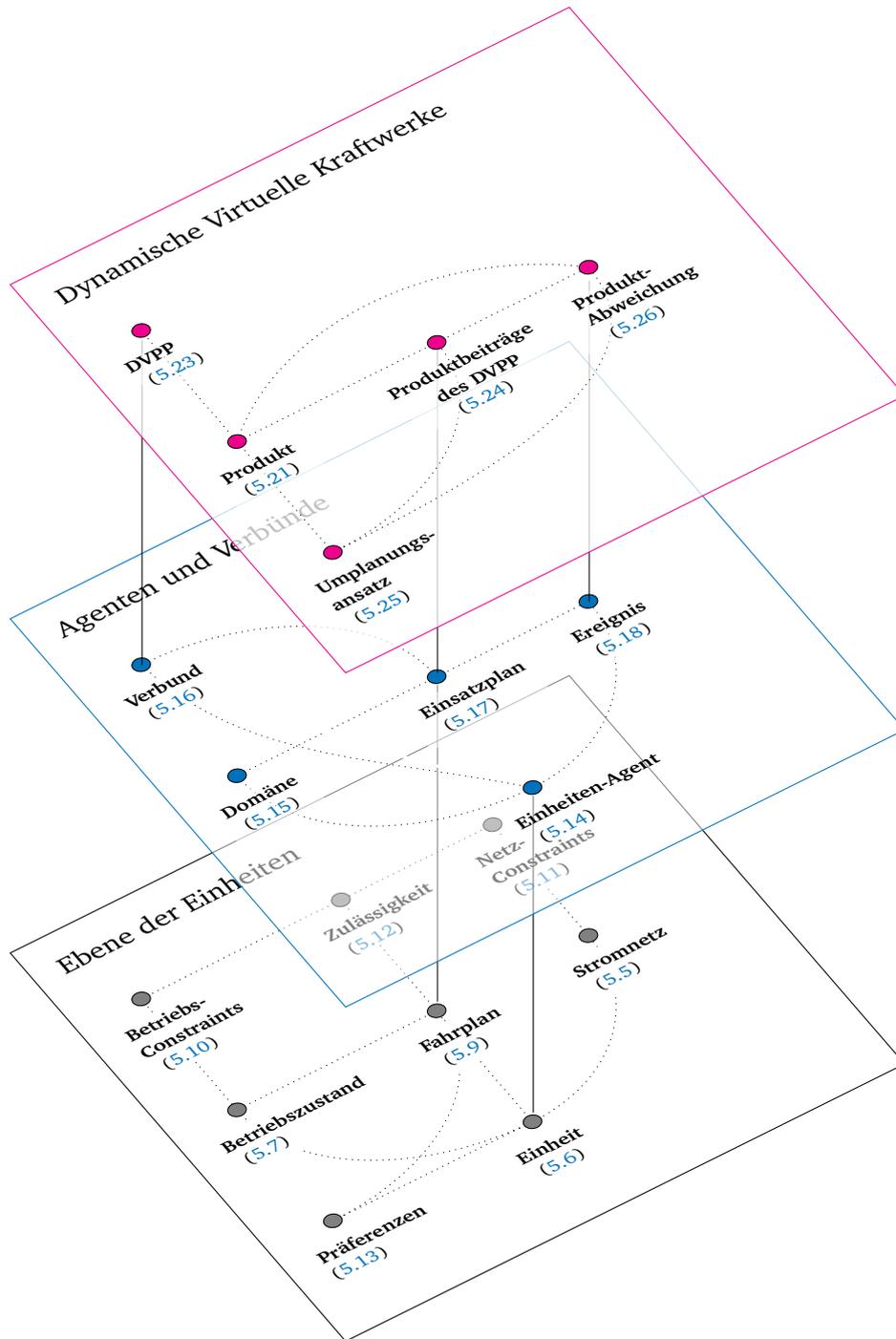


Abbildung 5.8: Zusammenhänge der wesentlichen definierten Begriffe über die Ebenen der Einheiten, der Agenten und Verbünde sowie der Dynamischen Virtuellen Kraftwerke

Agenten D , der Menge der Produkte P , die durch die DVPPs realisiert werden sollen, den initialen Produktbeiträgen der Agenten CON, den Ereignissen INC, welche die durch Agenten repräsentierten Einheiten innerhalb des Planungshorizontes betreffen, den in HC formulierten einheitenlokalen Präferenzen und den lokalen Präferenzen SC .

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen solchen Planungsansatz rsa zu entwickeln, der auf Basis der Planungsgrundlage fortlaufend über den gesamten Produkthorizont solche Produkteinsatzpläne generiert, dass die oben dargestellten Optimierungskriterien möglichst gut erfüllt werden. Die dargestellten Optimierungsziele sind dabei teils widersprüchlich. Die Entwicklung einer geeigneten Optimierungsfunktion für das dargestellte multikriterielle Optimierungsproblem ist somit selbst Bestandteil der Arbeit.

6

ANFORDERUNGSANALYSE UND DESIGN-KONZEPT

Im Rahmen der Konzeptualisierung ([Kapitel 5](#)) wurde bereits formal erfasst, welches Problem die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP lösen soll. Aus dem Blickwinkel eines Software-Entwicklungsprozesses ist somit der Rahmen für die funktionalen Anforderungen abgesteckt. Die Aufgabenstellung liefert über den Smart Grid-Anwendungskontext weiterhin nicht-funktionale Anforderungen, die bei der Auswahl und Anpassung eines Basisverfahrens von Bedeutung sind. Diese **Anforderungen** werden im Folgenden zusammenfassend diskutiert, wobei insbesondere die Beschreibung der funktionalen Anforderungen nur eine knappe Zusammenfassung der Konzeptualisierung darstellen soll ([Abschnitt 6.1](#)). Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse werden in die Auswahl eines geeigneten **Basisverfahrens** eingebracht ([Abschnitt 6.2](#)). Neben den Entscheidungen zur Interaktion zwischen den Agenten ist dabei die Modellierung der anlagenlokalen Flexibilität von großer Bedeutung. [Abschnitt 6.3](#) widmet sich dem in dieser Arbeit gewählten Ansatz. Mit diesen Aspekten sind die Grundlagen für das **Designkonzept** gelegt, das in [Abschnitt 6.4](#) entwickelt wird.

6.1 ZUSAMMENFASSENDE ANFORDERUNGSANALYSE

Das u.a. im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell SGAE (siehe [Abschnitt 2.2.3](#)) weist darauf hin, den Übergang zur Software-Entwicklung auch bei der Entwicklung von Smart Grid Algorithmen vorzusehen. Die Diskussion der funktionalen und insbesondere der nicht-funktionalen Anforderungen greift daher typische Aspekte der Anforderungsanalyse auf (siehe z. B. [[RR12](#)]). Eine Diskussion der Anforderungen anhand einer Abbildung auf das SGAM (Use-Case-Methodik nach [[Int08](#)]) ist aufbauend auf dieser Analyse möglich, geht aber über den Kontext dieser Arbeit hinaus.

6.1.1 Funktionale Anforderungen

Detektion von Ereignissen (Anforderung 1) Ein Energieprodukt stellt eine Anforderung an eine zu liefernde Energiemenge über einen bestimmten Zeitraum dar (siehe [Definition 5.21](#), S. 80). Die Anlagen, die dieses Produkt gemeinsam liefern, sind aber teilweise durch starke Schwankungen im Last- bzw. Erzeugungsverhalten gekennzeichnet. Während

ein BHKW mit definierten Modulationsstufen über einen längeren Zeitraum konstant Strom einspeisen kann, ist die Einspeisekurve einer PV-Anlage nicht konstant – Schwankungen sind somit normal und nicht grundsätzlich als Umplanungsanlass einzuschätzen. Aufgabe der kontinuierlichen Einsatzplanung ist es, solche Ereignisse, die eine Umplanung im Sinne der zugesagten Produktlieferung erforderlich machen, zu detektieren.

Kontinuierliche Bereitstellung gültiger Fahrpläne (Anforderung 2) Die Aufgabe der kontinuierlichen Einsatzplanung besteht darin, nach einer initialen Einsatzplanung einen gefundenen Plan insofern zu halten, als die für das DVPP definierten Produkte erfüllt werden müssen. Das zu entwickelnde Verfahren muss somit in der Lage sein, kontinuierlich neue und gültige Fahrpläne für die Anlagen so bereit zu stellen, dass das gesteckte Ziel soweit wie möglich angenähert wird. Die absolute Erfüllung eines Produktes ist allerdings auch ohne den Eintritt eines Ereignisses (und auch im Betrieb großer konventioneller Kraftwerke) ein rein theoretisches Konstrukt. Im Sinne der Systemsicherheit darf eine mögliche Produktabweichung aber nicht gegen die Bereitstellungs- bzw. Umplanungskosten abgewogen werden.

Berücksichtigung anlagentypspezifischer Präferenzen (Anforderung 3) Es wurde bereits diskutiert, dass insbesondere in der Umplanung anlagentypspezifische Präferenzen (z. B. die Vermeidung von Kaltstarts bei BHKW-Anlagen) zu berücksichtigen sind. Hergeleitet wurden diese Aspekte unter anderem aus der Übertragung der Argumente für eine Umplanung (im Vergleich zu einem Neuaufwurf der Planung) aus der industriellen Fertigung (siehe [Abschnitt 3.1.2](#)). Zusammenfassend ließ sich dieser Aspekt nur insofern übertragen, als die kontinuierliche Einsatzplanung es erlauben muss, die anlagentypspezifischen Präferenzen zu berücksichtigen. Eine möglichst große Ähnlichkeit eines Plans zum ursprünglichen Plan wird nicht als Anforderung definiert.

DVPPs als produktspezifische Verbünde (Anforderung 4) Dynamische Virtuelle Kraftwerke sind definiert über ihren Produktbezug (siehe [Definition 5.23](#), Seite 81). Ein Einheiten-Agent vertritt eine Energieanlage in ggf. unterschiedlichen DVPPs, so dass die kontinuierliche Einsatzplanung innerhalb des betrachteten Planungshorizontes gleichzeitig für unterschiedliche DVPPs durchgeführt wird. Für die kontinuierliche Einsatzplanung ergibt sich somit die Aufgabe, nicht nur das Produkt, das aktuell von einem Ereignis betroffen ist, in die Planung einzubeziehen, sondern weiterhin die sonstigen Produktverpflichtungen eines Einheiten-Agenten im Planungshorizont zu berücksichtigen. Neben der reaktiven Umplanung stellt sich somit die Aufgabe der proaktiven Umplanung für die nachfolgenden Produktzeiträume. Das Verfahren der kontinuierlichen Einsatzplanung muss die ggf. widersprüchlichen Anforderungen durch unterschiedliche Produktverpflichtungen, die im

gleichen Fahrplan umgesetzt werden müssen, bei der Fahrplanauswahl berücksichtigen. Das nachfolgende Beispiel stellt diesen Konflikt anhand einer einfachen Situation zweier kleiner DVPPs dar:

Beispiel 6.1

Ein Einheiten-Agent a_{st} vertritt einen elektrischen Speicher in zwei DVPPs mit folgender Zusammensetzung:

$$\psi_1 = \{a_{st}, a_{pv_1}, a_{pv_2}\}$$

$$\psi_2 = \{a_{st}, a_{pv_3}, a_{pv_4}\}$$

Im DVPP ψ_1 (Produkt 1) erbringt der Speicher nach der initialen Planung eine Einspeicherungsaufgabe in den ersten Produktintervallen. Im weiteren Produktzeitraum soll diese Energiemenge nach initialer Einsatzplanung wieder eingespeist werden. In DVPP ψ_2 (Produkt 2) erfüllt der Speicher die gleiche Aufgabe.

Während der Lieferung von Produkt 1 ändert sich die Prognose für die Solareinspeisung, nachdem der Speicher bereits gefüllt ist. Es wäre nun möglich, die komplette Energiemenge für Produkt 1 aus den PV-Anlagen von DVPP ψ_1 zu liefern und die eingespeicherte Energiemenge nicht zu nutzen. Nimmt man nun an, dass die Kosten für den PV-Strom geringer sind als die für die Nutzung des Speichers, so würde eine reaktive Planung ohne Berücksichtigung der zukünftigen Produktverpflichtungen in DVPP ψ_2 kosteneffizient den PV-Strom nutzen und den Speicher nicht leeren. Daher könnte der Speicher in DVPP ψ_2 seine Rolle (Einspeichern zu Beginn des Produktzeitraums, Ausspeichern zum Ende des Produktzeitraums) nicht erfüllen.

Zusammenfassend lässt sich die folgende Anforderung ableiten: Die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP muss die Produktverpflichtungen aktuell zu liefernder und zukünftiger Produkte bei der Umplanung berücksichtigen.

Dezentrale, datensparsame Gütebewertung (Anforderung 5) Für die kontinuierliche Einsatzplanung sollen Verfahren aus dem Bereich der selbstorganisierenden Systeme und verteilten Algorithmen angewendet werden (siehe [Abschnitt 1.4](#)). Selbstorganisierende Systeme zeigen Eigenschaften der Selbst-Konfiguration, Selbst-Optimierung, Selbst-Heilung, Selbst-Erklärung und des Selbst-Schutzes [MMW04]. Für die kontinuierliche Einsatzplanung ist insbesondere der Aspekt der Selbst-Optimierung und Selbst-Heilung relevant: Ereignisse müssen zum einen erkannt werden (Anforderung 1), weiterhin sollen die DVPP selbständig darauf reagieren und das System in der erforderlichen Zeit in einen möglichst optimalen Zustand zurückführen. Selbstorganisierende Systeme werden mit Hilfe unterschiedlicher Metriken charakterisiert. So wird beispielsweise der Grad der Autono-

mie der beteiligten Akteure, die Adaptivität des Systems (als Maß für die Fähigkeit zur Selbst-Heilung) oder das Wissen um den globalen Systemzustand (*global state awareness*) [AWM09] herangezogen. Während ein hohes Maß an globalem Systemwissen es den Akteuren einerseits erleichtert, eine für das Gesamtsystem günstige Entscheidung zu treffen, steht es andererseits dem übergeordneten Ziel des Datenschutzes entgegen. In stark selbstorganisierenden Systemen, in denen keine interne oder externe zentrale Kontrollinstanz vorhanden ist [SGK05], müssen die einzelnen Akteure jedoch in der Lage sein, eine für das Gesamtsystem günstige Entscheidung zu treffen, was ein (ggf. verfahrensabhängiges) Mindestmaß an globaler Information erfordert. Dieser Aspekt wird im Folgenden als dezentrale Gütebewertung bezeichnet.

Da die kontinuierliche Einsatzplanung für Einheiten durchgeführt werden soll, die teilweise in Privathaushalten vorzufinden sind, sollen möglichst wenig Informationen über den Aufstellungskontext der Anlage und anlagenlokale Präferenzen kommuniziert werden. Die Einsatzplanung soll in diesem Sinne dezentral und datensparsam umgesetzt werden.

Berücksichtigung der Kostenstruktur in der Planung (Anforderung 6) Eine detaillierte Betrachtung von Kosten ist nicht Bestandteil der Aufgabenstellung. Dennoch stellen die Kosten einen wichtigen Faktor in der Umplanung dar: Ergibt sich im Laufe eines Tages eine vermehrte optionale Einspeisung durch einen Anlagentyp, so muss geprüft werden, ob eine Umplanung aus ökonomischen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Prinzipiell wäre eine Umplanung nicht erforderlich: Es müsste nur anlagenlokal die Entscheidung zur Abregelung getroffen werden. Dennoch ist es Ziel der Umplanung, die Kosten zu minimieren. Daher soll bei der Umplanung die Kostenstruktur eines Plans berücksichtigt werden, um – bei Eintreten einer Planabweichung – einen günstigen Plan wählen zu können.

6.1.2 Nicht-funktionale Anforderungen

Skalierbarkeit (Anforderung 7) Skalierbarkeit gilt als wesentliches Argument für dezentrale Ansätze in unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Im Bereich der Smart Grids wird dieser Aspekt ebenfalls aufgegriffen und auch von führenden Industrievertretern im Bereich formuliert [CIS1111]. Wie aber gestalten sich die Skalierbarkeitsanforderungen für die kontinuierliche Einsatzplanung? Diese Frage teilt sich in zwei unterschiedliche Aspekte ein:

1. Wie groß kann ein DVPP maximal sein, d. h. wie viele Einheiten werden in einem DVPP über die entsprechenden Agenten zusammengeführt?
2. An wie vielen DVPPs ist ein Agent im Planungshorizont maximal beteiligt?

Definition 6.1 (Größe eines DVPP, Affiliationsmenge)

Als Größe G_ψ eines DVPP ψ wird die Kardinalität des zugehörigen Verbundes c bezeichnet. Mit der vereinfachten Notation gilt somit:

$$G_\psi = |\psi|$$

Als Affiliationsmenge \mathbb{A}_a eines Agenten a wird die Menge der DVPP bezeichnet, denen ein Agent angehört:

$$\mathbb{A}_a = \{\psi_i \mid a \in \psi_i\}$$

Die Aufgabe der Planung wird umso schwieriger, je mehr Produkte ein Agent in seiner Planung zu berücksichtigen hat. Bei der Prüfung der Eigenschaften bzgl. der Skalierbarkeit soll dieser Aspekt daher ebenfalls berücksichtigt werden.

Da sich die DVPPs auf Basis aktueller Produkte herausbilden, sind die adressierten Energiemärkte maßgebend. Prinzipiell ist es möglich, dass ein Produkt durch sehr viele Einheiten mit sehr geringem Produktbeitrag erfüllt wird – in diesem Fall wäre die Anzahl der Einheiten-Agenten des DVPP sehr groß. In der Untersuchung zur Skalierbarkeit soll dieser Aspekt daher ebenfalls geprüft und mit anwendungsspezifischer Parametrierung bewertet werden. Da DVPPs den Day-Ahead-Markt adressieren, an dem sowohl Stunden- als auch Block-Produkte gehandelt werden, wäre es den Agenten prinzipiell möglich, auf alle Produkte zu bieten. Mit der Einschränkung, keine überschneidenden Verbünde zu erlauben (siehe [Abschnitt 1.3](#)), wird die Komplexität reduziert: Die maximale Anzahl von Produkten, die ein Agent innerhalb unterschiedlicher DVPPs adressieren kann, liegt in der wiederholten Auswahl des Produktes mit dem kürzesten Produktzeitraum und somit im Day-Ahead-Markt bei Stundenprodukten.¹ Bei einem Planungshorizont von 24 Stunden ist die maximale Anzahl von unterschiedlichen DVPPs, an denen jeder Agent im System beteiligt sein kann, somit 24. Im Worst-Case würde also ein Ereignis zunächst ein DVPP direkt betreffen, indem der Agent den Produktbeitrag nicht liefern kann, sowie 23 weitere DVPPs im restlichen Planungshorizont, für die sich die Planungsgrundlage geändert hat.

Für die kontinuierliche Einsatzplanung lässt sich somit die Anforderung an die Skalierbarkeit folgendermaßen formulieren: Das Verfahren zur kontinuierlichen Einsatzplanung muss auf die Eigenschaften bzgl. der Größe der DVPPs, der Größe der Affiliationsmengen sowie auf die Anzahl der Produkte im Planungshorizont hin geprüft werden und eine solche anwendungsspezifische Parametrierung gefunden werden, welche die sonstigen Anforderungen, vor allem bzgl. der Ergebnisgüte erfüllt.

Einhalten anwendungsspezifischer Zeitgrenzen (Anforderung 8) Das Konzept Dynamischer Virtueller Kraftwerke basiert auf dem fahrplanbasierten Betrieb dezentraler Ener-

¹Seit Dezember 2014 sind im Day-Ahead-Markt sogar 15-Minuten Produkte möglich, siehe Fußnote auf S. 3.

gieanlagen. In der hier betrachteten Anwendung wurden Fahrpläne mit einer Auflösung von 15 Minuten gewählt (siehe [Abschnitt 5.2](#), Seite 68). Es stellt sich vor diesem Hintergrund daher zunächst die Frage, wie schnell die Einheiten bei Eintritt eines Ereignisses rekonfiguriert werden könnten. In [Abbildung 6.1](#) ist dargestellt, wie sich die Fahrplanauflösung von 15 Minuten auf die Detektion und Verarbeitung von Ereignissen auswirkt. Wie bereits angemerkt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Einheit einem konstanten Wirkleistungsverlauf innerhalb eines 15-Minuten-Intervalls folgt. Es ist somit prinzipiell möglich, dass die zu erbringende Energiemenge erst in der letzten Minute des Planungsintervalls geliefert wird. Der Einheiten-Agent kann zwar innerhalb des Planungsintervalls in höherer Auflösung Messwerte der Einheit erfragen (maximal in der Auflösung, die durch die Basiseinheit der Zeit vorgegeben ist, siehe [Definition 5.1](#), Seite 68), aber erst mit Ablauf des Planungsintervalls und damit reaktiv erkennen, ob ein Ereignis stattgefunden hat.² Für die beiden exemplarischen in [Abbildung 6.1](#) dargestellten Ereignisse in $t^{(i)}$ ist somit die Detektion des Ereignisses in jedem Fall erst zu Beginn des nachfolgenden Planungsintervalls $t^{(i+1)}$ möglich. Zu diesem Zeitpunkt sind die Setzwerte der Anlagen bereits für das aktuelle Planungsintervall übermittelt: Mit der Fahrplanauflösung geht einher, dass die Einheiten in der gleichen Auflösung gesteuert werden. Die Rekonfiguration der Einheit ist damit erst für das der Detektion des Ereignisses nachfolgende Intervall $t^{(i+2)}$ möglich.

Unter der vereinfachenden Annahme, dass das Auslesen des Betriebszustandes und die Konfiguration der Einheit die gleiche Zeit in Anspruch nehmen, ergibt sich somit für die kontinuierliche Einsatzplanung die anwendungsspezifische Zeitgrenze von 15 Minuten.³

Passfähigkeit in energiewirtschaftliches Rollensystem (Anforderung 9) DVPPs erfüllen auf der Ebene kleinskaliger dezentraler Energieanlagen die gleiche Aufgabe wie heutige virtuelle Handelskraftwerke (kommerzielle VK), erschließen aber ein neues Flexibilitätspotential im Verteilnetz. Energiewirtschaftlich betrachtet müssen DVPP die gleichen Anforderungen wie heutige VK erfüllen. Für die kontinuierliche Einsatzplanung gilt daher die Anforderung, dass sie sich auf das heutige regulatorische Umfeld abbilden lassen muss, insbesondere bzgl. der Verfügbarkeit von Daten für die beteiligten Akteure.

In [Tabelle 6.1](#) sind die Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren zusammenfassend dargestellt.

²Es ist auch denkbar, dass Agenten eine Ereignis-Prognose durchführen, und so bereits proaktiv ein Ereignis verarbeiten: Für eine solche Funktionalität müssten die Agenten über eine interne Einheiten-Repräsentation verfügen, die eine solche Voraussage erlaubt. Umsetzbar wäre ein solcher Ansatz z. B. mit dem Konzept modellprädiktiver Regelung (MPC, *model predictive control*). Im Schlussteil dieser Arbeit wird dieser Aspekt aufgegriffen.

³Eine differenziertere Betrachtung dieser Annahmen ist nur möglich, wenn das System bis auf die Ebene der Kommunikation und Komponenten spezifiziert wird und liegt daher außerhalb des in dieser Arbeit gewählten Rahmens.

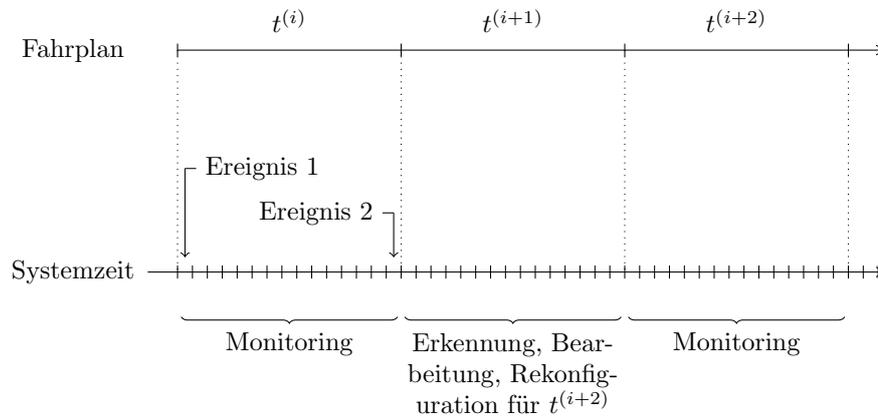


Abbildung 6.1: Ermittlung der Zeitanforderungen bei einer Fahrplanauflösung von 15 Minuten

ID	Anforderung
FA 1	Detektion von Ereignissen
FA 2	Kontinuierliche Bereitstellung gültiger Fahrpläne
FA 3	Berücksichtigung anlagentyp-spezifischer Präferenzen
FA 4	Berücksichtigung der Produktverpflichtungen im Planungshorizont
FA 5	Dezentrale, datensparsame Gütebewertung
FA 6	Berücksichtigung der Kostenstruktur
NFA 7	Skalierbarkeit
NFA 8	Einhalten anwendungsspezifische Zeitgrenzen
NFA 9	Passfähigkeit in energiewirtschaftliches Rollensystem

Tabelle 6.1: Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP

6.2 BASISVERFAHREN

6.2.1 Auswahl eines Basisverfahrens

Anhand der im letzten Abschnitt diskutierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen soll nun abgeglichen werden, welches der bereits im Abschnitt zu verwandten Arbeiten ([Kapitel 4](#)) dargestellten Verfahren geeignet ist, um als Basisverfahren für den Kontext der kontinuierlichen Einsatzplanung verwendet zu werden.

Anforderung	Hol. VK	AVPP	ALMA	COHDA
FA 1 (Ereignisse)	✓	(✓)	(✓)	E
FA 2 (Kont. Planung)	✓	(✓)	(✓)	E
FA 3 (Präferenzen)	✓	E	E	E
FA 4 (Produkte)	E	E	×	E
FA 5 (Dezentrale Gütebewertung)	×	×	(✓)	✓
FA 6 (Kosten)	✓	✓	✓	E
NFA 7 (Skalierbarkeit)	✓	✓	k. A.	✓
NFA 8 (Zeitgrenzen)	✓	✓	k. A.	✓
NFA 9 (Passfähigkeit)	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 6.2: Abgleich der Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung mit möglichen Basisverfahren. ✓: Verfahren erfüllt Anforderung. E: Verfahren erfüllt Anforderung nicht, Erweiterung möglich. ×: Verfahren erfüllt Anforderung nicht, Erweiterung nicht möglich. k. A.: Keine Aussage; Bewertung nicht möglich.

Die Abbildung von **Ereignissen** (FA 1) und damit die Verwendung eines Verfahrens für die **kontinuierliche Bereitstellung gültiger Fahrpläne** (FA 2) ist Teil der aktiven Einsatzplanung in Holonischen VK [Trö10]. Für AVPP soll ebenfalls ein solches Verfahren entwickelt werden [ASR14]; allerdings sind bisher keine Ergebnisse veröffentlicht. In der Dissertation von Pournaras wird für ALMA aufgezeigt, wie dezentral auf Ereignisse reagiert werden kann – unklar ist aber die Detektion von Ereignissen sowie die Kommunikation des Kompensationsbedarfs innerhalb der beteiligten Akteure [Pou13].

Die Berücksichtigung lokaler **Präferenzen** (FA 3) ist prinzipiell in allen dargestellten Ansätzen möglich. In der Arbeit von Tröschel wurde bereits skizziert, wie anlagenlokale Präferenzen nicht nur prinzipiell berücksichtigt, sondern auch modelliert werden können [Trö10].

Der **Produktbezug** (FA 4) Dynamischer Virtueller Kraftwerke ist eine Besonderheit des DVPP-Konzepts – insofern ist es wenig verwunderlich, dass keines der dargestellten Verfahren diesen Aspekt umsetzt. Allerdings liegt eine wichtige Voraussetzung für den Produktbezug in der Verwendung von Fahrplänen als grundlegendem Planungskonzept. Mit Ausnahme von ALMA setzen alle Verfahren dieses Konzept bereits um. Für ALMA ist unklar, wie die in diesem Verfahren gewählte Abstraktion auf Komfort-Level in ein Produkt-Konzept übertragen werden könnte.

Für die Bewertung der Verfahren bzgl. der **dezentralen Gütebewertung** (FA 5) sollte

zwischen den beiden Anforderungen der Dezentralität der Bewertung einerseits und der Dezentralität der Information andererseits unterschieden werden. Wie bereits dargestellt, handelt es sich um konträre Zielsetzungen. Die Holonischen VK und AVPP sind in diesen Aspekten vergleichbar: In beiden Fällen wird ein dynamisiert hierarchisches Konzept verwendet, bei dem die Gütebewertung auf dedizierten Stufen der Hierarchieebene durchgeführt wird – die Gütebewertung ist somit nicht vollständig dezentral. ALMA basiert für die Auswahl von Kompensationsmaßnahmen auf einer vorangegangenen Konfiguration des Systems auf Basis des Verfahrens EPOS. Nach Ablauf von EPOS ist die Anlage für unterschiedliche Komfort-Bereiche parametrisiert, so dass die Auswahl eines Betriebszustandes als Reaktion auf ein Ereignis dezentral möglich ist. Allerdings sind dazu vorab sämtliche Präferenzen der Energieanlage innerhalb des System kommuniziert worden – das Verfahren widerspricht damit der wichtigen Anforderung der Datensparsamkeit. COHDA erlaubt eine dezentrale Gütebewertung. Anlagenlokalen (ggf. private) Restriktionen werden innerhalb des Systems nicht kommuniziert.

Die Berücksichtigung der **Kosten** in der Planung wurde bei den meisten der betrachteten Verfahren bereits geprüft. In allen Fällen kann eine solche Erweiterung durch die Integration in eine entsprechende Zielfunktion des Verfahrens aufgenommen werden.

Im Bereich der **nicht-funktionalen Anforderungen** fällt der Vergleich der Verfahren deutlich schwerer. Mit Ausnahme von ALMA ist für alle Verfahren der Aspekt der Skalierbarkeit und der Zeitgrenzen so evaluiert worden, dass eine Anwendbarkeit für die kontinuierliche Einsatzplanung möglich ist. Sowohl die Holonischen VK als auch COHDA erreichen Zeitgrenzen, die für eine Fahrplanauflösung von 5 Minuten erforderlich wäre. Die Passfähigkeit der Verfahren in den energiewirtschaftlichen Kontext wurde in keinem der dargestellten Verfahren geprüft.

In [Tabelle 6.2](#) werden die Ergebnisse dieser Diskussion zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass nur COHDA die Anforderungen abdeckt bzw. eine entsprechende Erweiterbarkeit aufweist. Die Holonischen VK und AVPP werden nicht ausgewählt, weil sie Anforderung FA 5 nicht erfüllen: Ein Erweiterung der Verfahren um eine dezentrale Gütebewertung würde grundlegende Eigenschaften der Verfahren ändern. Für ALMA als ebenfalls vollständig verteiltem Verfahren muss weiterhin festgestellt werden, dass nicht etwa über Fahrpläne oder Produkte verhandelt wird, sondern anlagenlokale Präferenzen an eine zentrale Instanz kommuniziert werden, was ebenfalls zum Ausschluss des Verfahrens nach Anforderung FA 5 führt. COHDA wurde bereits für die initiale Einsatzplanung für statische Aggregationen von Energieanlagen verwendet und evaluiert. Weiterhin liegt für COHDA ein formaler Beweis der Konvergenz vor [[Hin14](#)]. Daher wird die Entscheidung getroffen, COHDA für den Anwendungsfall der kontinuierlichen Einsatzplanung zu erweitern.

6.2.2 COHDA

COHDA ist eine **verteilte Heuristik** zur Lösung eines verteilten **Constraint-Optimierungsproblems** und für ein **Multiagenten-System** konzipiert. Die Charakteristika des Verfahrens sollen nun anhand von Ordnungssystemen aus diesen drei Bereichen dargestellt werden. Diese Herangehensweise zur Darstellung von COHDA verfolgt dabei zwei Ziele:

1. **Einführung in COHDA:** Das Verfahren soll so vorgestellt werden, dass die nachfolgenden Arbeiten zur kontinuierlichen Einsatzplanung als Erweiterung von COHDA ohne tiefere Einarbeitung in die Originalveröffentlichungen zum Verfahren nachvollziehbar sind.
2. **Dekomposition der zu lösenden Aufgabe:** Da bereits aus der Anforderungsanalyse ersichtlich wurde, dass Erweiterungen des Verfahrens in unterschiedlichen Charakteristika erforderlich sein werden, sollen die Schritte zur Erweiterung des Verfahrens möglichst strukturiert hergeleitet werden.

Für ein tiefergehendes Verständnis von COHDA und insbesondere die Evaluationsergebnisse für die initiale Einsatzplanung in statischen Verbänden zur Abstimmung eines Einsatzplanes, der einen Ziellastgang möglichst gut annähert, sei auf die bereits in [Abschnitt 4.4.4](#) referenzierten Publikationen hingewiesen. Für ein einfacheres Verständnis bei vertiefender Lektüre der Arbeiten von Hinrichs werden im Folgenden – soweit möglich und hilfreich – die gleichen Symbole verwendet wie in [\[Hin14\]](#).

Das Verfahren COHDA gehört zu den **algorithmisch-verteilten kooperativen Heuristiken** [\[HLS14\]](#). Bei dieser Art von Verfahren tauschen unabhängig voneinander ablaufende Algorithmen Informationen aus, um gemeinsam eine optimierte Lösung eines allen Teilnehmern bekannten definierten Problems zu ermitteln. Talbi stellt die Designentscheidungen beim Entwurf solcher Heuristiken zusammenfassend über vier Fragen dar [\[Tal09\]](#):

- **Ausgetauschte Information** (*information exchanged*): Was ist der Inhalt der Nachrichten, die im System von den Agenten verschickt werden?⁴
- **Austausch-Kriterium** (*exchange criterion*): Wann tauschen die einzelnen Agenten Informationen aus?
- **Austausch-Topologie** (*exchange topology*): Welche Agenten tauschen Informationen aus?
- **Integration der Information** (*integration policy*): Wie integrieren Agenten die erhaltene Information in ihr Arbeitsgedächtnis?

⁴Da in der hier vorgelegten Arbeit Agenten als Mittel zur algorithmischen Parallelisierung verwendet werden, kann an dieser Stelle bereits davon gesprochen werden, dass nicht nur die Algorithmen, sondern die Agenten Informationen austauschen. Bei Talbi wird allgemeingültiger von den Algorithmen gesprochen.

COHDA soll in dieser Arbeit für die Lösung eines **verteilten Constraint Optimierungsproblems** eingesetzt werden. Es wurde bereits erläutert, warum keine vollständigen Verfahren für das Problem der Einsatzplanung verwendet werden können. Dennoch ist es zur Beschreibung von COHDA als heuristischem Verfahren hilfreich, Kategorisierungen aus dem Bereich der vollständigen DCOP-Verfahren zu verwenden, wie sie von Chapman et al. in einem Ordnungsrahmen dargestellt werden⁵ [Cha+11]:

- **Zustandsbewertung** (*state evaluation*): Auf Basis welcher Zielfunktion und mit welcher im Arbeitsgedächtnis vorgehaltenen Information bewertet ein Agent seinen Zustand bzw. den aktuellen Lösungskandidaten?
- **Entscheidungsregel** (*decision rule*): Wie wählt der Agent auf Basis der Zustandsbewertung einen neuen Kandidaten aus dem Lösungsraum aus?
- **Ablauf-Angleichung** (*adjustment schedule*): Folgen die Agenten einer systemweiten Synchronisation? Erfolgt die Reaktion auf erhaltene Information zufallsbasiert oder deterministisch?

COHDA wurde mithilfe eines **agentenbasierten Systems** in der Programmiersprache Python⁶ umgesetzt. Eigenschaften von Agentensystemen wurden bereits in [Abschnitt 3.3](#) dargestellt. Autonome Software-Agenten sind in der Lage, ihre Umgebung wahrzunehmen und in dieser zu agieren. Wesentliche Unterschiede in der Umsetzung von Multiagentensystemen finden sich in der Art der Autonomie: Wie entscheidet ein Agent, welche Aktion er vornimmt und wodurch der Prozess der Entscheidung ausgelöst wird? Bildet er die Agentenwelt und/oder die physikalische Welt in einem internen Modell ab? Die bereits dargestellte Differenzierung zwischen reaktiven, deliberativen und hybriden Agenten sowie die Aufgaben eines Agenten im planenden bzw. kontrollierenden Bereich andererseits sollen daher unter dem Begriff **Agentenmodell** ebenfalls zur Charakterisierung von COHDA aufgegriffen werden.

Ausgetauschte Information COHDA wurde für die initiale Einsatzplanung einer statischen Aggregation von Einheiten-Agenten (Verbund) entwickelt. Die Agenten versenden ihr jeweiliges Arbeitsgedächtnis κ . Das Arbeitsgedächtnis besteht aus dem Ziellastgang ζ , dem wahrgenommenen Systemzustand Ω und dem Lösungskandidaten γ :

$$\kappa = (\zeta, \Omega, \gamma)$$

⁵Wichtiges Anliegen von Chapman et al. ist es, den Bezug zwischen unterschiedlichen Bereichen der verteilten Constraint-Optimierung und auch zu spieltheoretischen Konzepten herzustellen, um die Auswahl eines Algorithmus für eine gegebene Anwendung zu erleichtern. Die Autoren zeigen auf, dass sich anhand des vorgeschlagenen Ordnungsrahmens Eigenschaften kombinierter Verfahren formal ableiten lassen.

⁶<https://www.python.org/>, zuletzt besucht am 2.12.2014

Der Ziellastgang ζ weist jedem Planungsintervall im Planungshorizont eine konstante Wirkleistung zu⁷:

$$\zeta : T_{pl} \rightarrow \mathbb{R}$$

Hinrichs beschreibt den Ziellastgang verkürzt als reelwertigen Vektor:

$$\zeta \in \mathbb{R}^{|T|}$$

Lösungskandidat und wahrgenommener Systemzustand beinhalten beide sogenannte *Konfigurationen*, die der Definition der Einsatzpläne entsprechen (siehe [Definition 5.17](#)): Ein Einsatzplan weist jedem Einheiten-Agenten des Verbundes c einen Fahrplan zu. Während der Lösungskandidat den Einsatzplan cs^* umfasst, den der Einheiten-Agent als aktuell beste Lösung bewertet, beinhaltet der wahrgenommene Systemzustand den aktuellsten Einsatzplan, über den der Agent informiert ist. Der Lösungskandidat γ enthält weiterhin den Bezeichner des Agenten a_i (im Folgenden vereinfacht dargestellt als a_i), der die beinhaltete Konfiguration ermittelt hat:

$$\Omega \in CS,$$

$$\gamma = (cs^*, a_i), cs^* \in CS, a_i \in c$$

Vereinfacht lässt sich sagen, dass die Agenten Informationen über den gemeinsam zu erbringenden Ziellastgang, den Einsatzplan, der dieses Ziel am besten erfüllt sowie den aktuellsten dem jeweiligen Agenten bekannten Einsatzplan austauschen.

Austausch-Kriterium Einheiten-Agenten versenden in COHDA immer dann ihr Arbeitsgedächtnis, wenn es im Laufe der Verarbeitung eingegangener Nachrichten geändert wurde. Erhält ein Agent also nur noch Informationen, die er nach Bewertung nicht in sein Arbeitsgedächtnis integriert, so versendet er keine neuen Nachrichten. Hat er dagegen Informationen erhalten, die zu einer Änderung seines im Arbeitsgedächtnis vorgehaltenen Lösungskandidaten oder des wahrgenommenen Systemzustandes geführt haben, so gibt er diese Informationen weiter. Der Austausch von Nachrichten im System endet somit, sobald kein Agent sein Arbeitsgedächtnis mehr geändert hat.

Austausch-Topologie Viele vollständige DCOP-Verfahren realisieren die Vollständigkeit darüber, dass sie als Kommunikationstopologie den Constraint-Graphen nutzen. Für die Einsatzplanung in Verbänden ist der Constraint-Graph ein vollvermaschtes Netz, da alle

⁷Hinrichs verwendet in späteren Publikationen den Begriff Wirkleistungsprodukt, der insofern weniger passend wirkt als der frühere Begriff Ziellastgang, als es nur jeweils ein Wirkleistungsprodukt gibt, das den vollständigen Planungshorizont umfasst. Daher wird hier der ältere Begriff Ziellastgang gewählt, der diese Eigenschaften besser abbildet und es erleichtert, den Erweiterungsbedarf für unterschiedliche Produkte im DVPP-Kontext darzustellen.

Agenten gemeinsam einen Ziellastgang erbringen müssen – es handelt sich um ein hochgradiges Constraint. Um den Kommunikationsaufwand zu reduzieren, verwendet COHDA eine sogenannte *schwarmbildende Overlay-Topologie*, d. h. eine virtuelle Austausch-Topologie, die von der physikalischen Kommunikationstopologie abstrahiert und einen reduzierten Kommunikationsgraphen mit definierten Eigenschaften auf der physikalischen Kommunikationstopologie umsetzt [Hin14, S. 56]. Die Agenten, mit denen ein Agent innerhalb dieser Overlay-Topologie kommunizieren kann, werden als Nachbarschaft eines Agenten bezeichnet. Das Overlay-Netz wird als schwarmbildend bezeichnet, wenn es zusammenhängend, irreflexiv und symmetrisch ist. Als Nachbarschaft eines Agenten a_i aus c wird die Menge der Agenten aus c bezeichnet, die über eine Kante im Overlay-Netz mit a_i verbunden sind. Sie umfasst damit die Agenten, mit denen Agent a_i kommunizieren kann.

Jedes schwarmbildende Overlay-Netz ist prinzipiell für COHDA verwendbar. Hinrichs vergleicht unterschiedliche Topologien bzgl. Lösungsgüte, Nachrichtenaufwand und Simulationsdauer. Abgesehen von Ausreißern, die auf eine Nutzung von Zufallswerten bei der Erstellung der Small-World-Topologie zurückgeführt werden und so ein lokales Minimum vermeiden, erreichen alle Topologien eine vergleichbare Lösungsgüte. Nachrichtenaufwand und Simulationsdauer verhalten sich gegenläufig und sind in Zusammenhang mit der Verbundgröße zu betrachten. Hinrichs zeigt die Zusammenhänge zwischen den Faktoren am Beispiel der Small-World-Topologie auf und empfiehlt eine auf die anwendungsspezifischen Zeitgrenzen zugeschnittenen Parametrierung bzgl. der Dichte der Overlay-Topologie.

Bei Start der COHDA -Heuristik muss zunächst das Overlay-Netz definiert werden. Hinrichs setzt diesen ersten Schritt des Verfahrens um, in dem er einen ausgewählten Sprecher des Verbundes eine schwarmbildende Overlay-Topologie ermitteln lässt und diese dann als jeweilige Nachbarschaft an jeden Agenten kommuniziert.

Integration der Information Ein Einheiten-Agent a_i erhält in COHDA das Arbeitsgedächtnis eines anderen Agenten a_j . Wegen der bereits dargestellten Symmetrie des Overlay-Netzes befindet sich der Sender a_j ebenfalls in der Nachbarschaft des Empfängers a_i . Folgende Schritte werden nun vom Agenten a_i durchgeführt (vgl. [Hin14, S. 62 f, S. 81 f]).

1. Enthält das Arbeitsgedächtnis des Empfängers den **Ziellastgang** noch nicht, so wird es abgespeichert⁸.
2. Der **wahrgenommene Systemzustand** wird aktualisiert, indem neues Wissen nach folgenden Regeln aufgenommen wird:
 - Enthält der Einsatzplan des Empfängers einen der im erhaltenen Einsatzplan

⁸Da die Agenten für die von COHDA spezifizierten Schritte lediglich Informationen im Arbeitsgedächtnis vorhalten, wird in der weiteren Darstellung des Verfahrens immer vereinfacht von »abspeichern« anstelle von »im Arbeitsgedächtnis abspeichern« gesprochen.

dargestellten Fahrpläne noch nicht (ist also über den entsprechenden Agenten noch nicht informiert), so nimmt er diesen in seinen Einsatzplan auf.

- Ist der Agent zwar über alle Agenten informiert, zu denen sich Fahrpläne im Einsatzplan finden, verfügt aber über ältere Informationen, so verwirft er den bisherigen Fahrplan des entsprechenden Agenten und nimmt den aktuelleren Fahrplan auf.
- In allen anderen Fällen wird keine Information zum wahrgenommenen Systemzustand integriert.

3. Der **Lösungskandidat** wird mit den folgenden Schritten aktualisiert:

- a) Enthält der erhaltene Lösungskandidat Informationen zu mehr Agenten und ist die Menge der Agenten, zu denen Fahrpläne vorliegen, eine echte Obermenge, dann wird der bisherige Lösungskandidat verworfen und der erhaltene Lösungskandidat abgespeichert.
- b) Enthält der erhaltene Lösungskandidat Informationen zu anderen Agenten, zu denen bisher keine Informationen vorliegen, so werden diese Fahrpläne im eigenen Lösungskandidaten ergänzt.
- c) Enthält die erhaltene Lösung Fahrpläne zu denselben Agenten, aber die Bewertung der Güte des erhaltenen Lösungskandidaten ergibt einen besseren Wert, so wird der bisherige Lösungskandidat verworfen und der erhaltene Lösungskandidat abgespeichert.
- d) Enthalten die Lösungskandidaten Informationen zu denselben Agenten und ergeben bei der Bewertung der Güte den gleichen Wert, so wird auf Basis einer definierten Reihenfolge unter den Bezeichnern der Agenten entschieden. Dieser Aspekt ist wesentlich für die Konvergenz des Verfahrens, da sich alle Agenten somit bei gleicher Güte mehrerer Lösungskandidaten für dieselbe Lösung entscheiden.⁹

Nach diesen Schritten ist die Integration der erhaltenen Informationen abgeschlossen.

Zustandsbewertung Die Zustandsbewertung in COHDA erfolgt anhand einer globalen Gütefunktion, die allen Agenten bekannt ist. Hinrichs evaluiert COHDA anhand des Erfüllungsgrades des Ziellastganges. Es wird aber darauf hingewiesen, dass auch andere Gütefunktionen möglich sind, wie beispielsweise konvex kombinierte oder lexikographische

⁹Man beachte, dass auf diese Weise alle Agenten des Systems in eine globale Reihenfolge gebracht werden, obwohl einem Agenten nicht alle Agenten und somit die absolute Reihenfolge bekannt sein müssen. Dieser Ansatz wird in vielen DCOP-Lösungsverfahren verfolgt, wie beispielsweise im *asynchronous backtracking*(ABT)-Algorithmus [SL09, S. 10].

Zielfunktionen. Wichtig für die Konvergenz des Verfahrens ist lediglich die Globalität dieser Funktion, so dass die Güte eines Lösungskandidaten von allen Agenten gleich bewertet wird.

Entscheidungsregel Es wurde bereits dargestellt, wie ein Agent neu eingegangene Information integriert (siehe S. 101, Integration der Information). In dem Fall, dass ein Agent sein Arbeitsgedächtnis κ bei der Verarbeitung geändert hat, entscheidet er nun über seine eigene ggf. angepasste Fahrplanauswahl. Hat der Agent noch keinen Fahrplan ausgewählt (d. h. zu Beginn des Verfahrens), so muss er in diesem Schritt eine Auswahl treffen. Hat er bereits einen Fahrplan gewählt, so darf er abhängig von einer frei wählbaren lokalen Zielfunktion einen neuen Fahrplan wählen. In jedem Fall wird dieser neue und damit aktuellere Fahrplan in den wahrgenommenen Systemzustand Ω aufgenommen.

Nun wird ermittelt, ob der Agent mit diesem aktualisierten wahrgenommenen Systemzustand einen neuen Lösungskandidaten identifiziert hat. Da es sich hierbei um eine Zustandsbewertung handelt (siehe letzter Abschnitt) darf diese Bewertung ausschließlich auf der globalen Zielfunktion beruhen. Wurde ein neuer Lösungskandidat ermittelt, so wird das Arbeitsgedächtnis entsprechend angepasst. Gemäß der definierten Regeln zum Austausch von Informationen wird der neue Lösungskandidat nachfolgend innerhalb der Nachbarschaft des Agenten kommuniziert.

Ablauf-Angleichung COHDA schreibt keine Angleichung der Agenten-Aktionen vor. Hinrichs zeigt weiterhin, dass die Lösungsgüte unabhängig von der Reaktionszeit der einzelnen Agenten ist. Wichtig ist dies insbesondere, wenn man die Entscheidungsregel in Betracht zieht: Da jeder Agent seinen Fahrplan nach einer lokal spezifizierbaren Funktion wählen darf, können gleiche Bearbeitungszeiten nicht garantiert werden. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass Simulationsdauer und Nachrichtenmenge in manchen Fällen von einer Variabilität dieses Faktors (der sogenannten *inter-agent variation*) profitieren. Allgemeingültige und übertragbare Regeln zur optimierten Wahl dieses Faktors wurden nicht abgeleitet [HS14a].

Agentenmodell Mit COHDA erfüllen die Agenten eine Planungsaufgabe: Nach der initialen Ermittlung möglicher Fahrpläne kooperieren die Agenten für die optimierte Auswahl eines Planes. Mit dem im kooperativen Austausch erhaltenen Wissen erweitern und aktualisieren die Agenten ihre interne Wissensrepräsentation (das Welt-Modell), und führen eine Planung auf dieser Grundlage durch. Damit setzen die Agenten deliberative Anteile um. Nach Abschluss des Planungsprozess verbleiben die Agenten bei der gefundenen Lösung – es werden somit lediglich planende Aspekte umgesetzt, keine kontrollierenden Aspekte, wie sie für ein Monitoring und eine ggf. erforderliche Umplanung der Einheit benötigt werden.

6.3 MODELLIERUNG DER ANLAGEN-FLEXIBILITÄT

Die Modellierung der Anlagen-Flexibilität stellt einen wesentlichen Baustein von Smart Grid-Koordinationsansätzen dar. Bei der Darstellung agentenbasierter Ansätze in [Abschnitt 4.1](#) wurden bereits unterschiedliche Herangehensweisen an diesen Teilprozess vorgestellt (siehe [S. 50](#)). Im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit wird für diese Aufgabe die kontinuierliche Suchraumdarstellung mit Dekoder-Ansatz nach Jörg Bremer verwendet [[BS13a](#)]. Im Folgenden soll dieser Ansatz kurz vorgestellt werden; für ein vertiefendes Verständnis sei auf die angegebenen Quellen verwiesen.

Die kontinuierliche Suchraumdarstellung basiert auf einem maschinellen Lernverfahren: Eine Menge gültiger Fahrpläne wird verwendet, um einen Klassifikator zu trainieren. Diese Trainingsdatenmenge (die sogenannten *Samples*) können beispielsweise mit Hilfe eines Simulationsmodells ermittelt werden. Der Klassifikator ist nach Abschluss der Trainingsphase in der Lage, einen beliebigen Fahrplan als der Domäne zugehörig oder nicht zugehörig zu klassifizieren.

Mit Hilfe einer Kern-Transformation wird im nächsten Schritt nun der (ggf. nicht zusammenhängende) durch die Stützvektoren definierte Raum in einen höherdimensionalen Raum transformiert, in dem die Stützvektoren auf der Außenseite einer Hyperkugel liegen. Von dieser Hyperkugel sind Mittelpunkt und Radius bekannt.

In [Abbildung 6.2](#) wird dargestellt, wie nun mit dieser Art der Domänenabbildung als Hyperkugel ein gewünschter, aber nicht zulässiger Fahrplan auf einen möglichst ähnlichen zulässigen Fahrplan abgebildet werden kann. Auf der linken Seite finden sich – dargestellt als Kreise – eine Menge von Fahrplänen. Im gewählten Beispiel ist die Domäne, die sich aus der Menge der gültigen Fahrpläne ergibt, nicht zusammenhängend. Eine Auswahl aus der Menge der gültigen Fahrpläne wurde als *Samples* für das Training des Klassifikators verwendet. Im linken Bereich von [Abbildung 6.2](#) sind die resultierenden Stützvektoren erkennbar – sie bilden den Randbereich der eingefärbten Fläche.

Auf der rechten Seite findet sich die Abbildung der Domäne als Hyperkugel im höherdimensionalen Raum. Der Dekoder-Ansatz erlaubt es nun, einen Fahrplan als Anfrage an das Suchraummodell zu definieren (hier der Fahrplan os_u'). Zunächst wird geprüft, ob der Fahrplan innerhalb des durch die Stützvektoren definierten Raumes liegt. Ist das nicht der Fall, so wird der Fahrplan ebenfalls in den höherdimensionalen Raum transformiert und dort auf den nächstgelegenen gültigen Fahrplan abgebildet. Die Rücktransformation des resultierenden Fahrplans ergibt nun mit os_u einen gültigen Fahrplan.

Die kontinuierliche Suchraumdarstellung mit Dekoder-Ansatz zeigt drei wesentliche Vorteile gegenüber der Simulationsmodell-basierten Abbildung von Fahrplänen:

- **Restriktionslose Suche:** Innerhalb der Domäne werden nur zulässige Fahrpläne abgebildet. Somit ist es möglich, unterschiedliche Fahrpläne aus der Domäne zu ermit-

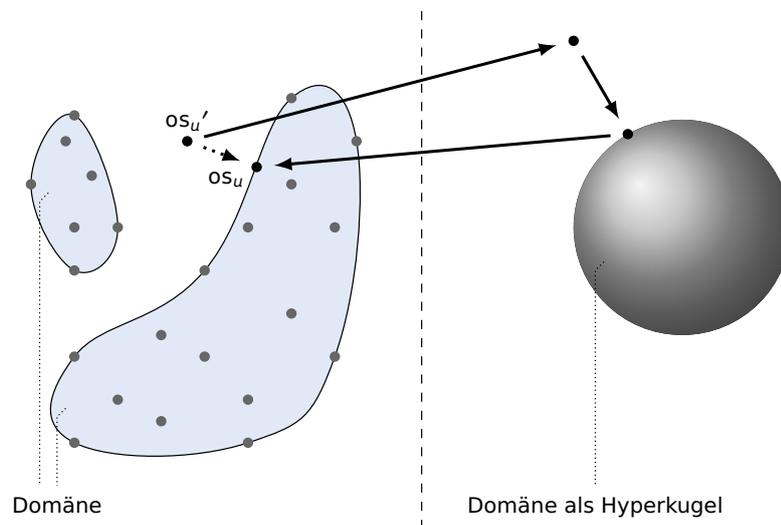


Abbildung 6.2: Suchraummodell und Dekoder nach [BS13a]: Ein nicht zulässiger Fahrplan os_u' wird in einen gültigen möglichst ähnlichen Fahrplan os_u überführt. Linke Seite: Menge zulässiger Fahrpläne als Domäne. Rechte Seite: Abbildung der Domäne im höherdimensionalen Raum als Hyperkugel. Angepasst nach einer Abbildung von Jörg Bremer, Universität Oldenburg.

teln und zu vergleichen. Alle so ermittelten Fahrpläne sind zunächst zulässig, können also umgesetzt werden.

- **Zielgerichtete Suche:** Die kontinuierliche Suchraumdarstellung kann in ein Optimierungsverfahren eingebunden werden, in dem im Sinne der Optimierungsfunktion möglichst gute Fahrpläne ermittelt werden. Nachfolgend kann geprüft werden, ob es sich um zulässige Fahrpläne handelt. Bei der Anfrage an das Suchraummodell können diese schließlich in möglichst ähnliche, zulässige Fahrpläne, übertragen werden.
- **Große Fahrplanmenge:** Mit der gewählten Umsetzung mit einem Klassifikator-Ansatz ist eine deutlich größere Menge von Fahrplänen aus der Domäne ermittelbar, als über die Samples abgebildet wurde.

Ob die so ermittelten zulässigen Fahrpläne auf der realweltlichen Anlagen auch umgesetzt werden, hängt davon ab, ob die gewählten Samples den zulässigen Betriebsbereich der Anlage ausreichend abbilden. Für entsprechende Hinweise zum Sampling sei auf [BS13b] verwiesen.

Für das gewählte Basisverfahren wurde bereits aufgezeigt, dass die kontinuierliche Suchraumdarstellung in das Optimierungsverfahren integriert werden kann [HBS13]. Die Effekte auf die Eigenschaften des Basisverfahrens wurden bisher nicht bewertet. In [Abbildung 5.4](#) (S. 78) wurde dargestellt, dass Ereignisse die Beschaffenheit der Domäne verändern. Übertragen auf die kontinuierliche Suchraumdarstellung sind somit die Stützvektoren und damit die ermittelte Hyperkugel als Abbildung der Domäne nicht mehr gültig. Es ist somit dafür Sorge zu tragen, dass bei Eintritt eines Ereignisses auch das Suchraummodell mit neuen bzw. angepassten Samples trainiert wird.

6.4 DEKOMPOSITION UND ERWEITERUNGSKONZEPT

In [Tabelle 6.2](#) wurde dargestellt, welche der Anforderungen der kontinuierlichen Einsatzplanung COHDA erfüllt, an welchen Stellen das Verfahren angepasst bzw. erweitert werden muss und zu welchen Aspekten bisher keine Aussage getroffen werden kann. Für die Einbettung des Verfahrens in den energiewirtschaftlichen Kontext (NFA 9) wird nach Entwurf des Verfahrens für die kontinuierliche Einsatzplanung geprüft, ob die gestellten Anforderungen erfüllt werden ([Kapitel 9](#)). Für die Anforderungen FA 1 (Detektion von Ereignissen), FA 2 (Kontinuierliche Bereitstellung gültiger Fahrpläne) und FA 4 (DVPPs als produktspezifische Verbünde) wurde der Erweiterungsbedarf bereits vermerkt. Bezüglich der Abbildung von anlagenlokalen Präferenzen (FA 3) wurde ebenfalls deutlich gemacht, dass das Verfahren es zwar erlaubt, diese in der Optimierung zu berücksichtigen, die Spezifika, die sich aus einer Umplanung im laufenden Betrieb ergeben aber anlagentypspezifisch ermittelt und abgebildet werden müssen – auch hier besteht daher Erweiterungsbedarf.

Der aus den Anforderungen hergeleitete Erweiterungsbedarf wird nun auf die dargestellten Charakteristika von COHDA abgebildet, um ihn so zu strukturieren und den schrittweisen Aufbau der kontinuierlichen Einsatzplanung für DVPP aus COHDA herzuleiten.

Tangierte Charakteristika durch die Detektion von Ereignissen Sollen die Einheiten-Agenten in der Lage sein, innerhalb des Planungshorizontes Ereignisse im Sinne von Fahrplanabweichungen zu erkennen, so erfordert dies zwei Erweiterungen: Zunächst einmal muss das bisherige Agenten-Modell erweitert werden: Die Agenten müssen nicht nur auf Nachrichten reagieren können, sondern müssen ergänzend auf sensorischen Input aus der Umgebung außerhalb der Agenten, der ihnen zugehörigen Anlage wahrnehmen und daraufhin innerhalb des Agentensystems agieren. Die klassische Kategorisierung in reaktive und deliberative Anteile (siehe [Kapitel 3](#)) erfasst dabei nicht den Kern der erforderlichen Erweiterung: Bereits für eine initiale Planung ist es erforderlich, dass die Agenten ein internes Modell über die Einheit in der physikalischen Welt aufbauen. Auf diesem Wissen setzen sie ihre Planung um. Für die Reaktion auf Ereignisse ist es allerdings erforderlich,

weiterhin wiederholt auf sensorischen Input aus der physikalischen Welt zu reagieren und so die deliberativen, planenden Anteile innerhalb einer Kontrollaufgabe umzusetzen. Somit sollte die Verwendung eines hybriden Agenten-Modells geprüft werden, wie in [BJW04] für die Realisierung von agentenbasierten Kontrollkonzepten beschrieben. Weiterhin muss das Austausch-Kriterium neu definiert werden, denn die Agenten müssen die Lösungsfindung erneut anstoßen können und ggf. andere Agenten über detektierte Ereignisse informieren.

Tangierte Charakteristika durch die kontinuierliche Bereitstellung gültiger Fahrpläne Beim Entwurf des Verfahrens muss definiert werden, ob ein Einheiten-Agent einen neuen gültigen Plan auf Basis des alten Fahrplans erstellt (Planreparatur), oder ob ein Neuaufwurf angestoßen wird. Wird der alte Fahrplan als Grundlage verwendet, so muss – zusätzlich zur Erfüllung des Produktes – die Ähnlichkeit des neuen Plans zum alten Plans berücksichtigt werden und somit Teil der globalen Zielfunktion (wie bereits in der Konzeptualisierung dargestellt, siehe [Kapitel 5](#)). Somit würde sich aus dieser Anforderung eine Änderung der Zustandsbewertung des Agenten ergeben.

Tangierte Charakteristika durch die Berücksichtigung anlagenlokaler Präferenzen Bei der Umsetzung der lokalen Fahrplanauswahl können anlagenlokale Präferenzen typspezifisch umgesetzt werden. Diese sollten in die lokale Bewertungsfunktion integriert werden, damit sie nicht veröffentlicht werden müssen: Dieser Erweiterungsbedarf hat somit einen Effekt auf die Entscheidungsregel.

Tangierte Charakteristika durch die Umsetzung des Produktbezuges Die Erweiterung auf den Produktbezug stellt die größte Erweiterung dar. Es muss geprüft werden, inwieweit andere Information übermittelt werden müssen (ausgetauschte Information): Wurde bisher nur ein Ziellastgang übermittelt, so müssen nun Produkte realisiert werden, von denen der Agent aber über den gesamten Planungshorizont möglicherweise mehrere abbilden muss. Weiterhin realisiert COHDA eine Austausch-Topologie unter allen Agenten, die einen Ziellastgang erfüllen. Da die Systemgrenze bei der Entwicklung von COHDA durch die Menge der Agenten definiert ist, die einen Verbund realisieren, ist garantiert, dass mit einem schwarmbildenden Overlay-Netzwerk alle Agenten miteinander verbunden sind. Mit der Erweiterung auf den Produktbezug der DVPP ist diese Bedingung nicht mehr unbedingt gegeben. Es muss daher geprüft werden, inwieweit der Produktbezug Effekte auf die Austausch-Topologie hat. Der Prozess der Integration von Information ins Arbeitsgedächtnis, wie er für COHDA definiert ist, bezieht sich auf das unter den Agenten ausgetauschte Wissen, das ebenfalls in vollständigen Arbeitsgedächtnissen besteht. Wird nun auf der Seite der Kommunikation eine Änderung durchgeführt, indem produktspezifisch Informationen ausgetauscht werden, muss auch der Prozess zur Integration in das

Arbeitsgedächtnis angepasst werden (Integration der Information). Schließlich muss geprüft werden, ob die Erweiterung auf Produkte einen Effekt auf die Zustandsbewertung (globale Bewertungsfunktion) und die Entscheidungsregel (lokale Fahrplanauswahl) hat. Insbesondere in diesem Aspekt sind die unterschiedlichen Affiliationsmengen der beteiligten Agenten zu berücksichtigen.

Tangierte Charakteristika durch die Berücksichtigung der Kostenstruktur Wie bereits dargestellt wurde, müssen die Kosten in die globale Bewertungsfunktion aufgenommen werden. Daher wird sowohl die ausgetauschte Information als auch die Zustandsbewertung auf eine Erweiterung hin geprüft werden.

	FA 1 (Ereignisse)	FA 2 (Umplanung)	FA 3 (Constraints)	FA 4 (Produkte)	FA 4 (Kosten)
Charakteristikum	Ausgetauschte Information			×	×
	Austausch-Kriterium	×			
	Austausch-Topologie			×	
	Integration der Information			×	
	Zustandsbewertung		×		×
	Entscheidungsregel			×	×
	Ablauf-Angleichung				
	Agenten-Modell	×			

Tabelle 6.3: Möglicher Erweiterungsbedarf nach Anforderungen und Charakteristikum. ×: Prüfen einer Erweiterung für diese Anforderung in diesem Charakteristikum erforderlich.

Erweiterungskonzept In [Tabelle 6.3](#) sind die für eine Erweiterung zu prüfenden Aspekte für diese Anforderungen zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass die Erweiterung auf den Produktbezug die Änderung darstellt, bei der am meisten Charakteristika auf eine Erweiterung hin geprüft werden müssen. Während abhängig von der konkreten Ausgestaltung bis zu fünf Charakteristika des Verfahrens erweitert werden müssen, tangieren die anderen Anforderungen jeweils nur ein bis zwei Charakteristika. Zudem betrifft der Erweiterungsbedarf für die Anforderungen FA 1, FA 2 und FA 3 unterschiedliche Charakteristika.

Es stellt sich nun die Frage, in welcher Reihenfolge die erforderlichen Entwicklungen und konzeptionellen Erweiterungen des Basisverfahrens durchgeführt werden sollen. Da-

bei wird der Anspruch erhoben, in jedem Designschritt ein voll funktionstüchtiges und somit testbares Verfahren zu erhalten. Daher soll zunächst diskutiert werden, welche der Erweiterungen es ermöglicht, das Ergebnis auf die Eigenschaften des Basisverfahrens hin zu prüfen:

Die Erweiterung des Verfahrens für die Anforderungen FA 1 und FA 2 erfordern ein erweitertes Agenten-Modell, da die Agenten auf sensorischen Input außerhalb des Agentensystems (aus der physikalischen Realität) innerhalb des Agentensystems agieren können müssen. Mit dem Anspruch einer kontinuierlichen Umplanung ist weiterhin die Anforderung verbunden, das interne Zeitmodell der Planung, das sich im Basisverfahren auf einen festen Planungshorizont beschränkt, auf die kontinuierlich fortschreitende Zeit und damit teilweise realisierte Fahrpläne hin anzupassen. Die Erweiterung der lokalen Entscheidungsregel der Agenten um die Berücksichtigung von Präferenzen ist relativ unabhängig vom Agenten- und Zeit-Modell. Für das Basisverfahren wurde weiterhin gezeigt, dass die Performanz des Verfahrens unabhängig von der Umsetzung der Entscheidungsregel ist. Mit der Umstellung auf den Produktbezug (FA 4) sind sehr viele Änderungen verbunden. Das Ergebnis dieser Erweiterung hat aber keinen Einfluss auf das dem Basisverfahren zugrunde liegende Agentenmodell oder die zeitlichen Aspekte einer kontinuierlichen Planung. Weiterhin lässt sich folgendes Beispiel konstruieren:

Beispiel 6.2 (Planungshorizont-maximales singuläres DVPP)

Definiert wird ein DVPP ψ , das ein Produkt p mit dem Produktzeitraum $T_{pr}^{(s,t)}$ zu erfüllen habe.

Es sei nun der Planungshorizont – abweichend von der bisherigen Parametrierung aus [Definition 5.4](#) (Seite 70) – folgendermaßen definiert:

- $s = 0$
- $i_{max} = t$
- $|P| = 1$

Der Planungshorizont umfasst somit genau den Produktzeitraum – das DVPP ist somit *Planungshorizont-maximal*. Ist nun $t = 95$, so umfassen Produktzeitraum und Planungshorizont einen vollständigen Tag. Ist $t = 3$, so wird nun für eine Stunde geplant (vier 15-Minuten-Intervalle). Da es weiterhin nur ein Produkt gibt, kann es im so parametrierten System nur ein *singuläres* DVPP ψ geben.

Die Aufgabenstellung der Einsatzplanung entspricht somit der Aufgabenbeschreibung des Basisverfahrens.

Es können somit nach der Erweiterung auf den Produktbezug solche Parametrierungen

des Systems definiert werden, in denen das Verfahren die gleichen Eigenschaften wie das Basisverfahren zeigen muss. Nach diesem Designschritt ist es daher noch möglich, gegen das Basisverfahren zu evaluieren. Es wurden daher die folgenden aufeinander aufbauenden Designschritte für die Entwicklung der kontinuierlichen Einsatzplanung definiert, in denen jeweils eine Erweiterung oder Anpassung der zugehörigen Charakteristika vorgenommen wird (siehe [Abbildung 6.3](#)):

1. **Schritt 1 – Umsetzung des Produktbezuges:** Nach diesem Designschritt soll ein Verfahren vorliegen, das für die initiale Einsatzplanung in DVPP verwendet werden kann.¹⁰ Das Ziel der Interaktion ist in diesem Schritt noch die Planung eines späteren Systemzustandes. Angewendet auf ein DVPP, das ein Produkt zu erfüllen versucht, das den kompletten Planungshorizont umspannt, muss das Verfahren die gleichen Eigenschaften wie COHDA aufweisen. Gleichzeitig muss es in der Lage sein, die initiale Einsatzplanung für solche DVPPs zu erfüllen, die sich bzgl. der Menge der Agenten (nicht aber im Produktzeitraum) überschneiden. Weiterhin wird in diesem Schritt die Erweiterung auf die Berücksichtigung der Kosten umgesetzt.
2. **Schritt 2 – Abbilden von anlagenlokalen Constraints:** Nach diesem Designschritt soll ein Verfahren vorliegen, das die initiale Einsatzplanung in DVPPs unter Berücksichtigung der anlagentypspezifischen Constraints der betrachteten Anlagentypen umsetzt. In diesem Schritt muss die Entscheidungsregel erweitert bzw. definiert werden.
3. **Schritt 3 – Ereignisse und Umplanung:** In diesem Designschritt werden die Erweiterungen bearbeitet, die für die Anpassung an ein erweitertes Agentenmodell, die Ergänzung des Austausch-Kriteriums sowie die Erweiterung der globalen Zielfunktion erforderlich sind. Das Ziel der Agenten beinhaltet nun nicht mehr nur die vorausschauende Planung in der Agenten-Welt, sondern weiterhin die Kontrolle der Einheiten in der physikalischen Welt.

Eine zusammenfassende Darstellung des Verfahrens wird schließlich in [Abschnitt 7.4](#) gegeben.

Bevor die einzelnen Schritte dargestellt werden, soll noch kurz erläutert werden, wie die Zulässigkeit der Erweiterung geprüft wird (siehe [Abbildung 6.3](#)): Nach dem ersten Erweiterungsschritt wird geprüft, ob das Verfahren – wenn es auf das Originalproblem der Einsatzplanung für einen Ziellastgang im Planungshorizont angewendet wird – die gleichen Eigenschaften zeigt wie COHDA. Im zweiten Schritt wird lediglich die freie Gesinnungswahl

¹⁰Die initiale Einsatzplanung entspricht der DVPP-internen Optimierung der integrierten DVPP-Wertschöpfungskette, die bereits in [Abschnitt 1.3](#) vorgestellt wurde. Betrachtet man die Einsatzplanung unabhängig vom Prozess der DVPP-Bildung, so handelt es sich bei diesem Prozess um die erste – initiale – Einsatzplanung.

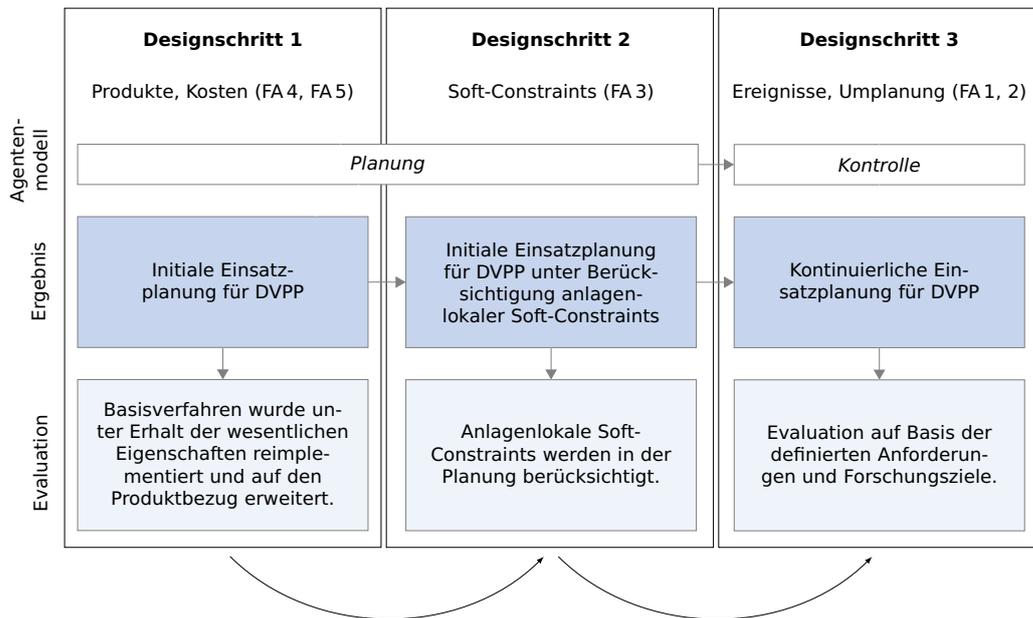


Abbildung 6.3: Erweiterungskonzept

der Agenten genutzt – in [Hin14] wurde formal nachgewiesen, dass diese keinen Effekt auf die Konvergenz des Verfahrens hat. Zu zeigen ist in diesem Schritt, dass es gelingt, die betrachteten Präferenzen mit dem gewählten Ansatz zu berücksichtigen.

Der dritte Designschritt schließlich stellt eine echte Veränderung des Verfahrens dar – das Verfahren kann nun nicht mehr die Eigenschaften des Basisverfahrens aufweisen und soll vielmehr die Evaluation für den Anwendungskontext bestehen. Daher wird das Ergebnis des dritten Designschritts im Rahmen der Gesamtevaluation geprüft.

7

DYNASCOPE – VERTEILTE KONTINUIERLICHE EINSATZPLANUNG

Mit der formalen Beschreibung des Problems der kontinuierlichen Einsatzplanung in [Kapitel 5](#) und der Anforderungsanalyse und dem Design-Konzept, die in [Abschnitt 6.4](#) vorgestellt wurden, sind die Grundlagen für die Entwicklung des Verfahrens dargelegt. Die nun folgende Darstellung folgt dem schrittweisen Design-Konzept: Zunächst wird das gewählte Basisverfahren auf den **Produktbezug** Dynamischer Virtueller Kraftwerke erweitert ([Abschnitt 7.1](#)). Die Konzeption der **lokalen Fahrplanauswahl** mit Berücksichtigung anlagenspezifischer Präferenzen wird in [Abschnitt 7.2](#) beschrieben. Die Detektion und **Verarbeitung von Ereignissen** führt schließlich zur Vorstellung des agentenbasierten Kontrollsystems der kontinuierlichen Einsatzplanung ([Abschnitt 7.3](#)). Ein **Überblick über das Verfahren** wird abschließend in [Abschnitt 7.4](#) gegeben.

7.1 SCHRITT 1: UMSETZUNG DES PRODUKTBEZUGS

Für die nachfolgende Darstellung werden im Sinne des Vorgehensmodells SGAE teilweise Irrwege dokumentiert, soweit sie die entwickelte Lösung leichter nachvollziehbar erscheinen lassen. Für diese Zwecke werden teilweise vorläufige Definitionen verwendet, die im späteren Verlauf der Arbeit durch die entgeltigen Definitionen ersetzt werden. Diese vorläufigen Definitionen werden entsprechend kenntlich gemacht.

7.1.1 Direkte Übertragung und Konvergenz-Problem

Zunächst wird eine direkte Übertragung des Produktkonzeptes mittels COHDA geprüft. Nach den Ergebnissen der vorangegangenen Analyse müssen das Arbeitsgedächtnis, die zwischen den Agenten ausgetauschten Information sowie alle damit verbundenen Prozesse angepasst werden (siehe [Tabelle 6.3](#)). Zunächst wird daher das Arbeitsgedächtnis angepasst, so dass nicht nur ein Ziellastgang, sondern sämtliche Produkte abgebildet werden können, an deren Erfüllung der Agent beteiligt ist. Realisiert wird das über die Affiliationsmenge des Agenten:

Vorläufige Definition (Arbeitsgedächtnis, DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis)

Das Arbeitsgedächtnis eines Agenten a sei definiert als Tupel aus der Affiliationsmenge \mathbb{A}_a des Agenten, dem wahrgenommenen Systemzustand Ω sowie einem Lösungskandidaten γ :¹

$$\kappa_a = (\mathbb{A}_a, \Omega, \gamma)$$

Das DVPP-reduzierte Arbeitsgedächtnis $\kappa_{a,\psi}$, das sich nur auf das Produkt p bezieht, ist definiert wie folgt:

$$\kappa_{a,\psi} = (p, \Omega, \gamma)$$

Das DVPP-reduzierte Arbeitsgedächtnis ist dann *vollständig*, wenn der wahrgenommene Systemzustand Ω einen Fahrplan zu jedem Agenten des entsprechenden DVPP enthält.

Da das zu entwickelnde Verfahren als verteiltes agentenbasiertes Verfahren konzipiert werden soll und ein Einheiten-Agent in einem Planungsintervall jeweils nur einem DVPP angehören kann, ist die Abbildung von DVPP auf Produkt innerhalb des Agenten bijektiv. Von dieser Eigenschaft wird daher im Folgenden ausgegangen.

Zur kooperativen Ermittlung einer Lösung für das jeweilige DVPP kommunizieren die Agenten innerhalb DVPP-spezifischer Nachbarschaften, für die das Konzept des schwarmbildenden Overlay-Netzes verwendet wird, wie es für das Basisverfahren definiert wurde (siehe S. 100):

Definition 7.1 (DVPP-spezifische Nachbarschaft)

Sei ein Agent a_i Teil des DVPP ψ und $O_\psi = (A, E)$ ein schwarmbildendes Overlay-Netz auf ψ , mit A als Menge der Agenten des DVPP ψ und E als Menge der Kanten des Overlay-Netzes. Die DVPP-spezifische Nachbarschaft des Agenten a_i sei definiert wie folgt:

$$N_{i,\psi} = \{a_j \mid (a_i, a_j) \in E\},$$

Die DVPP-spezifische Nachbarschaft $N_{i,\psi}$ des Agenten a enthält somit alle Agenten des DVPP ψ , mit denen der Agent a direkt kommuniziert.

Gehört ein Agent mehr als einem DVPP an, so hält er somit unterschiedliche Nachbarschaften vor, die jeweils die Kommunikation des Agenten für das durch das DVPP zu liefernde Produkt definieren.

Zur Bewertung eines Lösungskandidaten verwenden die Agenten eine Gütefunktion, die ihre Produkt-Verpflichtungen abbildet:

¹In der kooperativen Lösungssuche für die Einsatzplanung handelt es sich bei dem Lösungskandidaten um einen Einsatzplan, der eine mögliche Lösung des Verfahrens darstellt.

Vorläufige Definition (Gütefunktion)

Die Gütefunktion f_a bewerte die Güte eines Lösungskandidaten in Bezug auf die Erfüllung der Produkte der Affiliationsmenge \mathbb{A}_a des Agenten a .

Der Ablauf des Verfahrens erfolgt nun auf Basis dieser Definitionen folgendermaßen (siehe [Tabelle 7.1](#)): Die Agenten versenden nicht ihr vollständiges Arbeitsgedächtnis, sondern das DVPP-reduzierte Arbeitsgedächtnis innerhalb der DVPP-spezifischen Nachbarschaft. Für die Bewertung eines Lösungskandidaten prüft ein Agent die Produktverpflichtungen, die sich aus seiner Affiliationsmenge ergeben.

Charakteristikum	Anpassung
Ausgetauschte Information	DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis
Austausch-Topologie	DVPP-spezifische Nachbarschaften $N_{i,\psi}$
Integration der Information	Abspeichern der Einsatzpläne im angepassten Arbeitsgedächtnis
Zustandsbewertung	Bewertung des aktuellen Einsatzplanes nach Erfüllung der Produkte der Affiliationsmenge \mathbb{A}_a eines Agenten a mittels f_a

Tabelle 7.1: Direkte Übertragung von COHDA auf den Produktbezug

Beispiel 7.1 illustriert diesen Ablauf und zeigt die Probleme auf, die mit diesem Ansatz verbunden sind.

Beispiel 7.1 (Direkte Umsetzung des Produkt-Bezugs)

Gegeben seien zwei DVPPs ψ_i und ψ_j :

$$\psi_i = (a_1, a_2, a_3)$$

$$\psi_j = (a_3, a_4, a_5)$$

Die jeweiligen Produkte seien entsprechend bezeichnet, d. h. p_i für ψ_i und p_j für ψ_j . Da die Kardinalität der DVPP drei beträgt, entspricht die Austausch-Topologie einem Ring, so dass die DVPP-spezifische Nachbarschaft der Agenten aus allen Agenten des jeweiligen DVPP besteht (siehe [Abbildung 7.1](#)). Da Agent a_3 an beiden DVPP beteiligt ist, enthält die Affiliationsmenge \mathbb{A}_{a_3} beide DVPPs. Es sei angenommen, dass den Agenten a_1 und a_3 bereits ein vollständiges DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis für die Produkte vorliegt, an deren

Lieferung sie beteiligt sind. Dem Agenten a_1 liegen weiterhin aktuellere Informationen im wahrgenommenen Systemzustand Ω vor.

Agent a_1 sende nun sein DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis an Agent a_3 (siehe [Abbildung 7.2\(a\)](#)). Agent a_3 vergleicht die Güte des erhaltenen Lösungskandidaten γ mit der Güte des ihm vorliegenden Lösungskandidaten γ^* mittels der Gütefunktion f_{a_3} , um eine Integration in sein Arbeitsgedächtnis zu prüfen. In diese Bewertung bezieht der Agent alle Produkte ein. Es sei nun

$$f_{a_3}(\gamma_{\psi}^*) > f_{a_3}(\gamma_{\psi})$$

Agent a_3 integriert nur die Informationen aus dem wahrgenommenen Systemzustand, da diese aktueller sind, verwirft aber aufgrund der Bewertung mit Hilfe der globalen Gütefunktion den Lösungskandidaten. Sein neues DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis mit dem Lösungskandidaten γ^* schickt der Agent an die Agenten seiner Nachbarschaften (siehe [Abbildung 7.2\(b\)](#), zur Vereinfachung wird lediglich die Kommunikation innerhalb ψ_1 dargestellt).

Agent a_1 vergleicht die Güte der Lösungskandidaten mittels der Gütefunktion f_{a_1} , um eine Integration in sein Arbeitsgedächtnis zu prüfen. Da Agent a_1 lediglich DVPP $_{\psi_i}$ zugehörig ist, ist es möglich, dass die Konfigurationen folgendermaßen bewertet werden:

$$f_{a_1}(\gamma^*) < f_{a_1}(\gamma)$$

In diesem Fall nimmt Agent a_1 keine Änderung an seinem Arbeitsgedächtnis vor (siehe [Abbildung 7.2\(c\)](#)).

Das Verfahren terminiert also, konvergiert aber nicht: Beiden Agenten liegen unterschiedliche Lösungskandidaten vor.

Das gegebene Beispiel zeigt auf, dass eine Erweiterung des Verfahrens auf den Produktbezug in dieser Form nicht möglich ist: Die Gütefunktion bezieht die Produkt-Verpflichtungen der Agenten auf Basis der Affiliationsmenge ein. Da die Agenten eines DVPP unterschiedliche Affiliationsmengen aufweisen können, widerspricht dieses der Anforderung einer globalen Gütefunktion, die bereits für das Basisverfahren definiert wurde. Eine Konvergenz kann somit nicht mehr garantiert werden.

Weiterhin ist festzustellen, dass mit der direkten Umsetzung des Produktbezugs die Anforderung der Datensparsamkeit nicht erfüllt wird: DVPPs bündeln produktspezifisch, d. h. Agenten schließen sich für die Lieferung eines Produktes zusammen, dessen Produktzeitraum ggf. kürzer ist als der Planungshorizont. In der oben gewählten Umsetzung kommunizieren Agenten Einsatzpläne, die nach [Definition 5.17](#) (Seite 77) den gesamten Planungshorizont umfassen. Als Beispiel sei angeführt, dass es nicht begründet werden kann, warum ein Einheiten-Agent, der mit einem anderen Einheiten-Agenten gemeinsam ein Produkt in den frühen Morgenstunden erfüllt, nach Abschluss der Produktlieferung noch Information

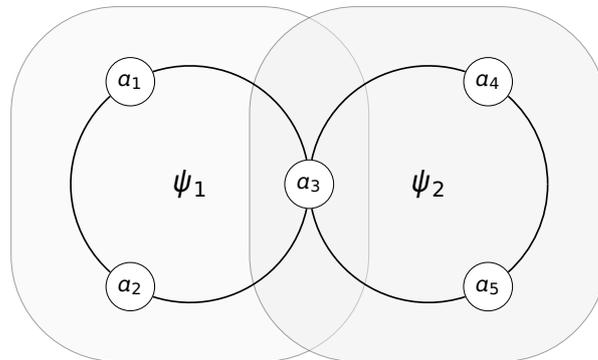


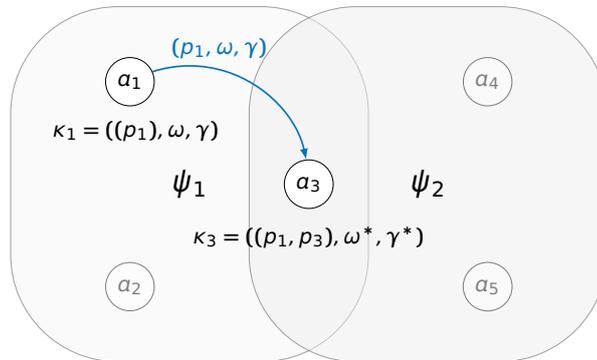
Abbildung 7.1: Austausch-Topologien für DVPP ψ_1 und ψ_2

über das für die Abendstunden geplante Betriebsverhalten der anderen Anlage erhalten sollte. Auch dieser Aspekt sollte daher bei der Entwicklung eines Lösungsansatzes für das Konvergenzproblem beachtet werden.

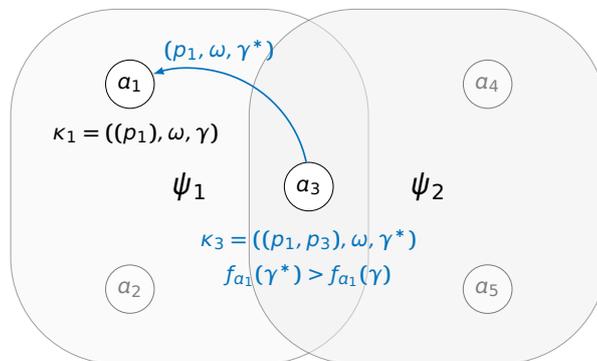
7.1.2 Lösungsansatz

Die Erkenntnisse aus der direkten Übertragung des gewählten Basisverfahrens auf den DVPP-Anwendungsfall lassen sich auf folgende Anforderungen an den zu entwickelnden Lösungsansatz abbilden:

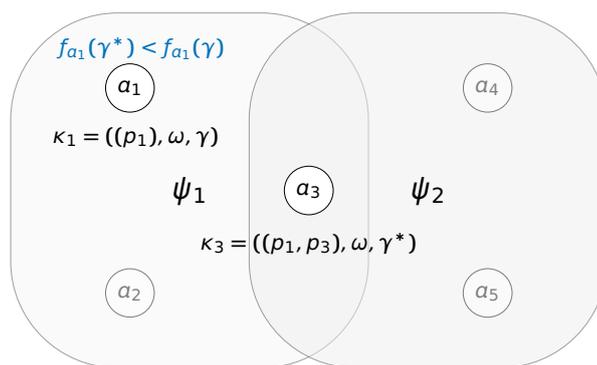
1. Die Speicherung produktspezifischer Information darf nicht den gesamten Planungshorizont umfassen. Daher muss das Arbeitsgedächtnis geeignet neu definiert werden.
2. Die Kommunikation des gesamten Fahrplans einer Einheit wurde als ungünstig im Sinne der Datensparsamkeit eingestuft. Weiterhin ist bei einer produktspezifischen Bewertung des Lösungskandidaten die Kommunikation von Planungsinformationen außerhalb des Produktzeitraumes unnötig. Daher werden die zu kommunizierende Information sowie alle damit verbundenen Prozesse der Informationssynthese neu definiert.
3. Die Gütefunktion zur Bewertung des Lösungskandidaten kann – anders als im Basisverfahren – nicht systemweit global sein. Ihre Allgemeingültigkeit muss unter Beachtung der Konvergenzfordernisse des Verfahrens eingeschränkt werden.
4. Die Berücksichtigung weiterer Produktverpflichtungen außerhalb des aktuell betrachteten DVPP darf – trotz Einschränkung der kommunizierten Information auf den Produktzeitraum – nicht wegfallen: Es ist leicht nachzuvollziehen, dass das System



(a) Agent a_1 sendet sein DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis an a_3 .



(b) Agent a_3 übernimmt den aktuelleren Systemzustand ω , verwirft den erhaltenen Lösungskandidaten γ und sendet sein DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis an a_1 .



(c) Agent a_1 verwirft den erhaltenen Lösungskandidaten γ^* und führt keine Änderung seines Arbeitsgedächtnisses durch. Das Verfahren terminiert.

Abbildung 7.2: Beispiel: Konvergenzproblem bei unterschiedlichen Affiliationsmengen der beteiligten Agenten und agentenspezifischer Gütefunktion.

ansonsten durch zwei parallele Planungsprozesse in einen oszillierenden Zustand versetzt werden könnte und somit nicht mehr konvergieren würde.

Speicherung produktspezifischer Informationen

Für die Formalisierung des Problems der kontinuierlichen Einsatzplanung wurde bereits der Produktbeitrag eines Agenten definiert (siehe S. 80). Nun soll zunächst der Bezug zu dem Fahrplanausschnitt des Agenten hergestellt werden, mit dem dieser Produktbeitrag realisiert wird:

Definition 7.2 (Produkt-Fahrplan)

Der Agent a sei Element des DVPP ψ . Das zu liefernde Produkt p umfasse den Planungshorizont $T_{pr}^{(s,t)}$. Der Agent a verfügt über einen Fahrplan os für die Einheit u , der er über die Einheitenzuweisung zugeteilt ist: $ua(a) = u$.

Der Produkt-Fahrplan $ps_{a,p}$ (*product operation schedule*) weise nun jedem Planungsintervall des Produkt-Zeitraums eine von der Einheit des Agenten zu liefernde Energiemenge zu:

$$ps_{a,p} : T_{pr}^{(s,t)} \rightarrow \mathbb{R},$$

$$ps_{a,p}(t^{(i)}) = e_u^{(i)},$$

$$s \leq i \leq t$$

Der Produkt-Fahrplan eines Agenten für ein definiertes Produkt ist somit der Fahrplanausschnitt der zugehörigen Einheit für die Intervalle im Produktzeitraum. Die Summe der im Produkt-Fahrplan festgehaltenen Energiemengen ergibt somit den Produktbeitrag des Agenten a für Produkt p . Der Agent halte weiterhin für einen Produkt-Fahrplan eine Zählvariable ν_{os} vor, der bei der Erstellung des Fahrplans generiert wird:

Definition 7.3 (Zählvariable eines Fahrplans)

Bei der Erstellung eines Fahrplans os erzeuge ein Agent a eine Zählvariable $\nu_{os} \in \mathbb{N}$. Für diese Zählvariable gelte, dass er einen Fahrplan des erzeugenden Agenten eindeutig identifiziere und die durch die Zählvariablen eines Agenten innerhalb des Systemverlaufs gebildete Folge stetig ansteige.

Die Zählvariable muss nicht systemweit eindeutig sein und stellt lediglich ein agentenspezifisch eindeutiges Sortierkriterium dar. Der Produkt-Einsatzplan wird nun auf dieser Basis definiert:

Definition 7.4 (Produkt-Einsatzplan)

Der Produkt-Einsatzplan ps_ψ (*product specific cluster schedule*) weist jedem Einheiten-Agenten $a \in \psi$ einen Produkt-Fahrplan $ps_{a,p}$ und die zugehörige Zählvariable ν_{os} des Fahrplans os , aus dem der Produkt-Fahrplan $ps_{a,p}$ ermittelt wurde, zu:

$$ps_\psi : a_i \mapsto (ps_{a,p}, \nu_{os}), a_i \in \psi$$

Ist die Zuweisung unvollständig in Bezug auf die Menge der Agenten aus ψ , so wird die Bezeichnung *unvollständiger Produkt-Einsatzplan* gewählt.

Die Produkt-Einsatzpläne werden verwendet, um die aktuell von den Agenten gewählten Produkt-Fahrpläne abzubilden, sowie um den aktuell von einem Agenten als beste mögliche Lösung für die Lieferung des Produktes abzubilden. Diese Informationen werden schließlich zusammenfassend im DVPP-reduzierten Arbeitsgedächtnis abgespeichert.

Definition 7.5 (Wahrgenommener DVPP-Zustand, DVPP-Lösungskandidat)

Als *wahrgenommener DVPP-Zustand* Ω_ψ wird der einem Agenten jeweils aktuellste Produkt-Einsatzplan bezeichnet.

Der dem Agenten mithilfe einer Gütefunktion f bewertete beste Produkt-Einsatzplan wird als *DVPP-Lösungskandidat* γ_ψ bezeichnet.

Definition 7.6 (DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis)

Das DVPP-reduzierte Arbeitsgedächtnis eines Agenten κ_ψ sei definiert als Tupel aus dem Produkt p eines DVPP, dem wahrgenommenen DVPP-Zustand Ω_ψ sowie einem DVPP-Lösungskandidaten γ_ψ :²

$$\kappa_\psi = (p, \Omega_\psi, \gamma_\psi)$$

Ergänzt um den aktuell gewählten Fahrplan os^* stellt das DVPP-spezifische Arbeitsgedächtnis κ_ψ die Grundlage des Arbeitsgedächtnisses eines Agenten dar:

Definition 7.7 (Arbeitsgedächtnis)

Das Arbeitsgedächtnis eines Agenten a sei definiert als Tupel aus dem aktuell gewählten Fahrplan sowie der Menge aller DVPP-reduzierten Arbeitsgedächtnisse für alle DVPPs

²Bei der Definition des Arbeitsgedächtnisses wird aus Gründen der Übersichtlichkeit darauf verzichtet, den Agenten a ergänzend als Subskript in das Symbol aufzunehmen. Hier und in allen folgenden Definitionen sind die jeweiligen Arbeitsgedächtnisse immer agentenspezifisch.

der Affiliationsmenge \mathbb{A}_a des Agenten:

$$\kappa = (os^*, \{\kappa_{\psi_i} \mid \psi_i \in \mathbb{A}_a\})$$

Mit der neuen Definition des Arbeitsgedächtnisses sind alle fahrplanbezogenen Informationen nun produktspezifisch abgebildet. Im nächsten Schritt wird definiert, wie die Agenten diese Information kommunizieren und integrieren.

Einschränkung der Kommunikation auf den Produkthorizont

Wie bereits dargestellt wurde, soll aus unterschiedlichen Gründen innerhalb der DVPPs lediglich produktspezifisch kommuniziert werden. Über die bereits gewählte produktspezifisch umgesetzte Speicherung der zu liefernden Energiemengen ist die Grundlage dafür geschaffen: Agenten kommunizieren nun lediglich DVPP-spezifische Arbeitsgedächtnisse κ_{ψ} innerhalb der entsprechenden bereits definierten DVPP-spezifischen Nachbarschaften (siehe [Definition 7.1](#)).

Einführung einer DVPP-spezifischen Gütefunktion

Für die Konvergenz des Verfahrens ist es erforderlich, dass Agenten, die gemeinsam versuchen, einen möglichst guten Lösungskandidaten zu ermitteln, die gleiche Bewertungsfunktion aufweisen. Mit der Definition von DVPPs als produktspezifischen Aggregationen muss an dieser Stelle die Systemgrenze definiert werden: Welche Agenten kommunizieren für welche Art von Lösung? Da sich ein DVPP jeweils nur auf ein Produkt bezieht, soll geprüft werden, ob eine produkt- und somit DVPP-spezifische Gütefunktion den Konvergenzanforderungen genügt. In diesem Fall tauschen Agenten wie im [Beispiel 7.1](#) skizziert Informationen aus – allerdings nur noch DVPP-reduzierte Arbeitsgedächtnisse, die sich nun ausschließlich auf den Produkt-Zeitraum beziehen (siehe [Abbildung 7.3](#)).

Die DVPP-spezifische Gütefunktion sei nun so definiert, dass alle Agenten des DVPP einen gegebenen Produkt-Einsatzplan ps_{ψ} gleich bewerten:

Definition 7.8

Die DVPP-spezifische Gütefunktion f_{ψ} weise einem Produkt-Einsatzplan ps_{ψ} einen Gütewert abhängig von der Erfüllung des Produktes p zu.

Mit dieser für jeden Agenten eines DVPP nun gleich definierten Gütefunktion konvergiert das Verfahren somit innerhalb eines DVPP.³

³Mit dem Verständnis, dass der Produkt-Zeitraum $T_{pr}^{(s,t)}$ innerhalb eines DVPP als Planungshorizont T_{pl} betrachtet werden kann, lässt sich der bereits für das Basisverfahren erbrachte Konvergenzbeweis direkt übertragen.

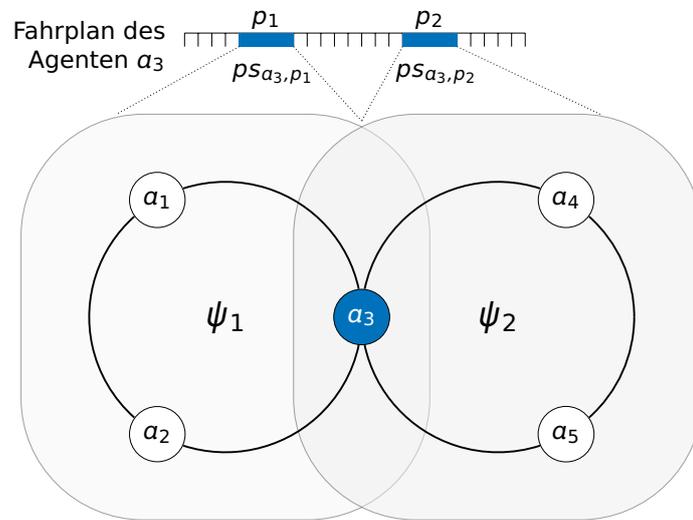


Abbildung 7.3: Beispiel: Kommunikation des produktspezifischen Fahrplanausschnittes. Trägt ein Agent zu unterschiedlichen Produkten bei, so kommuniziert er jeweils nur den produktspezifischen Ausschnitt seines Fahrplans innerhalb des entsprechenden Verbundes.

Berücksichtigung weiterer Produktverpflichtungen

Mit der Einführung der DVPP-spezifischen Gütefunktion bewertet ein Agent die Lieferung des Produktes des aktuellen DVPP und damit den entsprechenden Ausschnitt des Einsatzplanes. Die Basis für die Auswahl eines Produkt-Fahrplanes stellt aber der Fahrplan dar. Dieser Aspekt ist in [Abbildung 7.3](#) gut zu erkennen: Obwohl die Verbünde scheinbar unabhängig voneinander nach einer Lösung suchen können, müssen die Agenten die unterschiedlichen Produkt-Beiträge auf Basis desselben Fahrplans erbringen.

Das verwendete Basisverfahren sieht vor, dass ein Agent bei der Auswahl eines Fahrplans nach eigenen Präferenzen wählen darf. Diese Bewertung gefährdet die Konvergenz des Verfahrens nicht, da nicht etwa der Lösungskandidat bewertet wird, sondern lediglich der Beitrag des Agenten einer Auswahl unterliegt, die für die anderen Agenten nicht nachvollziehbar sein muss.⁴

Dieser Aspekt der sogenannten *freien Gesinnungswahl* soll nun auch für die Berücksichtigung der unterschiedlichen DVPP-Zugehörigkeiten genutzt werden. Dazu wird das Konzept der Domäne verwendet, das bereits in [Abschnitt 5.4](#) eingeführt wurde: Die Domäne

⁴Unter der Anforderung der Datensparsamkeit sollte die Auswahl sogar nicht systemweit nachvollzogen können, da dazu eine Kenntnis der lokalen Präferenzen erforderlich wäre.

eines Agenten wurde definiert als Menge aller zulässigen Fahrpläne des betrachteten Planungshorizontes (siehe S. 76). Betrachtet man nun diese Menge gültiger Fahrpläne unter dem Gesichtspunkt, ob sie einen gegebenen Produkt-Einsatzplan hinsichtlich des zu erfüllenden Produktes verbessern, so lassen sich Submengen der Domäne definieren (siehe [Abbildung 7.4](#)): Ein Teil der Fahrpläne wird einen gegebenen Produkt-Einsatzplan nicht verbessern (d. h. somit bleibt die Erfüllung des Produktes gleich oder verschlechtert sich bei Auswahl dieses Fahrplans) – dieser Teil der Domäne wird als $D^{P\leq}$ bezeichnet. Die restlichen Fahrpläne der Domäne ergeben die Submenge $D^{P>}$. Innerhalb diese Menge wird nun nach der Erfüllung der Produktbeiträge für die anderen DVPPs der Affiliationsmenge des Agenten unterschieden: Ist das entsprechende Produkt durch den betrachteten Fahrplan nicht in der Lieferung eingeschränkt, so gehört dieser Fahrplan zur Menge $D_{A_a}^{P>}$.

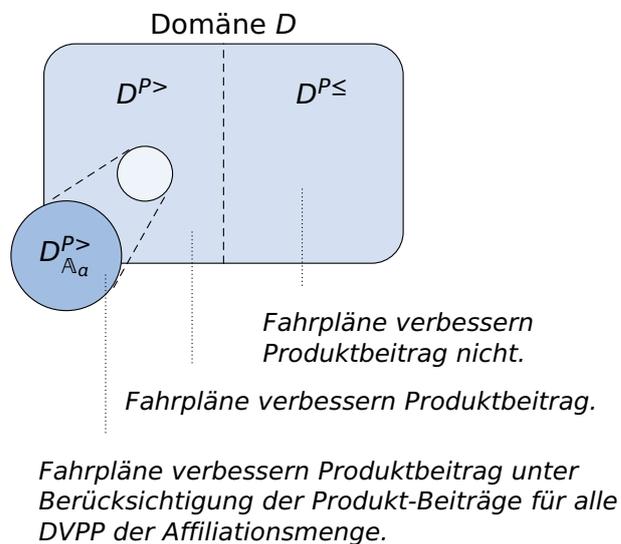


Abbildung 7.4: Untermengen der Domäne eines Agenten mit mehr als einer DVPP-Zugehörigkeit

Für das Verständnis des Prozesses sind nun drei Aspekte von Bedeutung:

- In der Initialplanung wird sequentiell entlang der Reihenfolge der Startzeitpunkte der Produkte geplant.
- Die Menge $D_{A_a}^{P>}$ ist nur dann leer, wenn kein Fahrplan zur Verfügung steht, der das aktuelle Produkt unter Berücksichtigung aller weiteren Produktverpflichtungen verbessert.

- Die Abarbeitung einer Nachricht innerhalb eines Agenten erfolgt sequentiell, d. h. es wird keine parallele Fahrplanauswahl für unterschiedliche Produkte in einem Agenten durchgeführt.

Erhält ein Agent nun eine Nachricht, so darf er bei der Auswahl eines neuen Produkt-Fahrplans auf die Fahrpläne aus $D_{\mathbb{A}_a}^{P>}$ gemäß seiner lokalen Präferenzen auswählen. Auf diese Weise kann die Auswahl eines Produkt-Fahrplans zwar zur Auswahl eines anderen Fahrplans führen, aber nicht die bisher in einem anderen DVPP erreichte Lösungsgüte verändern. Es ist somit garantiert, dass auch parallel in zwei DVPPs ablaufende Verfahren konvergieren.

7.1.3 Konkretisierung der Gütefunktion

Es wurde bereits dargestellt, dass die Berücksichtigung der Kosten ein wesentlicher Faktor für die Planung darstellt. An dieser Stelle soll nun die Berücksichtigung der Kosten innerhalb der globalen Gütefunktion f definiert werden. Zunächst wird dazu die anteilige Produktintervallerfüllung definiert, mit der die energiebezogene Lieferungsqualität eines Lösungskandidaten γ_ψ bewertet wird.

Definition 7.9 (Anteilige Produktintervallerfüllung, energiebezogene Lieferungsqualität)

Sie p ein Produkt, das die Zielvorgabe in der Wirkleistungserbringung e_p definiere und der Produkt-Einsatzplan ps_ψ ein Lösungskandidat γ_ψ , mit dem ein DVPP ψ dieses Produkt erfüllen soll. Die Energiemenge, die im Produktintervall $t_{pr}^{(i)}$ nach Produktdefinition zu erbringen ist, sei bezeichnet als $e_p^{(i)}$

Der Produktbeitrag eines Agenten a zum Produktintervall $t_{pr}^{(i)}$ sei bezeichnet als $con(a, i)$. Die *anteilige Produktintervallerfüllung* $f_{e_p^{(i)}}$ sei eine Funktion, die einem Lösungskandidaten γ_ψ einen Wert im Produktintervall $t^{(i)}$ zuordne. Sie sei definiert wie folgt:

$$f_{e_p^{(i)}}(ps_\psi, t^{(i)}) = \frac{\sum_{a \in \psi} con(a, i)}{e_p^{(i)}}$$

Sie bezeichne somit das Verhältnis der Summe aller Produktbeiträge der Agenten des DVPP zum betrachteten Produktintervall nach Produkteinsatzplan zur Energiemenge des Produktes im betrachteten Produktintervall.

Besteht ein Produkt lediglich aus einem Produktintervall (z. B. ein Stundenprodukt mit nur einer Vorgabe für den gesamten Produktzeitraum), so wird die anteilige Produktintervallerfüllung auch als (anteilige) *Produkterfüllung* f_{e_p} bezeichnet.

Die **normalisierte anteilige Produktintervallerfüllung** $norm(f_{e_p^{(i)}})$ ordnet der anteiligen Produktintervallerfüllung $f_{e_p^{(i)}}$ den entsprechenden Wert in der Normalisierung zwischen 0 und 1 zu.

Die **energiebezogene Lieferungsqualität** q_{e_p} des Produkt-Einsatzplanes ps_ψ ergebe sich nun als Mittelwert der normalisierten anteiligen Produktintervallerfüllung aller Produktintervalle des Produktes p :

$$q_{e_p} = \frac{\sum_{i=m}^n norm(f_{e_p^{(i)}})}{n - m}$$

Die energiebezogene Lieferungsqualität q_{e_p} eines Produkt-Einsatzplanes ps_ψ ist somit 1, wenn seine Ausführung in jedem Produktintervall zu einer Erfüllung der Wirkenergievorgabe $e_p^{(i)}$ führen würde – nur in diesem Fall würde das Produkt also vollständig geliefert.

Mit der Berücksichtigung der Kosten als zu optimierender Faktor neben der energiebezogenen Erfüllung des Produktes ist ein zweiter Faktor in der Optimierung abzubilden. Für eine mehrkriterielle Abbildung der Gütefunktion ist die konvexe Kombination dann geeignet, wenn nur zwei Faktoren abgebildet werden. Dazu wird den jeweiligen Faktoren eine Gewichtung α hinzugefügt, die folgendermaßen in eine Zielfunktion eingebracht wird: Sind a und b zwei zu optimierende Faktoren der Zielfunktion, so ergibt sich die konvexe Kombination dieser Faktoren mit $\alpha \cdot a + (1 - \alpha) \cdot b$. Während nun die lieferungsbezogene Güte maximiert werden soll, gilt es die Kosten zu minimieren. Daher wird der Kehrwert der Kosten in die Zielfunktion eingebracht.⁵ Auf dieser Basis und unter Berücksichtigung der Kosten c_ψ des DVPP für die Lieferung eines Produktes (siehe Seite 82) ergibt sich die Güte eines Produkteinsatzplanes wie folgt:

Definition 7.10 (Güte eines Lösungskandidaten)

Die Güte eines Lösungskandidaten γ_ψ sei definiert wie folgt:

$$f(\gamma_\psi) = \alpha \cdot q_{e_p} + (1 - \alpha) \cdot \frac{1}{c_\psi}$$

$$c_\psi > 0$$

7.1.4 Zusammenfassung

Mit den bis hierhin definierten Erweiterungen und Anpassungen des Basisverfahrens wurde der Produktbezug Dynamischer Virtueller Kraftwerke abgebildet, so dass eine initiale Einsatzplanung für DVPP unter Berücksichtigung der Kosten durchgeführt werden kann.

⁵Es wird somit festgelegt, dass die betrachteten Kosten nicht 0 sein können. Je nach Berücksichtigung von Kosten in der Simulation ist dies in der Umsetzung der Evaluation zu berücksichtigen.

Das Verfahren kann für die interne Optimierung eingesetzt werden, die im Anschluss an die DVPP-Bildung vorgenommen wird. (siehe [Abschnitt 1.3](#)).

7.2 SCHRITT 2: LOKALE FAHRPLANAUSWAHL

Für die Abbildung möglicher Fahrpläne einer Einheit als Planungsgrundlage des entsprechenden Agenten wurde – motiviert aus dem Bereich der *constraint optimization* das Konzept der Domäne gewählt: Eine Domäne fasst die zulässigen Fahrpläne der entsprechenden Einheit zusammen (siehe [Definition 5.15](#)) und stellt somit Alternativen von Abfolgen möglicher Betriebszustände dar. Ein Fahrplan ist dann zulässig, wenn die Betriebs- und Netzconstraints der Anlage durch die Ausführung des Fahrplanes nicht verletzt werden (siehe [Definition 5.12](#)). Zu den Netzconstraints gehören nach [Definition 5.11](#) die netztechnischen Beschränkungen am Netz-Anschlussknoten einer Einheit, wie sie beispielsweise in den technischen Anschlussbedingungen (TAB) vermerkt sind.

Die Anzahl prinzipiell umsetzbarer Fahrpläne einer Einheit kann – je nach gewähltem Vorgehen zur Bestimmung der Domäne – sehr hoch sein. Es ist weiterhin möglich, dass bezogen auf ein zu erfüllendes Produkt sehr ähnliche Fahrpläne enthalten sind. Steht eine solche Domäne einem Agenten als Planungsgrundlage zur Verfügung, wird er ggf. viele Lösungskandidaten ermitteln können, die sich nur sehr geringfügig in der Güte unterscheiden. Es ergeben sich zwei Effekte:

- Das Verfahren kann zu Konvergenzverläufen führen, die in kurzer Zeit eine starke Lösungsverbesserung herbeiführen, dann aber nur sehr langsam bei zunehmend geringerer Verbesserung der Güte konvergieren. Der Nachrichtenaufwand wird durch die hohe Anzahl an nur geringfügig verschiedenen Lösungskandidaten sehr hoch und führt bei allen anderen Agenten zur Generierung neuer (ggf. ähnlicher) Lösungskandidaten.
- Da die Domäne ausschließlich zulässige Fahrpläne als Abfolge von Betriebszuständen abbildet, werden Anlagen-Präferenzen nicht abgebildet. Es ist somit möglich, dass ein Fahrplan gewählt wird, der zwar technisch umsetzbar (zulässig), aber aus Sicht der Präferenzen nicht erwünscht ist, obwohl bezogen auf das Produkt ein gleichwertiger, aber bezüglich der Präferenzen vorteilhafterer Fahrplan in der Domäne enthalten ist.

Im Folgenden werden daher Erweiterungen der bisher spezifizierten Einsatzplanung vorgenommen, die auf diese Aspekte eingehen.

7.2.1 Sensitivität

Die Domäne D_a eines Agenten erlaubt eine restriktionsfreie Suche in einer prinzipiell sehr großen Menge an Fahrplänen. Je nach Struktur der Domäne ist es möglich, dass ein Agent

viele Fahrpläne aus dem Suchraummodell ermitteln kann, die nur noch zu geringfügigen Verbesserungen des aktuellen Lösungskandidaten führt.

Die Werte der lieferungsbezogenen Qualität der durch das Verfahren erzeugten Lösungskandidaten von dem initialen vollständigen Lösungskandidaten zum finalen Lösungskandidaten stellen eine konvergente, monoton steigende Folge dar. Die Steigung der Kurve der Lösungsqualität nimmt bei dem Verfahren nun insbesondere dann ab, wenn die Suchräume sehr feine Korrekturen des Fahrplanes zulassen: Bereits für das verwendete Basisverfahren wurde darauf hingewiesen, dass die Agenten zunächst sehr starke Verbesserungen der Lösungsqualität herbeiführen, und später – abhängig von der zur Verfügung stehenden Fahrplanmenge – geringere Verbesserungen [Hin14, S. 218f]. Es erscheint daher sinnvoll, bei nachlassender Verbesserung der Lösungsverbesserung das Verfahren frühzeitig zu beenden, und so Laufzeit oder Nachrichtenmenge gegen die Produkterfüllung abzuwägen.

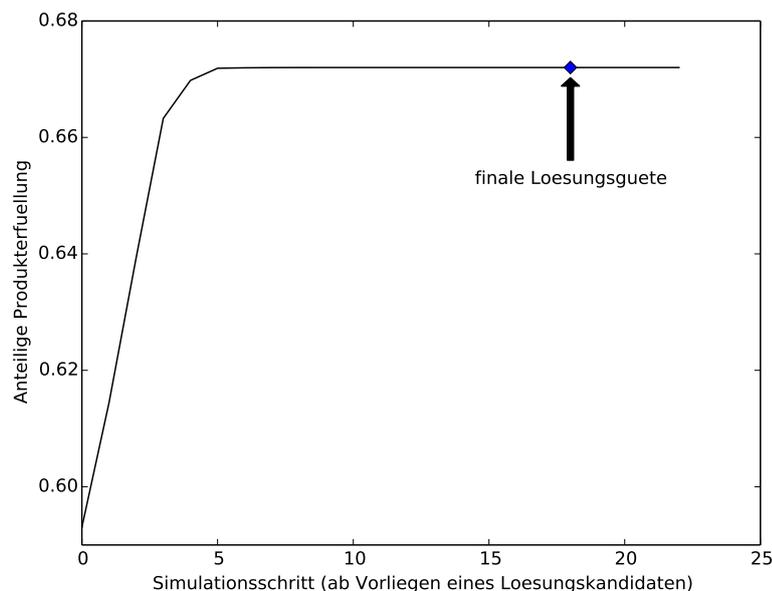


Abbildung 7.5: Exemplarische Darstellung des Konvergenzverlaufes bei starker Exploration der Domäne der Agenten. Im dargestellten Beispiel wurde ein DVPP aus 36 Agenten gebildet und eine Initialplanung durchgeführt. Abgebildet wird die Qualität des im jeweiligen Simulationsschritt systemweit besten Lösungskandidaten.

In [Abbildung 7.5](#) wird ein beispielhafter Konvergenzverlauf eines Planungsprozesses dargestellt. Aufgetragen sind die Güterwerte über den Verlauf einer initialen Planung, bei der jeder Lösungskandidat, der durch neue Fahrplanauswahl zu einer Verbesserung des

Lösungskandidaten führt, zwischen den Agenten ausgetauscht wurde. Theoretisch ist somit eine volle Exploration der Domäne der Agenten möglich. Das Verfahren benötigt ab dem ersten bekannten vollständigen Lösungskandidaten noch 22 Schritte bis zur Terminierung. Der finale Lösungskandidat liegt in Schritt 18 vor. Die Verbreitung des finalen Lösungskandidaten erfordert also noch 3 weitere Simulationsschritte. Ab Simulationsschritt 6 ist allerdings nur noch eine extrem geringe Verbesserung des Lösungskandidaten zu erkennen. Das Nachrichtenaufkommen in den Schritten 6 bis 18 ist jedoch hoch, da sich die jeweiligen Lösungskandidaten im System ausbreiten.

Die Gestalt des Konvergenzverlaufes kann sehr unterschiedlich sein: Befinden sich in den Domänen der beteiligten Agenten keine Fahrpläne, die solche geringfügigen Verbesserungen erlauben, so konvergiert das Verfahren sehr schnell. Eine Abschätzung ist nur unter genauer Kenntnis der im DVPP enthaltenen Anlagen und ihrer möglichen Betriebszustände im Planungsraum möglich und somit hoch spezifisch für die betrachtete Problem Instanz.

In einem zentralen Optimierungssystem könnte durch Beobachtung der Entwicklung der Lösungsqualität ein künstliches Ende des Verfahrens vor Konvergenz herbeigeführt werden. Im Sinne eines vollständig verteilten Verfahrens wird zu diesem Zweck aber ein Ansatz entwickelt, der dem Agenten selbst erlaubt, diese Entscheidung bei der lokalen Fahrplanauswahl zu treffen und so eine schnellere Konvergenz herbeizuführen. Es wird daher ein Parameter entwickelt, der bei der Bewertung der globalen Güte eines neuen Lösungskandidaten die Entscheidung bestimmt, ob dieser Lösungskandidat in ausreichendem Maße besser ist als der bisher gewählte Lösungskandidat. Der Sensitivitätsparameter der lokalen Fahrplanauswahl stellt Anforderungen an die minimale Steigung der Kurve der Güte der lokal bewerteten Lösungskandidaten, die durch die Konvergenzgeschwindigkeit abgebildet wird:

Der Agent a wähle nun nur dann einen neuen Fahrplan $ps_{a,p}^*$ aus seiner Domäne aus, wenn die Differenz der energiebezogenen Lieferqualität zwischen dem aus dieser Fahrplanauswahl resultierenden Lösungskandidaten γ_{ψ}^* und dem bisherigen Lösungskandidaten einen definierten Wert $\epsilon_{s,a}$ übersteigt.

Liegt nun die Differenz der Güte der beiden Produkt-Einsatzpläne unter dem gewählten Sensitivitätswert der lokalen Fahrplanauswahl, so wird der neu generierte Produkt-Einsatzplan verworfen – es wird kein neuer Lösungskandidat im System verteilt. Da auf diese Weise lediglich eine lokale Fahrplanauswahl nicht getroffen wurde, fällt dieses Vorgehen in den Bereich der Entscheidungsfindung des Agenten (siehe [Abschnitt 6.2.2](#)). Da für diese eine lokal frei zu definierende Gütefunktion verwendet werden darf, ist die Konvergenz des Verfahrens durch diese Erweiterung nicht gefährdet. Möglich ist allerdings ein Effekt auf die lokalen Minima, in denen das Verfahren konvergiert – dieser Aspekt ist in der Evaluation zu prüfen.

Es ist an der Stelle weiterhin wichtig zu erkennen, dass nur der potentielle neue Lösungskandidat verworfen wurde, der entsprechende Fahrplan aber nicht aus der Domäne

entfernt wird: Erhält der Agent in einem späteren Schritt des Verfahrens einen Lösungskandidaten, der durch die Auswahl des entsprechenden Fahrplans so verbessert wird, dass die Sensitivitätsgrenze überschritten wird, kann der Fahrplan dennoch gewählt werden. Der einmal verworfene Lösungskandidat kann aber nicht in einem späteren Schritt gewählt werden, solange die Sensitivitätsgrenze wie oben definiert konstant gewählt wird. Prinzipiell möglich und nicht konvergenzgefährdend ist auch eine stetige Steigung des Parameters über den Verlauf des Verfahrens, die in dieser Ausprägung allerdings im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit nicht weiter betrachtet wird.

7.2.2 Gebündelte Nachrichtenbearbeitung

Werden Domänen mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Fahrpläne verwendet, so ist der Lösungsraum der Probleminstanz ggf. sehr groß. Hat ein Agent einen neuen Lösungskandidaten durch lokale Fahrplanauswahl ermittelt, so versendet er diesen an die Agenten seiner Nachbarschaft. Treffen bei einem Agenten mehrere Nachrichten quasi gleichzeitig ein, so werden die enthaltenen Information in das Arbeitsgedächtnis integriert und erst dann eine lokale Fahrplanauswahl getroffen. Im Basisverfahren wird weiterhin – motiviert aus den möglichen Unterschieden der Komponenten im Feld – eine maximale Reaktionsverzögerung definiert, die dazu führen kann, dass nicht nur gleichzeitig eintreffende Nachrichten, sondern alle Nachrichten, die innerhalb einer definierten Zeitspanne eintreffen, in einem Schritt abgearbeitet werden. Diese sogenannte Reaktionsverzögerung r_a wird als Zufallszahl im Intervall $[0, r_a^{max})$ definiert. Dieser Parameter führt somit auch bei einem hohen Wert von r_a^{max} nicht zuverlässig zu einer Bündelung von Nachrichten. Es wird daher eine Erweiterung des Konzeptes vorgenommen, bei der auch die untere Grenze der Reaktionsverzögerung festgelegt werden kann. So wird erreicht, dass eine minimale Bündelung der Nachrichtenabarbeitung parametrisiert werden kann. Die nachfolgende Definition erweitert somit die Definition, wie sie in den Arbeiten zum Basisverfahren zu finden ist.

Definition 7.11 (Nachrichtenspeicher und Reaktionsverzögerung)

Die Reaktionsverzögerung eines Agenten a sei definiert als Zufallswert

$$r_a \in [r_a^{min}, r_a^{max}]$$

mit:

$$r_a^{min} \leq r_a^{max}$$

und bestimme den zeitlichen Abstand zwischen zwei Phasen der Informationsintegration einer Menge eingetroffener Nachrichten, die im Nachrichtenspeicher I (*Inbox*) vorgehalten werden.

Die minimale Reaktionsverzögerung r_a^{min} sei dabei als Untergrenze, die maximale Reaktionsverzögerung r_a^{max} sei als Obergrenze der Reaktionsverzögerung definiert.

Es gilt somit: Mit $r_a = [0, 0]$ wird jede Nachricht unmittelbar nach Eintreffen verarbeitet. Wird für r_a^{min} ein Wert größer 0 gewählt, so werden alle Nachrichten, die in der Zwischenzeit eintreffen, gebündelt verarbeitet: Der Agent integriert das erhaltene Wissen und trifft erst dann eine Entscheidung bezüglich seiner eigenen Fahrplanwahl. Mit $r_a^{min} < r_a^{max}$ wählen die Agenten den Zeitpunkt der Informationsintegration zufallsabhängig unterschiedlich – das Verhalten wird auf diese Weise desynchronisiert.

Die Reaktionsverzögerung wird somit nicht nur als möglicher Störfaktor des Verfahrens im Feld angesehen, dessen Einwirken auf Performanz und Robustheit des Verfahrens zu untersuchen ist. Die minimale Reaktionsverzögerung r_a^{min} bietet vielmehr eine Parametrierungsmöglichkeit für die zeitabhängige Bündelung von Nachrichten.

7.2.3 Abbildung von Präferenzen im Suchraum

Mit der Abbildung der Domäne als Menge zulässiger Fahrpläne werden auch Abfolgen von Betriebszustandswechseln abgebildet, die aus unterschiedlichen Gründen möglichst nicht gewählt werden sollten, z. B. weil sie die Lebensdauer der Einheit negativ beeinflussen. Auch in ökonomischer Hinsicht kann ein Agent Präferenzen bezüglich der zur Verfügung stehenden Fahrpläne aufweisen.

Es ist also an dieser Stelle wichtig, nicht nur aus den zulässigen Fahrplänen zu wählen, sondern die Präferenzen der Anlage (siehe [Definition 5.13](#)) in geeigneter Weise so abzubilden, dass die Wahl eines ungünstigen Fahrplans gegen andere Kriterien abgewogen werden kann. Die bisher definierte Domäne als Menge der zulässigen Fahrpläne kann diese Präferenzen nicht abbilden. Definiert wird daher der Suchraum des Agenten:

Definition 7.12 (Suchraum eines Agenten)

Es sei u eine Einheit und D_a die Domäne des Agenten a , für den gilt: $ua(a) = u$. Der Suchraum S_a eines Agenten a sei definiert als Menge aller Tupel von Fahrplan und zugehörigem Präferenzwert $sc_u(os)$ aller Fahrpläne der Domäne des Agenten:

$$S_a : \{ (os, sc_u(os)) \mid os \in D_a \}$$

7.2.4 Integration in die Planungsheuristik

Mit den im Zusammenhang der lokalen Fahrplanauswahl dargestellten Erweiterungen muss der Prozess der lokalen Auswahl neu definiert werden. Zur Darstellung werden wiederum die Charakteristika nach Talbi und Chapman verwendet [[Tal09](#)], [[Cha+11](#)].

1. **Informationsintegration:** Erhält ein Agent das DVPP-reduzierte Arbeitsgedächtnis eines anderen Agenten, so beginnt er die lokale Fahrplanauswahl erst dann, nachdem die Zeitspanne r_a^{min} verstrichen ist. Im Schritt der Informationsintegration verarbeitet er daher vorab alle Informationen, die bis zu dem Zeitpunkt eingetroffen sind nach den Regeln des Basisverfahrens (siehe Seite 101).
2. **Entscheidungsregel:** Der Agent trifft eine Fahrplanauswahl nach seiner individuellen Präferenzfunktion: Er wählt aus dem Suchraum einen solchen Fahrplan aus, der das Produkt verbessert und die Erfüllung der restlichen Produktbeiträge nicht verschlechtert. Hat der Agent die Möglichkeit, mit unterschiedlichen Fahrplänen die Produktgüte zu verbessern, so wählt er denjenigen mit dem besten Präferenzwert als seine aktuelle Konfiguration aus.
3. **Austausch-Kriterium:** Im letzten Schritt bewertet der Agent den neuen Einsatzplan anhand der globalen Gütefunktion: Überschreitet die Differenz der Gütewerte von neuem Einsatzplan und bisherigem Lösungskandidaten den agentenspezifischen Sensitivitätswert $\epsilon_{s,a}$, so generiert der Agent einen neuen Lösungskandidaten aus dem neuen Einsatzplan und versendet diesen mit seinem veränderten DVPP-spezifischen Arbeitsgedächtnis an seine Nachbarn. Wird der Wert $\epsilon_{s,a}$ nicht überschritten, erfolgt keine Änderung des Arbeitsgedächtnisses.

7.2.5 Zusammenfassung

Mit den dargestellten Erweiterungen bei der lokalen Fahrplanauswahl ist es möglich, eine Initialplanung für DVPPs durchzuführen, welche die Besonderheiten ggf. großer Fahrplanauswahlmengen abbildet. Über die Integration der Präferenzen in den Suchraum wird das Verfahren so erweitert, dass es neben der Zulässigkeit der Fahrpläne auch anlagenspezifische Eigenschaften abbilden kann und dennoch eine vollständige Kapselung der Agenten-Prozesse von den konkreten Anlagen-Modellen erlaubt.

Die ggf. große Menge an ähnlichen Lösungskandidaten bis zur Konvergenz des Verfahrens wird mit Hilfe von zwei Erweiterungen reduziert: Die minimale Reaktionszeit führt zu einer Bündelung von Nachrichten vor Erstellung eines neuen Lösungskandidaten, während die Sensitivität bei lokaler Fahrplanauswahl die Generierung nur geringfügig unterschiedlicher Lösungskandidaten verhindert. Angewendet wurden somit Mechanismen zur Vermeidung von Unruhe in verteilten Kontrollsystemen, die unter dem Begriff der *gedämpften Responsivität* bereits vorgestellt wurden (siehe [Abschnitt 3.3.3](#)).

Die Ergebnisse der Evaluation der hier dargestellten Erweiterungen des Basisverfahrens werden in [Kapitel 8](#) dargestellt und diskutiert.

7.3 SCHRITT 3: KONFIGURATION, EREIGNISSE UND UMPANUNG

7.3.1 Agentenmodell

In der bisherigen Darstellung der initialen Einsatzplanung wurde das Agentenmodell außer Acht gelassen. Da mit dem Übergang zur kontinuierlichen Planung auch der Übergang vom *planenden* zum *kontrollierenden Agentensystem* erforderlich ist, nimmt mit den nun folgenden Erweiterungen die Komplexität des Agentenmodells deutlich zu. Für die kontinuierliche Planung soll nun ein Agentenmodell vorgestellt werden, das sowohl eine Planungsaufgabe innerhalb des Multiagenten-Systems übernehmen kann als auch kontinuierlich auf sensorischen Input aus der physikalischen Welt reagieren und in einen kontinuierlichen Planungsprozess übergehen kann. Dabei muss ein Agent wiederholt die entsprechende Einheit und ihren Zustand einbeziehen, um Abweichungen festzustellen. Mindestens die folgenden Interaktionen mit einer Einheit sind nun erforderlich:

- **Konfiguration:** Übermitteln des Planungsergebnisses (Fahrplan) an die Einheit
- **Monitoring:** Prüfen des Betriebszustandes auf Erfüllung des Fahrplans
- **Flexibilitätserfassung:** Ermittlung der aktuell vorhandenen Flexibilität einer Einheit als Grundlage der Umplanung

Bezogen auf das SGAM (siehe S. 17) findet somit wiederholt eine Interaktion zwischen der Komponentenebene und den überlagerten Ebenen statt, während für die Initialplanung lediglich eine initiale Parametrierung der internen Einheiten-Repräsentation des Agenten zur Flexibilitätsermittlung erforderlich ist. Das im Folgenden dargestellte Agentenmodell wird im weiteren Verlauf um ein Zustandsmodell ergänzt. In [Abschnitt 7.4](#) werden die Prozesse der Umplanung schließlich zusammenfassend dargestellt.

In [Abschnitt 3.3](#) wurden unterschiedliche Agenten-Architekturen dargelegt. In [[Mül99](#)] werden zwei unterschiedliche Dimensionen für eine Charakterisierung von Agenten definiert, welche die Auswahl einer geeigneten Agenten-Architektur erleichtern sollen: Nach dem **Bezug zur physikalischen Welt** werden Hardware- und Software-Agenten definiert: Während Software-Agenten letztlich verteilte interagierende Software-Programme sind, haben Hardware-Agenten eine physikalische Gestalt, eine Materialisierung in der physikalischen Welt. Für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP sind beide Ausgestaltungen denkbar (siehe dazu auch [Kapitel 9](#)). In jedem Fall kann festgehalten werden, dass die Agenten zwar in der Agenten-Welt mit mehreren Agenten kommunizieren (ihrer jeweils Produkt-spezifischen Nachbarschaft), auf der Einheiten-Ebene aber eindeutig einer Einheit zugeordnet sind (siehe [Definition 5.14](#)). Daher sind die Agenten zwar einerseits prinzipiell

als Hardware-Agenten in einem eingebetteten System denkbar, zeigen aber deutlich reduzierte Anforderungen bezüglich der Komplexität der Wahrnehmung der physikalischen Welt: Wie oben dargestellt erhält ein Agent den sensorischen Input von nur einer festgelegten Einheit. Im Vergleich zu Agenten, die mobile Roboter in einem Produktionsumfeld steuern, ist das eine deutlich reduzierte Komplexität.

Die zweite Dimension in der Kategorisierung von Agenten stellt die **Interaktion mit der Welt** dar: Die Einheiten-Agenten der kontinuierlichen Einsatzplanung interagieren sowohl mit der physikalischen als auch mit der Agenten-Welt. In beiden Bereichen müssen sowohl reaktive als auch proaktive Verhaltensweisen umgesetzt werden. Es ist daher zu erwägen, ob gängige Architekturen zur Umsetzung von hybriden Agenten-Architekturen für KEP geeignet sind. Werden Anforderungen an die Interaktion mit der physikalischen Welt gestellt, sind v.a. geschichtete Ansätze interessant, welche die unterschiedlichen Wissens- und Entscheidungsebenen so abbilden können, dass sie ein Abbild des Verfahrens und damit eine möglichst direkte Umsetzung in einer Software-Architektur erlauben. Es wurden daher geschichtete Agenten-Architekturen genauer untersucht. Vertikal geschichtete Architekturen bilden intuitiv die unterschiedlichen Ebenen der Konzeptualisierung ab. Die bereits dargestellte Agenten-Architektur InteRRaP (siehe [Abschnitt 3.3](#)) kann auf die Umsetzung in der kontinuierlichen Anwendung angewendet werden, wird hier allerdings mit einer Modifikation in der Darstellung (ohne Änderung des konzeptuellen Gefüges) verwendet: In den gängigen Darstellungen zu InteRRaP wird die Interaktion mit der Agentenwelt einerseits und der physikalischen Welt andererseits nicht konzeptuell getrennt. Damit wird ein Prozessmodell, das Interaktionen im reaktiven und proaktiven Bereich auf beiden Seiten beinhaltet, weniger leicht nachvollziehbar, da es keine Entsprechung im Architekturmodell findet. Das Agentenmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung wird daher so dargestellt, dass sowohl auf der Kooperationsebene als auch auf der Einheiten-Ebene Interaktionen mit der entsprechenden Welt leichter erkennbar sind. Übertragen wird auch das Konzept einer hierarchischen Wissensbasis, wie es in InteRRaP dargelegt ist: Es erlaubt eine direkte Abbildung der Schichten der Konzeptualisierung. So kann der Zugriff auf bestimmte Daten innerhalb der auf dem Agentenmodell realisierten Prozesse verdeutlicht werden. In diesem Sinne stellt das nun vorgestellte Agentenmodell eine von InteRRaP abgeleitete Architektur dar, auf der die im Anschluss dargelegten Prozesse ausgeführt werden.

In [Abbildung 7.6](#) sind die Ebenen des Agentenmodells dargestellt. Jeder Agent verfügt zunächst über zwei Schnittstellen: Die Kooperationschnittstelle dient der Kooperation in der Agentenwelt, während die Einheitenschnittstelle die Interaktion mit der Anlage für die oben dargestellten Aspekte der Flexibilitätserfassung, der Konfiguration und des Monitorings erlaubt. Innerhalb des Agenten finden sich zum einen die Verhaltensebenen, zum anderen die Ebenen des Weltmodells, die das Wissen über beide Welten hierarchisch abbilden.

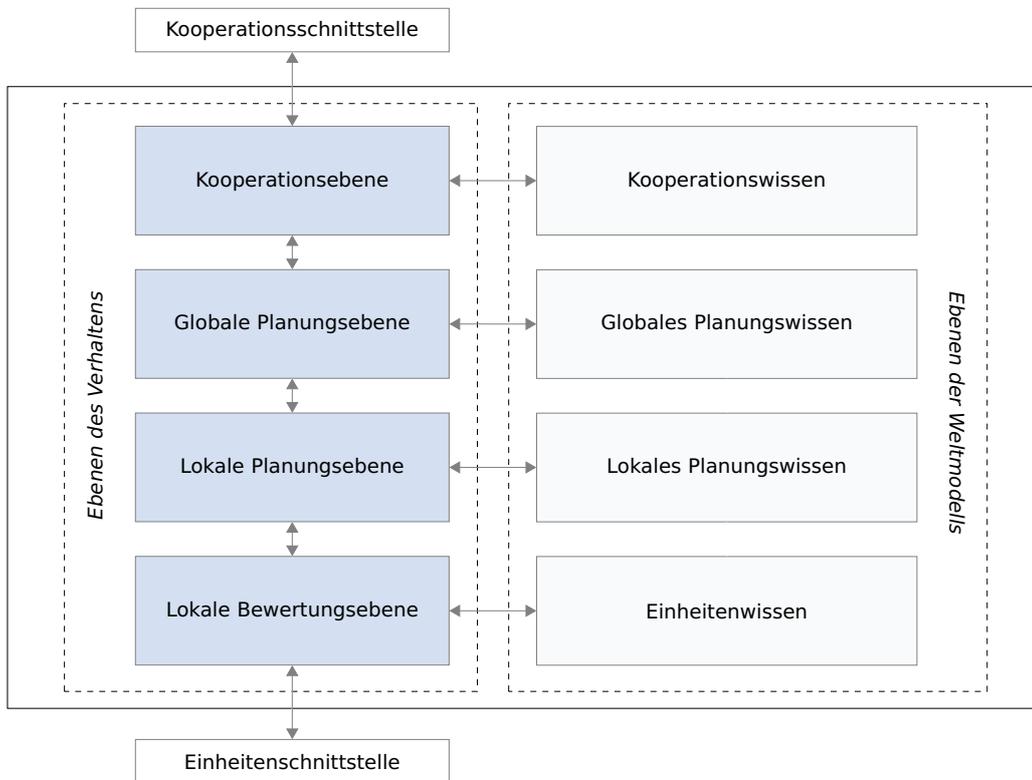


Abbildung 7.6: Hybrides Agentenmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung im Überblick

Die **Kooperationsebene** stellt die Verhaltensweisen bei der Interaktion mit anderen Agenten dar. Auf der entsprechenden Wissensschicht, im Kooperationswissen, erfasst der Agent die Agenten, mit denen er kommunizieren kann (seine produktspezifischen Nachbarschaften N_{ψ}) sowie die erhaltenen Nachrichten, die er im Nachrichtenspeicher I vorhält.

Die **globale Planungsebene** realisiert die Verarbeitung erhaltener Nachrichten sowie die Ermittlung neuer Lösungskandidaten. Das globale Planungswissen beinhaltet daher das Arbeitsgedächtnis κ des Agenten, dessen Bestandteile im weiteren Verlauf noch erweitert werden.

Die **lokale Planungsebene** realisiert die Verhaltensweisen der lokalen Fahrplanauswahl. Auf der Ebene des lokalen Planungswissens bildet der Agent sein planungsrelevantes Wissen über die Einheit ab.

Die **lokale Bewertungsebene** realisiert die Interaktionsprozesse mit der Einheit und wird mit der zugehörigen Ebene des Weltmodells im folgenden anhand der erforderlichen

Interaktionsprozesse dargelegt.

7.3.2 Konfiguration einer Einheit

Bisher dargestellt wurde der Anwendungsfall der Initialplanung, bei der der kooperativ ermittelte Einsatzplan zwar allen Agenten bei Terminierung des Verfahrens vorliegt, aber noch keine Konfiguration der Einheit vorgenommen wurde. Dieser Aspekt ist der Einbindung des Verfahrens in die Day-Ahead-Planung geschuldet: Die Agenten planen für den Folgetag. Mit dem Ergebnis des Planungsprozesses liegt den Agenten mit dem aktuell gewählten Fahrplan os^* eine Konfiguration vor, welche ihre Produktbeiträge für alle DVPPs ihrer Affiliationsmengen im Planungshorizont abbilden. Es ist also erforderlich, dass die Agenten diesen Fahrplan rechtzeitig vor Beginn des im Fahrplan spezifizierten Planungshorizontes an ihre Einheiten übermitteln. Rechtzeitig kann in diesem Zusammenhang so gefasst werden, dass die Einheiten im dem Planungshorizont vorangehenden Planungsintervall konfiguriert werden. Dazu wird zunächst der entsprechende Fahrplan gekennzeichnet:

Definition 7.13 (Aktivierter Fahrplan)

Sei os^* der gewählte Fahrplan eines Agenten für den Planungshorizont T_{pl} und $t^{(i)}$ der erste Planungsintervall dieses Planungshorizontes. Der gewählte Fahrplan os^* , der dem Agenten im Planungsintervall $t^{(i-1)}$ vorliege, sei gekennzeichnet als *aktivierter Fahrplan* os_{act}^* .

Verbunden mit dem aktivierten Fahrplan os_{act}^* ist nun der Prozess der Konfiguration einer Einheit, der folgendermaßen realisiert wird: Im letzten Planungsintervall vor Beginn des Planungshorizontes des Produktes p , zu dem der Agent a im DVPP ψ einen Beitrag zu erbringen hat, bestimme der Agent a den aktivierten Fahrplan os_{act}^* und übertrage ihn zur Ausführung an die von ihm repräsentierte Einheit u . In [Abbildung 7.7](#) sind die dargestellten Prozesse anhand der beteiligten Verhaltensebenen des Agentenmodelles dargestellt.

Mit Abschluss dieser Prozesse führt der Agent neben dem kontinuierlichen Nachrichtempfang zusätzlich den kontinuierlichen Prozess des Monitorings aus: Neben der Wahrnehmung der Agentenwelt wird nun auch die Wahrnehmung der physikalischen Welt kontinuierlich durchgeführt. In [Abschnitt 7.4.2](#) werden die wichtigsten Prozessabläufe der kontinuierlichen Einsatzplanung im Zusammenhang dargestellt, während im Folgenden jeweils die für den jeweiligen Schritt erforderlichen Prozesse dargelegt werden.

7.3.3 Detektion von Ereignissen auf der lokalen Bewertungsebene

Hat ein Agent seiner Einheit einen Fahrplan zur Ausführung übergeben, beginnt er mit dem Monitoring der Einheit: In jedem Monitoring-Intervall fragt er den Betriebszustand

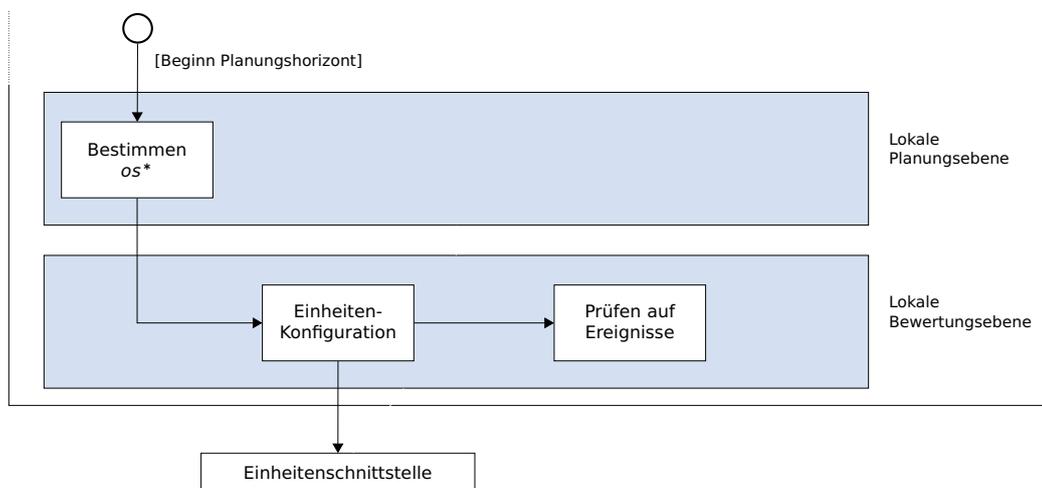


Abbildung 7.7: Einheiten-Konfiguration und Beginn des Monitorings: Mit Beginn des Planungshorizontes bestimmt der Agent auf der lokalen Planungsebene den aktivierten Fahrplan und übergibt für die Konfiguration der Einheit und das nachfolgende Monitoring an die lokale Bewertungsebene.

der Einheit ab. Die zeitliche Auflösung des Monitorings kann dabei beliebig klein sein und den technischen Möglichkeiten und Erfordernissen angepasst werden. Während in den hier dargelegten Prozessen der Agent aktiv den Betriebszustand der Einheit abfragt, sind andere und schon heute technisch mögliche Umsetzungen denkbar: Im internationalen Standard IEC 61850 ist z. B. ein Konzept vorgesehen, bei dem eine Einheit in definierten Zeitabständen Monitoring-Werte an subscribierende Entitäten (hier: Agenten) sendet [Int10]. Ein solche Umsetzung ist möglich und gleichwertig. Hinweise zur Anbindung von DEU auf Basis von IEC 61850 finden sich z. B. in [ABS14].

Es wird im Folgenden vorausgesetzt, dass mindestens zu jedem Planungsintervall ein Monitoring-Wert erfasst wird. Im hier gewählten Zeitmodell und der prototypischen Implementierung wurde zu einem Planungsintervall von 15 Minuten eine Monitoring-Auflösung von 1/Minute gewählt. Eine entsprechende Verrechnung der gemessenen Leistungswerte führt schließlich zu den in der Historie H_u einer Einheit u abgelegten Werten in der zeitlichen Auflösung des entsprechenden Planungsintervalls:

Definition 7.14 (Aktuelles Planungsintervall und Historie)

Es sei $t_{act}^{(k)}$ das **aktuelle Planungsintervall** im aktuellen Planungshorizontes T_{pl} mit:

$$T_{pl} = (t^{(0)}, t^{(1)}, \dots, t^{(i_{max})},)$$

Die Historie H_u einer Einheit u weise jedem verstrichenen Planungsintervall $t^{(i)}$ einen Betriebszustand $e_u^{(i)}$ zu:

$$H_u : T_{pl} \rightarrow \mathbb{R},$$

$$H_u(t^{(i)}) = e_u^{(i)}, \quad 0 \leq i < k$$

Sie liefert somit zu einem vergangenen Planungsintervall des Planungshorizontes den Betriebszustand, den die Einheit u in diesem Planungsintervall eingenommen hat.

Mit Abschluss eines Planungsintervalls kann ein Agent nun prüfen, ob die bisher eingenommenen Betriebszustände den Fahrplan erfüllen oder nicht. Dabei kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Einheit exakt die Werte des Fahrplans in allen Monitoring-Intervallen einnimmt: Es ist prinzipiell zulässig, dass erst im letzten Monitoring-Intervall eines Planungsintervalls ein Betriebszustand eingenommen wird, der die Fahrplanvorgabe erfüllt. Steht dem Agenten kein prognosefähiges Anlagenmodell zur Verfügung, kann der Agent erst mit Ablauf eines Planungsintervalls entscheiden, ob ein Ereignis stattgefunden hat – die Ereigniserkennung ist somit reaktiv. Bei der Ermittlung der Zeitanforderungen der kontinuierlichen Einsatzplanung (siehe Seite [Abbildung 6.1](#)) wurde dieser Aspekt bereits illustriert. In [Abbildung 7.8](#) wird zusammenfassend dargestellt, welches Wissens ein Agent im *Einheitenwissen* abbildet, um die Detektion eines Ereignisses durchzuführen.

Mit Beginn eines neuen Planungsintervalls ermittelt nun ein Agent die *produktspezifische Planungsabweichung* $\chi_p^{(k)}$. An Informationen steht dem Agenten die Planung aller Agenten des DVPP für das entsprechende Produkt sowie für seine eigene Einheit die Historie zur Verfügung. Über das tatsächliche Verhalten der anderen Einheiten hat der Agent keine Informationen, falls diese nicht bereits selbst ein Ereignis detektiert und kommuniziert haben. Für die nachfolgende Beschreibung soll das zunächst angenommen werden.

Für seine eigene Einheit u kennt der Agent die Historie H_u , die also das Verhalten im aktuellen Planungsintervall noch nicht umfasst. Da die Bewertung der Planabweichung eine Umplanung erst im übernächsten Intervall zur Folge hat, muss eine Annahme über den Betriebszustand der Einheit u im aktuellen Planungsintervall $t_{act}^{(i)}$ getroffen werden: Der Agent nimmt vereinfachend an, dass eine detektierte Abweichung seiner Einheit im letzten Planungsintervall sich im aktuellen Planungsintervall entsprechend fortsetzt: Ein Anlagenausfall wird somit auch im aktuellen Intervall als Ausfall angenommen, eine Fahrplanabweichung prozentual auf den aktuell vorgesehenen Betriebszustand übertragen.⁶

⁶In Folgearbeiten sollte geprüft werden, für welche Einheitentypen und Ereignisse eine solche Annahme

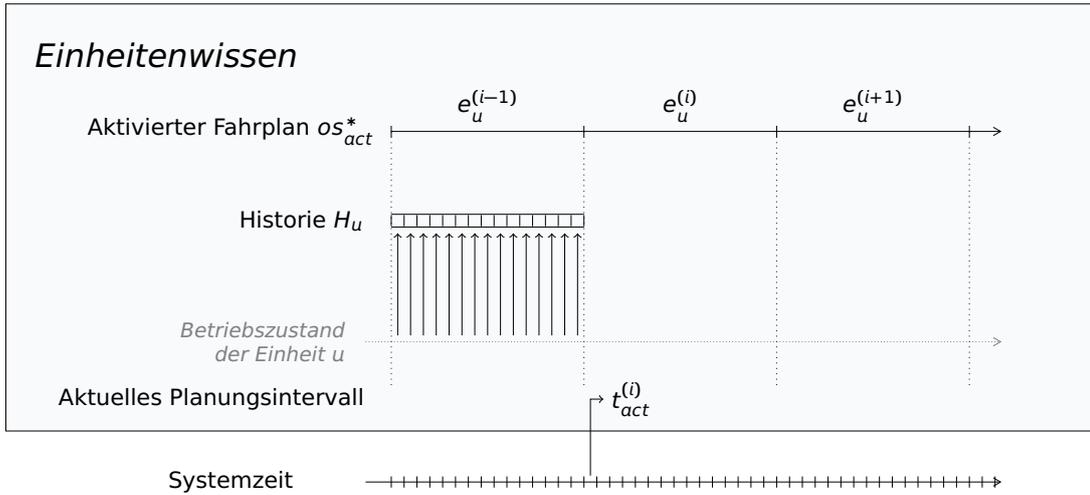


Abbildung 7.8: Einheitenwissen des Agenten zur Detektion von Ereignissen zu Beginn des Planungsintervalls $t^{(i)}$. Der Betriebszustand der Einheit u ist nur zur Illustration abgebildet und bildet keinen Bestandteil des Einheitenwissens, sondern wird über den in jedem Monitoring-Intervall abgefragten Betriebszustand in der Historie abgebildet.

Definition 7.15 (Geplante Produkteinsatzplanerfüllung)

Es sei a_n ein Agent des DVPP ψ , welches ein Produkt mit dem Produktzeitraum $T_{pr}^{(s,t)}$ liefern muss, der Produkteinsatzplan ps_ψ der in der Initialplanung ermittelte Produkteinsatzplan und $t_{act}^{(k)}$ das aktuelle Planungsintervall.

Die geplante Produkteinsatzplanerfüllung $\sigma_p^{(k)}$ sei definiert als:

$$\sigma_p^{(k)} = \sum_{a_m \in \psi} \sum_{i=s}^k e_{u_m}^{(i)},$$

mit der Einheiten-Zuordnung $ua(a_m) = u_m$.

Die geplante Produkteinsatzplanerfüllung $\sigma_p^{(k)}$ liefert somit die Angabe zur Energiemenge, die auf Basis des Produkteinsatzplanes ps_ψ durch das DVPP bis zum aktuellen Planungsintervall $t_{act}^{(k)}$ bereitgestellt werden würde.

Liegt das aktuelle Planungsintervall bereits innerhalb des Produktzeitraumes, so stehen einem Agenten a_n für seine eigene Einheit u_n die Werte des bisherigen Betriebsverhaltens in der Historie H_u zur Verfügung. Zur Bewertung eines Produkteinsatzplanes kann dieser Wert nun so verwendet werden, dass für die bereits vergangenen Planungsintervalle die in der Historie enthaltenen Werte verwendet werden: Der Agent verwendet somit für die Planung

verfeinert werden kann. Auch für diese Aspekte erscheint der Einsatz vorhersagefähiger Modelle sinnvoll.

und Bewertung für seine eigene Einheit das Wissen der physikalischen Welt. Für die anderen Agenten und Einheiten stehen im lediglich die Informationen aus der Agenten-Welt zur Verfügung. Mit diesem Wissen bestimmt der Agent die erwartete Produkterfüllung:

Definition 7.16 (Erwartete Produkterfüllung)

Es sei $t_{act}^{(k)}$ das aktuelle Planungsintervall, und weiterhin gelte

$$s < k < t,$$

d. h. das aktuelle Planungsintervall befindet sich innerhalb des betrachteten Produktzeitraums und es handelt sich nicht um das letzte Planungsintervall des Produktzeitraumes.⁷

Die anteilige Planabweichung $\text{dev}_u^{(i)}$ bezeichne das Verhältnis der Abweichung von tatsächlich gelieferter Energiemenge $e_H^{(i)}$ zu geplanter Energiemenge $e_u^{(i)}$ im Intervall $t^{(i)}$:

$$\text{dev}_u^{(i)} = \frac{e_H^{(i)}}{e_u^{(i)}}$$

Die erwartete Produkt-Einsatzplanerfüllung $\hat{\sigma}_p^{(k)}$ ergibt sich nun wie folgt:

$$\hat{\sigma}_p^{(k)} = \sum_{a_m \in \psi \setminus a_n} \sum_{i=p}^k e_{u_m}^{(i)} + \sum_{i=p}^{k-1} e_H^{(i)} + e_u^{(k)} \cdot (1 - \text{dev}_u^{(k-1)})$$

Dabei bezeichnet der erste Teil des Terms die erwartete Produkterfüllung aller anderen Agenten (entsprechend der Definition der geplanten Produkterfüllung). Der mittlere Teil des Terms entspricht der bereits durch die Einheit gelieferten Energiemenge, die sich aus der Historie H_u errechnen lässt. Der dritte Teil des Terms schließlich entspricht der Prognose für das aktuelle Planungsintervall: Von der geplanten Energiemenge $e_u^{(k)}$ wird die auf Basis der Planabweichung $\text{dev}_u^{(k-1)}$ ermittelte erwartete Abweichung abgezogen (bzw. addiert bei negativem Vorzeichen).

Mit der erwarteten Produkterfüllung $\hat{\sigma}_p^{(k)}$ und der geplanten Produkterfüllung $\sigma_p^{(k)}$ steht dem Agenten das Wissen zur Verfügung, um die produktspezifische Planabweichung zu ermitteln:

Definition 7.17 (Produktspezifische Planabweichung)

Die *produktspezifische Planabweichung* $\chi_p^{(k)}$ des Produkteinsatzplanes ps_ψ sei nun definiert über das Verhältnis von erwarteter Produkterfüllung $\hat{\sigma}_p^{(k)}$ zu geplanter Produkter-

füllung $\sigma_p^{(k)}$ wie folgt:

$$\chi_p^{(k)} = \left| 1 - \frac{\hat{\sigma}_p^{(k)}}{\sigma_p^{(k)}} \right|$$

Die produktspezifische Planabweichung soll an einem vereinfachten Beispiel erläutert werden, bei dem die Einheit bereits im ersten Intervall nicht den geplanten Betriebszustand einnehmen kann. Die folgenden Anforderungen werden an die Detektion eines Ereignisses gestellt:

1. Sowohl eine Unter- als auch eine Übererfüllung des Produktes ist unerwünscht.
2. Die Bewertung einer Abweichung muss in Zusammenhang mit der Gesamtenergiemenge des Produktes stehen: Eine Abweichung hat unterschiedliche Relevanz für die Produkterfüllung, abhängig nicht nur von der geplanten Energiebereitstellung der Einheit, sondern weiterhin von der geplanten Energiemenge des Produktes.

Beispiel 7.2

Das DVPP ψ bestehe aus 5 Einheiten-Agenten. In der initialen Einsatzplanung wurde der folgende Einsatzplan ermittelt (Angaben pro Intervall in kWh):

Agent	$e^{(48)}$	$e^{(49)}$	$e^{(50)}$	$e^{(51)}$	Produktbeitrag (kWh)
UA_0	5	5	5	5	5
UA_1	5	5	5	5	5
UA_2	1	1	1	1	1
UA_3	1	1	1	1	1
UA_4	1	1	0	0	0.5
Gesamt					12.5

Kommt es nun im Planungsintervall $(i-1)$ zu einer Abweichung im Betriebszustand der Einheit UA_0 , so wird diese in $t^{(i)}$ erkannt und mit Hilfe der produktbezogenen Planabweichung $\chi_p^{(k)}$ bewertet. Dabei ist dieser Wert abhängig von dem Anteil, den die betroffene Einheit bis zum aktuellen Intervall am Produkt hat.

⁷Mit der Einschränkung $s < k < t - 1$ wird ein Ereignis nur detektiert, wenn es auch noch prinzipiell im Produktzeitraum des aktuellen Produktes kompensiert werden kann. Dennoch ist es möglich, dass das Ereignis im aktuellen Produktintervall nicht mehr kompensiert werden kann. Ereignisse werden in diesem Fall trotzdem im Rahmen einer proaktiven Dämpfung weiterverarbeitet.

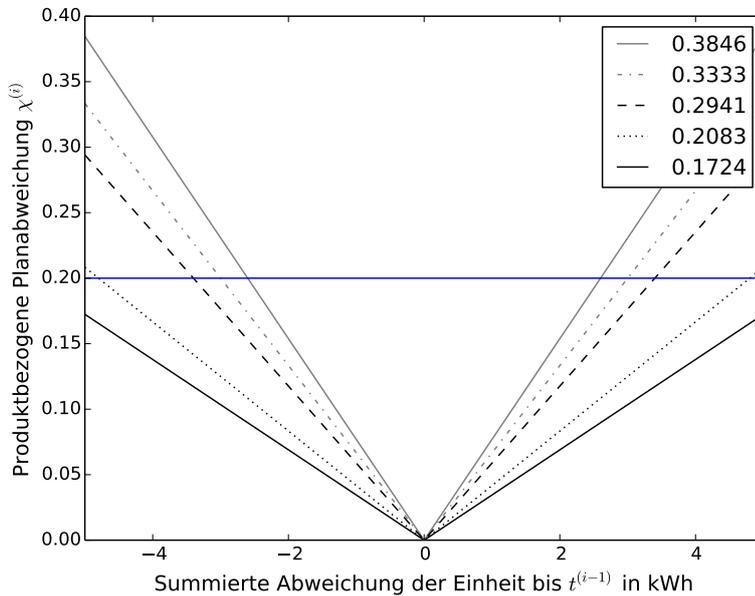


Abbildung 7.9: Produktbezogene Planabweichung $\chi_p^{(k)}$ an einem einfachen Beispiel. Dargestellt ist die produktbezogene Planabweichung abhängig von der summierten Abweichung von der geplanten Lieferung der betroffenen Einheit für unterschiedliche Initialpläne. Angegeben ist jeweils der Anteil der Einheit am Produkt bis zum aktuellen Planungsintervall $t_{act}^{(i)}$.

In der vorangestellten Abbildung ist der Effekt für unterschiedliche Anteile der Einheit UA_0 am Produkt dargestellt. Jeweils eine Linie repräsentiert die produktbezogene Planabweichung bei unterschiedlichen Anteilen der von einer Abweichung betroffenen Einheit. Je kleiner nun der Anteil der Einheit bis zum aktuellen Produktintervall am Produkt, desto kleiner ist der entsprechende Wert der produktbezogenen Planabweichung. Die horizontale Linie stellt eine beispielhafte Grenze zur Einstufung einer Abweichung als Ereignis dar. Es ist weiterhin erkennbar, dass eine Unter- und Übererfüllung des Produktes gleich gewertet wird.

Geringe Abweichungen vom im Fahrplan vorgegebenen Betriebszustand müssen als normal angesehen werden. Daher wird eine Ereignisgrenze $\epsilon_{inc,a}$ (*inc* von *incident*: Ereignis) definiert, die dem Zweck dient, eine Abweichung im Betriebszustand nur dann als Ereignis zu bearbeiten, wenn dadurch entweder eine Einschränkung des zu liefernden Produktes erwartet wird oder aber neu entstandene Flexibilitäten eine kostengünstigere Umsetzung des Produktes erlauben:

Definition 7.18 (Ereignisgrenze und Ereignis)

Es sei $\epsilon_{inc,a} \in \mathbb{R}^+$ die Ereignisgrenze des Agenten a .

Ist $\chi_p^{(k)} \geq \epsilon_{inc,a}$, so hat der Agent ein Ereignis $inc_a^{(k-1)}$ erkannt.

Mit der eindeutigen Zuordnung des Intervalls zu einem Produkt ist auch die Zuordnung des Ereignisses zum entsprechenden Produkt eindeutig.

Hat der Agent über seine Historie eine produktspezifische Planabweichung festgestellt, die die definierte Grenze überschreitet, so gilt der Produktfahrplan als *nicht erfüllt*. Über die Betrachtung der Betriebszustände in der Historie, d. h. in den vergangenen Planungsintervallen des Produktes, werden Abweichungen gebündelt als Ereignisse bearbeitet: Eine Abweichung in einem Intervall des Produktes führt ggf. erst in Kombination mit einer Abweichung im Folgeintervall zur Detektion eines Ereignisses.

Die Einführung einer Ereignisgrenze entspricht weiterhin dem Prinzip der *damped responsiveness*, also der **gedämpften Responsivität**, wie sie für den Bereich der kontinuierlichen Planung in Agentensystemen vorgeschlagen werden (siehe [Abschnitt 3.3.3](#)).

7.3.4 Verarbeitung eines Ereignisses auf der lokalen Planungsebene

Wurde auf der **Einheitenebene** ein Ereignis erkannt, so wird es zur Bearbeitung an die **lokale Planungsebene** übergeben.

Phase I: Ereignisdetektion mit lokaler Kompensation In der Konzeptualisierung wurde ein Ereignis bereits dahingehend definiert, dass es die Domäne des Agenten verändert (siehe Seite 77): Mindestens der bisher gewählte Fahrplan ist nicht mehr Bestandteil der Domäne, und damit entfällt das entsprechende Tupel aus Fahrplan und Präferenzwert aus dem Suchraum S . Um nun einen neuen Fahrplan auswählen zu können, mit dem eine Behebung des detektierten Ereignisses möglich sein könnte, muss also zunächst die Domäne und damit auch der Suchraum neu generiert werden.

Mit dem neu generierten Suchraum kann der Agent nun prüfen, ob ein neuer Fahrplan im Suchraum enthalten ist, der sowohl das aktuell vom Ereignis betroffene Produkt als auch die weiteren Produkte in der Zukunft erfüllt. Dazu stehen dem Agenten auf der lokalen Planungsebene neben dem neu generierten Suchraum S^* und dem gewählten Fahrplan os^* die Produkt-Fahrpläne ps_p für alle DVPPs der Affiliationsmenge \mathbb{A}_a des Agenten a zur Verfügung.

Gelingt die Fahrplanauswahl auf Basis dieser Produktverpflichtungen, so kann das Ereignis **lokal kompensiert** werden.

Definition 7.19 (Lokale Kompensation)

Sei $inc_a^{(i)}$ ein Ereignis, das den Agenten a betrifft, und S^* der neue Suchraum des Agenten.

Eine lokale Kompensation sei dann erreichbar, wenn gilt:

$$\exists (os^*, sc(os^*)) \in S^* : \chi_p^{(k)*} < \epsilon_{inc,a} \quad \forall p \in \mathbb{A}_a$$

mit $\chi_p^{(k)*}$ als produktspezifischer Planabweichung des Produkteinsatzplanes, der mit dem produktrelevanten Fahrplanausschnitt von os^* gegeben ist.

Existiert also ein Fahrplan-Präferenzen-Tupel in neuem Suchraum S^* , mit dem die Ereignisgrenze $\epsilon_{inc,a}$ für alle Produkte, an deren Lieferung der Agent beteiligt ist, unterschritten würde, so ist eine lokale Kompensation erreichbar.

Gelingt also die Identifikation eines Fahrplans für den verbleibenden Planungshorizont, der die ausstehenden Produkte erfüllt, so kann die Einheit mit diesem Fahrplan rekonfiguriert werden. In [Abbildung 7.10](#) sind die entsprechenden Prozesse anhand der beteiligten Ebenen des Agentenmodells schematisch dargestellt.

Es ist zu beachten, dass im Falle einer lokalen Kompensation der Produkt-Fahrplan des Agenten nicht mehr dem Fahrplan im Lösungskandidaten entspricht, der den anderen Agenten mit Ende des letzten Planungsprozesses vorliegt. Bezogen auf das zu liefernde Produkt sind die Pläne aber gleichwertig, so dass eine Information der anderen Agenten des DVPP unnötig ist. Nur mit der DVPP-globalen Gütefunktion ist dieser Schluss zulässig – diese ist aber bereits für die Konsistenz des Verfahrens erforderlich und kann daher an dieser Stelle vorausgesetzt werden.

Das Konzept der lokalen Kompensation entspricht dem Prinzip der **Abstraktion**, wie es für hoch dynamische Systeme empfohlen wird [[DZ13](#)]. Es dient der Vermeidung von Unruhe im dynamischen Planungs- und Kontrollsystemen (siehe [Abschnitt 3.3.3](#)).

7.3.5 Gestufte Verarbeitung eines Ereignisses auf der globalen Planungsebene

Konnte das Ereignis auf der lokalen Planungsebene nicht lokal kompensiert werden, so wird es an die globale Planungsebene weitergegeben: In jedem Fall muss nun eine Umlanung angestoßen werden, allerdings wurde noch nicht bewertet, ob dieses für das aktuelle Produkt und/oder eines der zukünftigen Produkte des Planungshorizontes erfolgen muss. Diese Ermittlung erfolgt nun auf der globalen Planungsebene.

Phase II: Proaktive Dämpfung mit lokaler Kompensation Zunächst versucht der Agent einen Fahrplan aus seinem Suchraum zu ermitteln, der das Ereignis für das aktuelle

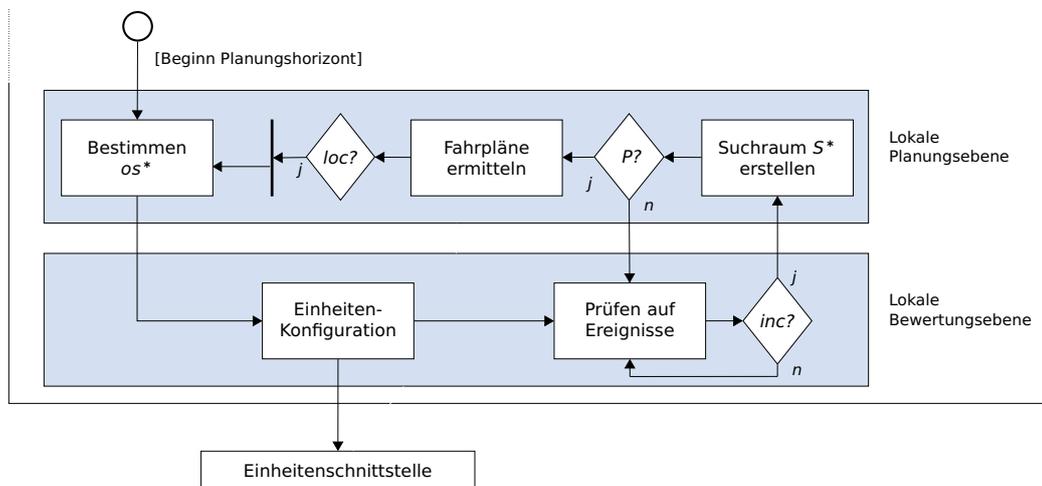


Abbildung 7.10: Phase I: Prozesse der Ereignisdetektion und lokalen Kompensation. Kann ein Agent auf der lokalen Planungsebene anhand seines neu generierten Suchraumes einen Fahrplan identifizieren, der die Produktverpflichtungen erfüllt, so aktiviert er diesen Fahrplan und gibt ihn für Einheitenkonfiguration und nachfolgendes Monitoring an die lokale Bewertungsebene weiter. *inc?*: Wurde ein Ereignis detektiert? *P?*: Ist ein Produkt betroffen? *loc?*: Ist eine lokale Kompensation möglich?

Produkt kompensiert und innerhalb der parametrierbaren Zulässigkeitsgrenze der Präferenzen verbleibt. Gelingt dem Agenten diese Suche, so führt er die folgenden Schritte aus:

1. Er wählt den entsprechenden Fahrplan als gewählten Fahrplan os^* aus.
2. Für das erste betroffene zukünftigen Produkt löst er eine Umplanung aus (siehe den nachfolgend beschriebenen Ablauf zum Auslösen einer Umplanung).

Der Agent parametriert in diesem Schritt somit seine Einheit mit dem gewählten Fahrplan, so dass die Kompensation des Ereignisses für das aktuelle Produkt abgeschlossen ist.

Da eine Abweichung der Einheit vom Produkt-Fahrplan zukünftiger Produkte nicht mehr zu vermeiden ist, stößt der Agent gleichzeitig proaktiv eine Planung für das erste betroffene Produkt an; das globale Planungswissen wird zu diesem Zweck erweitert. Die entsprechenden Abläufe der Umplanung sowie die dazu erforderlichen Definition werden weiter unten in [Abschnitt 7.3.6](#) dargestellt.

Phase III: Anstoßen einer Umplanung In Phase II wurde ein Fahrplan gesucht, der das Ereignis für das aktuelle Produkt lokal kompensieren kann, aber ggf. Ereignisse in zukünftigen Produkten zur Folge hätte. Gelingt die Auswahl eines lokal kompensierenden

Fahrplans auch in diesem Schritt nicht, so erfolgt der Übergang zur Phase III. In dieser Phase löst der Agent eine Umplanung für das aktuelle Produkt aus.

7.3.6 Umplanung

Eine Umplanung wird in den folgenden Fällen angestoßen:

- **Phase II:** Eine lokale Kompensation des aktuellen Ereignisses ist erfolgt, allerdings ist nach den Planungsinformationen des Agenten mindestens eines der nachfolgenden Produkte durch die Umplanung von einem Ereignis betroffen. Für das erste nachfolgende betroffene Produkt wird eine Umplanung angestoßen.
- **Phase III:** Eine lokale Kompensation ist nicht erfolgt. In diesem Fall wird die Umplanung für das aktuell von einem Ereignis betroffene Produkt durchgeführt.

Die Abläufe der Umplanung sind in beiden Fällen gleich: In beiden Fällen muss – da das System sich bereits im Planungshorizont des jeweiligen Produktes befindet – berücksichtigt werden, dass ein Teil der Fahrpläne bereits bearbeitet wurde. Auf der Implementierungsebene ist dieses durch das Zeitfenster-Konzept (*sliding window*) umzusetzen. Zur einfacheren Nachvollziehbarkeit sei hier lediglich auf diesen Aspekt verwiesen. Die Prozesse zur Vorbereitung und Auslösung einer Umplanung sind in [Abbildung 7.11](#) im Zusammenhang mit den bereits erläuterten Prozessen der Phasen I und II dargestellt. Auf der globalen Planungsebene erweitert der Agent zunächst sein produktspezifisches Arbeitsgedächtnis (siehe [Abbildung 7.11](#), Prozess: $\hat{\kappa}_\psi$ aktualisieren), indem er die Zählvariable des als ungültig markierten Produkt-Fahrplans in sein Arbeitsgedächtnis als **Ereignis-Information** integriert:

Definition 7.20 (Ereignis-Speicher)

Der *DVPP-spezifische Ereignis-Speicher* eines Agenten a weist Einheiten-Agenten die Zählvariable ν_{os} des zuletzt durch den Agenten für das entsprechende DVPP für ungültig erklärten Fahrplanes zu:

$$\eta_{a,\psi} : a_i \mapsto \nu_{os} \in \psi$$

Der Ereignis-Speicher η_a des Agenten a fasst die DVPP-spezifischen Ereignisspeicher des Agenten für alle DVPP der Affiliationsmenge des Agenten zusammen:

$$\eta_a = \{ \eta_{a,\psi} \mid \psi \in \mathbb{A}_a \}$$

Das Wissen um eingetretene Ereignisse wird nun im Arbeitsgedächtnis abgebildet:

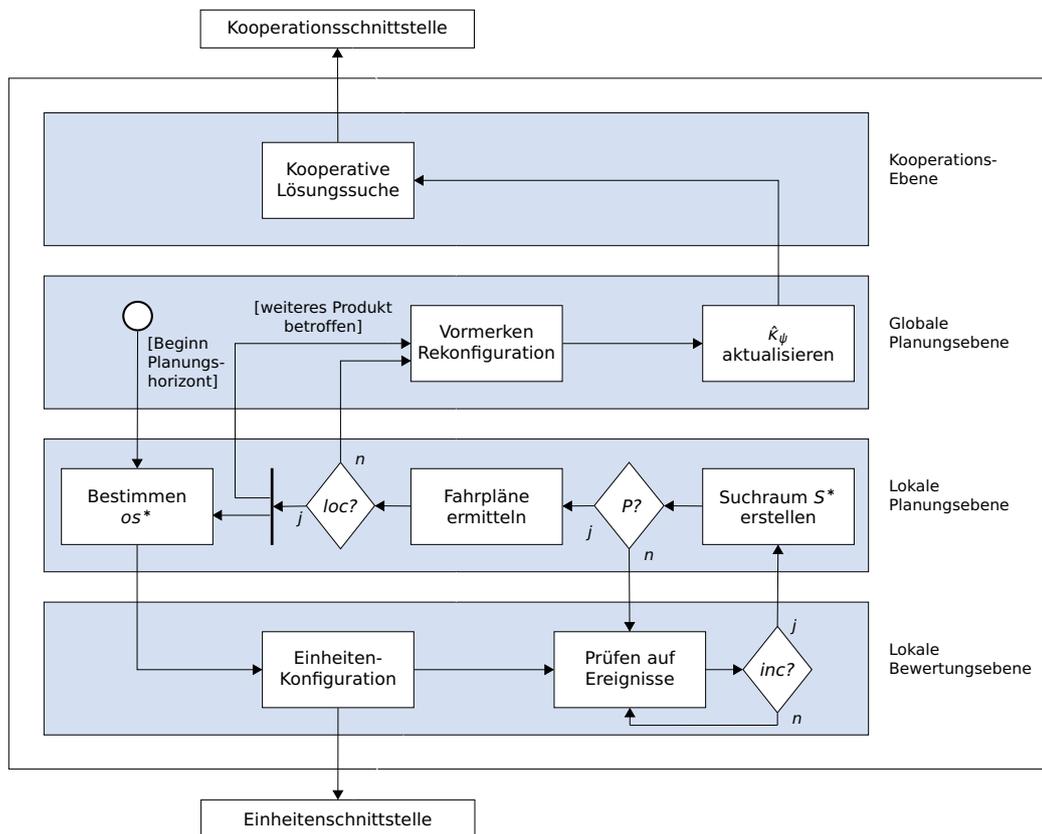


Abbildung 7.11: Phase II und III: Prozesse zum Auslösen einer Umplanung. Kann ein Agent auf der lokalen Planungsebene keine lokale Kompensation erreichen oder sind durch die erfolgte Kompensation nachfolgende Produkte betroffen, so merkt der Agent den Rekonfigurationszeitpunkt vor, aktualisiert sein produktspezifisches Arbeitsgedächtnis $\hat{\kappa}$ und löst mit dem Versenden an seine DVPP-spezifische Nachbarschaft eine kooperative Lösungssuche aus. *inc?*: Wurde ein Ereignis detektiert? *P?*: Ist ein Produkt betroffen? *loc?*: Ist eine lokale Kompensation möglich?

Definition 7.21 (Erweitertes Arbeitsgedächtnis)

Das *erweiterte Produkt-Arbeitsgedächtnis* $\hat{\kappa}_\psi$ des Agenten a sei aufbauend auf [Definition 7.6](#) nun definiert wie folgt:

$$\hat{\kappa}_\psi = (p, \Omega_\psi, \gamma_\psi, \eta_{a,\psi})$$

Das *erweiterte Arbeitsgedächtnis* $\hat{\kappa}$ des Agenten a sei aufbauend auf [Definition 7.7](#) folgendermaßen definiert:

$$\hat{\kappa} = (os^*, \{\hat{\kappa}_{\psi_i} \mid \exists \psi_{p_i} \in \mathbb{A}_a\})$$

Der Agent versendet nun das erweiterte Produkt-Arbeitsgedächtnis $\hat{\kappa}_\psi$ an die Agenten seiner Nachbarschaft und löst so den Prozess der kooperativen Lösungssuche aus (siehe [Abbildung 7.11](#), Prozess: Kooperative Lösungssuche).

Wie bereits in [Abschnitt 7.1](#) für die Initialplanung dargestellt wurde, beruht das Verfahren auf einer Terminierung durch Konvergenz – die Planungsprozesse werden nicht etwa künstlich beendet, sondern konvergieren mit einem Lösungskandidaten (Produkt-Einsatzplan), aus dem die Agenten ihre Einheiten-Konfiguration (Produkt-Fahrplan) ableiten. Erhält nun ein Agent in Folge einer Umplanung einen Lösungskandidaten für ein DVPP, in dem die Planung bereits abgeschlossen war, so führt er die bereits spezifizierten Schritte zur Informationsintegration, lokalen Fahrplansuche und Identifikation eines neuen Lösungskandidaten durch. Im ersten Schritt ist nun eine Erweiterung erforderlich, da der Agent nicht mehr nur das produktspezifische Arbeitsgedächtnis erhält, sondern nun das erweiterte produktspezifische Arbeitsgedächtnis mit Ereignisinformationen. Der Agent führt dabei einen zusätzlichen initialen Schritt bei der Integration der Information aus, wie sie auf [Seite 101](#) beschrieben wurde.

Verarbeitung von Ereignisinformationen

1. Erhält ein Agent ein erweitertes Produkt-Arbeitsgedächtnis $\hat{\kappa}_\psi$, so verfährt er für jeden Eintrag der Ereignisinformation wie folgt:
 - Ist der Ereignisspeicher des Agenten leer, so integriert er die erhaltene Ereignisinformation in seinen DVPP-spezifischen Ereignisspeicher $\eta_{a,\psi}$.
 - Liegt dem Agenten bereits eine Information zu dem von einem Ereignis betroffenen Agenten vor, so vergleicht er die entsprechende Zählvariable. Ist die erhaltene Zählvariable größer als die bereits im Ereignisspeicher vorgehaltene Zählvariable, so übernimmt der Agent die Zählvariable an dieser Stelle in seinen DVPP-spezifischen Ereignisspeicher $\eta_{a,\psi}$ und hat somit die Information aufge-

nommen, welche Fahrpläne für den entsprechenden Kandidaten nicht mehr gültig sind.

2. Für das Produkt, für das der Agent in diesem Schritt einen Lösungskandidaten erhalten hat, führt er die folgenden Schritte durch:
 - Aus seinem aktuell vorhandenen Lösungskandidaten entfernt er die Einträge der Agenten, deren Zählvariable kleiner oder gleich der im Ereignisspeicher für diesen Agenten vorgehaltenen Zählvariable ist.
 - Aus seinem wahrgenommenen Systemzustand entfernt er die Einträge der Agenten, deren Zählvariable kleiner oder gleich der im Ereignisspeicher für diesen Agenten vorgehaltenen Zählvariable ist.
 - Aus dem erhaltenen Lösungskandidaten entfernt er die Einträge der Agenten, deren Zählvariable kleiner oder gleich der im Ereignisspeicher für diesen Agenten vorgehaltenen Zählvariable ist.
 - Aus dem erhaltenen wahrgenommenen Systemzustand entfernt er die Einträge der Agenten, deren Zählvariable kleiner oder gleich der im Ereignisspeicher für diesen Agenten vorgehaltenen Zählvariable ist.

Mit Abschluss dieser initialen Phase sind somit alle ungültigen Produkt-Fahrpläne aus dem Arbeitsspeicher des Agenten sowie aus dem erhaltenen Lösungskandidaten und wahrgenommenen Systemzustand entfernt. Nun integriert der Agent die erhaltenen weiteren Informationen wie auf Seite 101 beschrieben. Hat der Agent innerhalb des initialen Schrittes der Ereignisintegration sein Arbeitsgedächtnis verändert, so verschickt er – ergänzend zu den bereits für die Informationsintegration getroffenen Regelungen – die entsprechenden erweiterten Produkt-Arbeitsgedächtnisse an die Agenten seiner Nachbarschaft.

Mit den initialen Schritten zur Verarbeitung von Ereignis-Informationen wird erreicht, dass sich diese Informationen gleichzeitig mit neuen Lösungskandidaten im System ausbreiten. An einem Beispiel mit Mehrfach-Ereignissen sei dieser Prozess erläutert.

Beispiel 7.3 (Mehrfachereignisse und Auslösen einer Umplanung)

In untenstehender Abbildung ist das Zusammenspiel von drei Agenten aufgezeigt. Die Agenten a_1 und a_3 detektieren nacheinander ein Ereignis. Agent a_2 hat beide Agenten in seiner Nachbarschaft. Zur einfachen Übersicht sind nur die Prozessschritte dargestellt, die zur Ausbreitung der Ereignisinformationen erforderlich sind. Mit drei Punkten markiert werden nachfolgende Prozessschritte, die der weiteren Verbesserung des Lösungskandidaten dienen.

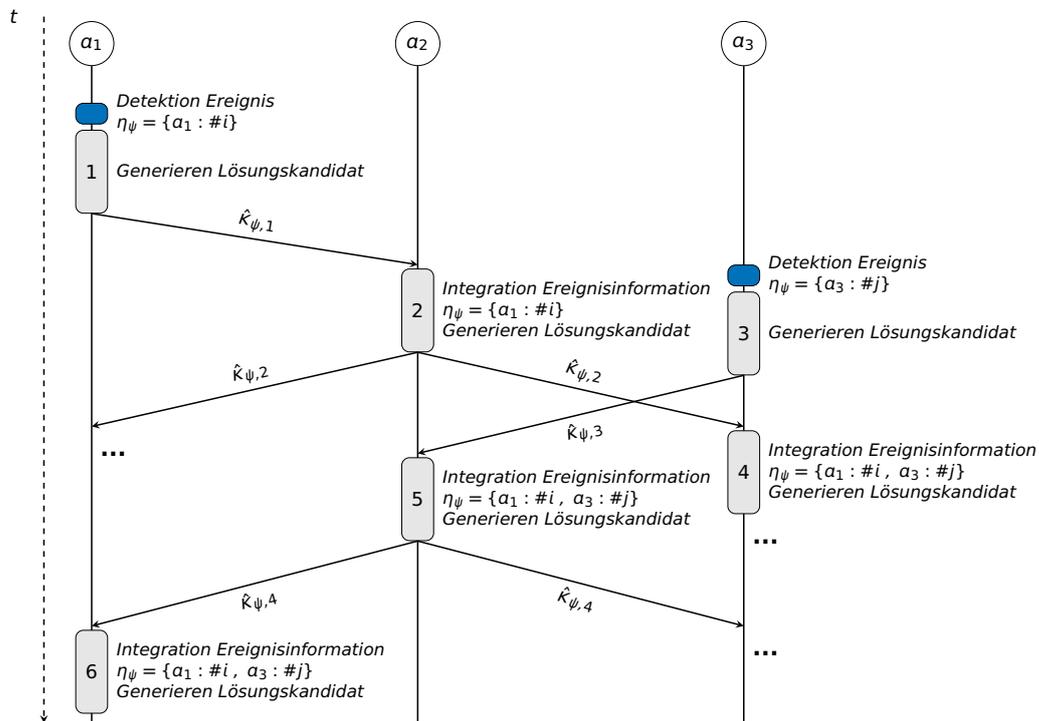


Abbildung 7.12: Beispiel für die Integration von Ereignisinformationen bei Mehrfacher-eignissen. Erläuterungen unter Verwendung der aufgeführten Nummerierung siehe Text.

1. Agent a_1 detektiert ein Ereignis und generiert einen neuen Lösungskandidaten. Er kommuniziert das erweiterte Produkt-Arbeitsgedächtnis $\kappa_{\psi,1}$ an Agent a_2 .
2. Agent a_2 integriert die Ereignisinformation und generiert einen neuen Lösungskandidaten. Er sendet sein erweitertes Produkt-Arbeitsgedächtnis an die Agenten a_1 und a_3 ($\kappa_{\psi,2}$).
3. Agent a_3 detektiert ein Ereignis und generiert einen Lösungskandidaten. Er sendet diese Information an Agent a_2 ($\kappa_{\psi,3}$).
4. Agent a_3 integriert die von Agent a_2 erhaltene Ereignisinformation. Er ist nun über das Ereignis der Einheit a_1 informiert.
5. Agent a_2 integriert die von Agent a_3 erhaltene neue Ereignisinformation, generiert einen neuen Lösungskandidaten und sendet die Informationen an die Agenten a_1 und a_3 .

6. Agent a_1 integriert die von Agent a_2 erhaltenen Informationen und ist somit über das Ereignis des Agenten a_3 informiert.

Treten keine weiteren Ereignisse ein, findet im Folgenden ausschließlich die Optimierung des Lösungskandidaten statt. Kommt es hingegen zu weiteren Ereignissen, so integrieren die Agenten diese Information in die aktuelle Suche nach einem Lösungskandidaten.

Anders als bei der Initialplanung entstehen im Verlauf der Ereignisbearbeitung somit durchaus schlechtere, allerdings immer vollständige Lösungskandidaten. Durch die Verwendung der agentenspezifischen Zählvariable bezüglich der ungültigen Fahrpläne ist weiterhin abgesichert, dass das Verfahren konvergiert: Jeder Agent, der in die laufende Planung integriert wird, erhält nicht nur den neuen Lösungskandidaten, sondern weiterhin die Zählvariablen der ungültigen Fahrpläne, so dass eine unterschiedliche Bewertung der Lösungskandidaten nicht erfolgen kann. Die Konvergenzanforderung der DVPP-weiten Gütefunktion ist somit weiterhin erfüllt.

Die Agenten halten jeweils nur die höchste ungültige Zählvariable vor. Mit der Anzahl der Agenten im DVPP steigt somit der Speicherbedarf nur linear und entspricht somit weiterhin der Speicherperformanz des Basisverfahrens. Weiterhin wurde mit der kombinierten Kommunikation von Ereignis und neuem Lösungskandidat ein Weg gewählt, der eine verbindungslose Kommunikation erlaubt: Erhält ein Agent die entsprechende Nachricht nicht, so verbleibt er in der alten Planung. Die Lösung ist somit ggf. schlechter, aber die Konvergenz des Verfahrens nicht gefährdet. Somit ist diese Erweiterung des Verfahrens um die Verarbeitung von Ereignissen bezüglich der Konvergenz robust gegen Nachrichtenverlust.

Mit Erreichen des Rekonfigurationszeitpunktes wählt der Agent den aktivierten Fahrplan auf Basis seines zu diesem Zeitpunkt aktuellen Weltwissens aus. Der Prozess der kooperativen Lösungssuche wird somit nicht unterbrochen. Die spezifizierten Zeitanforderungen der kontinuierlichen Einsatzplanung erfordern allerdings eine Terminierung des Verfahrens innerhalb des aktuellen Planungsintervalls, so dass die kooperative Einsatzplanung bis zum Rekonfigurationszeitpunkt abgeschlossen sein muss. In [Abschnitt 8.8](#) wird geprüft, ob die kontinuierliche Einsatzplanung diese Zeitanforderungen einhält.

7.3.7 Zusammenfassung

Mit diesem Designschritt ist die Entwicklung von DynaSCOPE abgeschlossen. Der Einsatz des Verfahrens ist nun nicht nur als Planungssystem, sondern weiterhin als Kontrollsystem möglich: Die Agenten können zunächst eine Initialplanung (bzw. eine DVPP-interne Optimierung) durchführen und konfigurieren ihre Einheit vor Beginn des Planungshorizontes mit dem ermittelten Fahrplan. Sie gehen dann in eine Phase des Monitorings über. In dieser Phase können Agenten abweichendes Verhalten ihrer Einheit ermitteln und bewerten. Eine

Ereignisgrenze erlaubt es, die eingetretenen Abweichungen zu bündeln und erst ab einer parametrierbaren Stärke der (ggf. kombinierten) Abweichungen als Ereignis zu klassifizieren. Die Verarbeitung des Ereignisses erfolgt nun in unterschiedlichen Phasen, die von einer vollständigen lokalen Kompensation bis hin zu einer Umplanung im aktuell betroffenen DVPP reichen. Durch die gestufte Ereignisverarbeitung wurden unterschiedliche Mechanismen zur proaktiven Dämpfung zukünftiger Ereignisse eingebracht. Eine parallele Verarbeitung eintreffender Nachrichten zu Ereignissen anderer Agenten und eigener Ereignisse wird durch die spezifizierten Prozesse ermöglicht.

7.4 ZUSAMMENFASSUNG: VERTEILTE KONTINUIERLICHE EINSATZPLANUNG IN DYNAMISCHEN VIRTUELLEN KRAFTWERKEN

Nach der Konstruktion von DynaSCOPE in den Abschnitten 7.1 bis 7.3 soll abschließend ein Überblick über Informationsmodell und Prozesse gegeben werden. Ergänzend wird das übergeordnete DynaSCOPE-Prozessmodell vorgestellt.

7.4.1 Ebenen des Weltmodells

In [Abbildung 7.13](#) sind zusammenfassend die Informationen auf den unterschiedlichen Ebenen des Weltmodells dargestellt, die für die kontinuierlichen Einsatzplanung von Bedeutung sind:

- **Kooperationswissen:** Auf dieser Ebene werden die für den Austausch mit anderen Agenten relevanten Informationen verwaltet. Der Agent speichert die produktspezifischen Nachbarschaften und hält die erhaltenen Nachrichten bis zur Verarbeitung in einem Nachrichtenspeicher vor.
- **Globales Planungswissen:** Auf dieser Ebene werden die Informationen vorgehalten, die für die kooperative Lösungssuche innerhalb eines DVPP erforderlich sind. Neben der Affiliationsmenge \mathbb{A}_a hält der Agent den wahrgenommenen Systemzustand und die aktuellen Lösungskandidaten produktspezifisch vor. Im Ereignisspeicher wird zu den entsprechenden Agenten die Zählvariable des letzten ungültigen Fahrplans abgelegt.
- **Lokales Planungswissen:** Für die Ermittlung potentieller Fahrpläne hält der Agent den Suchraum auf der Ebene des lokalen Planungswissens vor. Dieses Wissen wird nicht bei der kooperativen Lösungssuche weitergegeben, sondern bildet die Grundlage der lokalen Fahrplanauswahl bei Ereigniseintritt und neu angestoßener koopera-

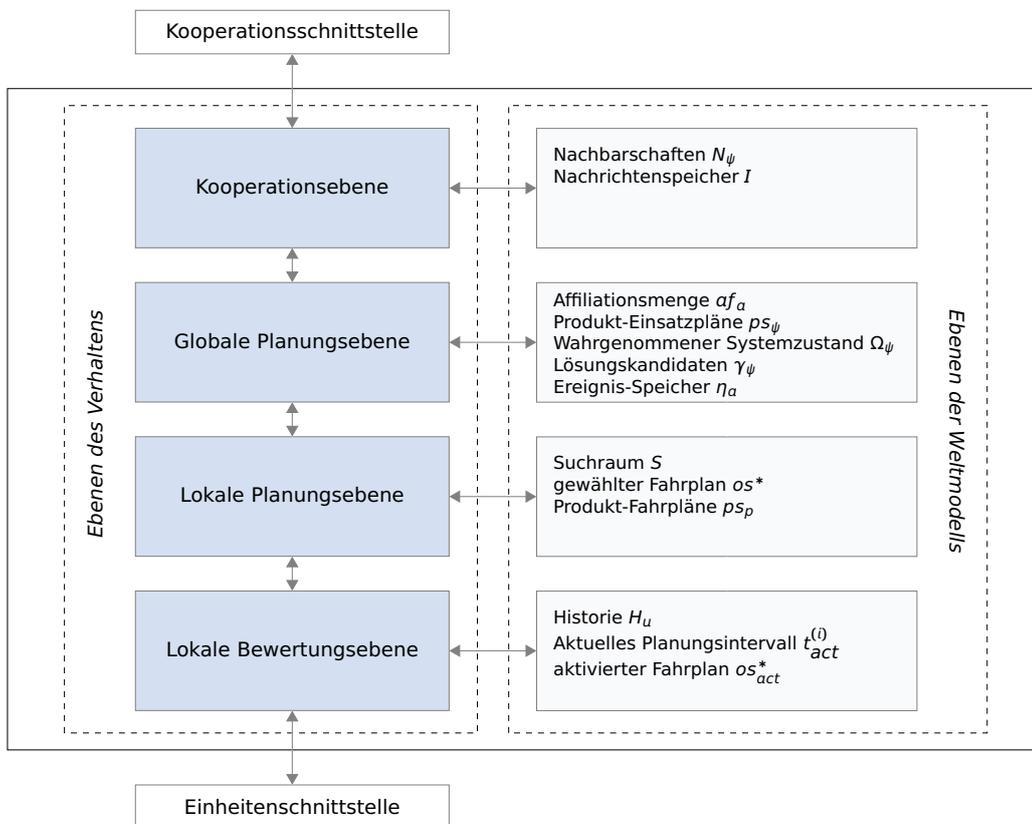


Abbildung 7.13: Agentenmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung

tiver Lösungssuche. Dazu hält der Agent weiterhin seine eigenen Produktverpflichtungen in den Produkt-Fahrplänen vor.

- **Einheitenwissen:** Diese Ebene stellt die interne Einheitenrepräsentation mit aktiviertem Fahrplan und historischen Werten dar: Auf ihr werden die Betriebszustände der Einheit sowie die Sollwerte des aktivierten Fahrplans erfasst.

7.4.2 Übergeordnetes Prozessmodell

In der bisherigen Darstellung wurden die Prozesse dargelegt, die für die Detektion eines Ereignisses und eine nachfolgende kooperative Lösungssuche erforderlich sind. Im verteilten System, wie es die Grundlage der kontinuierlichen Einsatzplanung darstellt, ist zu gewährleisten, dass die einzelnen Agenten die spezifizierten Prozesse widerspruchsfrei durchführen können.

In **Abbildung 7.14** wird das übergeordnete Prozessmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung dargestellt, das diese Aspekte gewährleistet: Jeder Agent führt die beiden Prozesse zur Wahrnehmung der physikalischen und der Agentenwelt parallel durch: Über den übergeordneten Prozess des Nachrichteneingangs werden kontinuierlich Nachrichten empfangen und im Nachrichtenspeicher (auf der Wissens Ebene des Kooperationswissens) ab. Der übergeordnete Prozess des Monitorings führt die Betriebsüberwachung der Energieeinheit durch und speichert die Monitoring-Werte in der Historie (auf der Wissens Ebene des Einheitenwissens) ab. Der dritte kontinuierliche Prozess ist die übergeordnete Prozesskontrolle: In jedem Schritt führt der Agent die folgenden Schritte nacheinander durch:

1. Eintrittspunkt 1: Prüfung auf Ereignisse
2. Eintrittspunkt 2: Prüfung auf Nachrichteneingang und Abarbeitungszeitpunkt
3. Eintrittspunkt 3: Prüfung auf Rekonfiguration der Einheit

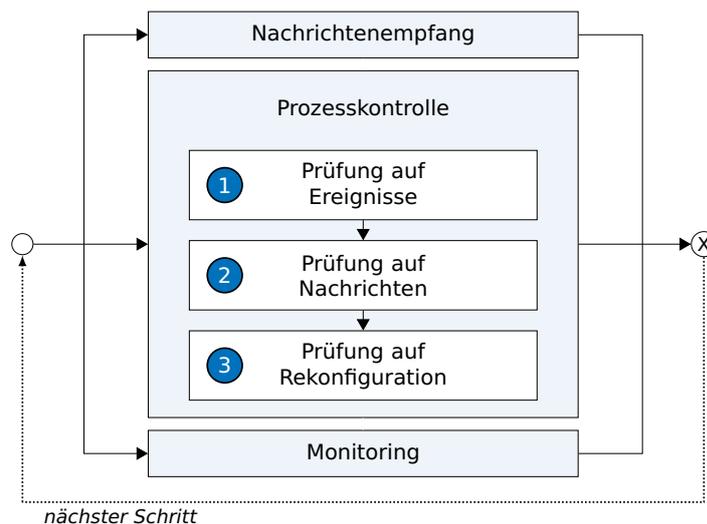


Abbildung 7.14: Übergeordnetes Prozessmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung: Die Prozesse Nachrichteneingang, Prozesskontrolle und Monitoring laufen parallel ab. Die Prozesskontrolle besteht aus den nacheinander ausgeführten Prozessen der Prüfung auf Ereignisse, Prüfung auf Nachrichteneingang und Prüfung auf Rekonfiguration der Einheit und stellt die unterschiedlichen Eintrittspunkte in die Prozesse der kontinuierlichen Einsatzplanung dar. Dargestellt ist der Ablauf für einen Schritt im Verhaltensmodell des Agenten. Die dargestellten Prozesse werden in jedem Schritt wiederholt.

Mit jedem dieser drei Schritte ist ein Eintritt in die Prozesse der kontinuierlichen Einsatzplanung möglich, wenn die Prüfung positiv ausfällt. Ein Agent führt daher – wenn er ein

Ereignis an seiner Einheit detektiert – zunächst sämtliche Prozesse der Ereignisverarbeitung durch, bevor er in den zweiten Schritt der Nachrichtenprüfung und somit in das Abarbeiten des Nachrichtenspeichers eintritt. Unabhängig davon, ob Nachrichten eingetroffen sind oder der Agent eine Umplanung ausgelöst hat, prüft er im letzten Schritt, ob ein vorge-
merkter Rekonfigurationszeitpunkt eingetreten ist, um seine Einheit mit dem ausgewählten Fahrplan zu rekonfigurieren.

In **Abbildung 7.15** sind die auf diese Weise definierten Eintrittspunkte in die Prozesse der kontinuierlichen Einsatzplanung dargelegt.

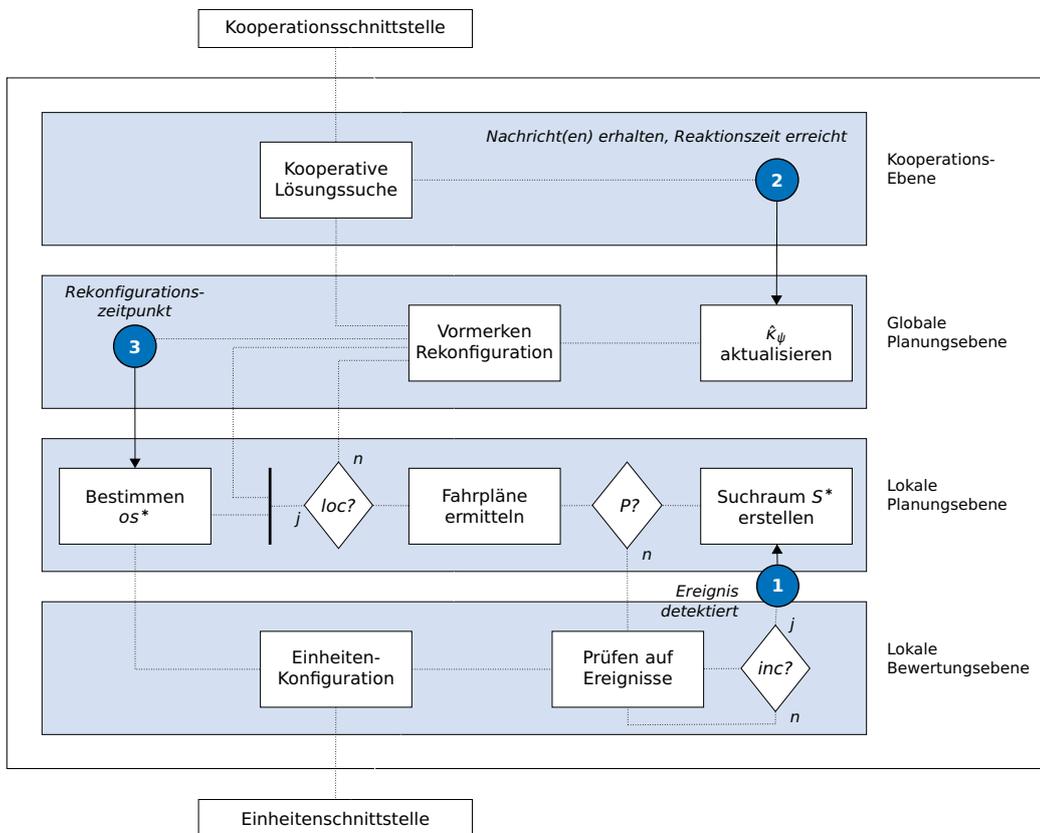


Abbildung 7.15: Eintrittspunkte in die Prozesse der kontinuierlichen Einsatzplanung. *inc?*: Wurde ein Ereignis detektiert? *P?*: Ist ein Produkt betroffen? *loc?*: Ist eine lokale Kompensation möglich?

Zur Verdeutlichung der definierten Prozesse werden die entsprechenden Abläufe nun zunächst aus der Sicht eines Ereignis-detektierenden Agenten (Eintrittspunkt 1), danach aus Sicht eines über Nachrichten von einem Ereignis in Kenntnis gesetzten Agenten (Eintrittspunkt

2) darstellen. Abschließend werden die Prozesse im Zusammenhang mit der Rekonfiguration einer Einheit im Überblick erläutert (Eintrittspunkt 3).

7.4.3 Eintrittspunkt 1: Ablauf aus Sicht eines Ereignis-detektierenden Agenten

Die Prüfung auf Ereignisse stellt den ersten Prozess der übergeordneten Prozesskontrolle der kontinuierlichen Einsatzplanung und damit den ersten Eintrittspunkt dar. Während die Wahrnehmung der Agentenwelt und der physikalischen Welt parallelisiert werden können, ist die Verarbeitung des sensorischen Inputs wegen der inhärenten Abhängigkeiten nicht möglich. Der Agent prüft zunächst den sensorischen Input aus der physikalischen Welt und verarbeitet ihn entsprechend der im Folgenden dargelegten Prozesse (siehe [Abbildung 7.16](#)). Eine Konfiguration der Einheit mit einem Fahrplan ist diesen Prozessen mindestens im Rahmen der Initialplanung bereits vorausgegangen und wird daher in [Abbildung 7.16](#) ebenfalls dargestellt.

1. Das für die Dauer des Fahrplans kontinuierlich durchgeführte Monitoring der Einheit wurde bereits mit der Konfiguration der Einheit aktiviert: In jedem Monitoring-Intervall prüft der Agent, ob die Einheit den Fahrplan wie vorgesehen erfüllt, d. h. die definierten Betriebszustände einnimmt. Wird eine Abweichung erkannt, so wird diese bewertet: Überschreitet die Abweichung die definierte Sensitivität $\epsilon_{s,a}$ des Agenten, so wird ein Ereignis erkannt und an die lokale Planungsebene übergeben.
2. Auf der lokalen Planungsebene wird der Suchraum der Einheit neu erstellt, da der bisherige Suchraum nicht mehr gültig ist.
3. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob für die Einheit ein Produkt-Fahrplan vorliegt, der vom detektierten Ereignis betroffen ist. Liegt keine Verletzung der Produktfahrpläne vor, so ist keine weitere Bearbeitung des Ereignisses erforderlich.
4. Ist ein Produkt-Fahrplan betroffen, so ermittelt der Agent Fahrpläne für eine lokale Kompensation unter Berücksichtigung der Präferenzen, die im Suchraum ergänzend zum Fahrplan abgelegt sind.
5. Gelingt die lokale Kompensation, so wählt der Agent einen Fahrplan als aktivierten Fahrplan os^* aus und übergibt wieder an die lokale Bewertungsebene für die Rekonfiguration der Einheit und das weitere Monitoring.
6. Gelingt die lokale Kompensation nicht oder sind weitere Produkte von dem Ereignis betroffen, so übergibt der Agent mit dem besten ihm zur Verfügung stehenden Fahrplan an die globale Planungsebene.

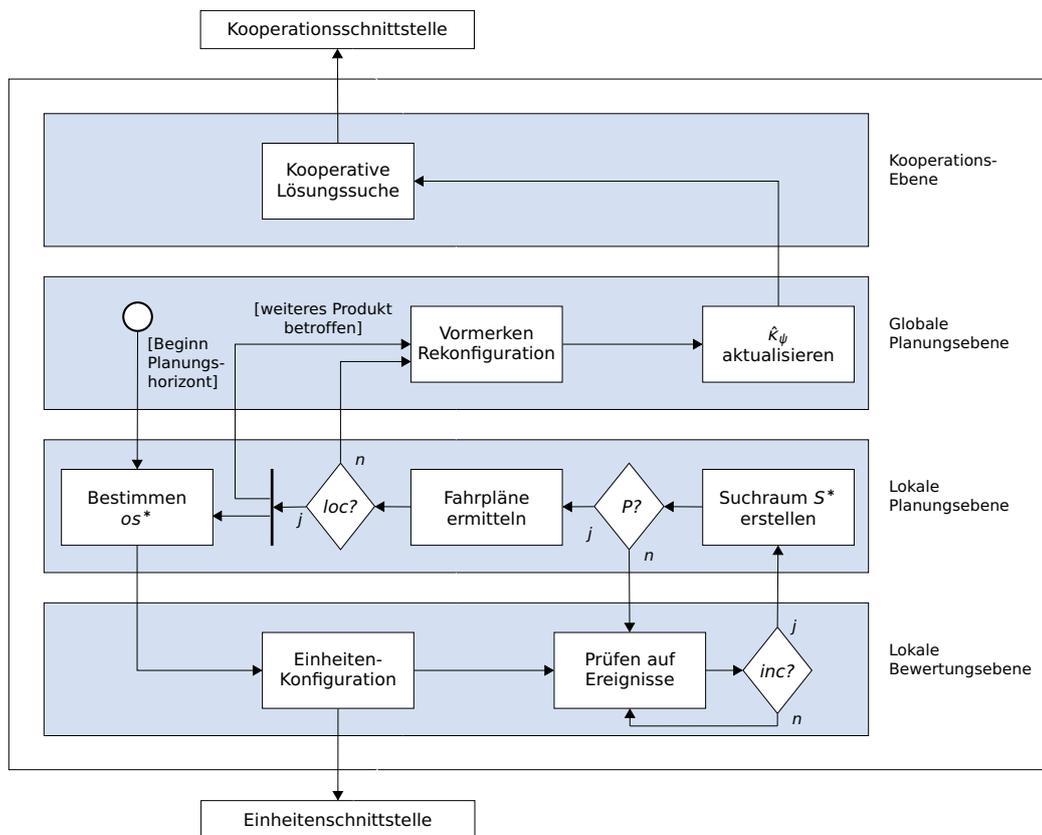


Abbildung 7.16: Prozesse der kontinuierlichen Einsatzplanung: Ablauf aus Sicht eines Ereignis-detektierenden Agenten (Eintrittspunkt 1). *inc?*: Wurde ein Ereignis detektiert? *P?*: Ist ein Produkt betroffen? *loc?*: Ist eine lokale Kompensation möglich?

- Auf der globalen Planungsebene wird ein Rekonfigurationszeitpunkt vorgemerkt: Da der Agent nun eine kooperative Lösungssuche anstoßen will, wird festgelegt, zu welchem Zeitpunkt das Ergebnis dieser Suche als neuer Fahrplan an die Einheit weitergegeben werden soll. Dieser Zeitpunkt wird auf das Ende des aktuellen Planungsintervalls $t_{act}^{(i)}$ festgelegt. Für die kooperative Lösungssuche stehen somit weniger als 15 Minuten zur Verfügung.
- Im nächsten Prozess aktualisiert der Agent sein produktspezifisches Arbeitsgedächtnis, indem er das detektierte Ereignis seinem Ereignisspeicher hinzufügt. Er wählt dazu die Lösungsvariable des nicht mehr gültigen Fahrplans aus und übergibt diese an den Ereignisspeicher. Weiterhin fügt er den Produkt-Ausschnitt des für die Lösungssuche gewählten Fahrplans hinzu. Er führt dazu die Schritte zur lokalen Fahr-

planauswahl durch, wie sie in der **Entscheidungsregel** definiert wurden (siehe Seite 130).

9. Im letzten Schritt der Ereignisverarbeitung sendet der Agent sein erweitertes Produkt-Arbeitsgedächtnis $\hat{\kappa}_\psi$ an die Agenten der produktspezifischen Nachbarschaft. Die kooperative Lösungssuche wurde somit begonnen. Der Agent führt nachfolgend die Prüfung auf Nachrichtempfang durch (Eintrittspunkt 2). Die nun folgenden Schritte entsprechen dem Ablauf der kontinuierlichen Einsatzplanung aus Sicht eines von einem Ereignis in Kenntnis gesetzten Agenten, die nachfolgend beschrieben werden.

7.4.4 Eintrittspunkt 2: Ablauf aus Sicht eines über Nachrichten von einem Ereignis in Kenntnis gesetzten Agenten

Nachdem der Agent den sensorischen Input aus der physikalischen Welt verarbeitet hat, prüft er nun, ob er Nachrichten von anderen Agenten erhalten hat. Findet der Agent mindestens eine Nachricht vor, so prüft er weiterhin, ob die Reaktionsspanne nach der letzten Nachrichtenverarbeitung und Erhalt einer weiteren Nachricht bereits verstrichen ist. Findet der Agent in seinem Nachrichtenspeicher keine Nachricht vor und ist die Reaktionsspanne noch nicht verstrichen, so ist dieser Prozess beendet.

Liegen dem Agenten Nachrichten vor, so führt er die in [Abbildung 7.17](#) dargestellten und im Folgenden dargestellten Prozesse nacheinander aus:

1. Jede erhaltene Nachricht prüft er zunächst auf neue Ereignisinformationen. Er aktualisiert mit dieser Information zunächst seinen Ereignisspeicher. Dann führt er eine Vorverarbeitung der erhaltenen Nachrichten durch: Sämtliche Produkt-Fahrpläne, die über Zählvariablen im Ereignisspeicher als ungültig gekennzeichnet sind, entfernt er aus dem wahrgenommenen Systemzustand und dem erhaltenen Lösungskandidaten (siehe Seite 147).
2. Im nächsten Schritt verarbeitet er die vorverarbeiteten Nachrichten: Er führt zunächst alle Schritte zur Informationsintegration durch (siehe Seite 101) und wählt anschließend einen neuen Fahrplan, falls dieser zu einer Verbesserung des Produktes führt (siehe Seite 121). Die Informationen werden im erweiterten Produkt-Arbeitsgedächtnis abgespeichert.
3. Nun merkt der Agent einen neuen Rekonfigurationszeitpunkt vor: Direkt vor Beginn des nächsten Planungsintervalls wird eine Rekonfiguration seiner Einheit vorgenommen werden.
4. Im letzten Schritt sendet der Agent im Rahmen der kooperativen Lösungssuche sein erweitertes Arbeitsgedächtnis an die Agenten der entsprechenden produktspezifischen Nachbarschaft.

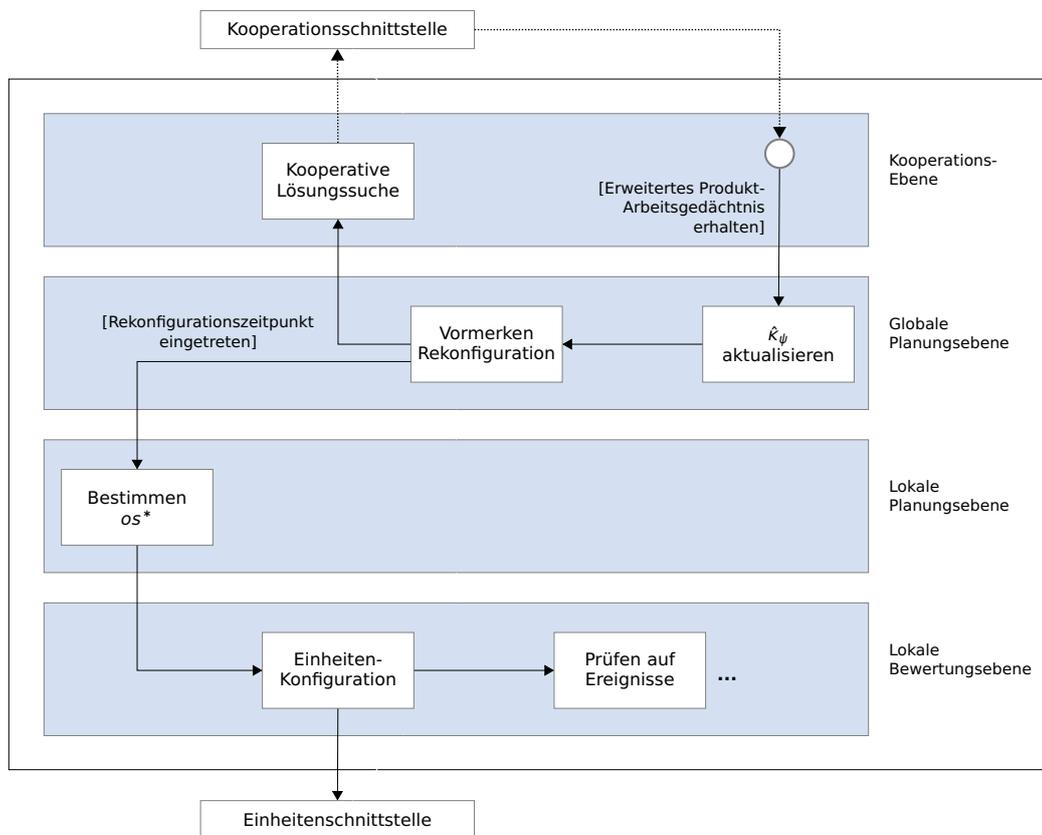


Abbildung 7.17: Prozesse der kontinuierlichen Einsatzplanung: Ablauf aus Sicht eines über Nachrichten von einem Ereignis in Kenntnis gesetzten Agenten (Eintrittspunkt 2).

7.4.5 Eintrittspunkt 3: Rekonfiguration einer Einheit

Unabhängig davon, ob ein Agent vorab ein Ereignis detektiert hat oder über eine kooperative Lösungssuche in die Umplanung einbezogen wurde, liegt ihm ein gültiger Fahrplan vor: War seine Einheit selbst von einem Ereignis betroffen, so hat er einen neuen Fahrplan aus seinem aktualisierten Suchraum gewählt. Im Rahmen der kooperativen Lösungssuche wurde ggf. ein neuer Fahrplan gewählt, der zur Kompensation weiterer Ereignisse bei anderen Agenten des DVPP beiträgt. Der Agent führt nun die folgenden Schritte durch:

1. Der Agent prüft, ob ein Rekonfigurationszeitpunkt eingetreten ist. Liegt kein Rekonfigurationszeitpunkt vor, so ist die übergeordnete Prozesskontrolle abgeschlossen und der Agent beginnt im nächsten Schritt wieder mit der Prüfung auf Ereignisse (Eintrittspunkt 1).

2. Ist eine Rekonfiguration der Einheit vorgesehen, so ermittelt der Agent den aktivierten Fahrplan, und übergibt diesen an die lokale Bewertungsebene.
3. Auf der lokalen Bewertungsebene wird die Einheit konfiguriert und der aktivierte Fahrplan an das kontinuierliche Monitoring übergeben.

Mit diesen Schritten ist die übergeordnete DynaSCOPE-Prozesskontrolle abgeschlossen. Der Agent wiederholt die Subprozesse der Ereignisprüfung, Nachrichtenprüfung und Rekonfigurationsprüfung im nachfolgenden Schritt.

8

EVALUATION

Mit der Konstruktion von DynaSCOPE in [Kapitel 7](#) wurde ein Verfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP vorgestellt. Im nun folgenden Kapitel wird dieses Verfahren auf seine Eignung für den skizzierten Anwendungskontext hin geprüft. Zunächst erfolgt eine Darstellung des gewählten Vorgehens bei der Evaluation ([Abschnitt 8.1](#)) sowie eine Vorstellung der prototypischen Implementierung und des Evaluationssystems ([Abschnitt 8.2](#)). Anschließend wird DynaSCOPE aufbauend auf dem bereits skizzierten Designkonzept anhand jeweils definierter Fragestellungen bzw. Hypothesen für die Eignung im Anwendungskontext bewertet ([Abschnitt 8.3](#) bis [Abschnitt 8.8](#)). Eine zusammenfassende Bewertung sowie eine Darstellung offener Fragen findet sich in [Abschnitt 8.9](#).

8.1 EINFÜHRUNG

Die Evaluation stellt den Abschluss der ersten Iteration innerhalb des vorgestellten Vorgehensmodells SGAE dar (siehe [Kapitel 2](#)). Ziel der Evaluation ist es, die prinzipielle Eignung des entwickelten Verfahrens DynaSCOPE für die kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP zu prüfen und Fragestellungen für die nächste SGAE-Iteration zu ermitteln. Die Vorgehensweise der Evaluation leitet sich aus diesem Anspruch ab: Für alle Hypothesen, die im Lauf der Analyse- und Design-Phasen entwickelt wurden, werden jeweils wenige realitätsnahe Szenarien entwickelt. Diese dienen dazu, die Hypothesen initial zu prüfen und Wirkzusammenhänge zu verstehen. Anhand von Metriken werden ergänzend Aussagen zur Güte der jeweils untersuchten Eigenschaft gemacht. Eine Detailprüfung anhand einer großen Menge unterschiedlicher Szenarien wird in dieser Phase noch nicht als sinnvoll erachtet: Anhand weniger Szenarien können Hinweise für die Verbesserung und eine nachfolgende detailliertere Prüfung ermittelt werden. Der simulative Aufwand kann trotzdem hoch sein, wenn entsprechende Parameter-Abhängigkeiten geprüft werden sollen.

Die im Rahmen der Evaluation verwendeten Begriffe sind wesentlich für das Verständnis der Vorgehensweise und sollen daher kurz erläutert werden:

Mit der formalen Beschreibung des zu lösenden Problems, der **Konzeptualisierung**, wurde die natürlichsprachliche Problembeschreibung der einleitenden Kapitel konkretisiert und eingeschränkt. Annahmen zu Eigenschaften der entwickelten Lösung werden als **Hypothese** bezeichnet. Sie werden aus der Problembeschreibung hergeleitet. Bei der Entwicklung

der Hypothesen ist darauf zu achten, dass sie mit den zur Verfügung stehenden Mitteln (z. B. der Simulationsumgebung) geprüft werden können.¹ Mit den Metriken oder **Performanzindikatoren** werden Eigenschaften der entwickelten Lösung quantifiziert. Sie dienen zur Bemessung der Ausprägung einer Eigenschaft des Verfahrens. Können mehrere Hypothesen für die Untersuchung anhand eines Szenarios zusammengefasst werden, so wird dies als **Untersuchungsziel** bezeichnet. In einem **Szenario** wird die Konzeptualisierung in eine konkrete Probleminstanz überführt, indem sämtliche Aspekte der Konzeptualisierung konkretisiert werden. Die Ausgestaltung des Szenarios hängt vom jeweiligen Untersuchungsziel ab. Die Eingeschränktheit des Szenarios bestimmt somit auch die begrenzte Aussagekraft in Bezug auf Hypothesen und Performanzindikatoren. Abhängig vom Untersuchungsziel können die zu setzenden Parameter der entwickelten Lösung unterschiedlich gewählt werden. Eine vollständige Parametrierung führt zu einer **Lösungsvariante**. So wie das Szenario eine Instanz der Konzeptualisierung darstellt, kann eine Lösungsvariante als eine Instanz der entwickelten und formal beschriebenen Lösung verstanden werden. Wird ein Szenario in einer Simulationsumgebung mit einer Lösungsvariante zur Ausführung gebracht, so wird das als **Versuch** bezeichnet. Zur statistischen Absicherung wird ein Szenario mit einer Lösungsvariante unter Modifikation angegebener zufallsbedingter Variablen (*random seed*) mehrfach durchlaufen – es handelt sich damit um eine **Versuchsreihe**. Die Wahl der zufallsbedingten Variablen ist dem Untersuchungsziel anzupassen, falls es möglich ist, sämtliche Variablen festzulegen. Mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Lösungsvarianten (z. B. unter Variation eines Parameters in angegebenen Faktorstufen) und einem Szenario stellen ein **Experiment** dar. Ein Experiment gehört somit immer zu einem definierten Untersuchungsziel. Unter einem Untersuchungsziel können mehrere Experimente zusammengefasst werden.

Nachfolgend wird zunächst ein Überblick über den Aufbau des verwendeten Evaluationsystems gegeben ([Abschnitt 8.2](#)). Anschließend wird entsprechend der definierten Schritte des Erweiterungskonzeptes zunächst die Erweiterung des Basisverfahrens um den Produktbezug evaluiert ([Abschnitt 8.3](#)). Im zweiten Schritt erfolgt die Evaluation der Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung sowie der Berücksichtigung lokaler Präferenzen evaluiert ([Abschnitt 8.4](#), [Abschnitt 8.6](#)). Im dritten Erweiterungsschritt wurden die Aspekte der Detektion und Verarbeitung von Ereignissen entwickelt – diese Arbeiten werden anhand der definierten Anforderungen beleuchtet ([Abschnitt 8.3](#)).

In jedem Abschnitt werden zunächst die Hypothesen, die gewählten Szenarien sowie die definierten Experimente vorgestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der entsprechenden Simulationsläufe. Den Abschluss des Evaluationskapi-

¹Zu Beginn dieses Evaluationsabschnittes sei noch einmal betont, dass die Hypothesen im Sinne des wissenschaftlichen Realismus lediglich falsifiziert oder bestärkt, nicht aber verifiziert werden können – die Aussagekraft der Experimente ist mindestens so eingeschränkt wie das Maß, in dem sie die reale Welt bzw. den möglichen Einsatzkontext des Verfahrens abbilden.

tels bildet die zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse sowie eine Darstellung offener Fragen, die als Input für die nächste SGAE-Iteration verwendet werden können.

8.2 EVALUATIONSSYSTEM UND PROTOTYPISCHE IMPLEMENTIERUNG

Die Evaluation von DynaSCOPE erfolgte mit Hilfe einer prototypischen Implementierung, in der die vorgestellten Konzepte umgesetzt und unter kontrollierten Bedingungen zur Ausführung gebracht wurden. In [Abbildung 8.1](#) wird ein Überblick über die Komponenten des Systems gegeben. Die wesentlichen Bestandteile, damit verbundene Design-Entscheidungen und Einschränkungen sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

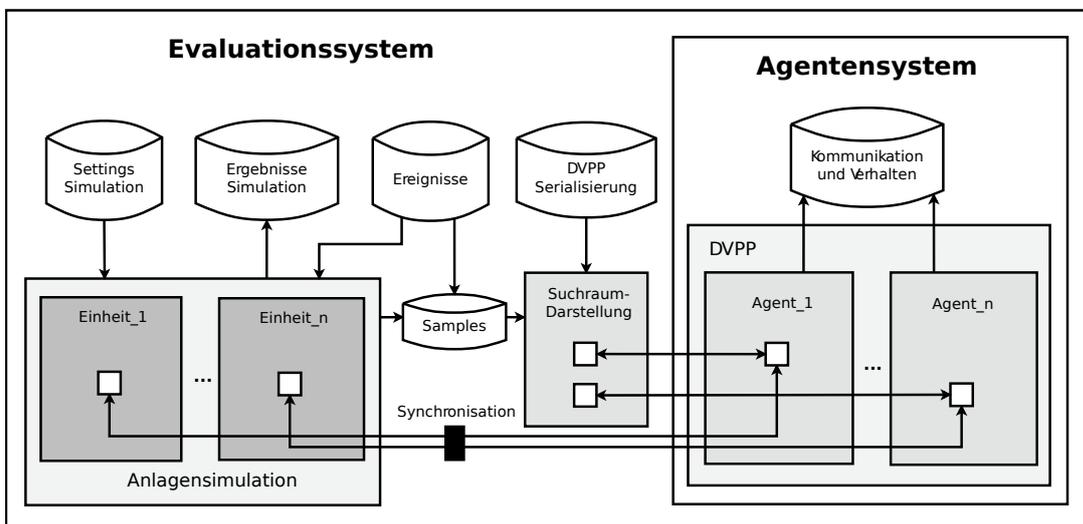


Abbildung 8.1: DynaSCOPE-Evaluationssystem

Agenten-Framework Für das Agentensystem wurde das JAVA-basierte Agenten-Framework JADE (*JAVA agent development framework*)² in einer modifizierten Version verwendet: Innerhalb des Forschungsverbundes Smart Nord wurde JADE so angepasst, dass es als eine Art Simulator in mosaik eingebunden werden kann. Dafür war es erforderlich, die Systemzeit anzupassen, da eine wesentliche Aufgabe von mosaik die Synchronisation der Simulationsmodelle darstellt. Weiterhin wurden sämtliche innerhalb von JADE laufzeitabhängig gestalteten Aspekte parametrierbar umgesetzt. So wurde bei entsprechender

²<http://jade.tilab.com/>, zuletzt besucht am 9.12.2014.

Festlegung der Zufallszahlen ein deterministisches Verhalten erreicht.³

Anlagensimulation Für die Simulation der Anlagen musste eine wesentliche Design-Entscheidung getroffen werden: Möglich wäre es, ein möglichst realitätsnahes Simulationsmodell zu verwenden. Dies wäre vorteilhaft in Bezug auf die Aussagekraft bezüglich domänenspezifischer Performanzindikatoren. Der Nachteil solcher Modelle wäre allerdings, dass diese zur Laufzeit nicht beeinflussbar wären. Es wäre somit nicht möglich, die Anzahl und zeitliche Verortung von Ereignissen zu spezifizieren. Für den Abschluss einer ersten SGAE-Iteration, bei der die prinzipielle Eignung DynaSCOPE für den Anwendungskontext geprüft werden sollte, wurde daher die zweite Option gewählt. Die Anlagensimulation wurde so gestaltet, dass die Einheiten die vorgegebenen Fahrpläne zunächst exakt abfahren. Die Austauschbarkeit der Modelle gegen realitätsnahe, nicht kontrollierbare Simulationsmodelle wurde gewährleistet.

Modellierung der Anlagenflexibilität Die Modellierung der Anlagenflexibilität wurde mit Hilfe des bereits vorgestellten Suchraummodells nach dem stützvektorbasierten Ansatz von Jörg Bremer umgesetzt [BS13a] (siehe [Abschnitt 6.3](#)). Für die Umsetzung im Evaluationssystem konnte das Suchraummodell als JAVA-Bibliothek eingebunden werden. Zum Training der Suchraummodelle wurden Samples verwendet, die auf echten Anlagensimulationsmodellen beruhen. Die Entwicklung dieser Modelle stellte keinen Schwerpunkt der hier vorgestellten Arbeiten dar. Sie konnten aus vorangegangenen Arbeiten und bereits abgeschlossenen Projekten verwendet werden. Die Simulationsmodelle wurden mit Prognose- und Startwerten des zu simulierenden Tages parametrisiert und eine Auswahl an Samples generiert. In [Abbildung 8.1](#) ist skizziert, wie die Samples als Input in die Suchraummodellierung eingehen.

DVPP-Konfiguration Für den Start der DynaSCOPE-Evaluation ist weiterhin eine vor-konfigurierte Menge an DVPP erforderlich (DVPP-Serialisierung in [Abbildung 8.1](#)). Diese kann im integrierten DVPP-Prozess aus dem Prozess der DVPP-Bildung übernommen werden. Für die Evaluation wurden manuell solche DVPPs spezifiziert, die für die entsprechende Fragestellung als geeignet angesehen wurden. In den nachfolgenden Abschnitten wird der Aufbau der verwendeten Szenarien jeweils einzeln motiviert.

Induktion von Ereignissen Um die Eigenschaften von DynaSCOPE bezüglich der zeitlichen Verortung und Häufung von Ereignissen zu prüfen, wurden vor Systemstart Ereignisse definiert. Unterschieden wurden Anlagenausfälle, die jeweils eine Dauer von 30 Minuten

³Die Arbeiten zur Modifikation von JADE wurden von Ontje Lünsdorf, OFFIS, umgesetzt und konnten im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit verwendet werden.

umfassten, und prozentual zum definierten Fahrplan spezifizierbare Prognoseabweichungen der gleichen Länge. Die Induktion eines Ereignisses zur Laufzeit führt dazu, dass die Anlagensimulation nicht mehr dem vorgegebenen Fahrplan folgt, sondern stattdessen das definierte Ereignis umsetzt. Bei der Abfrage des Betriebszustandes im Monitoring erfasst der entsprechende Einheiten-Agent somit vom Fahrplan abweichendes Verhalten. Ereignisse können spezifisch für einzelne Intervalle oder zufallsbasiert (gleichverteilt) über einer Menge von Intervallen konfiguriert werden. Ein Ereignis führt im Evaluationssystem weiterhin zu einer entsprechenden Anpassung der Samples, die für die Neugenerierung des Suchraummodells nach Ereignisdetektion verwendet werden.

Vorverarbeitung der Samples Präferenzen werden in der restriktionsfreien Modellierung der Fahrpläne im Suchraummodell zunächst nicht abgebildet. Es ist allerdings möglich, neben den Fahrplänen sogenannte Indikatoren in das Training des Suchraummodells zu integrieren. In der hier umgesetzten Implementierung wurde geprüft, ob auf diese Weise BHKW-Kaltstarts reduziert werden können. Dazu werden die Samples vorab eingelesen und auf die Anzahl der Kaltstarts hin analysiert. Der Wert geht in die Ermittlung eines Indikatorwertes ein, der die Anzahl der Kaltstarts exponentiell bestraft. Das Suchraummodell wird schließlich mit den erweiterten Samples trainiert, die neben dem Wirkleistungsverlauf weiterhin den entsprechenden Indikatorwert enthalten. Bei der Abfrage eines Fahrplans aus dem Suchraummodell wird neben dem gewünschten Fahrplan ein möglichst niedriger Wert für den Indikator angegeben.

Prozesskopplung Parallel zur Entwicklung und Evaluation von DynaSCOPE wurde gemeinsam mit anderen Mitarbeitern aus dem Forschungsverbund Smart Nord ein integriertes Evaluationssystem konzipiert (siehe [Abbildung 8.2](#)). Ziel war es, die prinzipielle Kopplung der Ansätze im Rahmen eines technischen Durchstichs zu prüfen. Anders als im bisher dargestellten Evaluationssystem wurde das Smart Grid Simulationsframework mosaik und realitätsnahe, zur Laufzeit nicht beeinflussbare Simulationsmodelle verwendet. Für DynaSCOPE wurde die Kopplung mit dem vorangegangenen Prozessschritt der DVPP-Bildung sowie die Kommunikation mit mosaik umgesetzt. Anhand eines Beispiels wurde die Integration von DVPP-Bildung, Initialplanung und Parametrierung der Einheiten mit den mittels DynaSCOPE generierten Fahrplänen umgesetzt. Die Ergebnisse wurden in [[Nie+14a](#)] veröffentlicht.

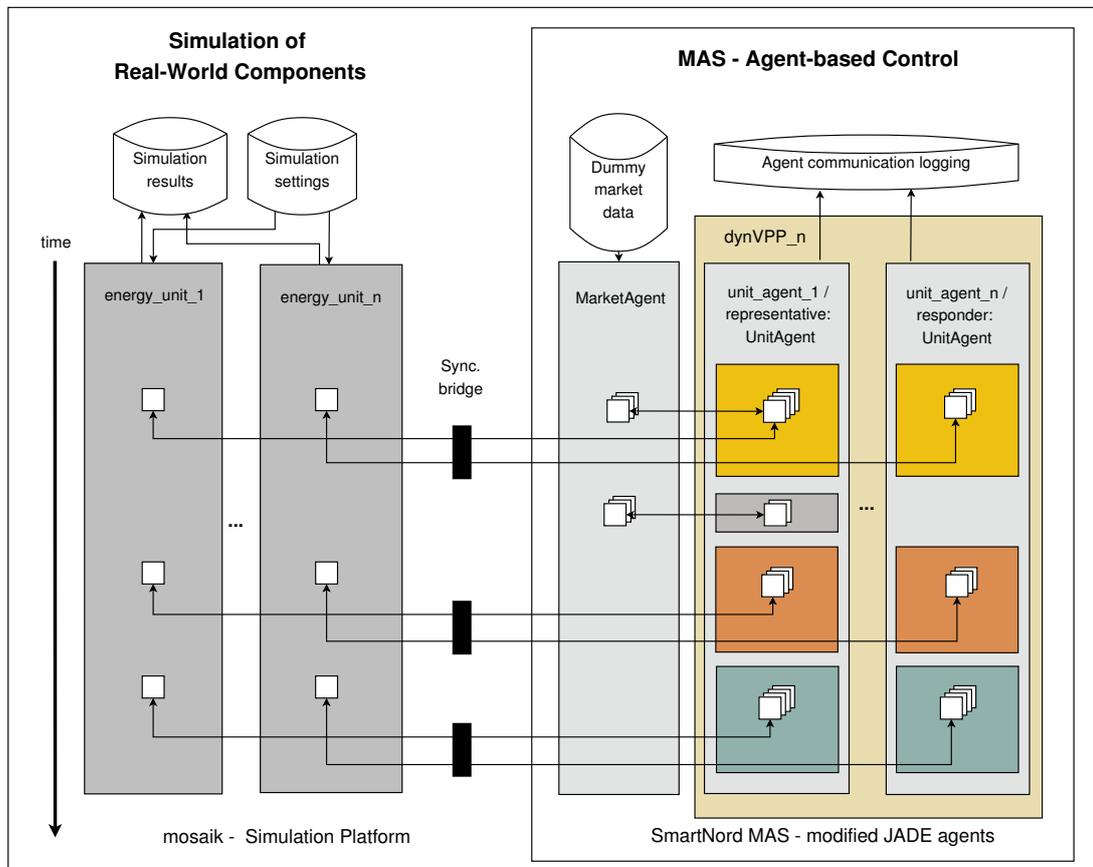


Abbildung 8.2: Prozessintegration: Konzeption des technischen Durchstichs. Quelle: [Nie+14a]

8.3 UMSETZUNG DES PRODUKTBEZUGS IM BASISVERFAHREN

8.3.1 Hypothesenbildung, Szenario und Experimente

Wie im Erweiterungskonzept dargestellt wurde, soll im ersten Evaluationsschritt geprüft werden, ob der Produktbezuges auf Grundlage des gewählten Basisverfahrens unter Erhalt der wesentlichen Eigenschaften umgesetzt wurde (siehe [Abbildung 6.3](#), Seite 111). Evaluiert wird das Verfahren bei Einsatz für die Initialplanung, d. h. für die DVPP-interne Optimierung des Einsatzplanes nach Abschluss des Markt-Matchings (siehe [Abschnitt 1.3](#)).

Basierend auf den Evaluationsergebnissen nach [Hin14] wurden Eigenschaften abgeleitet, die als Hypothesen in die nun folgende Prüfung eingehen sollen. Diese beziehen sich auf die Performanz (d. h. die Güte der erzielten Lösung, die nur aus dem zur Verfügung stehenden Lösungsraum zu bestimmen ist) und die Robustheit des Verfahrens bezogen

auf typische Parameter, die im Feld Schwankungen unterliegen können. Die Hypothesen in diesem Abschnitt werden mit dem Präfix H-BV (Hypothese zum Eigenschaftserhalt des Basisverfahrens) versehen, die durchgeführten Experimente mit dem Präfix E-BV.

In [Tabelle 8.1](#) sind die Hypothesen zusammenfassend dargestellt: Bezogen auf die **Performanz** des Verfahrens wurde in synthetischen Problem instanzen aufgezeigt, dass das Verfahren in allen Fällen eine sehr gute Lösungsgüte in der Nähe des theoretischen Optimums erzielt. Es wird daher die Hypothese aufgestellt, dass eine beliebige initiale Fahrplanauswahl durch das Verfahren deutlich verbessert werden kann (Hypothese H-BV-1). Wird dagegen mit Problem instanzen gearbeitet, für die der Lösungsraum nicht bekannt ist, so kann an dieser Stelle nur abgeschätzt werden: Es ist möglich, dass der Lösungsraum eine solche Struktur aufweist, dass das Auffinden einer Lösung nahe am Optimum trivial ist. Es ist daher erforderlich, zur Prüfung der These H-BV-1 synthetische Problem instanzen mit bekanntem Lösungsraum zu prüfen.

Für die Prüfung der Eigenschaften der **Robustheit** wurde für das Basisverfahren eine nur geringfügige Abhängigkeit der Lösungsgüte von der Dichte des Kommunikationsnetzes, der Nachrichtenverzögerung sowie der Reaktionsverzögerung aufgezeigt. Die Dichte des Kommunikationsnetzes kann innerhalb des Verfahrens kontrolliert werden. Nachrichtenverzögerung und Reaktionsverzögerung müssen als Nebenbedingungen betrachtet werden, die bei einer Umsetzung im Feld ggf. nicht kontrolliert werden können. Der Einfluss dieser Parameter auf die Simulationsdauer und die Nachrichtenmenge wurde ebenfalls ermittelt. Die Hypothesen H-BV-2 bis H-BV-8 fassen die Erkenntnisse zusammen. Um diese Hypothesen zu prüfen, wird ebenfalls mit einer synthetischen Problem instanz und enumerierten Fahrplanräumen gearbeitet: So können eventuelle Effekte durch die Integration der kontinuierlichen Suchraumdarstellung ausgeschlossen werden. [Abschnitt 8.4](#) widmet sich der Prüfung, ob die Eigenschaften auch bei Verwendung des Suchraummodelles erhalten bleiben.

Die in der Evaluation des Basisverfahrens verwendete Problem instanz ist auf den Spezialfall des Planungshorizont-maximalen DVPP (siehe [Beispiel 6.2](#), Seite 109) abbildbar: Definiert wird ein DVPP innerhalb eines Systems, das nur genau ein Produkt aufweist. Der Produktzeitraum entspricht weiterhin dem Planungshorizont. In [Experimentensteckbrief 8.1](#) wird das verwendete Szenario, die Parametrierung sowie die durchgeführten Experimente zusammenfassend dargestellt.

Als domänenspezifisches Performanzkriterium ist es entscheidend für die Bewertung des Verfahrens, wie gut der ermittelte Einsatzplan die Wirkenergievorgabe des Produktes erfüllt. Zunächst stellt sich daher die Frage, wie gut das Produkt unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Fahrpläne erreicht werden kann. Dazu wird im Folgenden die anteilige Produkterfüllung f_{e_p} als Metrik angewendet, die bereits für die Definition der globalen Zielfunktion definiert wurde (siehe Seite 124).

Erfüllt ein DVPP das Produkt vollständig, so ist die anteilige Produkterfüllung 1.0. Sind

Untersuchungsziel: Prüfung auf Eigenschaftserhalt des Basisverfahrens

- H-BV-1 Das Verfahren führt eine zufällige, beliebig schlechte initiale Fahrplanauswahl aller Agenten zu einer deutlich verbesserten Auswahl.
- H-BV-2 Der Vernetzungsgrad der Kommunikationstopologie hat nur geringen Einfluss auf die Lösungsgüte, es ist aber kein Trend erkennbar.
- H-BV-3 Je höher der Vernetzungsgrad in der Kommunikationstopologie, desto kürzer ist die Simulationsdauer.
- H-BV-4 Je höher der Vernetzungsgrad in der Kommunikationstopologie, desto mehr Nachrichten werden bis zur Konvergenz des Verfahrens verschickt.
- H-BV-5 Die Nachrichtenlaufzeit hat keinen erkennbaren Einfluss auf den verbleibenden Fehler.
- H-BV-6 Je höher die maximale Nachrichtenlaufzeit, desto länger benötigt das Verfahren bis zur Terminierung.
- H-BV-7 Die maximale Nachrichtenlaufzeit hat keinen erkennbaren Effekt auf die Lösungsgüte.
- H-BV-8 Die maximale Reaktionsverzögerung hat keinen erkennbaren Effekt auf die Lösungsgüte.

Tabelle 8.1: Hypothesen zum Eigenschaftserhalt des Basisverfahrens bei der Umsetzung des Produktbezugs

die Lösungsräume vollständig bekannt, so ist theoretisch (aber ggf. mit hohem Rechenaufwand) ermittelbar, wie hoch die anteilige Produkterfüllung maximal sein kann. In synthetischen Probleminstanzen mit bekannten Fahrplänen können so Zielvorgaben gemacht werden, die durch die Fahrpläne zu 100% erfüllbar sind – die anteilige Produkterfüllung kann somit den Wert 1.0 erreichen; das theoretische Optimum ist bekannt.

Für die anwendungsbezogenen Probleminstanzen in nachfolgenden Untersuchungen wird die anteilige Produkterfüllung ebenfalls bestimmt. Es kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass der Wert 1.0 theoretisch erreichbar ist. Von großer Bedeutung bei unbekanntem Lösungsräumen, wie die anwendungsbezogenen Probleminstanzen sie darstellen, ist aber die Streuung dieser Gütemetrik. Es ist somit weniger von Bedeutung, ob die anteilige Produkterfüllung nach Terminierung des Verfahrens bei 1.0 liegt, sondern ob und wie der Wert in Richtung des ggf. nicht erreichbaren Wert von 1.0 im Laufe des Verfahrens ändert. Evaluiert werden sollte somit, wie sich Lage und Streuung abhängig von der gewählten Parametrierung des Verfahrens ändern.⁴

Für die Bewertung der Experimente wird weiterhin die Simulationsdauer der Initialpla-

⁴Die Zuordnung eines Produktes zu einer Menge von Einheiten-Agenten und damit die Festlegung des Zielproduktes ist Thema der DVPP-Bildung und wird daher hier als vorangegangener Prozessschritt vorausgesetzt.

nung $dur_{\gamma_{\psi}^0}$ und der Kooperationsaufwand der Initialplanung $coop_{\gamma_{\psi}^0}$ herangezogen. Mit γ_{ψ}^0 wird der Einsatzplan des DVPP ψ bezeichnet, in dem das Verfahren bei der initialen Einsatzplanung konvergiert. Es handelt sich somit um den ersten kooperativ ermittelten Einsatzplan im Verlauf der kontinuierlichen Einsatzplanung.

Definition 8.1 (Simulationsdauer der Initialplanung $dur_{\gamma_{\psi}^0}$)

Die Simulationsdauer der Initialplanung $dur_{\gamma_{\psi}^0}$ bezeichnet die simulierte Zeitspanne, die zwischen Beginn und Terminierung des Verfahrens im Simulationssystem verstreicht.

Die Simulationsdauer der Initialplanung $dur_{\gamma_{\psi}^0}$ wird in Millisekunden (ms) angegeben.

Definition 8.2 (Kooperationsaufwand der Initialplanung eines DVPP $coop_{\gamma_{\psi}^0}$)

Der Kooperationsaufwand der Initialplanung eines DVPP $coop_{\gamma_{\psi}^0}$ bezeichnet die Anzahl der Nachrichten, die von Beginn eines Planungsprozesses bis zum Ende des Verfahrens zwischen den Agenten des DVPP ψ ausgetauscht werden, um einen gemeinsamen Einsatzplan zu ermitteln.

Er setzt sich zusammen aus der Anzahl der Nachrichten, die bis zur Ermittlung eines ersten Lösungskandidaten ausgetauscht werden, und der Anzahl der Nachrichten für die Optimierung dieses Lösungskandidaten.

publiziertes synthetisches Szenario verwendet. Die Darstellung des durchgeführten Experimentes E-BV-0 auf Seite 170 beschreibt die Eigenschaften des Experimentes in Form eines Experimenten-Steckbriefs. Es wurden 100 Versuche in der Standardparametrierung durchgeführt. Für ein weitergehendes Verständnis zur Problemkonstruktion sei auf [HLS14] verwiesen.⁵

Die Versuche zeigten insgesamt 22 unterschiedliche Ergebniswerte für die anteilige Produkterfüllung f_{e_p} (siehe Definition 7.9) bei Ende des Verfahrens. In Tabelle 8.2 sind die Ergebnisse dieses Experimentes für die Startkonfiguration, die beste und die schlechteste Lösung zusammengefasst. Dabei wird Bezug auf den im Mittel über alle Intervalle erzielten Wert genommen – dieser Wert entspricht nicht der Zielfunktion, sondern dient lediglich der Veranschaulichung der Entwicklung der Ergebnisgüte.

Die schlechteste Lösung über alle Versuchsreihen zeigt eine anteilige Produkterfüllung von ca. 1.0016.⁶ Vergleicht man die Mittelwerte der Zielerfüllung als Absolutwerte, so ergibt sich folgendes Bild: Bei der schlechtesten Lösung wird anstelle des Zielwertes von 521.8 (Produkt) bei der schlechtesten Lösung ein ungefährender Wert von 522.608 erreicht. Die Startlösung wies im Vergleich einen deutlich höheren Wert von 607.653 auf – wie erwartet wird das Produkt zunächst übererfüllt und das Verfahren nähert diesen Wert deutlich dem Zielwert an. Die beste gefundene Lösung liegt bei einer Produkterfüllung von 1.0004 und damit einem mittleren Absolutwert von ca. 521.998. Im Vergleich dazu liegt die beste Lösung der Probleminstanz bei den Versuchen von Hinrichs bei einem Wert von 522.8 und damit einer Produkterfüllung von 1.0019.

In Anbetracht der nur sehr geringen Unterschiede bei einer Neuimplementierung des Verfahrens auf anderer technologischer Plattform erscheinen die erzielten Ergebnisqualitäten somit gleichwertig. Mit diesen Ergebnissen kann die Hypothese H-BV-1 bestärkt werden: Das Verfahren führt eine zufällige, beliebig schlechte initiale Fahrplanauswahl aller Agenten zu einer deutlich verbesserten Auswahl.

8.3.3 Prüfung der Robustheit

Dichte der Kommunikationstopologie Zur Prüfung der Robustheit des Verfahrens gegenüber Änderungen in der Dichte der Kommunikationstopologie (Hypothesen H-BV-2, H-BV-3 und H-BV-4) wurde analog zu [Hin14] die bereits vorgestellte synthetische Probleminstanz verwendet. Variiert wurde nun im Experiment E-BV-1 der SmallWorld-Parameter ϕ , mit dem die Dichte der Kommunikationstopologie beeinflusst werden kann: Je größer der Wert ϕ , desto mehr Verbindungen zwischen den Agenten werden – zusätzlich zur ini-

⁵An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass gezeigt werden konnte, dass durch die formale Problemkonstruktion die Verwendung nur einer Probleminstanz der Problemkonstruktion ausreichend war. In [HS14b] wurden Ergebnisse für eine zufällig gewählte Probleminstanz dargestellt, welche die Eigenschaften des Basisverfahrens, die an einer synthetischen Probleminstanz gezeigt wurden, bestätigten.

⁶Als Dezimaltrennzeichen wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Punkt verwendet.

	Mittelwert (absolut)	Produkterfüllung (%)
Zielprodukt	521.8	1.0
Startkonfiguration	607.653	1.1645
Schlechteste Lösung	522.608	1.0016
Beste Lösung	521.998	1.0004

Tabelle 8.2: Experiment E-BV-0: Referenzexperiment zur Performanz in Standard-Parametrierung. Dargestellt sind für die Startkonfiguration (erster Lösungskandidat), die schlechteste erzielte anteilige Produkterfüllung sowie die beste anteilige Produkterfüllung die Mittelwerte der Rohdaten der Produkterfüllung über die 5 Produktintervalle sowie die anteilige Produkterfüllung f_{e_p} aus 100 Versuchen.

tialen Ring-Topologie – eingezogen. In jeder Versuchsreihe wurde für den Parameter ϕ – angelehnt an die Evaluation des Basisverfahrens – eine Belegung zwischen 0.0 und 2.0 gewählt.⁷ In den 100 Versuchen pro Versuchsreihe wurde der Zufallswert für den Aufbau der SmallWorld-Topologie variiert (auf Basis des gleichen in jedem Versuch einer Versuchsreihe veränderten *random seed*). Nachrichtenverzögerung und minimale Reaktionszeit wurden auf 200 ms festgelegt. Eine zufällige Verzögerung der Reaktionszeit wurde nicht gewählt ($r_a^{min} = r_a^{max}$).

In [Abbildung 8.3](#) sind die Effekte auf die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer und den Kooperationsaufwand dargestellt. Jeder Eintrag auf der X-Achse entspricht dabei 100 Versuchen der entsprechenden Versuchsreihe für den an der X-Achse angegebenen Dichte-Parameter ϕ . Die Ergebnisse jeder Versuchsreihe sind als Boxplot angegeben: Die Box stellt die beiden mittleren Quartile der Ergebnisse dar, die Ausläufer die beiden äußeren Quartile. Der Median wird als blauer Strich in der Box dargestellt, der Mittelwert als blauer Kreis. Ausreißer sind als Einzelwerte mit Kreuzen vermerkt.

Mittelwert und Median der anteiligen Produkterfüllung (obere Grafik) zeigen sich über alle Parametrierungen weitgehend stabil. Die Lage und Menge der Ausreißer ist in allen Versuchsreihen mit $\phi > 0.0$ und damit zufallsgebundenen Effekten im Aufbau der Topologie vergleichbar. Die Hypothese H-BV-2 kann somit als bestärkt bewertet werden: Der Vernetzungsgrad der Kommunikationstopologie zeigt nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisgüte.

Die Simulationsdauer (mittlere Grafik) nimmt mit zunehmendem ϕ ab. Gleichzeitig nimmt der Kooperationsaufwand mit zunehmendem ϕ ebenfalls zu. Die Hypothesen H-BV-3 und H-BV-4 können somit gestärkt werden: Je größer die Dichte des Kommunikationsnetzes,

⁷In [Anhang A](#) (Seite 267) sind beispielhafte Topologien für unterschiedliche Parameterbelegungen in einem DVPP mit 100 Agenten dargestellt.

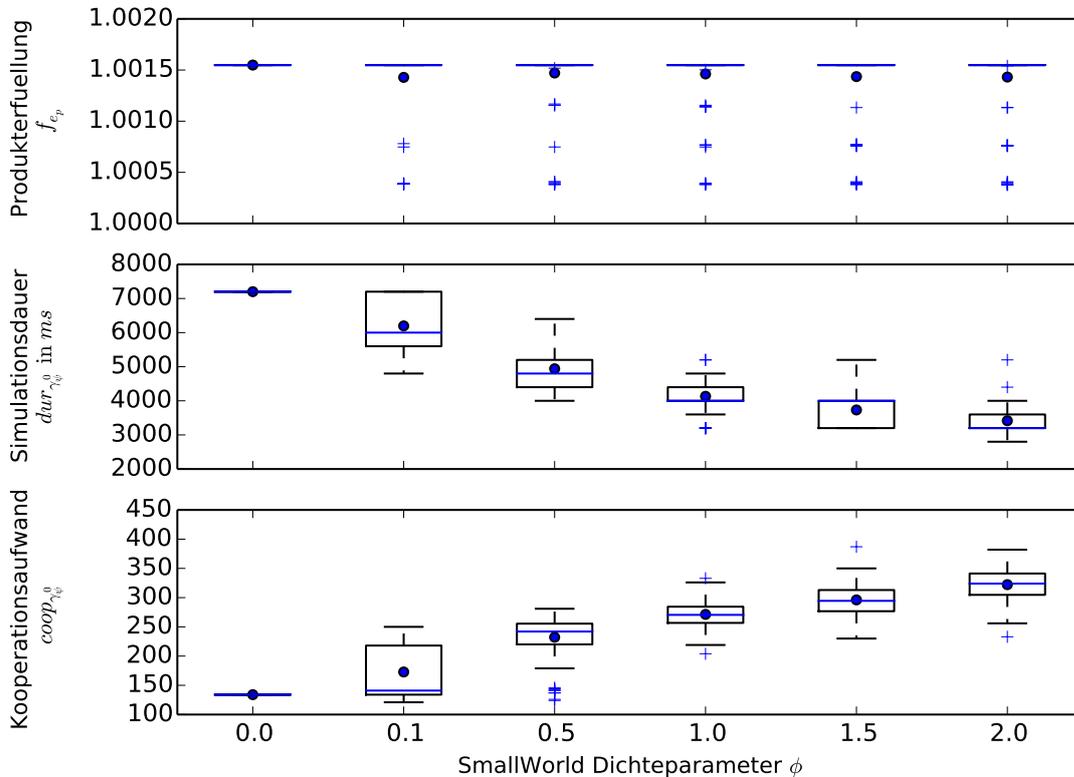


Abbildung 8.3: Experiment E-BV-1: Variation des Dichte-Parameters der Kommunikationstopologie. Dargestellt sind die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Parametrierungen des Dichte-Parameters ϕ . Jede Versuchsreihe stellt die Werte von 100 Versuchen als Boxplot dar. Mit einem Kreis ist die Lage des arithmetischen Mittels eingetragen.

desto mehr Nachrichten werden versandt und desto kürzer ist die Simulationsdauer bis zum Ende des Verfahrens.

Weiterhin ist festzustellen, dass die Anzahl der Nachrichten sich in der gleichen Größenordnung bewegt wie in den Arbeiten zum Basisverfahren dargestellt. Bei $\phi = 0.0$ wird in allen Fällen die gleichen Ergebnisse erzielt; die Umsetzung enthält keine zufallsabhängigen Variablen, die sich auf die Ergebnisgüte, die Simulationsdauer oder den Kooperationsaufwand auswirken würden.

Nachrichtenlaufzeit Für die Prüfung der Robustheitseigenschaften in Bezug auf die Nachrichtenlaufzeit wurde ebenfalls die synthetische Problem Instanz mit enumerierten Fahrplänen eingebracht. Jeweils 100 Versuche wurden mit unterschiedlichen maximalen

Nachrichtenlaufzeiten integriert (Experiment E-BV-2). Die minimale Nachrichtenlaufzeit betrug 200 ms. Bei maximaler Nachrichtenlaufzeit von 200 ms wird somit keine zufällige Nachrichtenverzögerung eingebracht – diese Parametrierung stellt den Referenzfall dar.

In **Abbildung 8.4** sind die Ergebnisse für die erzielte anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie den Kooperationsaufwand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die anteilige Produkterfüllung weitgehend stabil ist. Während der Median in allen Versuchsreihen bei ca. 1.0015 liegt, zeigt sich eine geringe Veränderung bei einer Nachrichtenverzögerung von 600 ms: Das lokale Optimum bei ca. 1.0011 scheint hier häufiger aufgetreten zu sein. Die weitgehend stabile Ergebnislage entspricht hier den Ergebnissen der Evaluation des Basisverfahrens. Die Simulationsdauer nimmt mit zunehmender maximaler Nachrichtenlaufzeit zu.

Die Thesen H-BV-5 (kein erkennbarer Einfluss der Nachrichtenlaufzeit auf den verbleibenden Fehler) und H-BV-6 (Wachstum der Simulationsdauer mit der maximalen Nachrichtenlaufzeit) werden durch diese Ergebnisse als gestärkt angesehen.

Reaktionsverzögerung Wie in Hypothese H-BV-8 dargelegt, konnte für das Basisverfahren eine Robustheit gegenüber einer verzögerten Verarbeitung von eingehender Information festgestellt werden. Für einen Einsatz des Verfahrens im Feld ist das von großer Bedeutung: Wird das Verfahren im Feld verteilt auf unterschiedlichen Komponenten umgesetzt, so wird die Verarbeitungsgeschwindigkeit unterschiedlich sein. Ebenso wie der Faktor Nachrichtenverzögerung ist es wichtig aufzuzeigen, ob das Verfahren in der Ergebnislage unabhängig von einer (ggf. sogar synchronisierten) Reaktionszeit der Komponenten ist, die im Feld nur unter großem Aufwand zu erreichen ist.⁸

Im Experiment E-BV-3 wurde das Verfahren bezüglich der Variation der Reaktionsverzögerung anhand der synthetischen Problemistanz geprüft. Die Verzögerung wurde in fünf unterschiedlichen Parametrierungen mit jeweils 100 Versuchen in das Verfahren eingebracht. Die minimale Reaktionszeit betrug in allen Fällen 200 ms und entspricht somit der in diesem Experiment festgelegten Nachrichtenlaufzeit. Es erfolgt daher in allen Versuchsreihen eine gebündelte Verarbeitung von Nachrichten, die innerhalb von 200 ms eintreffen: Bei $r_a^{min} = r_a^{max}$ findet keine zufallsbasierte Verzögerung statt; die Ergebnisse stellen die Referenz-Versuchsreihe dar.

In **Abbildung 8.5** sind die Effekte der Reaktionsverzögerung auf die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie den Kooperationsaufwand dargelegt. Mit Ausnahme eines Ausreißer bei einer maximalen Verzögerung von 1000 ms ist die Ergebnislage stabil auf dem auch in den anderen Experimenten ermitteltem Niveau. Während die Simulationsdauer eine steigende Tendenz zeigt, entwickelt sich der Kooperationsaufwand $coop_{\gamma,\psi}^0$

⁸In **Kapitel 9** werden unterschiedliche technische Realisierungsoptionen diskutiert, für die solche Aspekte von Bedeutung sind.

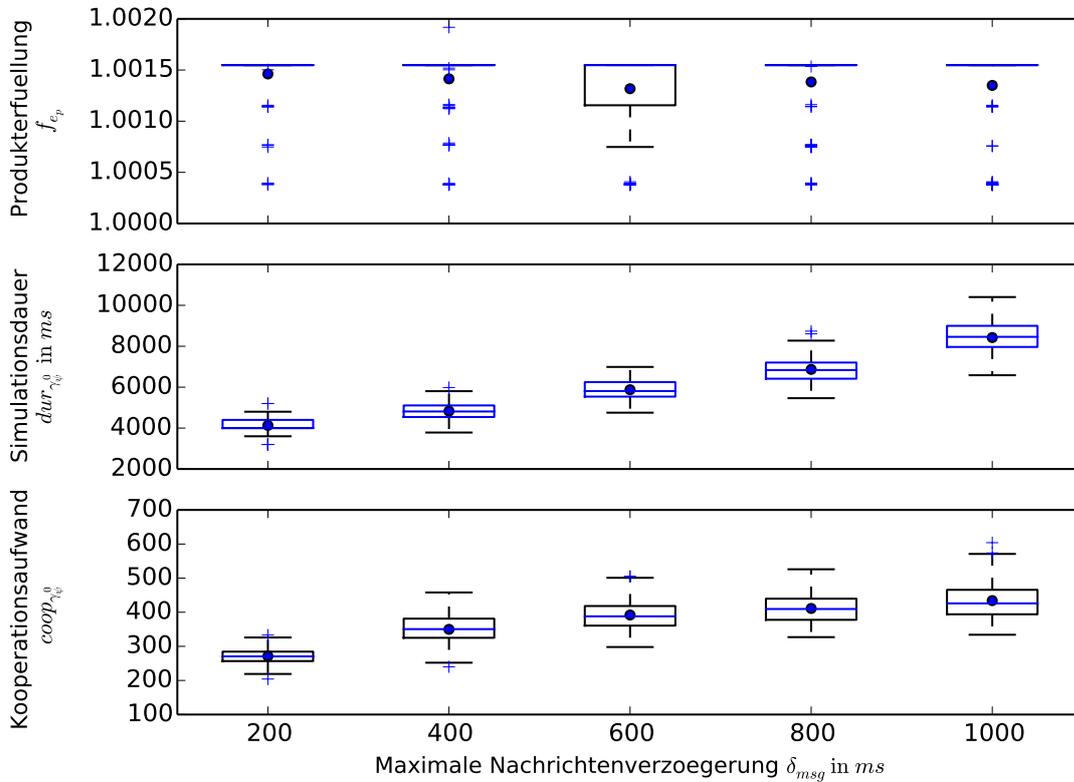


Abbildung 8.4: Experiment E-BV-2: Variation der maximalen Nachrichtenlaufzeit δ_{msg} . Dargestellt sind die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Parametrierungen der maximalen Nachrichtenlaufzeit δ_{msg} . Jede Versuchsreihe stellt die Werte von 100 Versuchen als Boxplot dar.

gegenläufig.

Zusammenfassend wird Hypothese H-BV-8 durch die hier dargestellten Ergebnisse als bestärkt betrachtet: Die maximale Reaktionsverzögerung hat keinen erkennbaren Effekt auf die Lösungsgüte.

8.3.4 Zwischenfazit

Ziel der in diesem Abschnitt dargestellten Experimente war es aufzuzeigen, dass – trotz Reimplementierung auf anderer technologischer Basis und Anpassung des Verfahrens an den Produktbezug Dynamischer Virtueller Kraftwerke – wesentliche Eigenschaften der Heuristik COHDA erhalten werden konnten. Im Detail untersucht wurde Lösungsgüte und Robustheit anhand einer synthetischen Probleminstanz, für die das Verhalten des Basisverfahrens publiziert wurde. Die aufgestellten Hypothesen H-BV-1 bis H-BV-8 konnten bestärkt

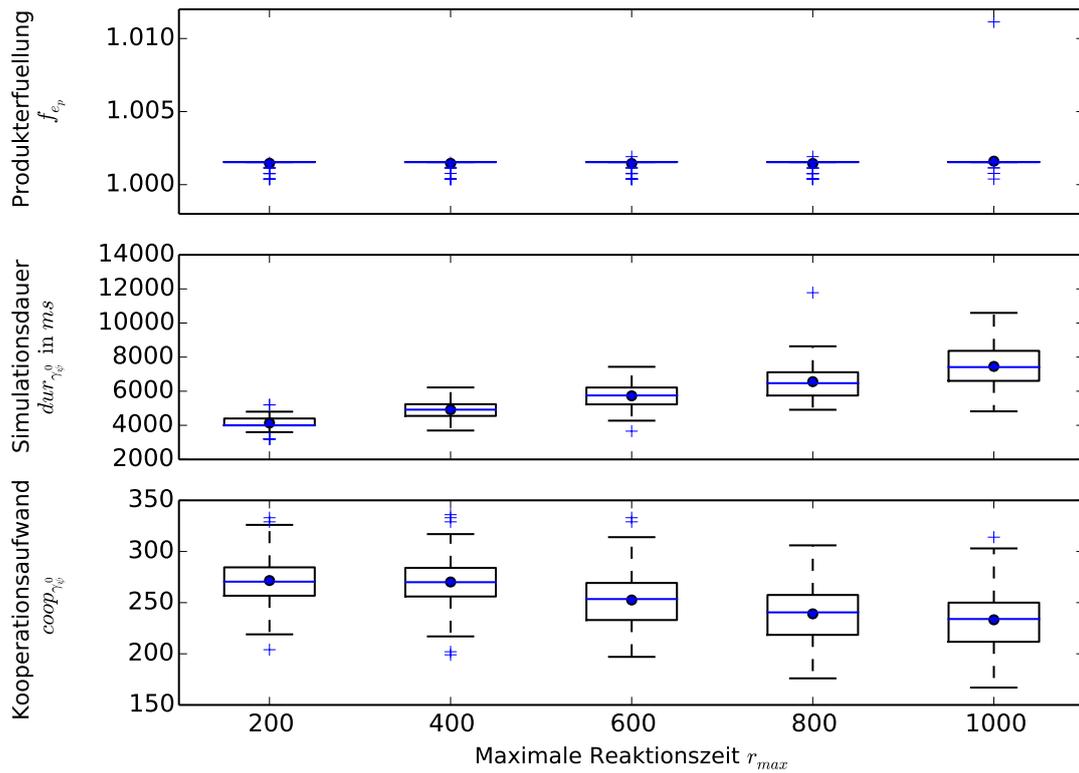


Abbildung 8.5: Experiment E-BV-3: Variation der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max} . Dargestellt sind die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Parametrierungen der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max} . Jede Versuchsreihe stellt die Werte von 100 Versuchen als Boxplot dar.

werden: Das erweiterte Verfahren erreicht im Spezialfall des Planungshorizont-maximalen DVPP eine vergleichbare Lösungsqualität und zeigt die gleichen Abhängigkeiten in Parameterstudien zur Dichte des Kommunikationsnetzes und zur Nachrichtenlaufzeit.

8.4 FAHRPLANAUSWAHL AUS KONTINUIERLICHEM SUCHRAUM

8.4.1 Hypothesenbildung, Szenario und Experimente

Anhand synthetischer Szenarien konnte gezeigt werden, dass die Robustheitseigenschaften des Basisverfahrens trotz Erweiterung auf den Produktbezug Dynamischer Virtueller Kraftwerke erhalten wurden. Der Anwendungskontext des Verfahrens im Rahmen dieser Arbeit sieht deutlich größere Szenarien mit anderer Darstellung des jeweiligen Suchraums der Agenten vor: Die stützvektorbasierte Darstellung in Kombination mit dem Dekoder-Ansatz führt zu einer potentiell (abhängig von den Trainingsdaten) extrem großen Menge unterschiedlicher Fahrpläne, aus denen die Agenten ihre Fahrplanauswahl treffen können.

Es wird daher im Folgenden evaluiert, ob die Performanz- und Robustheitseigenschaften des Basisverfahrens auch bei Verwendung mit kontinuierlichem Suchraum nachzuweisen sind. Insbesondere in größeren Szenarien bezüglich der Anzahl der Agenten sollte hier geprüft werden, ob das Verfahren eine ausreichende Performanz und Robustheit für den Einsatzzweck in der kontinuierlichen Einsatzplanung aufweist. Die Abschnitte 8.4.2 und 8.4.3 widmen sich diesen Fragestellungen.

In Vorversuchen wurde ermittelt, dass die Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung zu einer deutlich vergrößerten Nachrichtenmenge im System führt (hoher Kooperationsaufwand), da die Agenten ggf. sehr feine Nachjustierungen der Lösungsgüte vornehmen können. Die Einführung eines Sensitivitätsparameters soll hier ein Abwägen zwischen Lösungsgüte und Nachrichtenmenge bzw. Laufzeit erlauben und wird in den nachfolgend beschriebenen Experimenten daher auf ihre Effekte hin geprüft (Abschnitt 8.4.4).

Aufbauend auf diesen Fragestellungen werden die in Tabelle 8.3 zusammengefassten Hypothesen aufgestellt. Zur Prüfung der Hypothesen wurde ein Szenario gewählt, dass im Vergleich zur synthetischen Problem Instanz um den Faktor 10 vergrößert ist. Die Auswahl der Einheiten-Typen wurde so gewählt, dass durch die resultierenden Suchraummodelle unterschiedliche Lösungsräume konstruiert werden: Gewählt wurde ein Szenario mit 100 Agenten, die gemeinsam ein Produkt um die Mittagszeit erbringen sollen. Die Agenten vertreten BHKW und PV-Anlagen.⁹ Das Produkt wurde so gewählt, dass es prinzipiell reali-

⁹Es wäre an dieser Stelle auch möglich, mit rein synthetischen Modellen zu arbeiten, um unterschiedliche Suchräume zu erstellen. Im Sinne einer einfacheren Nachvollziehbarkeit der Experimente werden hier aber typische Anlagentypen gewählt. Es ist allerdings wichtig, an dieser Stelle noch keine Bewertung der Einsatzgüte bezogen auf weitere Kriterien wie z. B. der maximierten Integration erneuerbarer Energieträger vorzunehmen, da das Verfahren für die hier vorgestellten Untersuchungen nicht für solche Optimierungsziele parametrisiert wird.

Untersuchungsziel: Prüfung auf Anwendbarkeit des Verfahrens bei kontinuierlicher Suchraumdarstellung

- H-SSM-1 Das Verfahren führt auch bei Kombination mit der kontinuierlichen Suchraumdarstellung eine zufällige, beliebig schlechte initiale Fahrplanauswahl aller Agenten zu einer deutlich verbesserten Auswahl.
- H-SSM-2 Das Verfahren zeigt auch bei Kombination mit der kontinuierlichen Suchraumdarstellung die Robustheitseigenschaften des Basisverfahrens. Dies gilt auch für Probleminstanzen, die bezogen auf die Anzahl der Agenten deutlich erhöht sind.
- H-SSM-3 Über eine Erhöhung des Sensitivitätsparameters $\epsilon_{s,a}$ eines Agenten a bei lokaler Fahrplanauswahl wird der Kooperationsaufwand bis zur Terminierung des Verfahrens reduziert.
- H-SSM-4 Bei großen Werten von $\epsilon_{s,a}$ nimmt die Lösungsgüte ab.

Tabelle 8.3: Hypothesen zum Eigenschaftserhalt des erweiterten Verfahrens bei Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung

sierbar ist, d.h. in Vorversuchen bei zufälliger Auswahl von Fahrplänen aus den jeweiligen Suchräumen die anteilige Produkterfüllung um weniger als 0.01 vom Zielwert abwich und so einen möglichen Ausgangszustand nach Verbundbildung darstellte. Das Suchraummodell wurde mit Simulationsdaten eines Wintertages trainiert: Da die BHKW einen thermischen Lastgang zu erfüllen haben und auch in der Praxis aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten so ausgelegt werden, dass sie eine hohe Anzahl von Vollast-Betriebsstunden aufweisen, zeigen diese Anlagen am ausgewählten Wintertag nur eine sehr geringe Flexibilität. Die PV-Anlagen werden dagegen so parametrisiert, dass sie abgeregelt werden können. Die maximal mögliche Einspeisung dieser Anlagen entspricht dem Prognosewert. Das verwendete Szenario, die Standard-Parametrierung sowie die durchgeführten Parameter-Variationen sind in [Experimentensteckbrief 8.2](#) dargestellt.

8.4.2 Performanz

Für die Untersuchung der Robustheit wurde das Verfahren in der Standardparametrierung angewendet und eine Initialplanung für das dargestellte Szenario in eine Versuchsreihe mit 100 Ausführungen eingebracht (Experiment E-SSM-0). Die erzielten Ergebnisgüten als anteilige Produkterfüllung f_{e_p} sind in [Abbildung 8.6](#) als Histogramm dargestellt. Es wurden 10 Klassen gebildet. Die anteilige Produkterfüllung liegt bei 89 von 100 Versuchen bei nahezu 1.0. In 7 von 100 Fällen gelingt keine Verbesserung der Lösungsgüte des initialen Lösungskandidaten. In 4 weiteren Fällen zeigt das Verfahren eine frühe Konvergenz in Lösungskandidaten, die eine geringe Verbesserung zum initialen Lösungskandidaten

darstellen.

Die Güte der Lösungskandidaten zeigt eine deutliche Zweiteilung: Während in dem Großteil der Fälle sehr gute Lösungsgüten ermittelt wurden, sind andererseits sehr frühe Konvergenzen in schlechten Lösungsgüten möglich. Es ist an dieser Stelle noch nicht zu beurteilen, ob die geringe Lösungsgüte auf die Struktur des Suchraumes zurückzuführen ist, ob also den Agenten in den entsprechenden Versuchen keine Lösungen zur Verbesserung zur Verfügung standen. Im weiteren Verlauf der Evaluation wird dieser Aspekt daher noch einmal geprüft werden. Für die weiteren Versuche stellt dieses Performanz-Ergebnis die Basis dar: Es stellt die Verteilung der Güte in der Standardparametrierung dar und kann daher verwendet werden, um die Effekte von Parameter-Variationen in den Experimenten zur Robustheit des Verfahrens zu bewerten.

8.4.3 Prüfung der Robustheit

Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, ob das Verfahren eine ausreichende Robustheit für den Einsatzzweck in der kontinuierlichen Einsatzplanung in der gewählten Umsetzung mit kontinuierlicher Suchraumdarstellung aufweist.

Dazu wurde zunächst Experimente durchgeführt, bei denen entweder die Nachrichtenlaufzeit (Experiment E-SSM-1) oder die Reaktionsverzögerung (Experiment E-SSM-2) in mehreren Faktorstufen erhöht wurde. In beiden Experimenten wurde die minimale Reaktionszeit 200 ms gewählt und entspricht somit der minimalen Nachrichtenlaufzeit. Auf diese Weise wird in der ersten Versuchsreihe über r_a^{max} auf den Wert 200 gesetzt – so wird eine Bündelung von Nachrichten eingeführt, allerdings keine zufallsbedingte Variation zwischen den Agenten eingebracht. Es erscheint nicht sinnvoll, dass ein Agent Informationen, die ihm bereits vorliegen, weil sie quasi gleichzeitig eingetroffen sind, nicht gemeinsam abarbeitet, bevor er mit dem Versenden von Nachrichten auf die erhaltene Information reagiert: Die Phasen Wahrnehmung, Entscheidung, Aktion sollten vollständig nacheinander ausgeführt werden. Mit $r_a = [200, 200]$ wird somit dieser Fall abgedeckt.

In [Abbildung 8.7](#) sind die Ergebnisse des Experimentes E-SSM-1 dargestellt. Die Parametrierung $\delta_{msg} = 200 \text{ ms}$ stellt den Referenzfall dar, bei der keine zufallsbasierte Verzögerung von Nachrichten vorgenommen wird. Es ist zu erkennen, dass die anteilige Produkterfüllung bei steigender maximaler Nachrichtenverzögerung weitgehend stabil bleibt. Ebenso wie im untersuchten synthetischen Szenario steigen Kooperationsaufwand und Simulationsdauer mit zunehmender Nachrichtenverzögerung an. Die Robustheitseigenschaften bezüglich der Nachrichtenverzögerung können somit bestätigt werden.

In [Abbildung 8.8](#) sind die Ergebnisse für die Variation der maximalen Reaktionszeit dargestellt (Experiment E-SSM-2). Die erste Versuchsreihe ($r_a^{max} = 200 \text{ ms}$) stellt wiederum den Referenzfall dar, bei dem die eintreffende Information lediglich gebündelt abgearbeitet wird. Erst mit Parametrierung einer Reaktionszeit von 400 ms wird die Abarbeitung zu-

Experimentensteckbrief 8.2 (PV-BHKW-Szenario mit Suchraummodell)

Prüfung der Performanz und Robustheit des Verfahrens bei kontinuierlicher Suchraumdarstellung

Szenario

Zeitmodell [Definition 5.4](#) (Seite 70)

Einheiten-Ebene	○ BHKW:	31 Anlagen, Vaillant Ecopower 4.7kW
	○ PV:	69 Anlagen, 30kW _p abregelbar
Agenten-Ebene	○ Domäne:	kontinuierlich, Suchraummodell
DVPP-Ebene	○ Produkthorizont:	60 Minuten
	○ Produktintervalle:	1
	○ Produktzeitraum:	12 - 13 Uhr
	○ Zielvorgabe:	600 kWh

Standard-Parametrierung

○ Dichte der Kommunikationstopologie:	$\phi = 0.5$
○ Nachrichtenverzögerung:	$\delta_{msg} = 200ms$
○ Reaktionsverzögerung:	$r_a = [200, 200]$
○ Sensitivität bei Suchraumabfrage:	$\epsilon_{s,a} = 0.0$
○ Trainingsdaten für Suchraummodell:	Wintertag, 100 Samples

Experimente ([Abschnitt 8.4.3](#), [Abschnitt 8.4.4](#))

- E-SSM-0: Prüfung der Performanz in der Standard-Parametrierung
- E-SSM-1: Variation der maximalen Nachrichtenverzögerung δ_{msg}
- E-SSM-2: Variation der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max}
- E-SSM-3: Variation der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max} bei erhöhter Dichte der Kommunikationstopologie $\phi = 1.0$
- E-SSM-4: Variation der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max} bei hoher maximaler Nachrichtenverzögerung
- E-SSM-5: Variation der Sensitivität bei Suchraumabfrage $\epsilon_{s,a}$

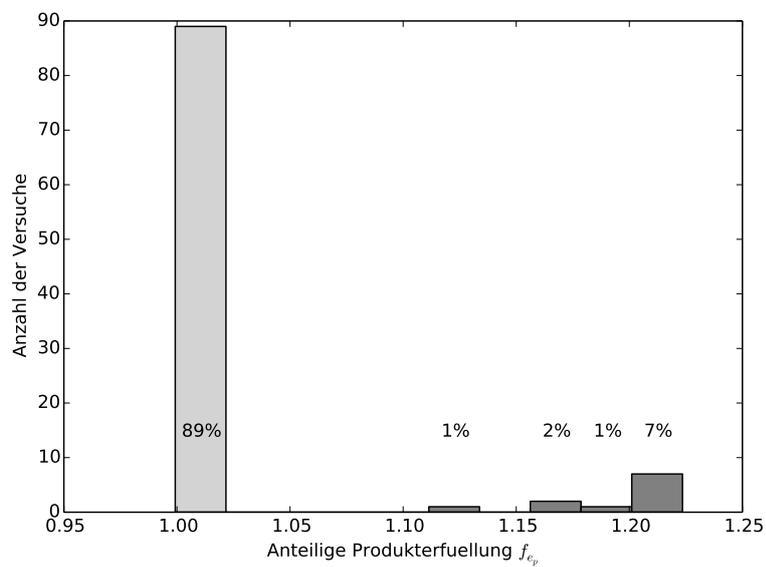


Abbildung 8.6: Experiment E-SSM-0: Prüfung der Performanz in der Standard-Parametrierung. Dargestellt wird ein Histogramm der anteiligen Produkterfüllung aus 100 Versuchen. Das Suchraummodell wurde in jedem Versuch mit den gleichen Trainingsdaten, aber anderem Seed aufgebaut.

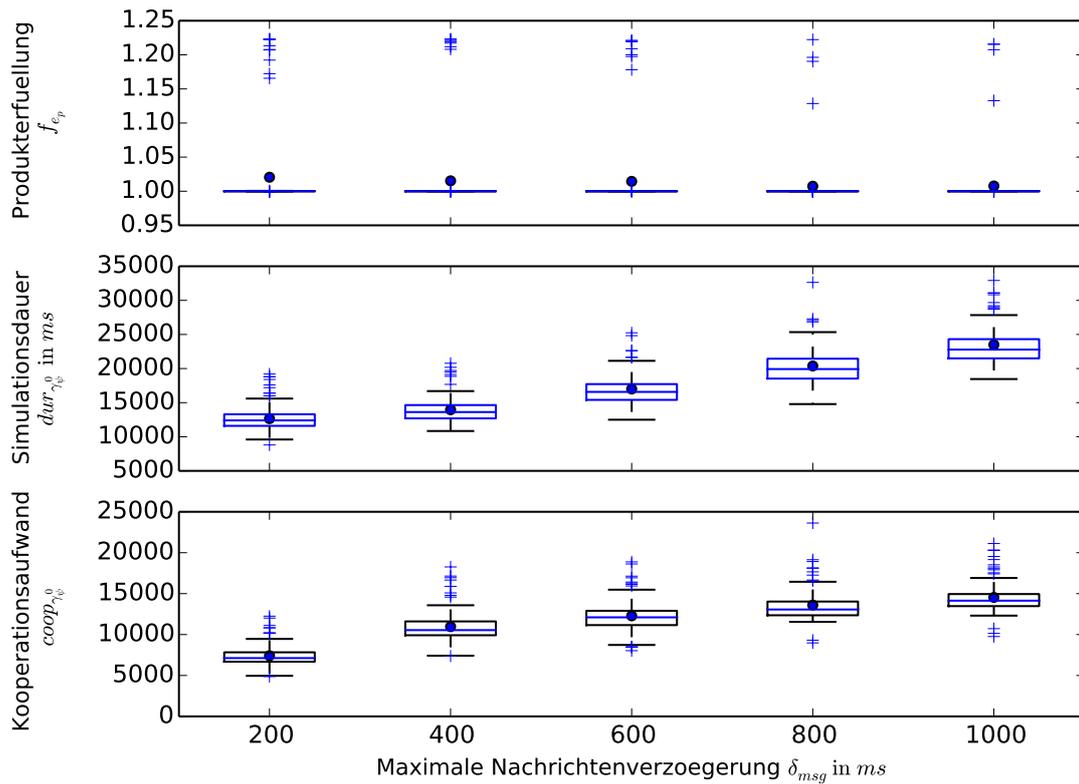


Abbildung 8.7: Experiment E-SSM-1: Variation der maximalen Nachrichtenverzögerung δ_{msg} . Dargestellt sind die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Parametrierungen der maximalen Nachrichtenverzögerung δ_{msg} . Jede Versuchsreihe stellt die Werte von 100 Versuchen als Boxplot dar.

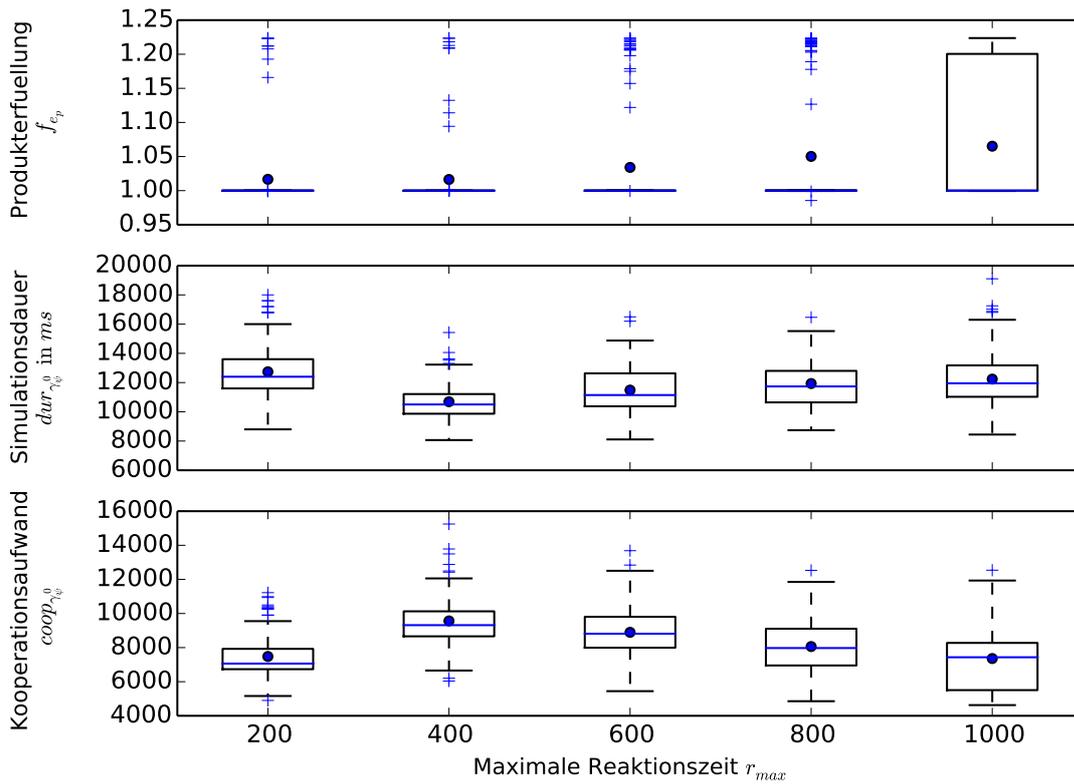


Abbildung 8.8: Experiment E-SSM-2: Variation der maximalen Reaktionszeit r_a^{max} . Dargestellt sind die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Parametrisierungen der maximalen Reaktionszeit r_a^{max} . Jede Versuchsreihe stellt die Werte von 100 Versuchen als Boxplot dar.

sätzlich zufallsbasiert verzögert. Zunächst einmal ist ein Sprung im Kooperationsaufwand und der Simulationszeit mit Einbringen einer zufallsbasierten Verzögerung zu erkennen: Bei $r_a^{max} = 400$ sinkt die Simulationsdauer und die Nachrichtenanzahl nimmt zu. Mit weiterer Erhöhung der maximalen Reaktionsverzögerung steigt die Simulationsdauer leicht an, während der Kooperationsaufwand wieder abnimmt. Der Mittelwert der Nachrichtenanzahl von ca. 7500 in der Referenzversuchsreihe wird erst bei der höchsten maximalen Reaktionsverzögerung wieder erreicht; gleiches gilt für die Simulationsdauer. Die anteilige Produkterfüllung zeigt einen unerwünschten Effekt: Mit zunehmender Verzögerung nehmen die Ausreißer im deutlich schlechteren Wert um 1.22 zu. Dieser Wertebereich entspricht der durchschnittlichen Qualität der ersten vollständigen Lösung (siehe [Abschnitt 8.4.2](#)). Es muss somit der Schluss gezogen werden, dass bei einer hohen Reaktionszeit eine Verbesserung des initialen Lösungskandidaten nicht mehr robust gelingt.

Es kann somit festgestellt werden, dass das Verfahren bei Verwendung mit dem Suchraummodell in großen Szenarien eine im Vergleich zu den synthetischen Szenarien reduzierte Robustheit bezüglich der Verzögerung der Reaktionszeit aufweist. Die Hypothesen H-SSM-1 und H-SSM-2 können somit nicht als gestärkt angesehen werden.

Erklärungsansätze und Hypothese Das Basisverfahren beruht darauf, dass ein initialer Lösungskandidat im kooperativen Austausch zwischen den beteiligten Agenten von einer schlechten zu einer guten Lösung hin konvergiert. Die Güte eines Lösungskandidaten wird über eine innerhalb aller Agenten eines DVPP gleichen Funktion bewertet. Im Verlauf des Verfahrens ist es möglich, dass das Verfahren in einem lokalen Optimum konvergiert – es zeigt somit eine typische Eigenschaft heuristischer Lösungsverfahren. Es stellt sich nun die Frage, welche Bedingungen die Wahrscheinlichkeit einer Konvergenz in einem frühen lokalen Optimum begünstigen. Das Verfahren konvergiert dann früh, wenn die Agenten weniger Lösungskandidaten kommunizieren. Es kann angenommen werden, dass eine erhöhte Reaktionszeit dazu führt, dass die Agenten seltener ihren Suchraum abfragen und somit weniger Lösungen ins System einbringen: Eine erhöhte Reaktionszeit führt zu einer stärkeren Bündelung von Nachrichten, die insgesamt zu weniger Nachrichten im System führt.

Im synthetischen Szenario, für das alle Robustheitseigenschaften des Basisverfahrens in [Abschnitt 8.3](#) dargestellt werden konnten, zeigte sich dieser Effekt nicht. Zwei Erklärungsansätze sind hier möglich:

- Eine Parameter-Abhängigkeit tritt prinzipiell auch in den synthetischen Szenarien auf, ist aber wegen der geringen Anzahl der Agenten und der ihnen zur Verfügung stehenden Fahrpläne nicht erkennbar.
- Die Parameter-Abhängigkeit tritt nur bei Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung auf.

Für eine Überprüfung der Erklärungsansätze müssten Szenarien unterschiedlicher Größe mit enumerierten Fahrplänen und mit Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung genau geprüft werden, um die sensitiven Bereiche zu ermitteln und so Wirkzusammenhänge sicher ableiten zu können. Eine weiterführende Evaluation des Basisverfahrens ist an dieser Stelle aber nicht im Fokus dieser Arbeit – hier soll lediglich die Anwendbarkeit des Verfahrens für den Anwendungsfall geprüft werden. Dazu wird die folgende vereinfachende zusammenfassende Hypothese abgeleitet: Bei Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung in großen Szenarien führt eine erhöhte Reaktionszeit der Agenten durch die insgesamt reduzierte Nachrichtenmenge zu einer frühen Konvergenz des Verfahrens und somit zu einer im statistischen Mittel reduzierten Ergebnisgüte.

Kann diese Hypothese bestätigt werden, so ist es möglich, eine Parametrierung des Systems (Lösungsvariante) zu ermitteln, die eine ausreichende Robustheit aufweist. Für eine solche Lösungsvariante können folglich Anforderungen an eine Umsetzung des Verfahrens im Feld abgeleitet werden.

Prüfung Eine einfache Möglichkeit zur Prüfung der Hypothese besteht darin, die Nachrichtenmenge im System zu erhöhen. Unter Beibehaltung der restlichen Konfiguration des Experimentes E-SSM-2 ist dies auf zwei Arten zu erreichen:

1. Erhöhte Dichte der Kommunikationstopologie: Da die Agenten im Mittel eine größere Menge von Agenten in ihrer Nachbarschaft haben, werden Nachrichten an mehr Agenten geschickt.
2. Verzögertes Eintreffen von Nachrichten: Da bei einer (ggf. zufällig erhöhten) Verzögerung von Nachrichten weniger Nachrichten gebündelt abgearbeitet werden, arbeitet ein Agent die für ihn bestimmten Nachrichten in mehreren Schritten ab, was insgesamt zu mehr Nachrichten im System führt.

Für beide Ansätze wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Im nachfolgend beschriebenen Experiment wird zunächst geprüft, ob es möglich ist, die Einschränkung der Robustheit bei hoher Reaktionszeit durch eine erhöhte Dichte der Kommunikationstopologie zu kompensieren. Das Experiment beruht weiterhin auf der Parametrierung des Systems wie im [Experimentensteckbrief 8.2](#) angegeben. Lediglich der Dichteparameter ϕ wird von 0.5 auf 1.0 erhöht.

In [Abbildung 8.9](#) sind die Ergebnisse des Experimentes E-SSM-3 dargestellt. Anders als im vorangegangenen Experiment zeigt sich die Lösungsgüte deutlich stabiler, mit leicht abnehmender Tendenz der Lösungsgüte mit höherer Reaktionsverzögerung. Bei Kooperationsaufwand und Simulationsdauer ist ein leicht gegenläufiger Trend erkennbar. Anders als im vorangegangenen Experiment zeigt sich kein Sprung mit Einführen einer zufallsbasierten Verzögerung im Vergleich zur Referenzversuchsreihe (200 ms). Insbesondere ist

auch die anteilige Produkterfüllung im Referenzfall gegenüber der Standardparametrierung erhöht: Es finden sich keine Ausreißer im Bereich um 1.22 (typischer Bereich der ersten ermittelten Lösungskandidaten). Vergleichend wurde dazu ein Histogramm der Lösungsgüten erstellt, das eine deutliche Verschiebung in Richtung des Wertes 1.0 bestätigt (siehe [Abbildung 8.10](#)).

Auch die Effekte einer zufälligen Verzögerung der Nachrichtenlaufzeit (Experiment E-SSM-4) bestärken dieses Bild: Hier wurde das gleiche Experiment, allerdings mit einer zufälligen maximalen Nachrichtenlaufzeit von 800 ms durchgeführt. Das Verfahren zeigt sich in dieser Konfiguration sehr robust gegen die verzögerte Reaktionsgeschwindigkeit. Die entsprechende Aufbereitung der Ergebnisse ist im [Anhang A, Abbildung A.2](#) aufgeführt.

Es kann auf Basis dieser Ergebnisse angenommen werden, dass der einschränkende Effekt einer zufallsbasiert verzögerten Reaktionszeit auf die Robustheit des Verfahrens durch die insgesamt erhöhte Nachrichtenmenge im System überkompensiert wird. Die entwickelte Hypothese zur Erklärung der eingeschränkten Robustheit kann somit als gestärkt angesehen werden.

8.4.4 Parameterstudie: Sensitivität bei Suchraumabfrage

In [Abschnitt 7.2](#) wurde die Sensitivität des Verfahrens bezüglich der Auswahl eines neuen Fahrplans aus der Menge der verfügbaren Fahrpläne definiert. Mit diesem Faktor soll erreicht werden, dass das Verfahren endet, wenn nur noch geringfügige Verbesserungen durch die Auswahl eines neuen Fahrplanes aus dem Suchraum erreicht werden können. Auf diese Weise soll der Kooperationsaufwand reduziert werden, der durch die Verwendung des Suchraummodells sehr hoch werden kann: Es kann beobachtet werden, dass bis zur Konvergenz des Verfahrens eine große Nachrichtenanzahl für im späten Verlauf des Verfahrens nur noch geringfügige Verbesserungen der Lösungsgüte aufgewendet wird. Hier handelt es sich um eine typische Eigenschaft des Basisverfahrens: Das Verfahren führt sehr schnell von einer sehr schlechten zu einer sehr guten Lösungsgüte, benötigt dann aber viele Schritte bis zur finalen Lösungsgüte. Der Sensitivitätsfaktor soll eine einfache und szenarienunabhängige Parametrierung des Verfahrens ermöglichen, die eine Reduktion des Kooperationsaufwandes bei stabiler Lösungsgüte ermöglicht (Hypothese H-SSM-3). Die Effekte, die durch diesen Parameter erreicht werden können, werden im nachfolgend beschriebenen Experiment E-SSM-5 untersucht. Es wird erwartet, dass eine zu geringe Sensitivität zu geringen Lösungsgüten führt (Hypothese H-SSM-4).

In [Abbildung 8.11](#) sind die Ergebnisse für unterschiedliche Parametrierungen von $\epsilon_{s,a}$ aufgeführt. Die Parametrierung $\epsilon_{s,a} = 0.0$ stellt die Referenz-Versuchsreihe dar. In den Faktorbelegungen bis 0.005 sind Effekte des Parameters auf die Produkterfüllung, die Simulationsdauer und den Kooperationsaufwand nicht erkennbar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Ergebnisse für kleinere Werte von $\epsilon_{s,a}$ nicht dargestellt, die das

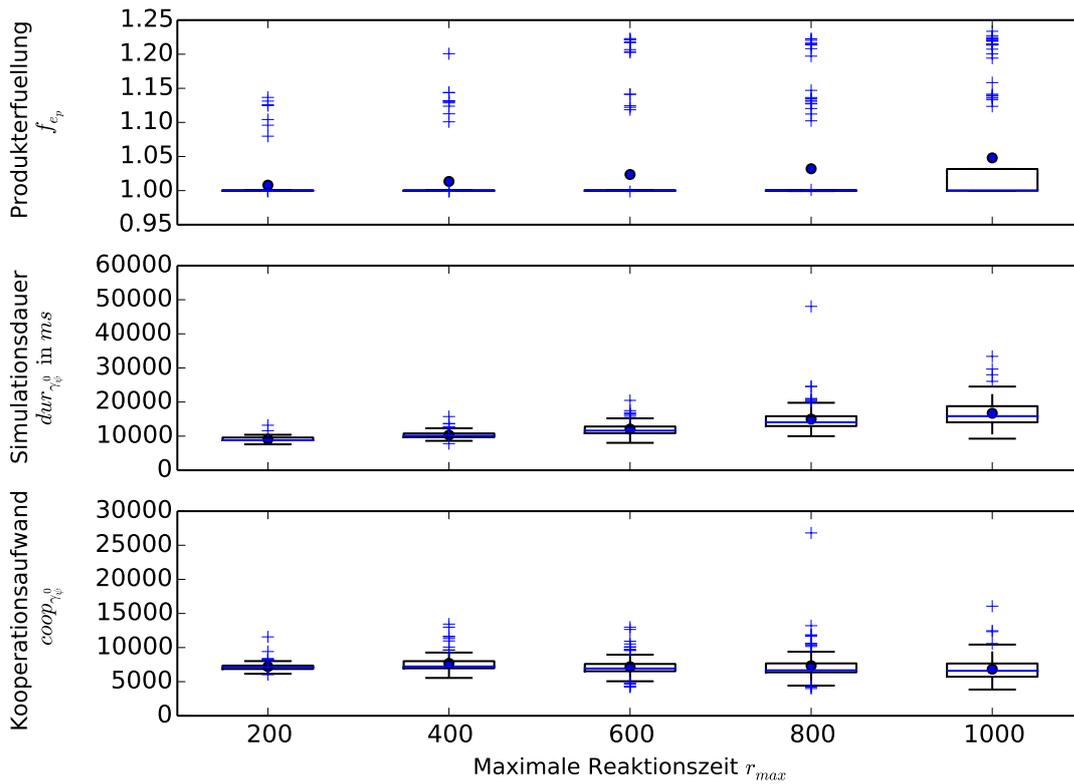


Abbildung 8.9: Experiment E-SSM-3: Variation der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max} bei erhöhter Dichte der Kommunikationstopologie $\phi = 1.0$. Dargestellt sind die anteilige Produktterfuellung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Parametrierungen der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max} . Jede Versuchsreihe stellt die Werte von 100 Versuchen als Boxplot dar.

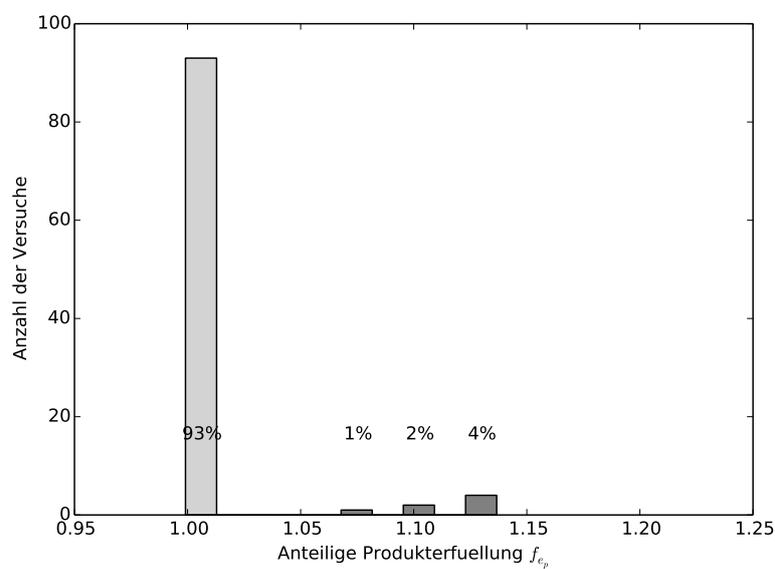


Abbildung 8.10: Experiment E-SSM-3: Variation der maximalen Reaktionsverzögerung r_a^{max} bei erhöhter Dichte der Kommunikationstopologie $\phi = 1.0$. Dargestellt wird ein Histogramm der anteiligen Produkterfüllung f_{e_p} in der Referenzversuchsreihe mit $r_a^{max} = r_a^{min}$, $\phi = 1.0$ für 100 Versuche. Die Verteilung weist im Vergleich zur Standardparametrierung eine deutliche Linksverschiebung auf (siehe [Abbildung 8.6](#), Seite 181).

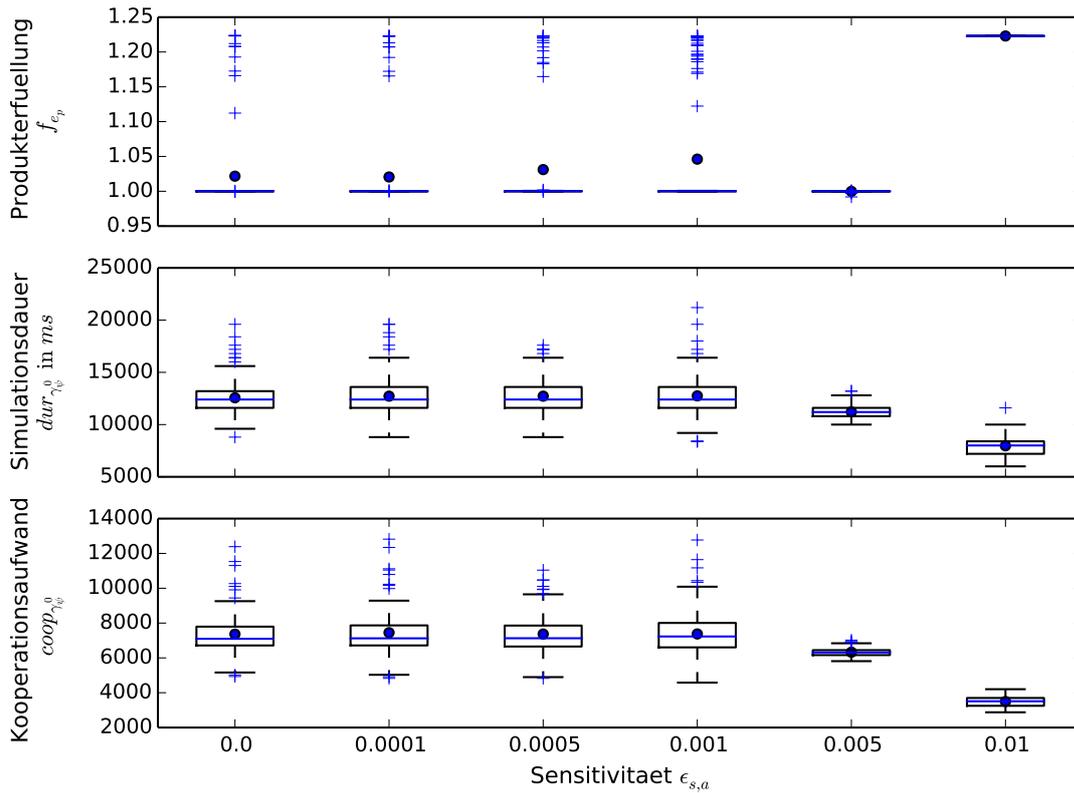


Abbildung 8.11: Experiment E-SSM-5: Variation der Sensitivität bei Suchraumabfrage $\epsilon_{s,a}$. Dargestellt sind die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Parametrierungen des Sensitivitätsparameters $\epsilon_{s,a}$. Jede Versuchsreihe stellt die Werte von 100 Versuchen als Boxplot dar.

gleiche Bild zeigen. Mit $\epsilon_{s,a} = 0.001$ scheint das Verfahren in einen instabilen Bereich überzugehen: Während es mit einer Belegung von 0.005 offensichtlich gelingt, Ergebnisgüte, Kooperationsaufwand und Simulationsdauer zu optimieren, gelingt in der nächsthöheren Belegung von $\epsilon_{s,a}$ die Verbesserung des initialen Lösungskandidaten in keinem der 100 durchgeführten Versuche. Es ist an dieser Stelle unklar, warum die Parametrierung 0.005 zu einer deutlich besseren Performanz als die Standardparametrierung des Verfahrens führt. Eine Analyse der Rohdaten führte zu der Vermutung, dass bereits die initialen Lösungskandidaten Güten außerhalb der frühen Konvergenzlösungen aufweisen und es so ggf. möglich ist, frühe lokale Minima zu vermeiden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit dem Sensitivitätsparameter interessante Effekte erreicht werden können, die allerdings deutlich genauer untersucht werden müssen. Wirkzusammenhänge sowohl mit der Struktur des Lösungsraums als auch mit der übrigen Parametrierung des Verfahrens sollten genauer ermittelt werden, um den Parameter endgültig in seiner Eignung für die Integration in das Lösungsverfahren bewerten zu können.

8.4.5 Zwischenfazit

Durch die Verwendung einer kontinuierlichen Suchraumdarstellung wird das in synthetischen Probleminstanzen als robust klassifizierte Verfahren in einen anderen Anwendungskontext geführt.

Die Robustheitseigenschaften bei Verwendung kontinuierlicher Suchraumdarstellung und großen Probleminstanzen müssen als reduziert eingestuft werden. Anders als in [HS14a] konnte bei der Verwendung in großen Szenarien mit kontinuierlichem Suchraummodell kein durchweg in allen Indikatoren (Güte, Simulationsdauer, Kooperationsaufwand) positiver oder neutraler Effekt für eine zufallsbasierte Verzögerung der Reaktionszeit ermittelt werden. Eine geringe Verzögerung der Reaktion zeigte noch keine Einbußen in der Lösungsgüte: Das Verfahren ist zwar nicht frei von Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Komponenten, allerdings nicht auf eine Synchronisation angewiesen. Für eine mögliche Umsetzung als auf Feldebene verteiltes Verfahren muss diese Einschränkung berücksichtigt werden (siehe dazu [Kapitel 9](#)) und vorab die Parameter-Sensitivität abhängig von den möglichen Belegungen quantifiziert werden. Eine Kompensation negativer Effekte ist durch eine Erhöhung der Nachrichtenmenge möglich, die verfahrensintern über die Dichte der Kommunikationstopologie oder das Verhältnis von Nachrichtenbündelung (minimale Reaktionszeit) zu im Feld erwarteten maximaler Nachrichtenlaufzeit erreicht werden konnte.

Je nach Trainingsdaten für das Suchraummodell ist es möglich, dass ein Lösungskandidat nach anfänglich starker Verbesserung in sehr vielen nachfolgenden Schritten verbessert wird. Der resultierende hohe Kooperationsaufwand konnte in kleinen Szenarien durch die Einführung des Sensitivitätsparameters $\epsilon_{s,a}$ eines Agenten a reduziert werden. Eine

systemweit gleiche Parametrierung dieses Parameters zeigt in großen Szenarien diesen Effekt nicht mehr: Die Nachrichtenmenge nimmt erst dann ab, wenn die Lösungsgüte in einen instabilen Bereich übergeht. Hier empfehlen sich somit genaue Parameterstudien, die zudem die Abhängigkeiten zu anderen Parametern abbilden. In weiterführenden Arbeiten könnte geprüft werden, ob sich der in kleinen Szenarien überprüfte Konvergenzverlauf abhängig von der Größe des Szenarios und der Parametrierung des Verfahrens ändert.

Das Verfahren wird zusammenfassend als anwendbar, geeignet parametrierbar und ausreichend robust im angestrebten Kontext angesehen. In allen nachfolgend beschriebenen Experimenten wird die kontinuierliche Suchraumdarstellung für die Modellierung der Anlagenflexibilität verwendet.

8.5 ABBILDUNG VON KOSTEN

8.5.1 Hypothesenbildung, Szenario und Experimente

Für Designschritt 1, der Erweiterung des Basisverfahrens um den Produktbezug, wurde neben der Umsetzung der Initialplanung in DVPP die Berücksichtigung von Kosten beschrieben. Ziel dieser Erweiterung ist es, dass nicht nur eine bezogen auf das zu liefernde Produkt optimale Lösung, sondern möglichst eine günstige Lösung gefunden werden soll. Die Kosten wurden daher in die globale Gütefunktion integriert. Die Funktion dient dazu, neu generierte Einsatzpläne daraufhin zu prüfen, ob sie als neue Lösungskandidaten in der Nachbarschaft eines Agenten kommuniziert werden sollen.

Gewählt wurde als erster Ansatz zur Integration eines zweiten Optimierungskriteriums in die Gütefunktion eine konvexe Kombination der beiden Optimierungskriterien Lieferungsqualität und Kosten. Während die Agenten somit bei der Auswahl des Fahrplans aus dem Suchraum lediglich einen solchen Fahrplan suchen, der die Lieferungsqualität verbessert, wird nach Integration dieses Fahrplans in den Einsatzplan geprüft, mit welchen Kosten dieser Einsatzplan verbunden wäre (siehe [Abbildung 8.12](#)). Nur ein Einsatzplan, der anhand

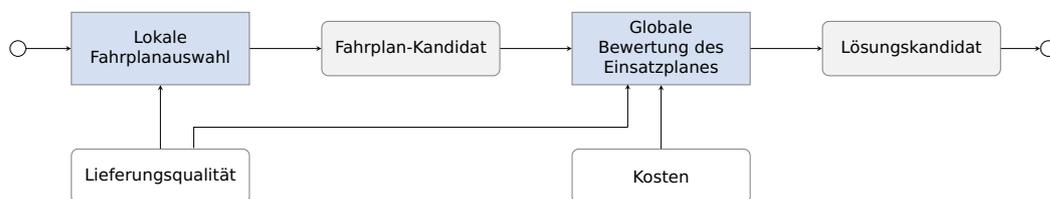


Abbildung 8.12: Vereinfachte Darstellung der Berücksichtigung von Lieferungsqualität und Kosten bei lokaler Fahrplanauswahl aus dem Suchraum und globaler Bewertung des Einsatzplanes (Erläuterung siehe Text)

der globalen Gütefunktion eine bessere Bewertung erhält, wird somit an die Agenten der Nachbarschaft eines Agenten weitergegeben.

Im Rahmen der Evaluation soll nun untersucht werden, ob die so abgebildeten Kosten es erlauben, in der verteilten Einsatzplanung einen solchen Plan zu bevorzugen, der das Produkt günstiger erfüllen kann. Dabei sollte eine solche Parametrierung möglich sein, die zwar zu positiven Effekten bezüglich der Kosten führt, die Lieferungsqualität aber nicht beeinträchtigt.

Untersuchungsziel: Prüfung auf die Effekte des Kostenfaktors

- H-CO-1 Die Berücksichtigung der Kosten in der globalen Gütefunktion führt zur Generierung günstigerer Einsatzpläne.
- H-CO-2 Mit zunehmender Gewichtung des Kostenfaktors in der globalen Gütefunktion nehmen die Initialpläne mit schlechterer Lieferqualität zu.

Tabelle 8.4: Hypothesen zu den Effekten der gewichteten Kostenberücksichtigung in der globalen Gütefunktion

In [Tabelle 8.4](#) sind die Hypothesen für die Experimente zur Bewertung der Effekte des Kostenfaktors zusammenfassend aufgeführt. Zunächst einmal wird angenommen, dass das Verfahren in der Lage ist, mit Hilfe des Kostenfaktors günstigere Einsatzpläne zu ermitteln (H-CO-1). Wenn der Kostenfaktor allerdings mit starker Gewichtung in die Gütebewertung eingeht, so ist anzunehmen, dass deutlich weniger Lösungskandidaten innerhalb des Agentensystems kommuniziert werden, da eine Verbesserung der Produktlieferung durch die Erhöhung der Kosten ggf. nicht mehr zu einer besseren Bewertung des Einsatzplanes führen kann, sobald der Plan mit höheren Kosten verbunden ist. Daher wird erwartet, dass eine zunehmende Gewichtung des Kostenfaktors zu einer zunehmenden Einschränkung der Lieferungsqualität führt (H-CO-2).

Eine detaillierte Modellierung von Kostenstrukturen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen. Es wird daher mit stark vereinfachten Gestehungskosten für die Anlagen gearbeitet: Für fossil betriebene Einheiten werden 0.20 ct/kWh angenommen, für Einheiten auf Basis erneuerbarer Energiequellen dagegen 0.0 ct/kWh. Diese Vereinfachung lässt es zu, die oben aufgeführten Hypothesen an der Lieferungsqualität und dem Anteil der Energiemenge in der Einsatzplanung zu ermitteln, der durch regenerative Einheiten eingebracht wird. Weiterhin stellen diese Annahmen einen Bezug für eine erweiterte Anwendung des Verfahrens her: Wenn es möglich ist, die günstigeren Einheiten in der verteilten Optimierung entsprechend zu berücksichtigen, so kann es sinnvoll sein, auch untertägig dann eine Umplanung anzustoßen, wenn eine – prinzipiell abregelbare – Mehreinpeisung regenerativer Anlagen zu einer günstigeren Lieferung des Produktes führen kann.

Für die Experimente zur Prüfung der dargestellten Hypothesen wird das bereits in [Experi-](#)

[mentensteckbrief 8.2](#) (Seite 180) dargestellte Szenario verwendet: Es beinhaltet insgesamt 100 Einheiten mit 69 PV-Anlagen und 31 KWK-Anlagen. Entsprechend der Erkenntnisse bezüglich der Robustheit des Verfahrens in Bezug auf den Vernetzungsgrad der Kommunikationstopologie wird abweichend von der Standard-Parametrierung der SmallWorld-Dichteparatemer ϕ mit dem Wert 1.0 parametrieret. In jeweils 100 Versuchen wird nun eine Parametrierung der Kostengewichtung geprüft, wobei lediglich der *random seed* des Suchraummodells angepasst wird. Es werden 5 Faktorausprägungen geprüft, die den Bereich von 0.0 bis 0.4 abdecken.

Experimentensteckbrief 8.3 (PV-BHKW-Szenario mit Kostenfaktor)

Prüfung der Effekte des Kostenfaktors

Szenario siehe [Experimentensteckbrief 8.2](#) (S. 180)

Standard-Parametrierung abweichend: SmallWorld $\phi = 1.0$

Experimente ([Abschnitt 8.5.2](#))

- E-CO-0: Prüfung der Performanz in der Standard-Parametrierung
- E-CO-1: Kostengewichtung: 0.1
- E-CO-2: Kostengewichtung: 0.2
- E-CO-3: Kostengewichtung: 0.3
- E-CO-4: Kostengewichtung: 0.4

8.5.2 Effekte auf lieferungsbezogene Qualität und Zusammensetzung

In [Abbildung 8.13](#) sind die Ergebnisse der Experimente E-CO-1 bis E-CO-5 als Boxplots für die Produkterfüllung (obere Grafik) und den Anteil der durch PV-Anlagen bereitzustellenden Energie in Prozent (untere Grafik) dargestellt. Auf der X-Achse sind die Gewichtungen des Kostenfaktors als Ordinalskala aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass bei jeder Gewichtungsstufe der Median nahe 1.0 liegt. Der Mittelwert der Produkterfüllung liegt bei über 0.99 bei einer Gewichtung des Kostenfaktors von 0.0 bis 0.2. Bei den Faktorbelegungen 0.3 und 0.4 liegt der Mittelwert der Produkterfüllung bei 0.95 bzw. 0.98. Die Unterschiede zwischen Median und Mittelwert sind an den Ausreißern klar zu erkennen: Die schlechteste Produkterfüllung (0.69) findet sich bei einer Kostengewichtung von 0.3.

Der Anteil der durch PV-Anlagen in den Einsatzplan eingebrachten Energiemenge (untere Grafik in [Abbildung 8.13](#)) steigt kontinuierlich an. Die Mittelwerte steigen zunächst schwach von 9.2 über 10.4 auf 11.5 % bei einer Kostengewichtung von 0.2. Mit einer Kostengewich-

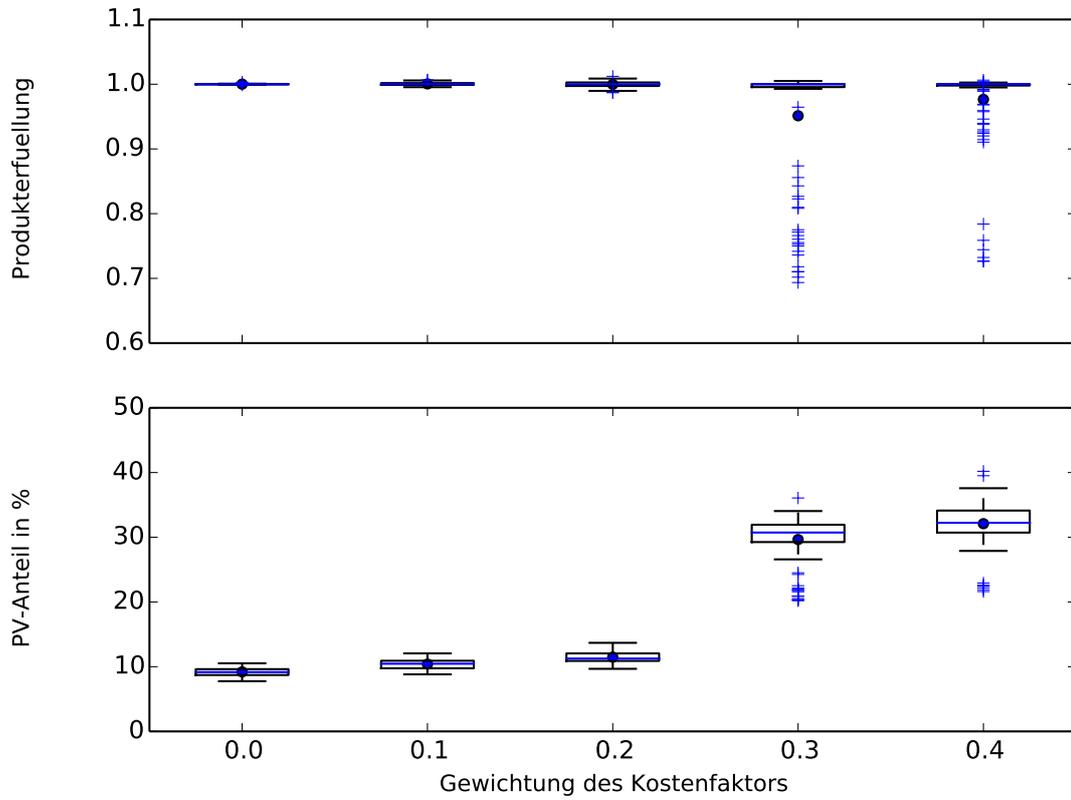


Abbildung 8.13: Experimente E-CO-0 bis E-CO-4: Variation der Gewichtung des Kostenfaktors in der globalen Gütefunktion. Dargestellt ist die anteilige Produkterfüllung und der Anteil der von PV-Anlagen gelieferten Energiemenge im ermittelten Einsatzplan bei unterschiedlicher Parametrierung des Kostenfaktors in der globalen Gütefunktion. Dargestellt sind jeweils die Ergebnisse von 100 Versuchen pro Kosten-Parametrierung als Boxplot.

tung von 0.3 steigt der PV-Anteil sprunghaft an: Der Mittelwert beträgt nun 29.7 % bzw. 32.1 % bei einem Kostengewicht von 0.4. Gleichzeitig nimmt – ebenso wie bei der Produkterfüllung – die Anzahl der Ausreißer zu, erreicht allerdings nicht den Bereich der oberen Quartilen der Versuchsreihen mit einer Kostengewichtung von 0.0 bis 0.2.

Es kann somit festgestellt werden, dass die Gewichtung des Kostenfaktors einen deutlichen Effekt auf den PV-Anteil hat. Ab einer Kostengewichtung von 0.3 wird somit eine deutlich günstigere Lösung gefunden. Dieser Effekt ist erwünscht, allerdings muss die gleichzeitig beobachtete Zunahme von Ausreißern genauer betrachtet werden. Es stellt sich die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen den Ausreißern bei der Produkterfüllung und bei dem PV-Anteil besteht. Die möglichen Zusammenhänge können so kategorisiert werden:

1. Es gibt keinen Zusammenhang zwischen den Versuchen mit geringem PV-Anteil und den Versuchen mit geringer Lösungsgüte.
2. Ein geringerer PV-Anteil (und somit ein teurerer Einsatzplan) zeigt sich in den Versuchen, in denen eine schlechtere Produkterfüllung erreicht wird.
3. Ein geringerer PV-Anteil zeigt sich in den Versuchen, in denen eine bessere Produkterfüllung beobachtet wird.

Um dieser Frage nachzugehen, werden die Versuchsreihen mit einer Kostengewichtung von 0.3 und 0.4 in einer anderen Weise dargestellt: In [Abbildung 8.14](#) ist für diese beiden Versuchsreihen die Produkterfüllung gegen den PV-Anteil für jeden Versuch aufgetragen. Die meisten Versuche bewegen sich im Bereich eines PV-Anteils von 27 bis 38 % und einer

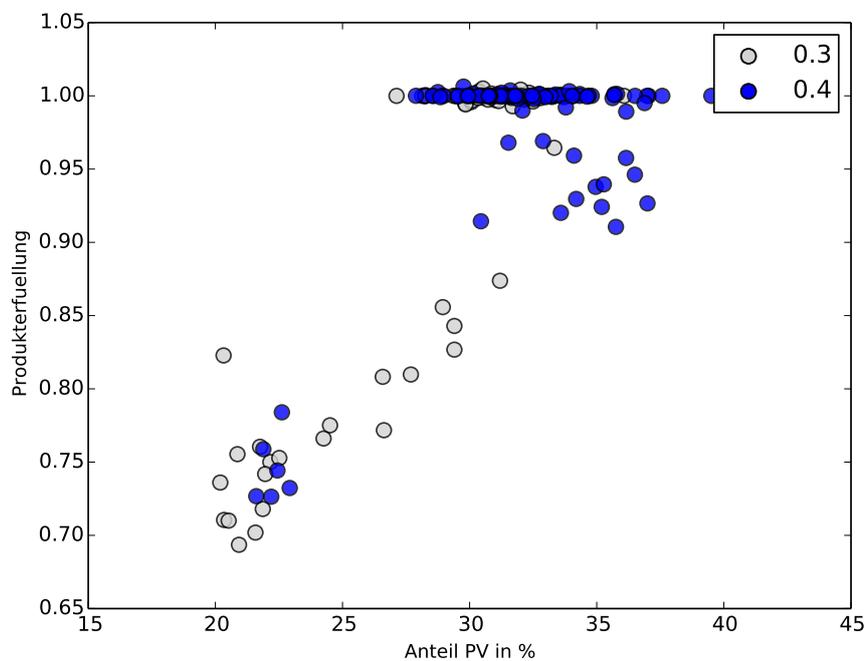


Abbildung 8.14: Experimente E-CO-3 und E-CO-4: Darstellung von Produkterfüllung und PV-Anteil in der Einsatzplanung als Scatterplot (200 Versuche, dargestellt als Einzelwerte).

Produkterfüllung von ca. 1.0. Die Ausreißer, die bezüglich der Produkterfüllung ermittelt wurden, sind deutlich zu erkennen. Die Ausreißer lassen einen Trend erkennen: je höher der PV-Anteil im Einsatzplan, desto besser ist die Produkterfüllung.

Dieser Effekt ist folgendermaßen erklärbar: Das Verfahren zeigte bereits in den vorab dargestellten Versuchen die Eigenschaft, dass eine frühe Konvergenz in lokalen Minima

auftreten kann. Da in der gewählten Parametrierung mit günstigeren PV-Beiträgen und höherer Flexibilität bei den PV-Anlagen eine feinere Anpassung an das Produkt mit den günstigeren PV-Anlagen möglich ist, ist anzunehmen, dass die Anfälligkeit für eine frühe Konvergenz sich somit verringert: Die Agenten der PV-Anlagen bringen neue Lösungen mit mehr Erfolg in die kooperative Lösungssuche ein, da sie das Zielprodukt genauer erfüllen können.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Berücksichtigung der Kosten in der globalen Gütefunktion zu günstigeren Einsatzplänen führt – Hypothese H-CO-1 wird somit durch die Experimente gestärkt. Mit zunehmender Gewichtung der Kosten in der globalen Gütefunktion zeigt sich weiterhin eine Verschlechterung der Lieferungsqualität (H-CO-2).

8.5.3 Zwischenfazit

Es konnte gezeigt werden, dass eine Berücksichtigung der Kosten in der kooperativen Lösungssuche möglich ist und prinzipiell zu günstigeren Einsatzplänen führen kann. Mit den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Experimenten kann weiterhin das Auftreten von Lösungen mit schlechter Qualität verhindert werden: Es ist mit unterschiedlichen Mitteln einfach möglich, die kooperative Lösungssuche – beispielsweise bei einem Lösungskandidaten unterhalb eines akzeptierten Schwellwertes – erneut anzustoßen. Eine entsprechende Eigenschaft könnte bei einem oder wenigen Agenten in jedem DVPP vorgesehen werden. In der Evaluation der Umplanung wird dieser Aspekt genauer beleuchtet; vorab sei bereits angemerkt, dass ein Wiederanstoßen der Lösungssuche z. B. bei Eintreten eines Ereignisses zur Ermittlung besserer Lösung führen kann, indem lokale Minima verlassen werden.

Ein weiterer interessanter Aspekt ergibt sich in der Übertragung dieser Ergebnisse auf die untertägige Planung: Ergibt sich kurzfristig eine günstigere Möglichkeit zur Lieferung eines Produktes, so kann diese ermittelt werden. Eine entsprechende Erweiterung des Verfahrens würde somit nicht nur die ereignisinduzierte, sondern weiterhin die ökonomisch-optimierende Umplanung erlauben.

8.6 BERÜCKSICHTIGUNG VON PRÄFERENZEN

Es wurde bereits dargestellt, dass das entwickelte Verfahren zunächst einmal unabhängig vom Typ der betrachteten Energieanlagen angewendet werden kann. Gleichzeitig abstrahiert auch das verwendete Konzept zur Darstellung von Fahrplan-Suchräumen vollständig von den Energieanlagen und bildet unter der Voraussetzung entsprechender Trainingsdaten ausschließlich umsetzbare Fahrpläne ab [BS13a]. In der Folge werden zunächst allerdings nur Restriktionen (*hard constraints*) berücksichtigt. Mit der gewählten Erweiterung der Domäne um Soft-Constraints zum Suchraum (siehe [Definition 7.12](#), Seite 130) wurde ein

Weg gewählt, um auch diese in die Fahrplanauswahl einzubeziehen. Im Folgenden werden die Effekte dieser Erweiterung evaluiert.

In [Abbildung 8.15](#) wird dargestellt, wie die Berücksichtigung der Präferenzen in die kontinuierliche Einsatzplanung eingeht: Es ist zu erkennen, dass die Präferenzen lediglich bei der lokalen Fahrplanauswahl berücksichtigt werden. In der globalen Einsatzplanbewertung werden Lieferqualität und Kosten von allen Agenten gleich bewertet.

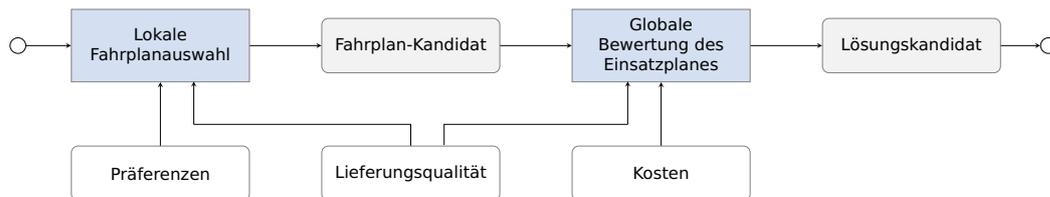


Abbildung 8.15: Vereinfachte Darstellung zur Berücksichtigung von Präferenzen, Lieferqualität und Kosten in der kooperativen Lösungssuche.

8.6.1 Hypothesenbildung, Szenario und Experimente

Zwei Hypothesen wurden zur Prüfung der Integration der Soft Constraints in die Planungsheuristik formuliert (siehe [Tabelle 8.5](#)): Es soll geprüft werden, ob die Integration der Präferenzen in den Suchraum und die Planungsheuristik dazu führt, dass der resultierende Fahrplan die Präferenzen besser abbildet, als wenn diese nicht abgebildet und berücksichtigt werden (Hypothese H-SC-1). Weiterhin ist zu prüfen, ob dieser Effekt ohne Einbußen des Optimierungsziels der lieferungsbezogenen Qualität erfolgt: Die Präferenzen sollen zwar berücksichtigt werden, allerdings nicht gegen die Produktlieferung abgewogen werden (Hypothese H-SC-2). Zur Prüfung der Hypothesen wurde ein Soft Constraint gewählt,

Untersuchungsziel: Prüfung auf Berücksichtigung von Soft Constraints

- H-SC-1 Die Integration von Präferenzen in den Suchraum der Agenten und deren Berücksichtigung bei der lokalen Fahrplanauswahl führt zu einem Planungsergebnis, bei dem die anlagenlokalen Präferenzen besser berücksichtigt werden, wenn die Erfüllung der Restriktionen es erlaubt.
- H-SC-2 Die Berücksichtigung der Präferenzen führt nicht zu einer Einschränkung der lieferungsbezogenen Lösungsqualität.

Tabelle 8.5: Hypothesen zur Berücksichtigung von anlagenlokalen Soft Constraints in der lokalen Fahrplanauswahl

das sich direkt aus der Analyse der Fahrpläne ableiten lässt.¹⁰ Die Fahrpläne von BHKW-Anlagen (4.7 kW) wurden auf häufige Betriebszustandswechsel hin analysiert: Sind die Einheiten mindestens zwei Planungsintervalle in einem Betriebszustand mit sehr geringer Leistung (kleiner 100 W) und im nachfolgenden Planungsintervall in einem Betriebszustand, der einer Leistung von über 1000 W entspricht, so wird das als Kaltstart bewertet. Diese Bewertung geht nun in die Vorverarbeitung der Trainingsdaten ein, in dem diese um den normierten Indikator zur Berücksichtigung des so definierten Soft Constraints erweitert werden; dem Fahrplan wird somit eine weitere Dimension hinzugefügt. Bei der Auswahl des Fahrplans aus dem mit diesen erweiterten Daten trainierten Suchraummodell wird nun ein solcher Fahrplan gesucht, der das Produkt erfüllt und weiterhin die anlagenlokale Qualität möglichst gut abbildet.

Die anlagenlokale Qualität wird daher für das gewählte Soft Constraint folgendermaßen definiert:

Definition 8.3 (Anlagenlokale Qualität bezüglich Kaltstarts)

Es sei rel_{sc} das Verhältnis von im betrachteten Fahrplan os beobachteten zu den maximal in den Trainingsdaten detektierten Kaltstarts.

Die anlagenlokale Qualität eines BHKW-Fahrplans sei definiert wie folgt:

$$f_{loc}(os) = 1 - rel_{sc}$$

Sie bezeichnet somit den Gütewert der anlagenlokalen Qualität bezüglich Kaltstarts. Dieser Wert ist somit 1.0, wenn keine Kaltstarts im Fahrplan os detektiert wurden, und nimmt mit zunehmender Anzahl der Kaltstarts ab. Für Trainingsdaten, in denen kein Kaltstart enthalten ist, ist die anlagenlokale Qualität bezüglich der Kaltstarts nicht definiert, da die Fahrpläne auf Basis der Trainingsdaten nicht nach diesem Kriterium differenziert werden können.

Die Experimente zur Hypothesen-Prüfung müssen so gestaltet werden, dass den Agenten zur Erfüllung des Zielproduktes eine Auswahl zwischen Plänen haben: Agenten müssen ihre anlagenlokalen Präferenzen missachten können, um das Zielprodukt zu erfüllen. Der gewünschte Effekt kann sich somit nur dann zeigen, wenn ausreichend Flexibilität innerhalb des DVPP zur Verfügung steht. Im Experiment E-SC-1 wird diese Flexibilität geschaffen, indem nur die Hälfte der Agenten – bei gleichen Trainingsdaten – die Präferenzen im Suchraum abbildet.

Weiterhin müssen solche Fahrpläne als Trainingsdaten gewählt werden, die für das gewählte Soft Constraint relevant sein können: Kaltstarts können nur dann im Fahrplan be-

¹⁰Das Konzept ist nicht auf die Abbildung solcher Präferenzen beschränkt, die sich aus dem Fahrplan ableiten lassen. Allerdings wird die Evaluation deutlich erleichtert, da lediglich die aus der Planung resultierenden Fahrpläne analysiert werden müssen.

obachtet werden, wenn das BHKW aufgrund des thermischen Lastgangs nicht durchgängig in Betrieb sein muss, wie bereits in der Definition der anlagenlokalen Qualität abgebildet wurde. Für die Experimente wird daher ein Übergangstag gewählt. In den verwendeten Trainingsdaten traten bis zu 9 Kaltstarts nach der o.a. Definition auf. Somit ist es prinzipiell möglich, dass ein sehr ungünstiger Fahrplan gewählt wird.

Es wurde ein DVPP definiert, das an einem Übergangstag unterschiedliche Zielprodukte zu erfüllen hat und aus 30 Agenten zusammengesetzt ist. Die Zielprodukte wurden manuell so definiert, dass sie den Bereich der prinzipiell möglichen Energielieferung der BHKW umfassen.

Im Experimenten-Steckbrief 8.4 sind die gewählten Parametrierungen und Experimente zusammenfassend dargestellt. Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt und diskutiert.

8.6.2 Effekte auf die anlagenlokale Qualität

Die Ergebnisse des Experimentes E-SC-1 sind in [Abbildung 8.16](#) dargestellt. Die anlagenlokale Qualität ist an der primären (linken) Y-Achse aufgetragen. Auf der X-Achse sind die unterschiedlichen Versuchsreihen (Zielprodukte in aufsteigender Reihenfolge) notiert. Aufgetragen wurde der Mittelwert der anlagenlokalen Qualität normiert mit der auf Basis der Trainingsdaten maximal möglichen Anzahl von Kaltstarts. Die Mittelwerte der anlagenlokalen Qualität bei Berücksichtigung der Präferenzen (SC_+) sind als gefüllte Kreise aufgetragen, die Mittelwerte der anlagenlokalen Qualität ohne Berücksichtigung der Präferenzen (SC_i) als ungefüllte Kreise. Die lieferungsbezogene Qualität ist auf der Sekundärachse dargestellt und mit Kreuzen markiert.

Bereits an der Skalierung der primären Y-Achse ist zu erkennen, dass in allen Fällen der Mittelwert der anlagenlokalen Qualität recht hoch ist. Über alle Versuche wurden maximal 4 Kaltstarts beobachtet – es wurden somit bei Abschluss der Planung kein Fahrplan aus dem Suchraummodell gewählt, der die hohe Anzahl von Kaltstarts aus den Trainingsdaten aufwies.

Der Mittelwert der anlagenlokalen Qualität liegt bei Berücksichtigung der Präferenzen bei der lokalen Fahrplanauswahl in allen Fällen höher als ohne Berücksichtigung der Präferenzen. Weiterhin ist ein eindeutiger Trend zu erkennen: Je höher die zu erbringende Leistung, desto besser ist die anlagenlokale Qualität. Dieser Effekt lässt sich folgendermaßen erklären: Je höher die Energielieferung der Einheiten sein muss, um das Produkt zu erfüllen, desto weniger Kaltstarts sind in den entsprechenden Fahrplänen enthalten, so dass es insgesamt zu einer Verbesserung der anlagenlokalen Qualität kommt. Gleichzeitig ist an der lieferungsbezogenen Qualität (Sekundärachse in [Abbildung 8.16](#)) zu erkennen, dass die Qualität im Bereich 50 - 55 kWh die besten Werte zeigt: Das DVPP kann das vorgegebene Produkt in diesem Bereich sehr gut erfüllen. Im Bereich 40 - 45 kWh und 60 - 65 kWh

Experimentensteckbrief 8.4 (BHKW-Szenario mit und ohne Präferenzen)

Prüfung auf Berücksichtigung von Soft Constraints in der lokalen Fahrplanauswahl

SzenarioZeitmodell [Definition 5.4](#) (Seite 70)

Einheiten-Ebene	○ BHKW:	30 Anlagen, Vaillant Ecopower 4.7kW
Agenten-Ebene	○ Domäne:	kontinuierlich, Suchraummodell
	○ mit bzw. ohne Training des Präferenzwertes (abhängig vom Experiment)	
DVPP-Ebene	○ Produkthorizont:	60 Minuten
	○ Produktintervalle:	1
	○ Produktzeitraum:	12 - 13 Uhr
	○ Zielvorgabe:	40 - 65 kWh in 5 kWh-Schritten

Standard-Parametrierung

○ Dichte der Kommunikationstopologie:	$\phi = 1.0$
○ Nachrichtenverzögerung:	$\delta_{msg} = 200ms$
○ Reaktionsverzögerung:	$r_a = [200, 200]$
○ Sensitivität bei Suchraumabfrage:	$\epsilon_{s,a} = 0.0$
○ Trainingsdaten für Suchraummodell:	Übergangstag

Experimente ([Abschnitt 8.6.3](#), [Abschnitt 8.6.2](#))

- E-SC-0: Prüfung der anlagenlokalen und lieferungsbezogenen Qualität ohne Berücksichtigung der Präferenzen bei der lokalen Fahrplanauswahl
- E-SC-1: Prüfung der anlagenlokalen und lieferungsbezogenen Qualität, 50% der Agenten mit Berücksichtigung der Präferenzen bei der lokalen Fahrplanauswahl

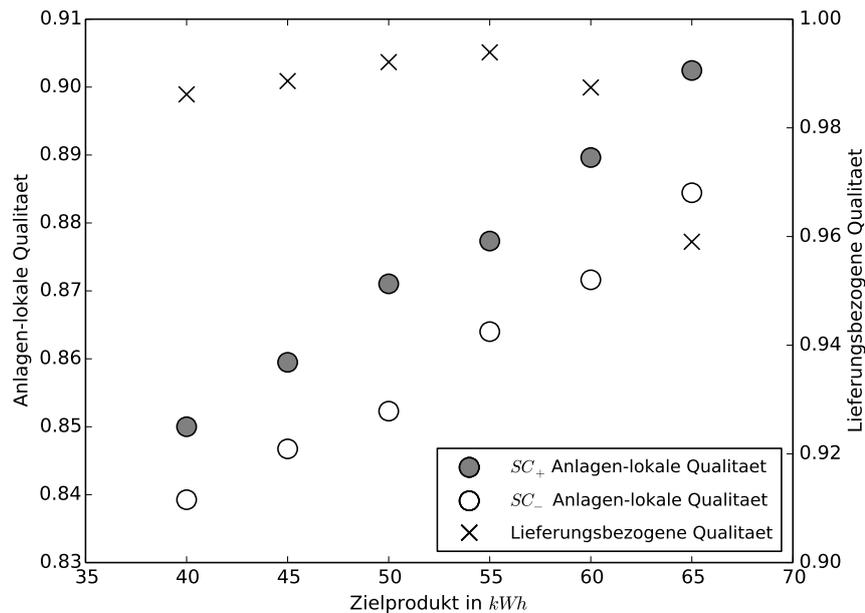


Abbildung 8.16: Experiment E-SC-1: Abhängigkeit der anlagenlokalen Qualität von der Verwendung der Präferenzen beim Training des Suchraummodells. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert der anlagenlokalen Qualität einer Versuchsreihe von 100 Versuchen mit jeweils 15 Agenten mit bzw. ohne Training der Präferenzen. Es wurden sechs Versuchsreihen mit steigender Zielprodukt-Vorgabe durchgeführt. SC_+ fasst die Werte der anlagenlokalen Qualität der Agenten zusammen, welche die Präferenzen im Suchraum abgebildet und bei der Auswahl berücksichtigt haben, SC_- die Werte ohne Präferenzen-Berücksichtigung. Mit dem Symbol X werden die Mittelwerte der lieferungsbezogenen Qualität in der jeweiligen Versuchsreihe gekennzeichnet. Da diese für jeweils einen Versuch von allen Agenten gemeinsam ermittelt wird, kann sie nicht einzeln nach Berücksichtigung der Präferenzen erfasst werden. Im Referenzexperiment E-SC-0 wird die lieferungsbezogene Qualität für den Referenzfall untersucht (siehe [Abbildung 8.18](#)).

kommt es zur Über- bzw. Untererfüllung des Produktes.

Wegen der geringen Unterschiede in der Anzahl der Kaltstarts werden ergänzend die Rohdaten für die Versuchsreihen dargestellt, bei denen das DVPP das Zielprodukt mit sehr guter Qualität erfüllen kann: In [Abbildung 8.17](#) ist die Anzahl der Fahrpläne differenziert nach der Anzahl der Kaltstarts aufgetragen. Die grau gefüllten Balken entsprechen den Fahrplänen, die unter Berücksichtigung der Präferenzen ausgewählt wurden. In beiden Versuchsreihen ist zu erkennen, dass sich die Anzahl der Fahrpläne, die keinen Kaltstart aufweisen, durch Verwendung der Präferenzen in der lokalen Fahrplanauswahl deutlich erhöht hat: Im Vergleich zur Referenz ergibt sich über alle Versuchsreihen eine Erhöhung der Fahrpläne ohne Kaltstarts von ca. 34 %. Die Anzahl der Fahrpläne, die zwei Kaltstarts aufweisen, ist hingegen deutlich reduziert. Fahrpläne mit 3 oder vier Kaltstarts treten nur in sehr geringer Anzahl auf, so dass eine Aussage hier schwierig erscheint. Die Rohdaten für die weiteren Zielprodukte sind im Anhang (Seite [270](#)) aufgeführt.

Mit diesen Ergebnissen wird die Hypothese H-SC-1 als gestärkt betrachtet: Die Integration von Präferenzen in den Suchraum der Agenten und deren Berücksichtigung bei der lokalen Fahrplanauswahl führt zu einem Planungsergebnis, bei dem die anlagenlokalen Präferenzen besser berücksichtigt werden, wenn die Erfüllung der Hard Constraints es erlaubt.

8.6.3 Effekte auf die lieferungsbezogene Qualität

Im Experiment E-SC-0 wurde geprüft, ob die Berücksichtigung der anlagenlokalen Präferenzen Einbußen in der lieferungsbezogenen Qualität zur Folge hatte. Dazu wird das bereits beschriebene Experiment so durchgeführt, dass keiner der Agenten die Präferenzen in das Training des Suchraummodells und die anschließende Fahrplanauswahl einbezieht. Verglichen wird nun die lieferungsbezogene Qualität in beiden Experimenten.

In [Tabelle 8.6](#) sind die Mittelwerte der lieferungsbezogenen Qualität einander gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Unterschiede in der lieferungsbezogenen Qualität nur sehr gering ausfallen. Weiterhin ist der Bereich, in dem das DVPP gut in der Lage ist, das vorgegebene Zielprodukt zu erfüllen, weitgehend unverändert.

Die Analyse der Beachtung der anlagenlokalen Präferenzen im Referenz-Experiment E-SC-0 zeigte weiterhin auf, dass die anlagenlokale Qualität sich ohne die Beachtung der Präferenzen auch im Referenz-Experiment im gleichen Bereich bewegt wie im Experiment E-SC-1 (siehe [Abbildung 8.18](#)).

Die Hypothese H-SC-2 wird somit als gestärkt betrachtet: Die Berücksichtigung der Präferenzen führte in den durchgeführten Experimenten nicht zu einer Einschränkung der lieferungsbezogenen Lösungsqualität. Einschränkend muss allerdings festgestellt werden, dass der Einfluss auf die lieferungsbezogene Qualität für solche Fälle neu geprüft werden sollte, bei denen auch der Einfluss auf die anlagenbezogene Qualität nicht nur erkennbar,

sondern deutlicher ausgeprägt ist.

40kWh	45kWh	50kWh	55kWh	60kWh	65kWh
<i>Mit Berücksichtigung der Präferenzen</i>					
0.9862	0.9886	0.9921	0.9939	0.9874	0.9590
<i>Ohne Berücksichtigung der Präferenzen</i>					
0.9850	0.9907	0.9931	0.9937	0.9830	0.9605

Tabelle 8.6: Vergleich der lieferungsbezogene Qualität im Experiment E-SC-1 (mit Berücksichtigung der Präferenzen bei der Hälfte der Agenten) und im Referenzexperiment E-SC-0. Dargestellt ist das arithmetische Mittel aus 100 Versuchen mit variiertem Zufallswert bei der Erstellung des Suchraummodells.

8.6.4 Zwischenfazit

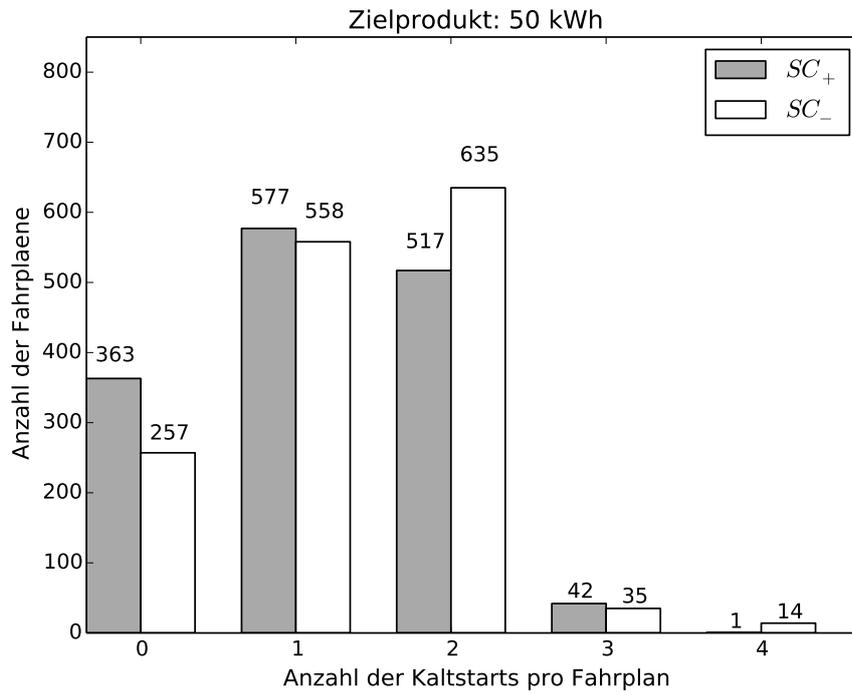
In den durchgeführten Experimenten konnte gezeigt werden, dass eine Berücksichtigung von Soft Constraints in der Initialplanung möglich ist, ohne dass die Agenten eine Kenntnis vom Anlagentyp oder den entsprechenden Modellen hätten. Erreicht wurde dies durch einen Vorverarbeitungsschritt, bei dem die Trainingsdaten für das Suchraummodell durch einen Indikatorwert ergänzt wurden, der die Erfüllung der entsprechend definierten anlagenlokalen Präferenz abbildet. Es konnte gezeigt werden, dass eine Berücksichtigung dieses Indikators bei der lokalen Fahrplanauswahl zu einer verbesserten Berücksichtigung der Präferenzen führt, ohne dass die lieferungsbezogene Qualität als Hard Constraint des Optimierungsverfahrens beeinträchtigt wurde.

Ausgehend von diesem Ergebnis eröffnen sich viele Möglichkeiten zur Verfeinerung des Ansatzes – diese werden im Schlussteil der hier vorgelegten Arbeit diskutiert.

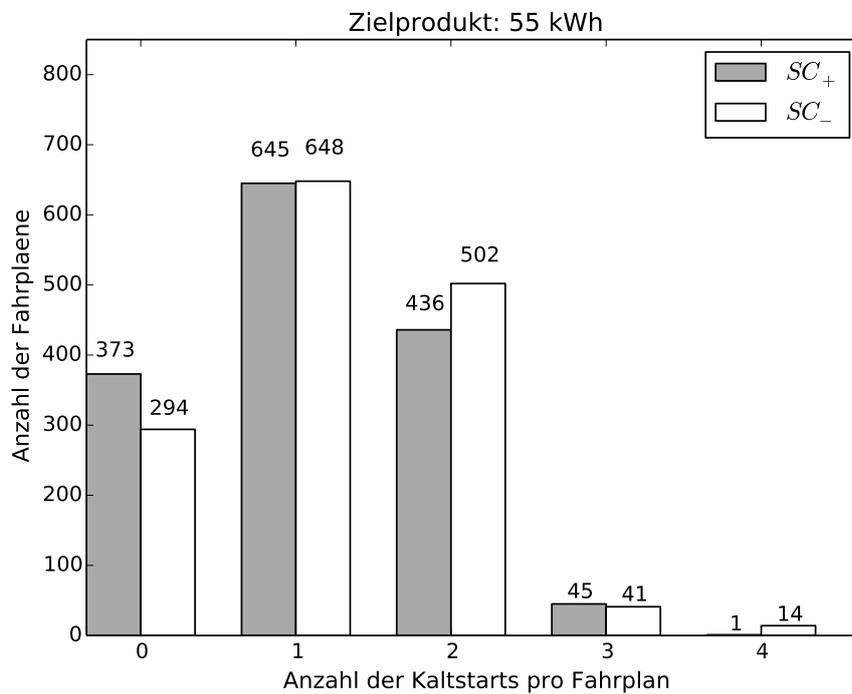
8.7 EREIGNISSE UND UMPLANUNG

8.7.1 Hypothesenbildung, Szenario und Experimente

Die Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung wurden bereits in [Abschnitt 6.1](#) diskutiert. Die in [Tabelle 8.7](#) dargestellten Hypothesen leiten sich aus diesen Anforderungen ab und stellen unterschiedliche gewünschte Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung dar. Die Hypothesen beziehen sich auf die Eigenschaften der kontinuierlichen Einsatzplanung als verteiltes Verfahren in einer agentenbasierten Umsetzung. Daher



(a)



(b)

Abbildung 8.17: Experiment E-SC-1: Anzahl der Fahrpläne differenziert nach Anzahl der Kaltstarts für die Zielprodukte (a) 50kWh und (b) 55 kWh.

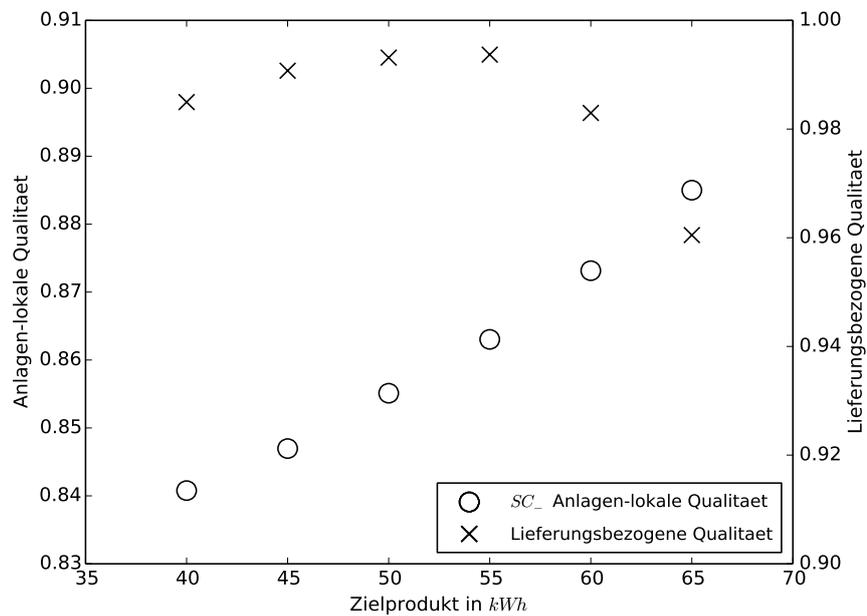


Abbildung 8.18: Experiment SC-0: Anlagenlokale und lieferungsbezogene Qualität im Referenzexperiment. Mit einem ungefüllten Kreis (*SC_*) markiert ist der Mittelwert der Anlagenlokalen Qualität aus 100 Versuchen mit jeweils 30 Agenten ohne Abbildung der Präferenzen im Suchraum.

werden sie in den nachfolgend vorgestellten Versuchen zunächst anhand von Ergebnissen aus der Agenten-Welt (dem Planungswissen der Agenten) geprüft (siehe [Abschnitt 8.7.2](#)). Für die Bewertung der Güte des Verfahrens wird im Anschluss die tatsächliche Umsetzung der kooperativ ermittelten Pläne in der simulierten Welt analysiert (siehe [Abschnitt 8.7.3](#)).

Untersuchungsziel: Prüfung der Performanz der Umplanung

- H-RE-1 Das Verfahren erkennt Ereignisse.
- H-RE-2 Das Verfahren löst bei Detektion eines Ereignisses eine Umplanung aus.
- H-RE-3 Das Verfahren verbessert einen Plan durch kooperative Lösungssuche aller Agenten des DVPP nicht nur in der Initialplanung, sondern auch in der Umplanung nach Ereigniseintritt.
- H-RE-4 Das Verfahren integriert gleichzeitig auftretende bzw. detektierte Ereignisse in der Planung.

Tabelle 8.7: Hypothesen zur Evaluation der Umplanung

Im [Experimentensteckbrief 8.6](#) sind das gewählte Szenario sowie die Parametrierungen des Verfahrens dargelegt. Für die Prüfung der Umplanung wird ein Szenario gewählt, bei dem ein DVPP mit 50 Agenten ein Blockprodukt über vier Stunden liefern muss. Dabei gilt jeweils eine Energiemengen-Vorgabe für eine Stunde – das Produkt kann somit als vier aufeinanderfolgende Stundenprodukte angesehen werden, allerdings mit konstanter Zusammensetzung des DVPP. Dieses Produkt wird gewählt, um Abhängigkeiten in der Planung abzubilden, da eine Reduktion auf nur eine Stunde es prinzipiell erlauben würde, große Freiheitsgrade über eine freie Planung der restlichen Planungsintervalle zu erschließen.¹¹ Die Energiemengen-Vorgabe pro Produktintervall wurde so gewählt, dass in der Initialplanung eine lieferungsbezogene Qualität von über 0.99 erreicht wird.

Die Einheiten-Zusammensetzung bezieht BHKWs als verschiebbare Erzeuger, PV-Anlagen als abregelbare, zustandslose Erzeuger sowie Wärmepumpen als Beispiel für steuerbare Verbraucher ein. Für die Trainingsdaten wurde ein Übergangstag gewählt, da auf diese Weise sowohl die PV-Anlagen als auch Wärmepumpen und BHKW relevante Betriebszustände einnehmen. Die Ereignisse wurden künstlich ausgelöst (siehe [Abschnitt 8.2](#)).

Im Experiment E-RE-0 wurde zunächst kein Ereignis induziert, um sicherzustellen, dass das Evaluationssystem den Abgleich zwischen der simulierten physikalischen Welt und der Agenten-Welt korrekt abbildet. Für die Relevanz der Ergebnisse bei kontrolliertem Auslösen von Ereignissen muss zunächst gezeigt werden, dass die von den Agenten ermittelten

¹¹Die gewählte Implementierung schließt diesen Effekt zum Teil aus, indem für den initial gewählten Fahrplan die Betriebszustände der Planungsintervalle außerhalb von Produktzeiträumen möglichst geringfügige Veränderung vorgegeben werden.

Produkt-Einsatzpläne von der Einheiten-Simulation wie erwartet umgesetzt werden. Entsprechend der rein synthetischen Abbildung der Realität dürfen keine unvorhergesehene Einflüsse auf das Betriebsverhalten der Modelle ermittelt werden (siehe auch die Beschreibung der prototypischen Umsetzung auf Seite 163).

In Experiment E-RE-1 wurden das Verfahren der kontinuierlichen Einsatzplanung anhand unterschiedlicher Ereigniskombinationen geprüft: Jeweils 100 unterschiedliche Versuche mit zufälliger Verteilung der Ereignisse zwischen Beginn und Ende des Produktzeitraumes wurden mit einer Kombination von BHKW-Ausfällen und PV-Prognose-Abweichungen vorgenommen. Die nachfolgend aufgeführten Kombinationen von BHKW-Ausfällen und PV-Prognose-Abweichungen wurden in jeweils einer Versuchsreihe evaluiert. In der Notation (x,y) bezeichnet x die Anzahl der BHKW-Ausfälle, y die die Anzahl der PV-Abweichungen.

(0,0)	(0,2)	(0,4)	(0,6)	(0,8)
(2,0)	(2,2)	(2,4)	(2,6)	(2,8)
(4,0)	(4,2)	(4,4)	(4,6)	(4,8)
(6,0)	(6,2)	(6,4)	(6,6)	(6,8)
(8,0)	(8,2)	(8,4)	(8,6)	(8,8)
(10,0)	(10,2)	(10,4)	(10,6)	(10,8)

8.7.2 Agenten-Welt: Verlauf der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität

Zunächst soll geprüft werden, ob die Agenten die induzierten Ereignisse korrekt detektieren und – falls erforderlich – eine Umplanung auslösen. Es wird daher zunächst das Wissen der Agenten evaluiert. Zur Veranschaulichung werden dazu zunächst in [Abbildung 8.19](#) die erwartete lieferungsbezogene Qualität aller Agenten des DVPP von der Initialplanung bis Ende der Produktlieferung von einem Versuch mit 10 BHKW-Ausfällen dargestellt. Die Werte sind in chronologischer Reihenfolge aufgetragen, wobei die Auswertungen durch die Verteiltheit des Verfahrens teilweise gleichzeitig auftreten. Da nur die Werte eines Versuches abgebildet sind, ist eine Zuordnung der Simulationszeit möglich: Der Beginn eine Produktintervalls ist jeweils mit einer gestrichelten Linie vermerkt. Die Pfeile kennzeichnen jeweils die Detektion eines Ereignisses. In den Ergebnisdateien wurde geprüft, dass alle 10 Ereignisse korrekt detektiert wurden. Im dargestellten Versuch sind diese gleichmäßig über den Produktzeitraum verteilt und treten gleichzeitig und – bei einer Ausfalldauer von 30 Minuten – teils überlappend auf, so dass ein Pfeil teilweise die Detektion mehrerer Ereignisse kennzeichnet. Im linken Bereich der [Abbildung 8.19](#) ist der Verlauf der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität während der Initialplanung gezeigt. Durch Festlegung aller zufallsgebundenen Variablen mit Ausnahme der Ereignisverteilung konnte in allen Versuchen der gleiche Verlauf der Initialplanung beobachtet werden.

Experimentensteckbrief 8.5 (Erzeuger-Verbraucher-DVPP für ein Blockprodukt)

Prüfung auf Performanz der Umplanung

SzenarioZeitmodell [Definition 5.4](#) (Seite 70)

Einheiten-Ebene	○ BHKW:	20 Anlagen, Vaillant Ecopower 4.7kW
	○ PV:	20 Anlagen, 10kW _p
	○ Wärmepumpen:	10 Anlagen, 5kW
DVPP-Ebene	○ Produkthorizont:	4 Stunden
	○ Produktintervalle:	4
	○ Produktzeitraum:	11 - 15 Uhr
	○ Zielvorgabe:	150kWh pro Produktintervall

Standard-Parametrierung

- Dichte der Kommunikationstopologie: $\phi = 1.0$
- Nachrichtenverzögerung: $\delta_{msg} = 200ms$
- Reaktionsverzögerung: $r_a = [200, 200]$
- Sensitivität bei Suchraumabfrage: $\epsilon_{s,a} = 0.0$
- Trainingsdaten für Suchraummodell: Übergangstag, 200 Samples

Experimente

- E-RE-0: Prüfung der erzielten lieferungsbezogenen Qualität ohne Ereignisse
- E-RE-1: Prüfung der erzielten lieferungsbezogenen Qualität und des Verlaufs der geplanten lieferungsbezogenen Qualität bei unterschiedlicher Anzahl von Ereignissen (Details siehe Text).

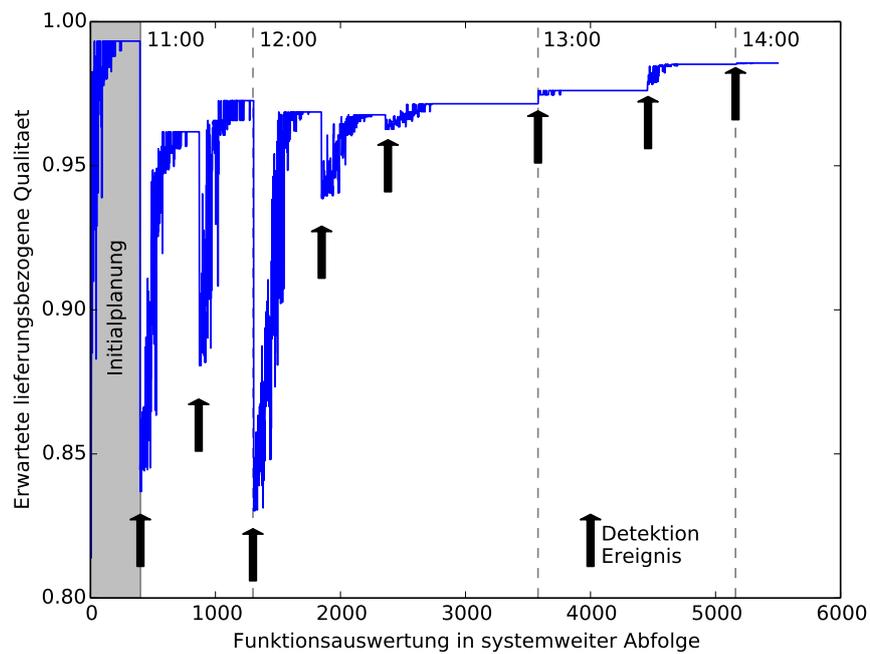


Abbildung 8.19: Experiment E-RE-1: Beispiel für den Verlauf der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität bei 10 BHKW-Ausfällen. Dargestellt ist die Ergebnisgüte in chronologischer Reihenfolge, die jeder Agent systemweit vor Versenden einer Nachricht ermittelt. Schwarze Pfeile kennzeichnen Detektionen von Ereignissen, die gleichzeitig mit der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität protokolliert wurden. Zur Veranschaulichung wird die jeweilige Systemzeit dargestellt. Die Skalierung der X-Achse entspricht der Anzahl der Auswertungen, nicht der Systemzeit.

Es ist zu erkennen, dass die erwartete lieferungsbezogene Qualität mit jedem Ereignis einbricht. Ungefähr 500 Werte werden jeweils bis zum Erreichen eines Plateaus verzeichnet. Diese Plateaus direkt vor einem weiteren Einbruch der Qualität zeigen die Konvergenz des aktuellen Planungsverfahrens auf: Es ist erkennbar, dass die Qualität nach einem Einbruch allmählich wieder ansteigt. Im dargestellten Versuch ist die Lage des Plateaus unterschiedlich – die Qualität der Initialplanung wird nicht erreicht. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Qualität von Ereignis zu Ereignis ansteigt. Diese Beobachtung kann allerdings nicht in allen Versuchen gemacht werden; es wurden unterschiedliche Ausprägungen beobachtet, so auch eine bezogen auf die Initialplanung bessere Qualität nach Umplanung.

Mit Beginn der zweiten Produkthälfte (13:00 Uhr) tritt ein interessanter Effekt auf: Zu drei weiteren Zeitpunkten werden Ereignisse detektiert und eine Umplanung angestoßen. Diese Ereignisse führen nicht zu einem Einbruch der Qualität, sondern direkt zu einer Verbesserung des Plans. Dieser Effekt ist gut erklärbar: Da schon ein Teil des Produktes erfüllt wurde, ist der Effekt der Ereignisse kleiner. Durch die erneut angestoßene Umplanung wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass eine bessere Lösung gefunden wird. Dieser Effekt entspricht somit der Vermeidung einer frühen Konvergenz, wie sie bereits in den Experimenten E-SSM-3 und E-SSM-4 (siehe Seite 185) erreicht wurde. In der zusammenfassenden Bewertung wird dieser Aspekt noch einmal unter der Frage aufgegriffen, ob eine Umplanung ggf. auch dann neu angestoßen werden sollte, wenn keine Ereignisse eingetreten sind.

Weiterhin beruht die Planung nun auf den aktualisierten Suchräumen aller Agenten, die bereits von einem Ereignis betroffen waren. Das Ergebnis dieser Planung kann somit sowohl besser als auch schlechter zur Produktvorgabe passen. Im dargestellten Versuch wird mit Abschluss der Planung nach Verarbeitung des letzten Ereignisses eine erwartete lieferungsbezogene Qualität von 0.98 erreicht. Sie übertrifft somit die in diesem Versuch beobachtete schlechteste Qualität von 0.83 deutlich.

In [Abbildung 8.20](#) sind die Ergebnisse des gleichen Experimentes für zwei unterschiedliche Versuchsreihen dargestellt. Im der ersten dargestellten Versuchsreihe ([Abbildung 8.20 \(a\)](#)) wurden 10 BHKW-Ausfälle induziert. In der zweiten hier dargestellten Versuchsreihe ([Abbildung 8.20 \(b\)](#)) wurden ergänzend 8 Prognose-Abweichungen eingebracht (jeweils eine Abweichung von 20% zur geplanten Energiemenge). Dargestellt ist jeweils der Verlauf der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität pro Versuch.

In beiden Versuchsreihen können die detektierten Ereignisse in der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität gut erkannt werden: Mit einer Ereignisdetektion bricht die erwartete lieferungsbezogene Qualität ein. Über die resultierende lieferungsbezogene Qualität nach Ende der Produktlieferung kann anhand dieser Darstellung keine Aussage getroffen werden; sie wird im nachfolgenden Abschnitt anhand der Auswertung der Monitoring-Werte diskutiert. Es ist allerdings gut zu erkennen, dass in einigen Versuchen im Verlauf der kontinuierlichen Planung eine bessere Qualität erreicht wird als in der Initialplanung. Eine manuelle Überprüfung der Ergebnisse einzelner Versuche zeigte weiterhin, dass die in-

duzierten Ereignisse vollständig detektiert und auch gleichzeitig auftretende Ereignisse gemeinsam bearbeitet wurden.

Die hier dargestellten Verläufe der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität zeigen Eigenschaften, die sich aus der Konstruktion des Verfahrens der kontinuierlichen Einsatzplanung herleiten lassen. Es wird an dieser Stelle darauf verzichtet, diese Verläufe weitergehend zu analysieren: Relevant für die Güte der Umplanung sind die zum Ende der Produktlieferung erreichten Werte, die auf Basis der Monitoring-Werte (physikalische Welt) im nachfolgenden Abschnitt untersucht werden.

Die Evaluation der Planungsergebnisse aus der Agenten-Welt erlauben die Bewertung der Hypothesen H-RE-1 bis H-RE-4: Es konnte gezeigt werden, dass die Agenten Ereignisse an den ihnen zugeordneten Einheiten erkennen (H-RE-1) und eine Umplanung auslösen (H-RE-2). Die Agenten verbessern die Qualität des Plans durch kooperative Lösungssuche (H-RE-3) und integrieren gleichzeitig auftretende Ereignisse (H-RE-4). Diese Thesen können daher durch die durchgeführten Versuchsreihen als gestärkt angesehen werden.

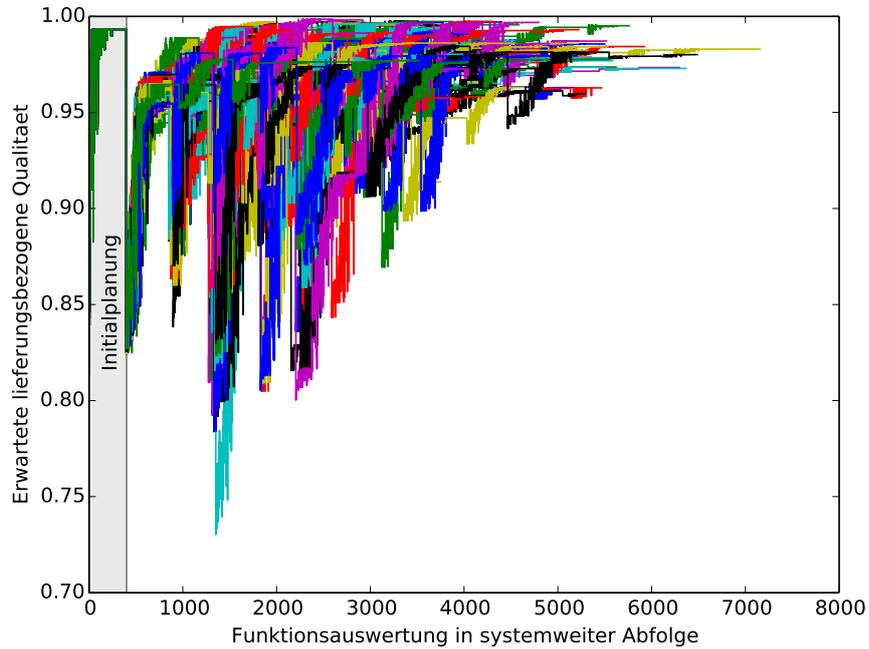
8.7.3 Physikalische Welt: Lieferungsbezogene Qualität

Im Folgenden soll analysiert werden, welche lieferungsbezogene Qualität die Agenten durch die Umplanung bei der Umsetzung des Produktes erreichen. Es wird daher nicht die Güte anhand der Bewertungen analysiert, die die Agenten durchführen, sondern die von den Agenten erfassten Monitoring-Werte. Auf diese Weise wird nicht nur die erreichte lieferungsbezogene Qualität ermittelt, sondern weiterhin die Konfiguration der Einheiten mit den Fahrplänen geprüft.

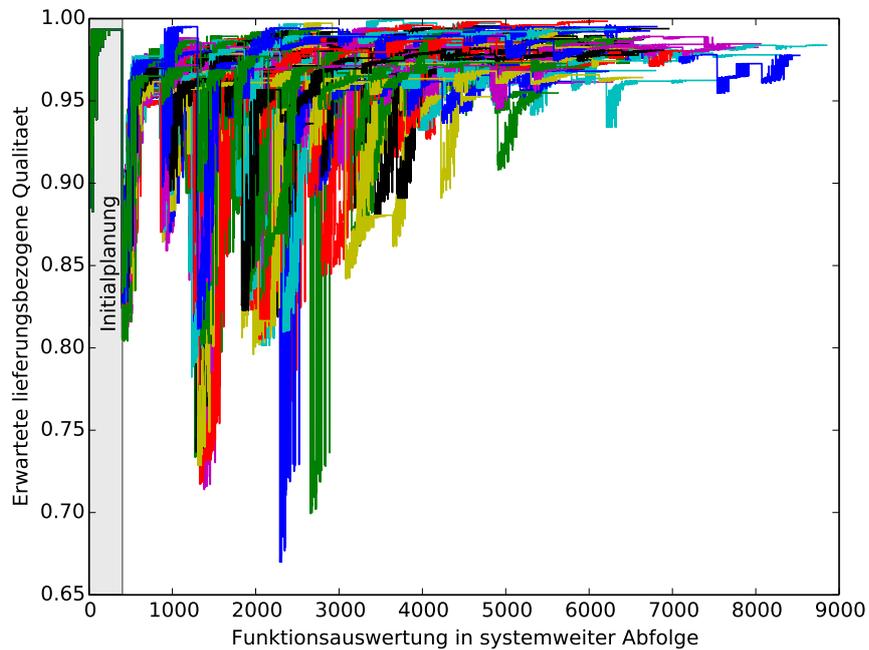
In [Abbildung 8.21](#) sind die erzielten Werte der lieferungsbezogenen Qualität für alle Versuche mittels Boxplots pro Versuchsreihe dargestellt. Auf der X-Achse sind die unterschiedlichen Parametrierungen der BHKW-Ausfälle aufgetragen, während jede einzelne Grafik eine Variante von PV-Prognose-Abweichungen darstellt. Im linken Bereich der Abbildung finden sich somit die Versuchsreihen ohne BHKW-Ausfälle, links oben die Versuchsreihe ohne Ereignisse aus dem Experiment E-RE-0. Wie bereits in vorangegangenen Auswertungen ist der Median mit einem Strich in der Box dargestellt, das arithmetische Mittel mit einem Kreis eingetragen.

Zunächst ist festzustellen, dass im Referenz-Experiment ohne Induktion von Ereignissen (oben links) die erwartete Qualität von über 0.99 aus der Initialplanung erreicht wird. Die Versuchsreihe zeigt weiterhin, dass keine versteckten Zufallsvariablen das Ergebnis beeinflussen: Der Wert ist konstant über alle Versuche.

Die schlechteste Qualität wird bei 6 BHKW-Ausfällen und 8 PV-Abweichungen bei einem Ausreißer beobachtet: Hier wird nur eine Qualität nur ca. 0.90 erreicht. In keinem Fall werden Werte unter 0.9 beobachtet, wie sie im Verlauf der kooperativen Lösungssuche auftreten und bereits diskutiert wurden. Das oberste Quartil der Qualitätswerte erreicht in



(a) 10 BHKW-Ausfälle, keine PV-Prognose-Abweichungen



(b) 10 BHKW-Ausfälle, 8 PV-Prognose-Abweichungen

Abbildung 8.20: Experiment E-RE-1: Verlauf der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität bei (a) 10 zufällig verteilten BHKW-Ausfällen und (b) zusätzlich 8 PV-Prognose-Abweichungen. Gezeigt wird der Verlauf aus allen 100 Versuchen je Versuchsreihe.

allen Versuchsreihen einen Wert über 0.99. Der Mittelwert liegt zwischen 0.97 und 0.99 in allen Versuchsreihen.

Relevanter für die Bewertung der Performanz des Verfahrens ist die Entwicklung der Werte mit zunehmender Anzahl an Ereignissen: Dazu soll zunächst die oberste Grafik in [Abbildung 8.21](#) betrachtet werden. Sie stellt die Versuchsreihen dar, bei denen zwischen 0 und 10 BHKW-Ausfällen zufällig über den Produkthorizont verteilt wurden. Es ist zu erkennen, dass die Qualität mit zunehmender Anzahl an Ereignissen stetig abnimmt.

Mit zunehmender Anzahl von PV-Prognose-Abweichungen – d. h. von der obersten in Richtung der untersten Grafik – wird dieser Effekt weniger deutlich, allerdings ist nicht erkennbar, dass sich die Qualität durch die PV-Abweichungen verbessert. Dieses Ergebnis ist zunächst überraschend: Es kann angenommen werden, dass ein Wegfall an Leistung durch BHKW-Ausfälle durch eine erhöhte PV-Einspeisung kompensiert würde. Die Effekte einer Kombination mit PV-Prognose-Abweichungen soll daher anhand [Abbildung 8.22](#) diskutiert werden: In dieser Aufbereitung werden die Ergebnisse derselben Versuchsreihen so aufgetragen, dass die PV-Prognose-Abweichungen auf der X-Achse aufgetragen sind, während die einzelnen Grafiken jeweils eine Variante von BHKW-Ausfällen darstellen. In der obersten Grafik (keine BHKW-Ausfälle) ist erkennbar, dass die PV-Abweichungen die Qualität vermindern. Zurückzuführen ist die verminderte Qualität auf eine Über- oder Untererfüllung des Produktes, allerdings ist das nur aus den Rohdaten pro Intervall, nicht aus der hier gewählten abstrahierten Darstellung über alle Produktintervalle abzulesen. Mit zunehmender Anzahl an BHKW-Ausfällen wird dieser Effekt schwächer: Die Qualität erreicht in der unteren Abbildungshälfte in allen Versuchsreihen einen mittleren Wert von ca. 0.97.

Der These, dass eine erhöhte PV-Einspeisung und BHKW-Abweichungen sich kompensieren würden, liegt die Annahme zugrunde, dass diese gleichzeitig und in einem Produktintervall auftreten müssten: Da die Produktvorgabe jeweils genau für eine Stunde zu liefern ist, kann es nur dann zu einer direkten Kompensation kommen, wenn diese Abweichungen möglichst innerhalb des gleichen Intervalls auftreten. In Stichproben konnte gezeigt werden, dass in diesen Fällen eine Qualität von über 0.99 erreicht wurde – dieses ist allerdings kein Merkmal des Planungsverfahrens, da es auch im ungesteuerten Betrieb automatisch zu einer Kompensation kommen würde.

Die Untersuchung der Monitoring-Werte zeigt, dass durch die Umplanung eine deutlich verbesserte lieferungsbezogene Güte erreicht wird als zu Beginn der jeweiligen Planungsverfahren nach Detektion eines Ereignisses.

8.7.4 Zwischenfazit

In den durchgeführten Experimenten konnte aufgezeigt werden, dass das Verfahren zu einer zuverlässigen Detektion und Verarbeitung von Ereignissen führt. Die Agenten ermitteln

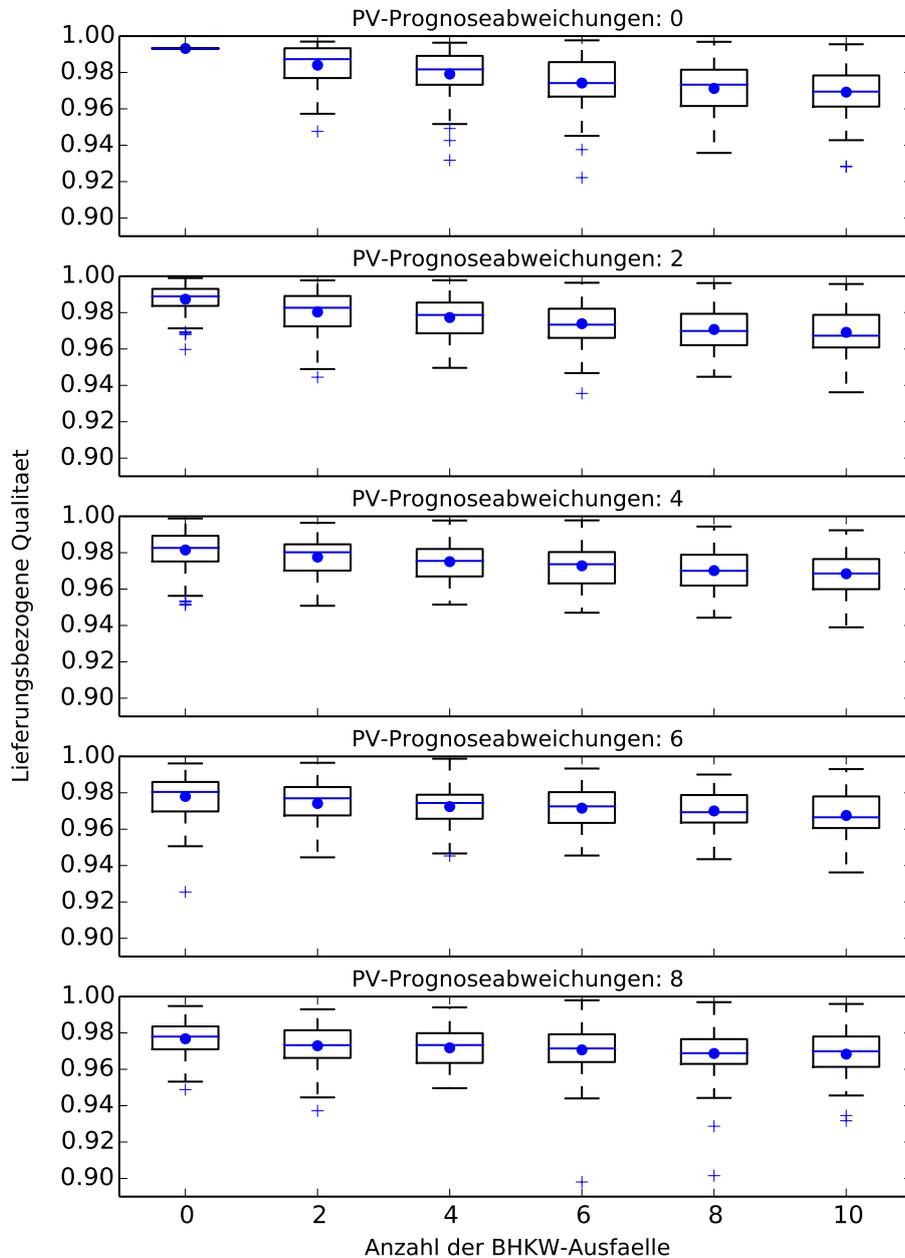


Abbildung 8.21: Experiment E-RE-1: Lieferungsbezogene Qualität. Aufgetragen ist jeweils die über das Monitoring der Einheiten ermittelte Qualität für jede Versuchsreihe als Boxplot mit ergänztem Mittelwert (blauer Kreis). Von links nach rechts nehmen die BHKW-Ausfälle zu, von oben nach unten die PV-Prognose-Abweichungen.

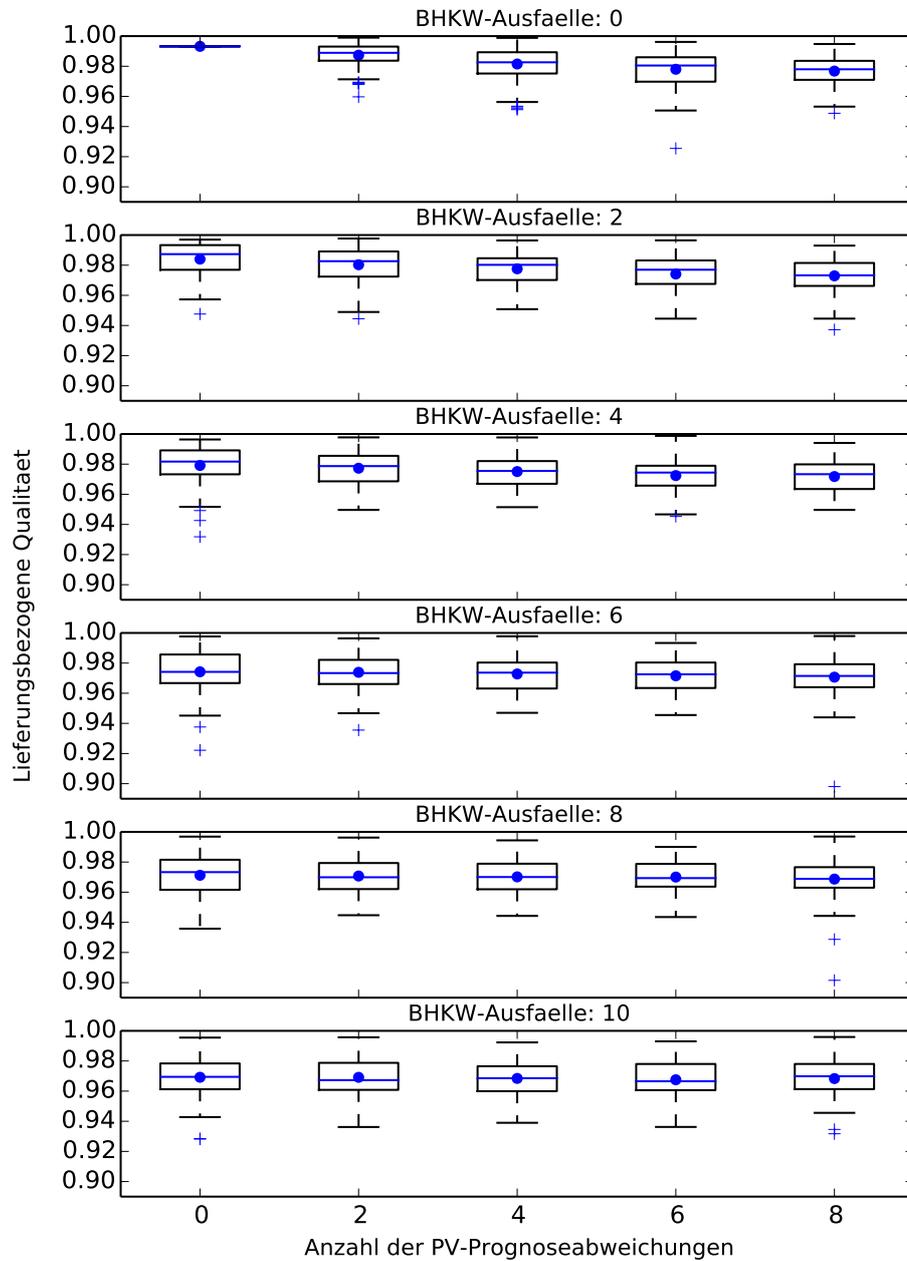


Abbildung 8.22: Experiment E-RE-1: Lieferungsbezogene Qualität. Aufgetragen ist jeweils die über das Monitoring der Einheiten ermittelte Qualität für jede Versuchsreihe als Boxplot mit ergänztem Mittelwert (blauer Kreis). Von links nach rechts nehmen die PV-Prognose-Abweichungen zu, von oben nach unten die BHKW-Ausfälle.

in einer Umplanung neue Fahrpläne, mit denen die Einheiten auch bei mehrfach auftretenden Ereignissen konfiguriert werden. Die erwartete lieferungsbezogene Qualität, die die Agenten auf Basis ihres Weltwissens ermitteln, kann durch die erneut angestoßene kooperative Lösungssuche deutlich verbessert werden. Weiterhin konnte an Beispielen gezeigt werden, dass die Ergebnisse der Planung ein stabiles Verhalten bzgl. der zu verarbeitenden Ereignisse aufzeigen.

8.8 SKALIERBARKEIT

8.8.1 Hypothesenbildung, Szenario und Experimente

Mit den Experimenten zur Skalierbarkeit werden unterschiedliche Ziele verfolgt: Zum einen soll geprüft werden, welchen Einfluss die Anzahl der Ereignisse auf die Anzahl der Nachrichten hat, die im Laufe der Produkterfüllung innerhalb des Systems zwischen den Agenten ausgetauscht werden. Es wird angenommen, dass bei gleichem DVPP die Ereignisse dann die Anzahl der Nachrichten erhöhen, wenn sie in unterschiedlichen Planungsintervallen detektiert werden. Werden die Ereignisse jedoch innerhalb des gleichen Planungsintervalls bearbeitet, so sollte die Anzahl der Ereignisse einen unter-linearen Einfluss auf die Nachrichtenmenge haben, da mit dem entwickelten Verfahren der kontinuierlichen Einsatzplanung alle Agenten in die kooperative Lösungssuche eingebunden werden und innerhalb dieser Lösungssuche detektierte Ereignisse dabei direkt mit verarbeitet werden. Die Hypothese H-SK-1 fasst diese Annahmen zusammen.

Weiterhin soll geprüft werden, ob die in [Abschnitt 6.1](#) diskutierten anwendungsspezifischen Zeitgrenzen eingehalten werden können. Es wurde festgehalten, dass der Einsatzplanung nach der Detektion eines Ereignisses maximal 15 Minuten zur Verfügung stehen, um neue, gültige Einsatzpläne zu ermitteln und die Einheiten mit den entsprechenden Fahrplänen zu konfigurieren. Deutlich kürzere Zeitspannen erscheinen im Sinne einer Erweiterbarkeit des Verfahrens hinsichtlich anderer Fahrplanauflösungen oder prognosefähiger Anlagenmodelle für relevant: Kann ein Agent durch ein erweitertes Anlagenmodell bereits innerhalb eines Planungsintervalls prognostizieren, dass es zu einer Abweichung kommen wird, kann vor Ablauf eines Planungsintervalls und damit proaktiv ein Ereignis detektiert werden. In einem solchen Konzept würden deutlich verkürzte Zeitanforderungen gelten.

Erkennt ein Agent ein Ereignis und löst eine Umplanung aus, so integrieren die Agenten zunächst die Ereignisinformationen in ihren Ereignisspeicher und beteiligen sich dann an der kooperativen Lösungssuche. Durch den Aufbau der Kommunikationstopologie ist gewährleistet, dass die Verbreitung von Informationen bei gleicher Parametrierung der Dichte der Kommunikationstopologie weitgehend unabhängig von der Anzahl der beteiligten Agenten ist. Es wurde zunächst die Hypothese aufgestellt, dass die Größe eines DVPP nur einen

geringen oder keinen Einfluss auf die Dauer der Umplanung hat. In der gewählten Umsetzung erwies es sich allerdings als nicht möglich, eine Vergleichbarkeit von Experimenten mit unterschiedlichen Anlagen-Anzahlen herzustellen: Da die Struktur des Lösungsraums nicht vergleichbar ist, sind auch die Ergebnisse nicht vergleichbar – nur innerhalb eines Experimentes (d.h. mit gleichem Szenario, siehe S. 162) können Ergebnisse im Sinne einer Parameterstudie verglichen werden. Die dargelegte Hypothese wurde daher nicht weiter verfolgt.¹² Der Aspekt der Vergleichbarkeit von Szenarien wird im letzten Abschnitt dieses Evaluationskapitels diskutiert werden. Wichtig für die Eignung von DynaSCOPE im Anwendungskontext der Dynamischen Virtuellen Kraftwerke ist die Einhaltung der Zeitgrenzen. Diese wird als eigene Hypothese formuliert und ist unabhängig von einer Vergleichbarkeit der Experimente prüfbar (Hypothese H-SK-2).

Der dritte Aspekt, der innerhalb der Untersuchungen zur Skalierbarkeit betrachtet werden soll, ist der Einfluss unterschiedlicher Konstellationen bezüglich der Affiliationsmengen: Welche Unterschiede in Initial- und Umplanung ergeben sich, wenn eine Gruppe von Agenten über einen langen Zeitraum gemeinsam ein Produkt liefert oder aber über den gleichen Zeitraum in einzelnen DVPPs zusammengefasst sind? In [Kapitel 7](#) wurde dargestellt, dass eine Zugehörigkeit zu unterschiedlichen DVPPs eine gemeinsame Planung verhindert, da die Konvergenz des Planungsverfahrens ansonsten nicht mehr gewährleistet werden kann. Es wird erwartet, dass durch diese Einschränkung Einbußen in der Lösungsgüte entstehen können: Die einzelnen DVPPs beeinflussen sich potentiell in der Planung, können sich darüber aber nicht so in Kenntnis setzen, dass eine integrierte Optimierung möglich wäre. Um die Konvergenz des Verfahrens zu sichern, wurden die folgenden Einschränkungen vorgenommen:

- Für die Produkte des Folgetages erfolgt die Initialplanung sequentiell, wobei der Beginn eines Produktes die Reihenfolge definiert.
- Die Initialplanung eines Produktes darf solche Produkte, die früher zu erfüllen sind, nicht gefährden: Ein neuer Fahrplan darf nur dann von einem Agenten ausgewählt werden, wenn er mit dem neuen Fahrplan die Verpflichtungen in vorangehenden Produkten noch erfüllt.
- In der Umplanung wird analog zum gewählten Vorgehen bei der Initialplanung zunächst das aktuelle Produkt berücksichtigt und eine Umplanung in Folgeprodukten nachfolgend angestoßen.
- Wird untertägig ein nachfolgendes Produkt umgeplant, so darf der Produktbeitrag des aktuellen Produktes durch die lokale Fahrplanauswahl nicht gefährdet werden.

¹²Siehe dazu auch die Erläuterungen zum verwendeten Vorgehensmodell im [Kapitel 2](#).

Es wird vermutet, dass das prinzipiell bezüglich der Affiliationsmengen sehr dynamische DVPP-Konzept in der Planung an Grenzen stoßen kann: Bereits in der Initialplanung wird die Auswahl der Agenten aus dem Suchraum für alle Produkte außer dem ersten Produkt des Tages eingeschränkt. Hypothese H-SK-3 fasst diese Aspekte folgendermaßen zusammen: Werden Agenten in mehrere DVPPs aufgeteilt und können daher nur über reduzierte Zeiträume integriert optimieren, so wird die lieferungsbezogene Qualität dadurch beeinträchtigt. In [Tabelle 8.8](#) werden die Hypothesen zur Skalierbarkeit im Überblick dargestellt.

Untersuchungsziel: Prüfung der Skalierbarkeit

- H-SK-1 Treten Ereignisse im gleichen Planungsintervall auf, so ist der Einfluss auf die Nachrichtenmenge schwächer als linear.
- H-SK-2 Auch bei großen DVPP mit vielen Ereignissen stellt die kontinuierliche Einsatzplanung innerhalb der vorgegebenen Zeitgrenzen eine gültige Einsatzplanung bereit.
- H-SK-3 Werden Agenten in mehrere DVPP aufgeteilt und können daher nur über reduzierte Zeiträume integriert optimieren, so wird die lieferungsbezogene Qualität dadurch beeinträchtigt.

Tabelle 8.8: Hypothesen zur Skalierbarkeit der Umplanung

Für die Prüfung der Hypothesen zur Skalierbarkeit müssen unterschiedliche Experimente durchgeführt werden. Für die Hypothese H-SK-1, für welche die Effekte unterschiedlicher Mengen von Ereignissen innerhalb desselben DVPP geprüft werden, können die bereits vorgestellten Versuche aus [Abschnitt 8.7](#) herangezogen und analysiert werden: Im Experiment E-RE-1 wurde bei einem DVPP mit 50 Agenten eine unterschiedliche Anzahl von Ereignissen induziert (siehe [Experimentensteckbrief 8.6](#), Seite 219). Diese wurden zufällig über einen Produktzeitraum von vier Stunden verteilt. Während also bei wenigen Versuchen die Wahrscheinlichkeit einer Häufung von Ereignissen in einem Planungsintervall sehr klein ist, müssen mit einer steigenden Anzahl von Ereignissen mehrere Ereignisse innerhalb eines Planungsintervalls verarbeitet werden. Es wurden die Versuchsreihen analysiert, die bis zu 18 Ereignisse aufweisen (die ersten zehn Ereignisse als BHKW-Ausfälle, die nachfolgenden Ereignisse als PV-Prognose-Abweichungen).

Mit der Prüfung unterschiedlicher DVPP-Größen und damit Szenarien für Hypothese H-SK-2 können nur sehr eingeschränkt vergleichbare Probleminstanzen geschaffen werden: Nicht nur die Anzahl der Einheiten ändert sich, sondern zwangsläufig auch die Rolle einer einzelnen Einheit im DVPP. Anders als im Experiment E-RE-1 ist es also nicht zulässig, die Nachrichtenanzahl oder die Simulationsdauer daraufhin zu analysieren, ob ein Trend von kleinen zu großen DVPP erkennbar ist. Die in diesen Versuchen ermittelten Ergebnisse wer-

den daher lediglich zur Prüfung der Zeitanforderungen herangezogen. [Experimentensteckbrief 8.6](#) gibt einen Überblick über die zur Prüfung der Hypothese H-SK-2 durchgeführten Experimente. Die Annahmen bezüglich der zugrunde liegenden Hardware-Basis und der daraus abgeleiteten Parameterwahl werden an entsprechender Stelle dokumentiert.

Experimentensteckbrief 8.6 (Größenvariation: Erzeuger-Verbraucher-DVPP) Prüfung auf Einhaltung der Zeitanforderungen	
Standard-Parametrierung	
◦ Dichte der Kommunikationstopologie:	$\phi = 1.0$
◦ Nachrichtenverzögerung:	$\delta_{msg} = 200ms$
◦ Reaktionsverzögerung:	$r_a = [200, 400]$
◦ Trainingsdaten für Suchraummodell:	Wintertag, 100 Samples
Experimente	
E-SK-1 (DVPP100):	6 BHKW, 40 Wärmepumpen, 54 PV-Anlagen 6 BHKW-Ausfälle, 44 PV-Prognoseabweichungen
E-SK-2 (DVPP200):	12 BHKW, 80 Wärmepumpen, 108 PV-Anlagen 12 BHKW-Ausfälle, 88 PV-Prognoseabweichungen
E-SK-3 (DVPP300):	18 BHKW, 120 Wärmepumpen, 162 PV-Anlagen 18 BHKW-Ausfälle, 132 PV-Prognoseabweichungen
E-SK-4 (DVPP400):	25 BHKW, 159 Wärmepumpen, 216 PV-Anlagen 25 BHKW-Ausfälle, 175 PV-Prognoseabweichungen
Versuchsreihen	
Zufallsbedingte Variation:	Aufbau der Kommunikationstopologie

Für die Untersuchungen zur Skalierbarkeit bezüglich der Affiliationsmengen (Hypothese H-SK-3) werden Szenarien definiert, die – auf der Basis des Szenarios aus Experiment E-RE-1 – unterschiedliche Aufteilungen der Agenten auf Produkte vorsehen. Alle Agenten finden sich in allen DVPP wieder. Verfahrensbedingt ergeben sich die Einschränkungen nicht aus der Anzahl der Agenten, die die Schnittmenge zwischen zwei DVPP bilden, sondern aus der Reduktion des Produktzeitraums, der den Gegenstand der kooperativen Lösungssuche definiert. Sind nun wie in den definierten Szenarien alle Agenten in allen DVPP, so ist ein Vorverarbeitungsschritt, in dem diese DVPP kombiniert werden, leicht umsetzbar. Der hier definierte Sonderfall bietet für die experimentelle Auswertung die Möglichkeit, die Ergebnisse zwischen den Szenarien eingeschränkt vergleichen zu können. In [Abbildung 8.23](#) ist die Aufteilung des Zeithorizontes von zwölf Stunden auf die einzelnen Produkte in den jeweiligen Experimenten dargestellt. Im [Experimentensteckbrief 8.7](#) sind die Parametrie-

rungen der durchgeführten Experimente E-AF-0 bis E-AF-4 zusammenfassend dargestellt.

Experimentensteckbrief 8.7 (Affiliationsmengen: Erzeuger-Verbraucher-DVPP)	
Prüfung auf die Effekte der zeitbezogenen Aufteilung der Agenten in unterschiedliche DVPP	
<hr/>	
Basis-Szenario	
Zeitmodell	Definition 5.4 (Seite 70)
Einheiten-Ebene	<ul style="list-style-type: none"> ◦ BHKW: 20 Anlagen, Vaillant Ecopower 4.7kW ◦ PV: 20 Anlagen, 10kW_p ◦ Wärmepumpen: 10 Anlagen, 5kW
Agenten-Ebene	◦ Domäne: kontinuierlich, Suchraummodell
<hr/>	
Standard-Parametrierung	
◦ Dichte der Kommunikationstopologie:	$\phi = 1.0$
◦ Nachrichtenverzögerung:	$\delta_{msg} = 200ms$
◦ Reaktionsverzögerung:	$r_a = [200, 200]$
◦ Sensitivität bei Suchraumabfrage:	$\epsilon_{s,a} = 0.0$
◦ Trainingsdaten für Suchraummodell:	Übergangstag, 200 Samples
<hr/>	
Experimente	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ E-AF-0: 1 DVPP über 12 Stunden ◦ E-AF-1: 2 DVPP über je 6 Stunden ◦ E-AF-2: 4 DVPP über je 3 Stunden ◦ E-AF-3: 6 DVPP über je 2 Stunden ◦ E-AF-4: 12 DVPP über je 1 Stunde 	
<hr/>	
Versuchsreihen	
Zufallsbedingte Variation:	Aufbau der Kommunikationstopologie

8.8.2 Nachrichtenanzahl (Experimente E-RE-1)

In [Abbildung 8.24](#) ist die Anzahl der Nachrichten pro Agent für die Versuchsreihen mit bis zu 18 Ereignissen als Boxplots aufgetragen. Die erste Versuchsreihe zeigt das Nachrichtenaufkommen für die Initialplanung auf und weist wegen der Festlegung aller Variablen wie erwartet keine Streuung auf. In den nachfolgenden Versuchsreihen, d. h. mit jeweils zwei Ereignissen mehr pro Versuchsreihe, steigt die Anzahl der Nachrichten pro Agent stetig an. Die Zunahme in jedem Schritt nimmt im Mittel allerdings ab: Insbesondere in den

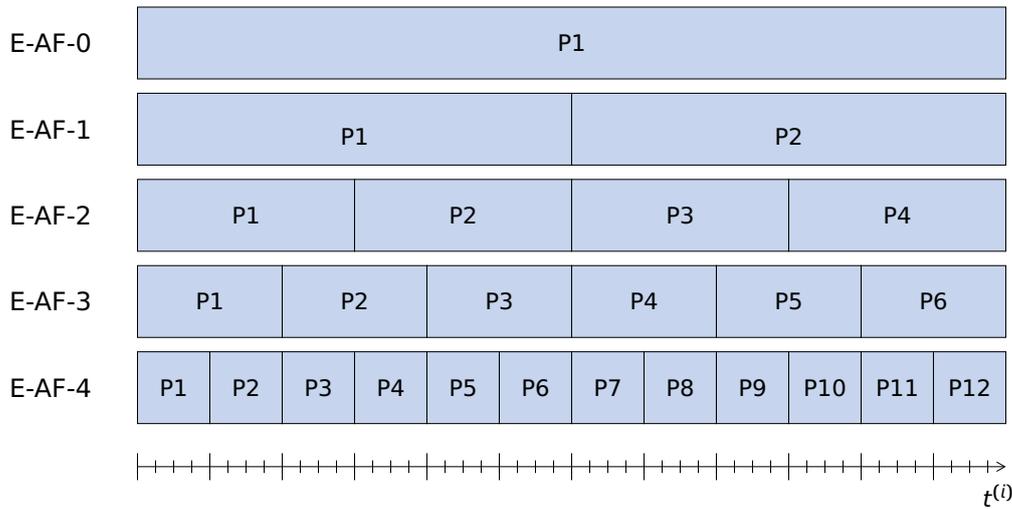


Abbildung 8.23: Experimente E-AF-0 bis E-AF-4: Konstruktion der Produkte.

letzten Versuchsreihen zeigt sich eine Stabilisierung der Nachrichtenanzahl. Erklärbar ist dies durch das Verhältnis von Produktzeitraum und Ereignisanzahl: Der Produktzeitraum umfasst vier Stunden, somit 16 Planungsintervalle. Die Ereignisse wurden über alle Produktintervalle gleichverteilt, so dass die Wahrscheinlichkeit, dass mehrere Ereignisse innerhalb eines Planungsintervalls detektiert werden, sich mit zunehmender Anzahl der Ereignisse erhöht. Werden mehrere Ereignisse in einem Planungsintervall detektiert, so wird zwar jeder Agent zunächst eine Nachricht verschicken, um die Lösungssuche anzustoßen, der Nachrichtenaufwand der eigentlichen Lösungssuche ist aber unabhängig von der Anzahl der Ereignisse, da Nachrichten gebündelt verarbeitet werden.

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ereignisse und der Nachrichtenanzahl soll im Folgenden kurz diskutiert werden. Dazu wird zunächst die Anzahl der Nachrichten für die Ereignisbearbeitung $m_{inc}(INC)$ definiert:

Definition 8.4 (Anzahl der Nachrichten für die Ereignisbearbeitung)

Die Menge der Ereignisse, die im Systemverlauf detektiert werden, sei bezeichnet als INC (siehe [Definition 5.18](#)).

Bei parallel auftretenden Ereignissen ergibt sich die Anzahl der Nachrichten für die Ereignisbearbeitung $m_{inc}(INC)$ aus der Anzahl der Nachrichten, bis alle Agenten über alle Ereignisse informiert sind, m_{inf} , sowie aus der Anzahl der Nachrichten zur Verbesserung

der Lösung m_{opt} :

$$m_{inc}(INC) = m_{inf}(INC) + m_{opt}(INC)$$

Es ist nun zu betrachten, wie sich die Nachrichtenmenge abhängig von der Mächtigkeit der Menge INC verändert.

Parallel angestoßene Prozesse der kooperativen Lösungssuche werden durch das skizzierte verteilte Verfahren der kontinuierlichen Einsatzplanung integriert (siehe [Beispiel 7.3](#), S. 148). Damit hat – sobald parallel angestoßene Lösungssuchen integriert sind – die Anzahl der Ereignisse keinen Einfluss auf die Anzahl der Nachrichten zur Verbesserung der Lösung.

Wie verändert sich aber die Anzahl der Nachrichten, bis alle Agenten über alle Ereignisse informiert sind, in Abhängigkeit von der Menge der Ereignisse? Um dies zu beleuchten, wird zunächst angenommen, dass die ersten beiden Ereignisse bei den Agenten detektiert werden, die bezogen auf die Overlay-Topologie die größte Entfernung haben. In einem Ring entspricht das bei gerader Anzahl von Agenten genau den Agenten, die sich gegenüberliegen. Die Anzahl der Nachrichten, die erforderlich sind, bis diese beiden Agenten sich über die Ereignisse informiert haben, ist somit maximal. Mit jedem weiteren Ereignis verringert sich die Anzahl der Nachrichten, bis die Prozesse sich integrieren, da sich der Abstand der Agenten bezogen auf die Overlay-Topologie verringert. Weiterhin können innerhalb einer Menge von Agenten auf Basis der zugrunde gelegten Overlay-Topologie immer ein oder mehrere Paare von Agenten identifiziert sind, die bezogen auf diese Topologie die maximale Entfernung aufweisen. Es gilt somit: Mit zunehmender Anzahl von parallel detektierten Ereignissen steigt die Menge der Nachrichten, bis alle Agenten über alle Ereignisse informiert sind, schwächer als linear an.

Zusammenfassend kann Hypothese H-SK-1 als gestärkt angesehen werden: Der Zusammenhang zwischen der Anzahl auftretender Ereignisse und der Nachrichtenmenge wird als schwächer als linear eingeschätzt.

8.8.3 Umplanungsdauer (Experimente E-SK-1 bis E-SK-4)

Die nachfolgend beschriebenen Experimente dienen der Prüfung, ob die Umplanung innerhalb der definierten Zeitgrenzen konvergiert.

Eine Bewertung der Umplanungsdauer ist nur eingeschränkt in der entwickelten Evaluationsumgebung möglich.¹³ Die nachfolgenden Ergebnisse geben somit einen ersten Einblick in das Zeitverhalten.

Die Experimente E-SK-1 bis E-SK-4 bestanden aus jeweils 100 Versuchen, bei denen die Verknüpfungen der Kommunikationstopologie zufallsbedingt variiert wurde. Die Allokation der Ereignisse bezogen auf Anlagen und Planungsintervall wurde nicht variiert, d. h. in jedem Versuch des jeweiligen Experimentes waren dieselben Einheiten im selben

¹³Entsprechend der hier dargestellten ersten Iteration des Vorgehensmodells SGAE fokussiert die Evaluation auf die volle Parametrierbarkeit der Ereignisse.

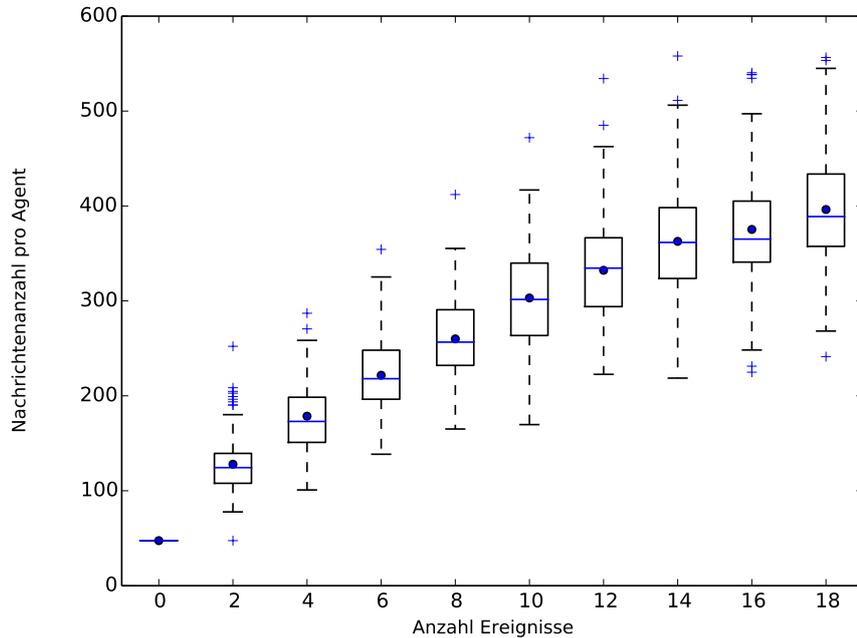


Abbildung 8.24: Experiment E-RE-1: Analyse des Nachrichtenaufkommens pro Agent abhängig von der Anzahl der Ereignisse. Die dargestellten Boxplots fassen die Ergebnisse jeweils einer Versuchsreihe von 100 Versuchen dar. Zufallsgebunden war die Allokation der Ereignisse im Produkthorizont.

Planungsintervall von einem Ereignis betroffen. Durch den zufallsbedingt variierten Aufbau der Kommunikationstopologie ergeben sich allerdings unterschiedliche Abfolgen, in denen die Agenten sich über Ereignisse, den wahrgenommenen Systemzustand und neue Lösungskandidaten informieren. Die Größe der DVPPs steigt mit der Ordnungsnummer der Experimente von 100 auf 400 Agenten an. Mit G_ψ als Größe eines DVPP wird die Anzahl der induzierten Ereignisse in allen Versuchen bei $G_\psi/2$ definiert, d. h. ein Ereignis wurde bei der Hälfte der Einheiten induziert. Wie bereits im ersten Evaluationsschritt wurden je 100 Samples als Trainingsdaten eines Wintertages gewählt – so sollten zum einen eine nicht trivial lösbare Probleminstanzen geschaffen werden und zum anderen eine lokale Kompensation vermieden werden: Insbesondere bei den BHKWs konnte in Vorversuchen häufig eine lokale Kompensation beobachtet werden, wenn der Beitrag der jeweiligen Einheit nur sehr klein war. Dieser Effekt sollte in den hier durchgeführten Experimenten soweit möglich vermieden werden: An dem gewählten Wintertag speisen die BHKWs im Bereich ihrer Peak-Leistung ein. Für die PV-Anlagen wurde eine positive Prognose-Abweichung induziert: Die Einheiten speisen 120 % der geplanten Energie ein. Der Anteil der lokal kompensierten Ereignisse ist im Anhang A, [Tabelle A.2](#) (S. 269) zusammengefasst.

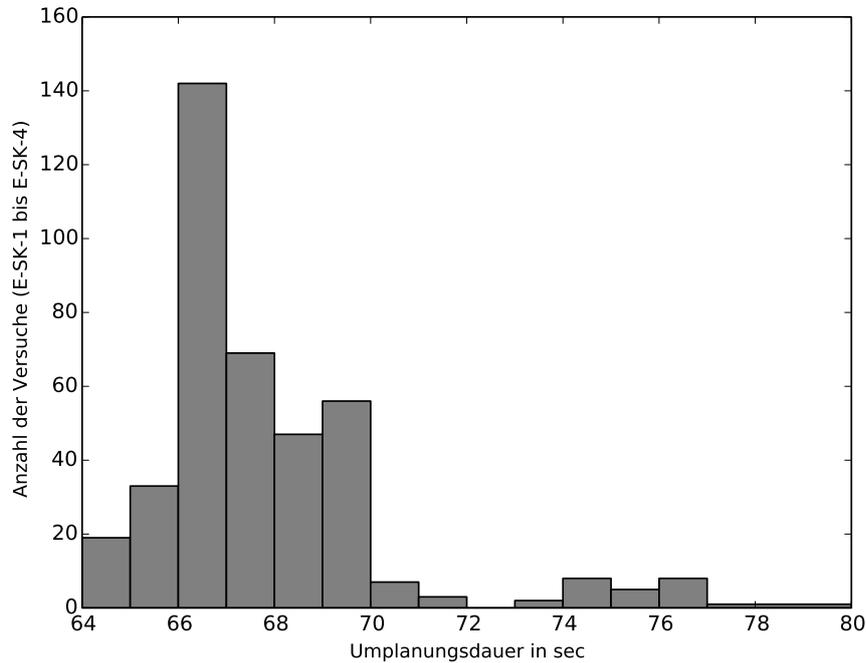


Abbildung 8.25: Experimente E-SK-1 bis E-SK-4: Darstellung der Umplanungsdauer als Histogramm für alle 400 Versuche.

In [Abbildung 8.25](#) sind die ermittelten Umplanungsdauern in den Experimenten E-SK-1 bis E-SK-4 zusammenfassend dargestellt. Im dargestellten Histogramm wird nicht nach Szenario differenziert. Die maximale beobachtete Umplanungsdauer beträgt ca. 80 Sekunden. Die minimale Umplanungsdauer beträgt ca. 64 Sekunden, während in den meisten Versuchen eine Umplanungsdauer von 66 - 69 Sekunden beobachtet wurde. Diese Angaben umfassen nur die simulierte Zeit, die von der gewählten Umsetzungsvariante und den von der verwendeten Hardware abhängigen Parametern abstrahiert. Zum Abschluss dieses Abschnittes wird diskutiert, welche Subprozesse bezüglich ihres Zeitbedarfes hardware-spezifisch betrachtet werden sollten.

In [Tabelle 8.9](#) sind einige Rohdaten pro Experiment aufgeführt: Zu jedem DVPP wird die minimale und maximale Umplanungsdauer sowie Median und arithmetisches Mittel aufgeführt. Weiterhin sind die gleichen Werte für die Nachrichtenmenge pro Agent dargestellt. Diese Werte beziehen die Nachrichten aus der Initialplanung mit ein. Die maximale Umplanungsdauer wurde in einem Versuch des Experimentes E-SK-3 beobachtet (*DVPP300*), der geringste im Experiment E-SK-1 (*DVPP100*). Die Spreizung der Werte ist weiterhin sehr unterschiedlich. Die höchste Nachrichtenmenge mit ca. 442 Nachrichten pro Agent wurde bei *DVPP100* beobachtet, die niedrigste mit ca. 89 Nachrichten pro Agent bei *DVPP200*.

	min.	max.	Median	arithm. Mittel
<i>DVPP100</i>				
Umplanungsdauer	64.349	71.303	66.095	66.162
Nachrichten/Agent	110.65	442.27	130.585	160.199
<i>DVPP200</i>				
Umplanungsdauer	64.521	71.8	67.24	67.554
Nachrichten/Agent	89.095	200.605	149.635	143.686
<i>DVPP300</i>				
Umplanungsdauer	67.277	79.447	69.408	70.692
Nachrichten/Agent	128.99	254.23	157.877	174.929
<i>DVPP400</i>				
Umplanungsdauer	66.128	68.084	66.869	66.883
Nachrichten/Agent	347.99	397.205	364.096	366.070

Tabelle 8.9: Experimente E-SK-1 bis E-SK-4: Umplanungsdauer in Sekunden und Nachrichten pro Agent. Angegeben ist jeweils der minimale und maximale Wert (min./max.), sowie der Median und das arithmetische Mittel für jeweils 100 Versuche des jeweiligen Experimentes.

Die große Diversität der Szenarien soll anhand einer kombinierten Darstellung von Nachrichten pro Agent, Umplanungsdauer und lieferungsbezogener Qualität illustriert werden. In [Abbildung 8.26](#) sind diese drei Metriken für jeden Versuch folgendermaßen aufgetragen: Auf der X-Achse ist die Anzahl der Nachrichten pro Agent aufgetragen, auf der Y-Achse die Umplanungsdauer. Die Größe der pro DVPP spezifischen Marker definiert sich über die erreichte Lösungsgüte. Die Erwartung kann dabei nicht gestellt werden, dass die Agenten in der Umplanung eine Lösungsgüte von 1.0 erreichen – auch in diesen Experimenten ist die Veränderung der Lage und Streuung der Lösungsgüte, nicht der absoluter Wert, von Bedeutung.

Deutlich erkennbar ist auch hier die maximale Umplanungsdauer von ca. 80 Sekunden sowie eine Häufung im Bereich 65 - 70 Sekunden. Die weiteren Charakteristika der Experimente sind sehr unterschiedlich: In *DVPP100* werden gleiche Lösungsgüten bei sehr unterschiedlicher Nachrichtenmenge erreicht. In *DVPP400* sind Nachrichtenmenge, Umplanungszeit sowie Lösungsgüte in allen Versuchen ähnlich. Bei *DVPP200* und *DVPP300* ist eine Tendenz erkennbar: Lösungsgüte, Nachrichtenmenge und Umplanungsdauer steigen gemeinsam an; die jeweiligen Marker mit der größten Nähe zum Ursprung sind am

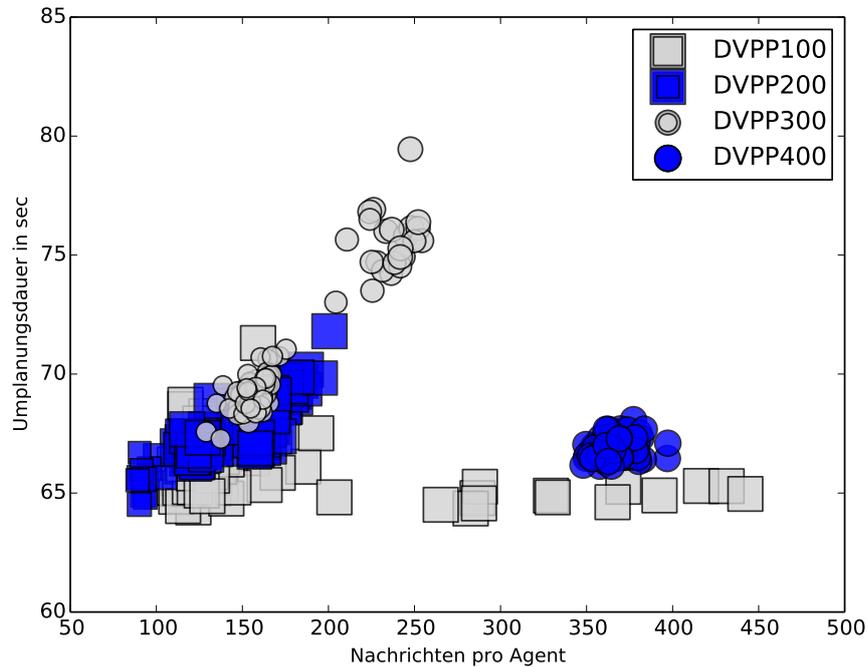


Abbildung 8.26: Experimente E-SK-1 bis E-SK-4: Darstellung der Umplanningdauer in Kombination mit der Nachrichtenanzahl pro Agent. Die Werte jeden Versuches wurden einzeln aufgetragen. Die Größe der Markierungen entspricht der Lösungsqualität.

kleinsten.

Die hier vorgestellten Ergebnisse sollen – neben der Darstellung der zeitlichen Eigenschaften der kontinuierlichen Einsatzplanung – vor allem illustrieren, dass durch die komplexen Wechselbeziehungen in Szenarien keine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Probleminstanzen gegeben ist.

Der Zeitbedarf für die kontinuierliche Einsatzplanung ist erst dann ermittelbar, wenn konkrete Annahmen zur Hardware und – bei einer Verteilung der Agenten auf Komponenten im Feld – zur verwendeten physikalischen Kommunikationstopologie gemacht werden können. Zur genaueren Untersuchung empfiehlt sich eine Evaluation in einer Laborumgebung mit kombinierter Simulation der Kommunikation, um – neben den Verzögerungen durch die gewählte Kommunikationsinfrastruktur – den Zeitbedarf der folgenden Subprozesse zu ermitteln:

- **Generieren der Samples:** Für das Training des Suchraummodells müssen Samples auf Basis des aktuellen Betriebszustandes ermittelt werden. Der Zeitbedarf dieses Schrittes ist abhängig von dem Anlagenmodell, das für die Generierung der Samples verwendet wird.

- **Training des Suchraummodells:** Die Dauer dieses Subprozesses ist neben den Eigenschaften der verwendeten Hardware stark abhängig von der Anzahl der Samples. Über diese Anzahl ist somit auch eine Beeinflussung des Zeitbedarf möglich. Weiterhin zeigte sich eine (hier nicht dargestellte) Abhängigkeit von der Länge des Planungshorizontes.
- **Lokale Fahrplanauswahl:** Der Zeitbedarf ergibt sich aus dem Zeitbedarf für die Abfrage eines Fahrplans aus dem Suchraummodell und der Bewertung in Bezug auf weitere Produktverpflichtungen. Der Prozess wird mehrfach ausgeführt.
- **Ermittlung Lösungskandidat:** Die Bewertung eines potentiellen Lösungskandidaten wird anhand der globalen Bewertungsfunktion vorgenommen. Die Häufigkeit dieses Subprozesses hängt von der Anzahl der erhaltenen Lösungskandidaten sowie der Beschaffenheit des Suchraums eines Agenten ab.

Mit 80 sec. als maximaler Laufzeit für das Verfahren kann als Anforderung formuliert werden, dass eine solche Hardware und Kommunikationsinfrastruktur verwendet werden muss, welche die Umsetzung der dargestellten Subprozesse in ca. 10 Minuten erlaubt. Auf diese Weise würde die erforderliche Konvergenz des Verfahrens innerhalb eines Planungsintervalls von 15 min. sicher erreicht.

8.8.4 Affiliationsmenge (Experimente E-AF-0 bis E-AF-4)

In den Experimenten E-AF-0 bis E-AF-4 wurde der Einfluss der Affiliationsmenge auf die Einsatzplanung untersucht. Dazu wurden über einen 12-Stunden-Zeitraum stundengenaue Zielvorgaben definiert. Das Referenzexperiment, in dem die Agenten über den gesamten betrachteten Zeitraum innerhalb eines DVPP zusammengeschlossen wurden, diente zur Definition der Zielvorgaben; in manuellen Versuchen wurden die Vorgaben so ermittelt, dass eine lieferungsbezogene Qualität von über 0.98 erreicht wurde. In [Abbildung 8.27](#) ist beispielhaft das Ergebnis einer Einsatzplanung dargestellt – es ist erkennbar, dass die Vorgaben insbesondere wegen der in der Mitte des betrachteten Zeitraums stärkeren PV-Einbindung in den einzelnen Stunden sehr unterschiedlich definiert waren.

In den weiteren Experimenten sind die Zeiträume aufgeteilt: Im Extremfall, der in Experiment E-AF-4 definiert ist, sind die Agenten für jeweils eine Stunde in einem DVPP zusammengefasst. Dieses Experiment stellt somit den hypothetischen schlimmsten anzunehmenden Fall im Anwendungskontext Dynamischer Virtueller Kraftwerke dar: Obwohl die DVPPs eine vollständige Überschneidung der Agentenmenge ausweisen, kann innerhalb jedes DVPP nur für eine Stunde geplant werden. In allen Experimenten sind die durch alle DVPPs definierten Produktzeiträume zusammenhängend und bilden so den 12-Stunden-Zeitraum des Referenz-Experimentes E-AF-0 mit den gleichen Vorgaben ab. An einer definierten Einheit wurde in jedem Versuch im ersten Planungsintervall ein Ereignis induziert,

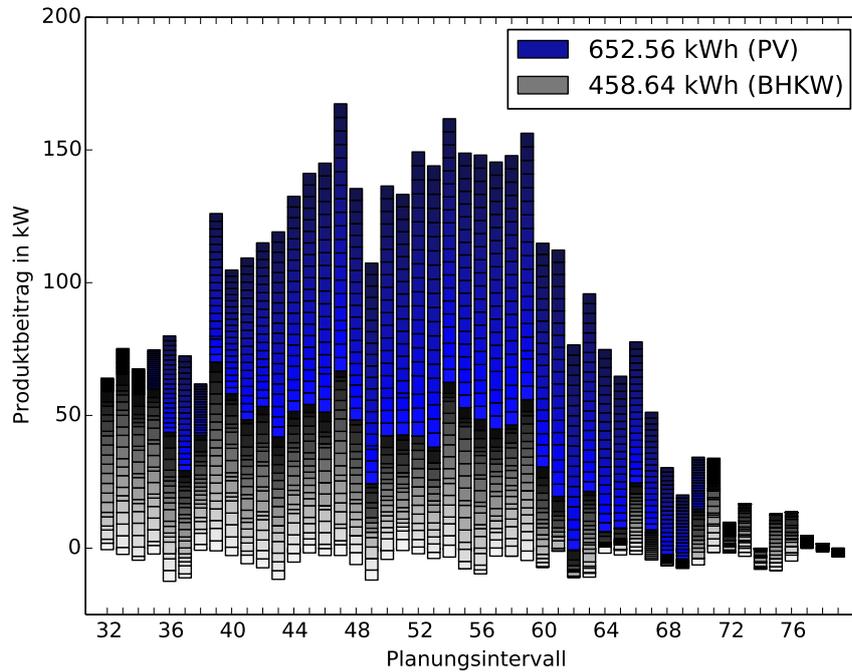


Abbildung 8.27: Experiment E-AF-0: Darstellung eines Einsatzplanes des Referenz-Experimentes. Der elektrische Verbrauch der integrierten Wärmepumpen ist als negative Basislinie eingebracht, so dass entsprechend der Konzeption der Erzeuger-Verbraucher-DVPP zunächst der interne Bedarf erfüllt wird.

das nicht lokal kompensiert wurde und somit zu einer Umplanung mindestens des ersten Produktes führte. Für jedes Experiment wurden 100 Versuche mit zufallsbedingt variierteter Ausbildung der Kommunikationstopologie durchgeführt.

Zur Bewertung der Experimente wurde die Anzahl verworfener Lösungskandidaten erfasst:

Definition 8.5 (Anzahl verworfener Kandidaten)

Die Anzahl der verworfenen Kandidaten innerhalb eines Planungsprozesses bezeichnet die Anzahl der Fahrpläne, die aus dem Suchraum ermittelt wurden und wegen anderer Produktverpflichtungen nicht gewählt werden konnten.

In [Abbildung 8.28](#) sind die Ergebnisse für die Experimente E-AF-0 bis E-AF-4 aufgetragen. Dargestellt ist jeweils als Boxplot mit ergänztem Mittelwert die lieferungsbezogene Qualität der Initialplanung, die lieferungsbezogene Qualität der Umplanung sowie die Anzahl verworfener Kandidaten über die gesamte Simulationsdauer des jeweiligen Versuches. Die X-Achse stellt die Experimente als Ordinalskala dar: Das Referenz-Experiment E-AF-0

weist nur ein Produkt auf und bildet die erste Kategorie, in Experiment E-AF-1 sind zwei aufeinander folgende Produkte von jeweils sechs Stunden definiert usw. Erwartungsgemäß wurde im Referenz-Experiment kein Fahrplan verworfen.

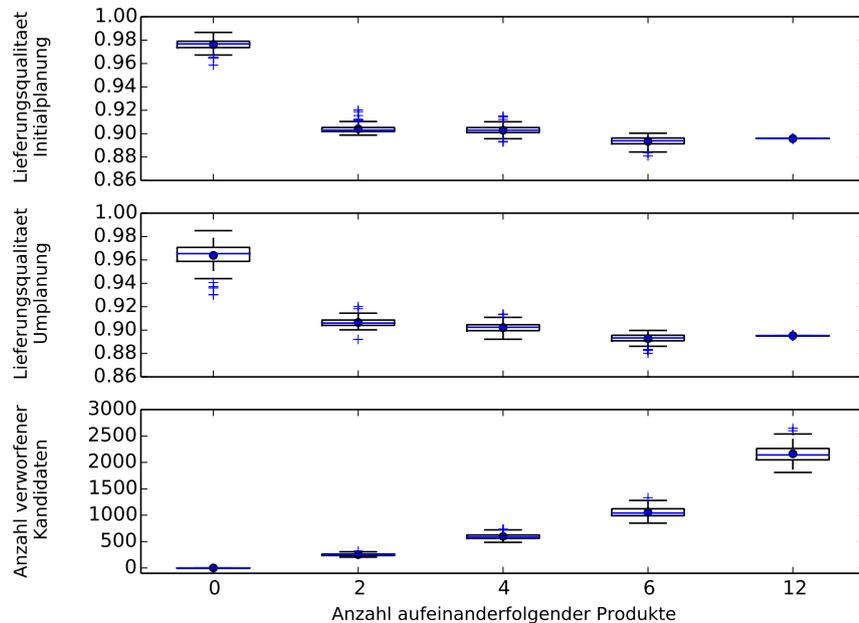


Abbildung 8.28: Experimente E-AF-0 bis E-AF-4: Einfluss der Affiliation auf die Qualität der Einsatzplanung. Dargestellt ist für jeweils 100 Versuche des jeweiligen Experimentes die lieferungsbezogene Qualität in Initial- und Umplanung sowie die Anzahl der im Lauf der Planungen verworfenen Fahrpläne als Boxplot. Für die Angabe der lieferungsbezogenen Qualität bei Initial- und Umplanung wurde die Güte identisch zum Referenzexperiment aus den produktspezifischen Werten errechnet.

Zunächst sollen die Ergebnisse der Initialplanung betrachtet werden: Im Referenz-Experiment liegt diese im Mittel bei knapp unter 0.98 mit nur geringer Streuung. Im Experiment E-AF-2, d. h. bei einer Teilung des DVPP in der Mitte des Produktzeitraums, bricht diese deutlich ein: Die lieferungsbezogene Qualität sinkt auf unterhalb 0.91 ein. Ca. 250 Fahrpläne wurden durch die Agenten bei der lokalen Fahrplanauswahl verworfen. Jeder Fahrplan hatte potentiell zu einem neuen Einsatzplan führen können. Der Fahrplan wurde in jedem Fall genau dann verworfen, wenn der Produktbeitrag des Agenten für das erste Produkt durch diesen Fahrplan nicht mehr erfüllt worden wären. Es ist somit erkennbar, dass für die Initialplanung des zweiten Produktes eine deutlich verringerte Flexibilität zur Verfügung stand. Dennoch ist es an dieser Stelle korrekt, diese Fahrpläne noch im Suchraum abzubilden: Im Rahmen der prädiktiven Planung, die durch die Initialplanung abgebildet wird, sind diese Fahrpläne anlagenseitig zulässig, wenn auch planungsbedingt nach dem aktuel-

len Weltwissen des Agenten nicht mehr umsetzbar, falls die vorangegangene Produkte so erfüllt würden wie geplant.

Im Experiment E-AF-2 wurden vier aufeinander folgende Produkte definiert, denen alle Agenten des Szenarios zugeordnet wurden. Die Anzahl der verworfenen Kandidaten steigt auf etwas mehr als 500 an und hat sich somit mit der Anzahl der DVPPs etwas mehr als verdoppelt. Auch in den nachfolgenden Experimenten wächst die Anzahl der verworfenen Kandidaten ungefähr proportional mit der Anzahl der DVPP. Die lieferungsbezogene Qualität sinkt nach dem ersten Einbruch bei zwei Produkten (Experiment E-AF-1) nur noch geringfügig weiter ab.

Es ist somit erkennbar, dass in den untersuchten Szenarien bereits bei einer Aufteilung des betrachteten 12-Stunden-Zeitraums auf zwei DVPP die Flexibilität in der Fahrplanauswahl stark eingeschränkt ist.

Die Verteilung der lieferungsbezogenen Qualität auf die einzelnen Produkte soll am Beispiel von Experiment E-AF-2 (vier Produkte) diskutiert werden. In [Abbildung 8.29](#) ist die lieferungsbezogene Qualität für jedes Produkt einzeln aufgetragen. Auf Basis der Rohdaten wurde ermittelt, dass bereits für das zweite Produkt nach Ermittlung eines ersten Lösungskandidaten keine Verbesserung des Produktes erreicht werden konnte. Aus den Werten der lieferungsbezogenen Qualität, die in den dargestellten Experimenten erst zum Produkt P4 abfallen, kann somit keine Aussage über die Abhängigkeit der lieferungsbezogenen Qualität zur Reihenfolge der Produkte gemacht werden – sie zeigen lediglich auf, wie gut die für das erste Produkt ermittelten Fahrpläne auch die Produktbeiträge für die weiteren Produkte erfüllen, ohne dass dies Bestandteil der kooperativen Lösungssuche gewesen wäre. In [Abbildung 8.30](#) wird dieser Aspekt für alle Experimente anhand des Mittelwertes der lieferungsbezogenen Qualität pro Produkt illustriert.

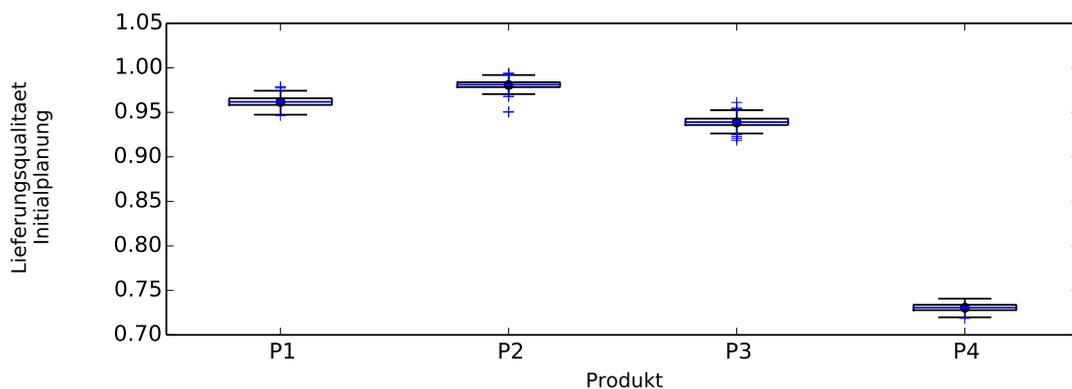


Abbildung 8.29: Experiment E-AF-2: Einfluss der Affiliation auf die Qualität der Einsatzplanung. Dargestellt ist für die vier aufeinanderfolgenden Produkte P1 bis P4 die lieferungsbezogene Qualität in der Initialplanung.

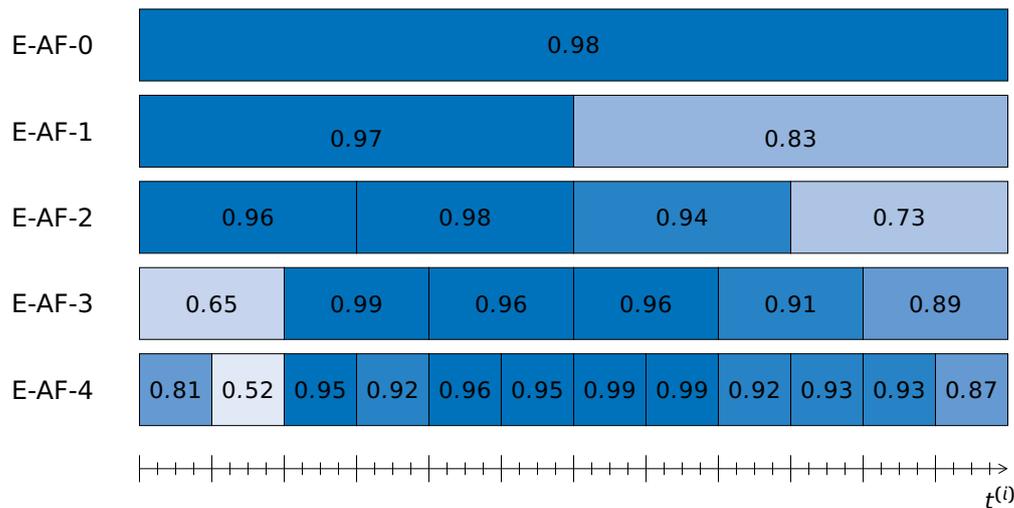


Abbildung 8.30: Experimente E-AF-0 bis E-AF-4: Lieferungsbezogene Qualität in der Initialplanung. Dargestellt ist pro Experiment jeweils der Mittelwert der lieferungsbezogenen Qualität für jedes Produkt aus 100 Versuchen. Auf der Zeitachse sind die Planungsintervalle mit hervorgehobener Stundengrenze aufgetragen. Die Farbschattierungen geben vereinfacht die Abstufungen des dargestellten Wertes wider.

Abschließend soll kurz auf die Effekte der Umplanung in den unterschiedlichen Experimenten eingegangen werden (siehe mittlere Grafik in [Abbildung 8.28](#)). Wie bereits erläutert, wurde im ersten Planungsintervall an einer Einheit ein Ereignis induziert, das nicht lokal kompensiert werden konnte. Im Referenzexperiment wurde daher eine Umplanung für den gesamten 12-Stunden-Zeitraum ausgelöst. In den nachfolgenden Experimenten wurde mindestens für das erste Produkt eine Umplanung ausgelöst - in den nachfolgenden DVPP nur in dann, wenn die Produktlieferung durch die Umplanung des ersten Produktes eingeschränkt wurde. Im Referenz-Experiment führt das Ereignis zu einem Abfall der erwarteten lieferungsbezogenen Qualität auf im Mittel 0.92 (Gütwert des ersten Lösungskandidaten nach Ereignisdetektion, damit Gütwert zu Beginn der Umplanung). Durch die Umplanung gelingt es den Agenten, die lieferungsbezogene Qualität auf einen Wert oberhalb von 0.96 zu steigern und damit einen zur Initialplanung reduzierten, aber vergleichbaren Wert zu erreichen. In den weiteren Experimenten zeigt sich dieser Effekt vergleichbar: Die lieferungsbezogene Qualität nach Umplanung ist mit der initialen Einsatzplanung vergleichbar. Auf Basis der Rohdaten wurde weiterhin ermittelt, dass es in allen Versuchen gelang, das Ereignis innerhalb des ersten Produktes so zu verarbeiten, dass die nachfolgenden Produkte ohne eine weitere Umplanung erfüllt werden konnten. Diese Beobachtung sollte allerdings wegen des bezüglich der Ereignisse sehr artifiziellen Charakters der Szenarien nicht in eine

weiterreichende Hypothese überführt werden: In der Praxis erscheint es unwahrscheinlich, dass lediglich ein Ereignis innerhalb eines 12-Stunden-Zeitraumes detektiert wird.

Bereits auf Basis der Ergebnisse der Initialplanung kann somit die Hypothese H-SK-3 bestätigt werden: Können Agenten aufgrund einer Zuordnung zu unterschiedlichen DVPP nur reduzierte Zeiträume integriert optimieren, so wird die lieferungsbezogene Qualität dadurch erheblich beeinträchtigt. Es wäre an dieser Stelle wünschenswert, diese Ergebnisse mit Hilfe solcher Szenarien genauer zu prüfen, die auf Basis einer realistischen DVPP-Bildung entstehen, um Empfehlungen für die DVPP-Bildung auszusprechen. Diese und weitere Aspekte werden im [Abschnitt 8.9](#) diskutiert.

8.8.5 Zwischenfazit

In den durchgeführten Experimenten konnte aufgezeigt werden, dass der Einfluss einer zunehmende Menge von Ereignissen innerhalb eines Planungsintervalls sich schwächer als linear auf die Nachrichtenmenge auswirkt. Auch bei großen DVPPs stellte DynaSCOPE in den durchgeführten Experimenten eine neue und gültige Einsatzplanung innerhalb der anwendungsspezifischen Zeitgrenzen bereit. Eine starke Einschränkung in der lieferungsbezogenen Qualität muss dann in der Initialplanung in Kauf genommen werden, wenn ein Agent innerhalb des Planungshorizontes in mehreren DVPPs eingebunden ist. Es sollte daher in Folgearbeiten geprüft werden, ob diese Einbußen der lieferungsbezogenen Qualität in der untertägigen Planung kompensiert werden können oder aber Mindestauern für DVPPs erforderlich sind.

8.9 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG UND OFFENE FRAGEN

Die hier dargestellten experimentellen Evaluationen schließen eine erste Iteration des SGAE-Vorgehensmodells ab. Ziel war es, die Eignung des entwickelten Verfahrens für den angestrebten Anwendungskontext zu prüfen. Um die Abhängigkeiten von der Anzahl und Verteilung der Ereignisse prüfen zu können, wurden synthetische, voll kontrollierbare Einheitenmodelle verwendet. Ein einheitentyp-ähnliches Verhalten wurde darüber simuliert, dass die verwendeten Suchraummodelle mit Trainingsdaten detaillierterer Einheitenmodelle trainiert wurden. Anhand von Beispiel-Szenarien wurden vorab definierte Hypothesen meist in Parameterstudien geprüft. Es wurden Hypothesen zum Eigenschaftserhalt des Basisverfahrens, zur Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung, zur Berücksichtigung der Kostenstruktur und der anlagenlokalen Präferenzen in der Planung sowie zu den Eigenschaften der Umplanung und der Skalierbarkeit von DynaSCOPE geprüft. Alle Versuchsreihen wurden mit jeweils 100 Versuchen durchgeführt, wobei die zufallsabhängige Variation abhängig vom Untersuchungsziel gewählt wurde. Insgesamt wurden 92 unterschiedliche Versuchsreihen ausgeführt und automatisiert ausgewertet.

Zusammenfassend kann – mit der einschränkenden Wirkung des synthetischen Charakters der gewählten Evaluationsumgebung – auf Basis dieser Untersuchungen festgestellt werden, dass DynaSCOPE für die kontinuierliche Einsatzplanung in Dynamischen Virtuellen Kraftwerken geeignet ist.

Auf Basis der Untersuchungen konnten relevante Fragen und Hypothesen bearbeitet werden und Fragen und Anregungen für eine nächste SGAE-Iteration – mit detaillierteren Annahmen und Modellen – ermittelt werden. Diese werden nachfolgend aufgeführt und erläutert.

- **Robustheit des Basisverfahrens:** Das verwendete Basisverfahren zeigte eine im Vergleich zu synthetischen Probleminstanzen reduzierte Robustheit, wenn die kontinuierlichen, stützvektorbasierten Suchräume verwendet wurden. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Effekt mit Hilfe einer erhöhten Vernetzung der Overlay-Topologie kompensiert werden kann. In weitergehenden Arbeiten sollte untersucht werden, ob die reduzierte Robustheit sich aus der reduzierten Anzahl kommunizierter Lösungskandidaten ergibt oder auf andere Effekte zurückzuführen ist. Es erscheint weiterhin sinnvoll, das Basisverfahren auf weitere Parameterabhängigkeiten hin zu prüfen, z. B. mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung.
- **Ereignisinduzierte Umplanung vs. Online-Optimierung:** In der kontinuierlichen Einsatzplanung konnte gezeigt werden, dass DynaSCOPE eine Verbesserung der lieferungsbezogenen Qualität durch ein Wiederanstoßen der kooperativen Lösungssuche ermöglicht. Ein Ereignis stellt in diesem Fall einen Vorteil dar, weil es mit dem Wiederanstoß der Optimierung den Ausbruch aus einem lokalen Minimum ermöglicht. Da DynaSCOPE es erlaubt, die vorangegangenen Betriebszustände zu berücksichtigen, stellt eine Umplanung zudem keinen Nachteil dar. Es sollte daher geprüft werden, ob eine Umplanung nicht nur im Falle eines Ereignisses, sondern ggf. auch dann neu angestoßen werden sollte, wenn keine Ereignisse eingetreten sind. Dies empfiehlt sich insbesondere bei längeren Produktzeiträumen. Es sollte daher weiterhin geprüft werden, in welchem Fall eine lokale Kompensation (und die weiteren Eigenschaften des Verfahrens, die der Dämpfung dienen) sinnvoll ist. Unbekannt ist weiterhin, wie groß – bei Verwendung echter Anlagenmodelle und somit nicht kontrollierbarer Ereignismenge – die Anzahl der Ereignisse im Feld tatsächlich werden kann. Ist das Verfahren in der Lage, in der Auflösung der Fahrpläne wiederholt eine Umplanung anzustoßen und die jeweiligen aktuellen Anlagenzustände zu berücksichtigen, so könnte beispielsweise die Ereignisbearbeitung auf die Neugenerierung des Suchraummodells beschränkt werden. Durch unterschiedlich realisierbare Ansätze (in der einfachsten Variante realisiert durch einen dedizierten Agenten des DVPP) könnte die Umplanung in jedem Fahrplanintervall für das nachfolgende Intervall neu angestoßen werden. In diesem Fall würde die prädiktive Einsatzplanung durch

eine Online-Optimierung auf Basis des verhandelten Einsatzplanes ergänzt. Nachfolgende Arbeiten sollten diese beiden Ansätze – Ereignis-induzierte Umplanung und Online-Optimierung – vergleichend bewerten.

- **Umsetzungsvarianten und Zeitgrenzen:** Für die Definition der Experimente war es erforderlich, Annahmen bezüglich bestimmter Parameter zu machen, die für weiterreichende Untersuchungen abhängig von der eingesetzten Hardware zu treffen wären. An einigen Stellen wurde bereits auf unterschiedliche technologische Realisierungsoptionen verwiesen. Am augenfälligsten sind die Ausprägungen der Einsatzplanung als verteilte Optimierung auf einem zentralen Server oder aber als verteiltes Steuerungskonzept auf anlagen-lokalen Komponenten im Feld. Für Folgearbeiten empfiehlt sich, die Untersuchungen mit einer solchen Parametrierung zu wiederholen, die der angestrebten technologischen Realisierungsoption entspricht bzw. diese detaillierter zu untersuchen. Dazu wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein erster Schritt in diese Richtung unternommen, indem unterschiedliche Realisierungsoptionen initial beschrieben werden (siehe [Kapitel 9](#)).
- **Modellierung von anlagenlokaler Flexibilität:** Die Fahrpläne einer Einheit wurden mit Hilfe der kontinuierlichen Suchraumdarstellung so abgebildet, dass eine restriktionslose Suche im Suchraum möglich ist. Der verwendete stützvektorbasierte Ansatz zur Modellierung möglicher Fahrpläne zeigte gute Eigenschaften und erlaubt die Abstraktion von tatsächlichen Anlagentypen. Die anlagenlokale Flexibilität ließe sich aber ggf. genauer ermitteln, wenn zur Generierung der Trainingsdaten (Samples) vorhersagefähige Modelle verwendet würden. Mögliche Ansatzpunkte ergeben sich z. B. aus dem Bereich der modellprädiktiven Regelung (siehe z. B. [[Neg07](#)]).
- **Berücksichtigung von Präferenzen:** Es konnte gezeigt werden, dass eine Berücksichtigung von Präferenzen über eine Abbildung im Suchraum möglich ist. Dazu wurde das Suchraummodell mit vorab ermittelten Präferenzwerten trainiert. In der gewählten Umsetzung wurden die Präferenzwerte aus Eigenschaften der Trainingsdaten abgeleitet. In nachfolgenden Untersuchungen sollte anlagentypspezifisch geprüft werden, welche Präferenzen aus Sicht des ökonomischen Anlagenbetriebs relevant sind und ob diese im Suchraummodell abgebildet werden können.
- **DVPP-Bildung und Affiliationsmengen:** Der Anwendungskontext Dynamischer Virtueller Kraftwerke zeigt eine extreme Flexibilität bezüglich der Zuordnung von Agenten zu unterschiedlichen DVPPs und geht damit deutlich über das Konzept bisherigen VK hinaus. Im Extremfall können aus der Verbundbildung so viele unterschiedliche Verbünde heraus entstehen, wie Produkte am Markt definiert werden, beispielsweise 24 DVPP pro Tag. Um die Konvergenzeigenschaften des Basisverfahrens zu erhalten,

mussten Einschränkungen in der Nutzung vorhandener Flexibilitäten genau dann in Kauf genommen werden, wenn für eine Einheit weitere Produktverpflichtungen außerhalb des jeweils aktuell betrachteten DVPP vorliegen. Es sollte daher vergleichend evaluiert werden, ob in der untertägigen Planung diese Defizite ausreichend behoben werden können oder es alternativ ökonomisch sinnvoller ist, eine Mindestdauer für den Zusammenhalt eines DVPP festzulegen. Eine solche Untersuchung muss im Zusammenhang mit detaillierteren Betrachtungen zum Marktdesign erfolgen.

- **Vergleichbarkeit von Szenarien:** Im Verlauf der Evaluation wurde mehrfach auf die Problematik der Vergleichbarkeit von Experimenten hingewiesen. Es wurde aufgezeigt, dass Experimente, in die unterschiedliche Szenarien eingebracht werden, nicht im Rahmen von Parameterstudien miteinander verglichen werden können (siehe dazu insbesondere [Abbildung 8.26](#), Seite 226). So konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Anlagenzahl und der im Produkt zu erbringenden Energiemenge nicht zu vergleichbaren Probleminstanzen führt. Denkbar wäre es, die für die jeweilige Untersuchung entscheidenden Eigenschaften der Szenarien in ein Experimenten-Design zu übernehmen – allerdings empfiehlt sich ein solches Vorgehen wegen des hohen experimentellen Aufwandes sicherlich erst in späteren SGAE-Iterationen. Es sollte geprüft werden, inwieweit es möglich ist, durch die Wahl der Parameter eine vergleichbare Struktur des Lösungsraums zu ermitteln.

9

RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DVPP

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Verfahren DynaSCOPE bettet sich ein in die gesamte DVPP-Wertschöpfungskette (siehe [Abschnitt 1.3](#)). In der Komplexität des Gesamtprozesses ist es begründet, diesen in Teilprobleme zu zerlegen und diese getrennt zu bearbeiten – nicht zuletzt, weil es sich um algorithmisch unterschiedliche Probleme handelt. Um aber der Aufgabenstellung dieser Arbeit gerecht zu werden, müssen neben den bisher bearbeiteten Fragestellungen, die sich auf die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP fokussiert haben, auch übergeordnete Fragen zur gesamten Wertschöpfungskette beantwortet werden. Das folgende Kapitel widmet sich daher der Beantwortung der folgenden bisher noch unbearbeiteten Fragen:

1. Welche **technischen Voraussetzungen** und Entwicklungen sind erforderlich, um das entwickelte Verfahren und das DVPP-Gesamtkonzept im Feld umzusetzen?
2. Bauen die technologischen Anforderungen dynamischer virtueller Kraftwerke im Sinne eines **Transformationsprozesses** widerspruchsfrei aufeinander auf? Sind die getroffenen Annahmen damit frei von inkonsistenten Weiterentwicklungen in verwandten Technologiefeldern?
3. In welchem **Zeithorizont** kann mit den technischen Voraussetzungen im Feld gerechnet werden?
4. Fügt sich das DVPP-Konzept in die **regulatorischen Rahmenbedingungen** der energiewirtschaftlichen Realität ein oder wären Anpassungen bzgl. der heute definierten Rollen und Akteure zwingend erforderlich, um DVPPs in der Praxis umzusetzen?

Diesen Fragestellungen wird im Folgenden mit Hilfe einer *gap-to-the-field*-Analyse nachgegangen. Die für diesen Zweck entwickelte Herangehensweise besteht aus einem dreistufigen Verfahren, das im Folgenden kurz skizziert wird. [Abbildung 9.1](#) fasst das Vorgehen im Überblick zusammen. Herangehensweise und ein Teil der Ergebnisse wurden in [[Nie+14b](#)] veröffentlicht.

Schritt 1: Ermittlung von Realisierungsoptionen ([Abschnitt 9.1](#)) DVPPs stellen einen algorithmischen Ansatz für die Integration kleiner dezentraler Energieanlagen in die

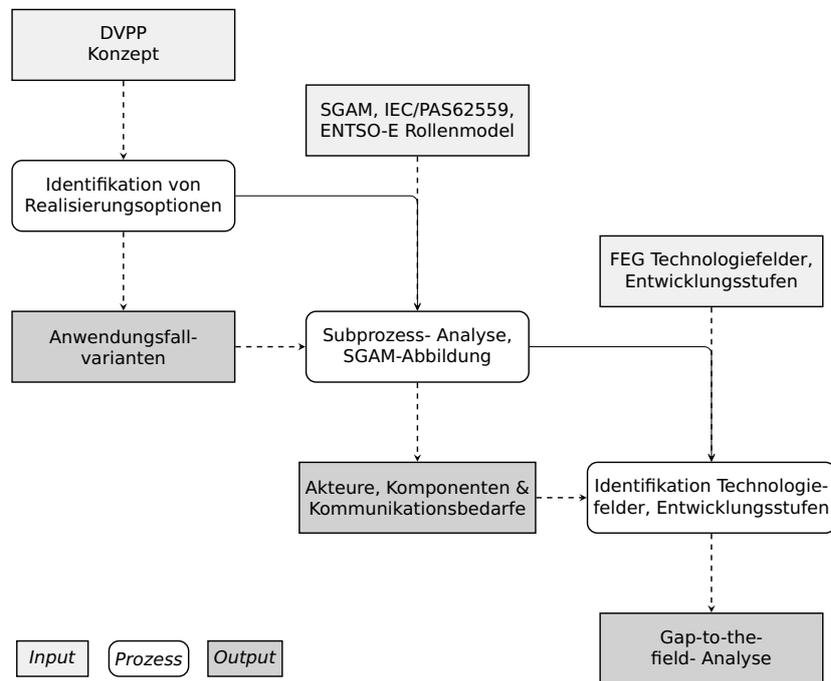


Abbildung 9.1: Herangehensweise für die *gap-to-the-field*-Analyse von DVPP

Energiemärkte dar, für die unterschiedliche technologische Umsetzungsoptionen entwickelt werden können. Um Widersprüche zu technologischen Bedingungen im Feld ermitteln zu können, ist daher eine Konkretisierung der bisher rein algorithmischen Sicht erforderlich. Es werden daher in einem ersten Schritt zwei unterschiedliche Realisierungsoptionen als Anwendungsfall-Varianten entwickelt, auf die sich die weitere Analyse bezieht.

Schritt 2: Ermittlung der Akteure, Komponenten und Kommunikationserfordernisse (Abschnitt 9.2) Die Anwendungsfall-Varianten werden bzgl. der relevanten Subprozesse analysiert und auf das *Smart Grid Architectural Model* (SGAM, siehe [Abschnitt 2.2.1](#)) abgebildet. Mit Hilfe der in IEC/PAS 62559 (siehe [[TGD13](#)]) vorgeschlagenen Use-Case-Methodik werden relevante Akteure, Komponenten und Kommunikationsanforderungen herausgearbeitet. Die Abbildung auf Akteure erfolgt anhand des ENTSO-E-Rollenmodells und erlaubt es daher festzustellen, inwieweit eine Umsetzung auf Basis der aktuell in europäischem Kontext festgelegten energiewirtschaftlichen Rollen möglich ist.

Schritt 3: Ableiten technologischer Anforderungen (Abschnitt 9.3) Die technologischen Anforderungen an die Komponenten werden im dritten Schritt mit Hilfe der Studie

»Future Energy Grids – Migrationspfade ins Internet der Energie« (im Folgenden: FEG-Studie) [AKM12] ermittelt: In dieser Studie wurden auf Basis von Expertenbefragungen und unter Beteiligung von Vertretern der relevanten Industriezweige Schlüsselfaktoren für die Umsetzung unterschiedlicher IT-basierter Smart Grid-Konzepte ermittelt und erforderliche Entwicklungsschritte dargestellt. Die daraus abgeleiteten Migrationspfade beschreiben nicht etwa Prognosen bzgl. technologischer Entwicklungen als vielmehr die Notwendigkeiten, die im Sinne der politisch vorangetriebenen Energiewende in Deutschland erforderlich sind, um die europaweit festgelegten Ziele bzgl. des Ausbaus erneuerbarer Energiequellen und der Dezentralisierung der Stromerzeugung zu erreichen. In diesem Sinne stellen die in der FEG-Studie dargestellten Migrationspfade keine zeitliche Prognose dar, sondern mögliche Entwicklungspfade für definierte politische Ziele. Auf Basis der Analyse der Subprozesse werden die relevanten Technologiefelder und die erforderlichen Entwicklungsstufen ermittelt. Die zeitlichen Horizonte der in der FEG-Studie angegebenen Migrationspfade erlauben eine zeitliche Einordnung unter den bereits angegebenen Einschränkungen.

9.1 TECHNOLOGISCHE REALISIERUNGSOPTIONEN

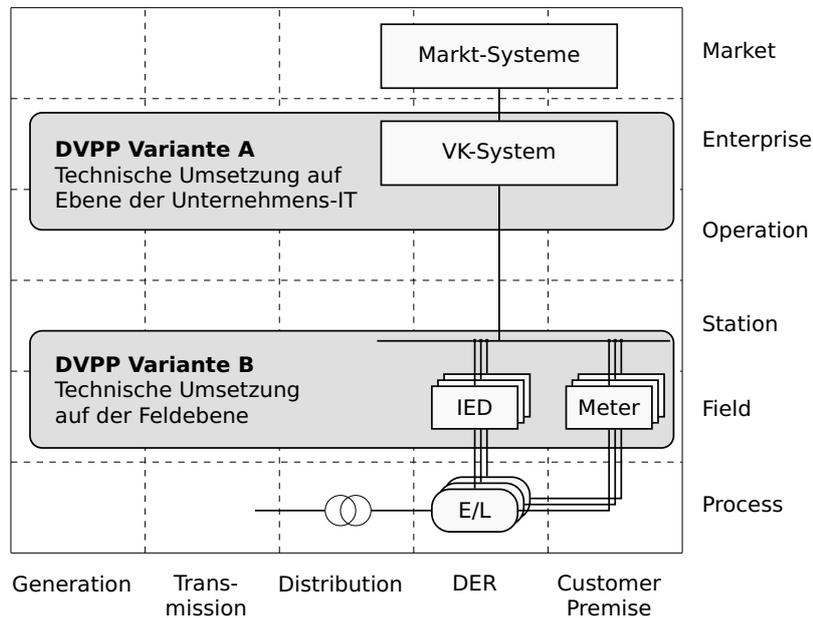


Abbildung 9.2: SGAM Component Layer: Technologische Realisierungsoptionen für DVPP (E/L: Erzeuger bzw. Lasten)

In den algorithmische DVPP-Subprozessen werden Prinzipien der Selbstorganisation auf das Management dezentraler Energieanlagen angewendet. Zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze zur Allokation der Selbstorganisation werden in [Abbildung 9.2](#) mithilfe der Komponenten-Ebene des SGAM dargestellt: In der Anwendungsfall-Variante A werden die Prozesse des DVPP im Bereich der Unternehmens-IT umgesetzt (*enterprise zone*). In dieser Variante sind DVPPs eine algorithmische Lösung für die zugrunde liegenden Optimierungsprobleme und als solche innerhalb eines VK-Systems umgesetzt. In der Anwendungsfall-Variante B werden die DVPP-Konzepte als Kontroll-Paradigma auf der Feldebene mithilfe spezieller Controller (IED – *intelligent electronic device*) umgesetzt. Die Charakteristika dieser beiden Varianten werden im Folgenden diskutiert.

9.1.1 Anwendungsfall-Variante A: DVPP als Optimierungsparadigma

In dieser Anwendungsfall-Variante sind DVPPs ein internes Konstrukt innerhalb eines zentralen VK-Systems und übernehmen die Aufgaben der Einsatzplanung für alle Einheiten, die innerhalb des VK verwaltet werden. Die Aspekte der Selbstorganisation beschränken sich auf die verteilte Optimierung innerhalb des VK-Systems, das als zentrale Kontrollinstanz Steuerung und Monitoring der verwalteten Anlagen übernimmt.

In [Abbildung 9.3](#) wird diese Anwendungsfall-Variante im Überblick dargestellt. Nicht dargestellt ist der Prozess der Anlagen-Registrierung, der als Vorbedingung bereits erfolgt sein muss. In einem ersten vorbereitenden Schritt ermittelt das VK-System die Flexibilität der ihm zugeordneten Einheiten (Subprozess I, Details zu diesem Schritt werden im nachfolgenden Abschnitt dargestellt). Auf der Grundlage aktueller Marktinformationen (1) formieren sich die Einheiten-Agenten innerhalb des VK-Systems zu DVPPs und führen eine initiale Einsatzplanung durch (Subprozesse II/III). Die Fahrpläne werden durch das VK-System an die Anlagen-Controller übermittelt (2), die deren Umsetzung über eine kontinuierliche Übermittlung von Setzwerten an die Anlagen realisieren (3). Das VK-System empfängt kontinuierlich Messdaten (c_1 , c_2) und analysiert Abweichungen im Anlagenbetrieb, um ggf. eine Umplanung und wiederholte Rekonfiguration der Anlagen-Controller vorzunehmen (Subprozess IV). Die endgültig realisierten Produktbeiträge werden der Abrechnung bzw. Mehrwertverteilung zugeführt (4) (Subprozess V).

Bezogen auf die Zonen des SGAM sind in dieser Anwendungsfall-Variante alle Algorithmen der DVPP-Subprozesse innerhalb des VK-Systems auf der Ebene der Unternehmens-IT realisiert.

9.1.2 Anwendungsfall-Variante B: DVPP als Kontroll-Paradigma

In dieser Anwendungsfall-Variante werden die DVPP-Algorithmen mit Hilfe von verteilter Software (z. B. Software-Agenten) auf speziellen Kontroll-Modulen im Feld umgesetzt. Der

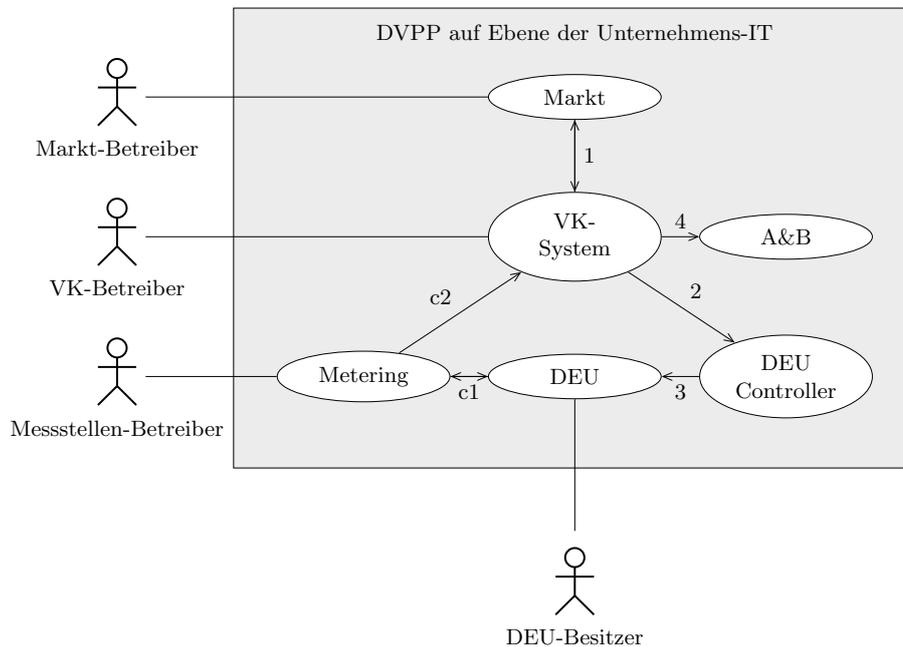


Abbildung 9.3: Anwendungsfall-Variante A: DVPP als Optimierungsparadigma. Zahlen repräsentieren übermittelte Informationen; Erläuterungen im Text.

Funktionsumfang der Module ist somit deutlich erweitert; sie werden daher hier nicht mehr *Controller*, sondern (entsprechend der Semantik im internationalen Standard IEC 61850) als *intelligent electrical device* (IEDs) bezeichnet. DVPP-Bildung und Einsatzplanung sind als verteilte Algorithmen auf den IEDs realisiert. Das VK-System stellt die weiteren notwendigen Services zur Verfügung, insbesondere die Kommunikation mit weiteren Akteuren wie z. B. den Energiemärkten. Der VK-Betreiber wird in dieser Variante daher als VK-Dienstleister bezeichnet, um den reduzierten Aufgabenbereich zu verdeutlichen.

In [Abbildung 9.4](#) ist die Anwendungsfall-Variante im Überblick dargestellt. Nicht dargestellt ist der initiale Prozess der Registrierung neuer Anlagen beim VK-System. Der VK-Dienstleister bezieht Informationen zu aktuellen Marktprodukten (1) und gibt diese auf Anfrage an die Einheiten-Agenten weiter (2). Weiterhin erfragen die Einheiten-Agenten die netztopologische benachbarten Einheiten-Agenten (siehe [Abschnitt 1.3](#)), die der VK-Dienstleister in einer spezifischen Datenbank vorhält (3). Die Agenten ermitteln zunächst die Flexibilität der ihnen zugeordneten Einheiten (Subprozess I) und starten nun den Prozess der DVPP-Bildung und Einsatzplanung (Subprozesse II/III). Ergebnis dieser Prozesse sind Einsatzpläne, deren Einträge als Setzwerte durch die IEDs an die Anlagen übermittelt

werden (5). Abweichungen von diesen Vorgaben werden im Rahmen eines kontinuierlichen Monitorings durch den Einheiten-Agenten bewertet (c1, c2). Bei Bedarf wird eine DVPP-interne Umplanung angestoßen (DVPP-Subprozess IV). Nach Abschluss der Produktlieferung werden die tatsächlich erbrachten Produktbeiträge an das Accounting und Billing des VK-Dienstleisters übermittelt, um die Verteilung der generierten Mehrwerte umzusetzen (6) (DVPP-Subprozess V).

Bezogen auf die Zonen des SGAM sind in dieser Anwendungsfall-Variante alle algorithmisch verteilten DVPP-Prozesse auf der Feld-Ebene realisiert und stellen somit nicht nur eine algorithmische Optimierungslösung, sondern ein Kontroll-Paradigma auf der Feld-Ebene dar.

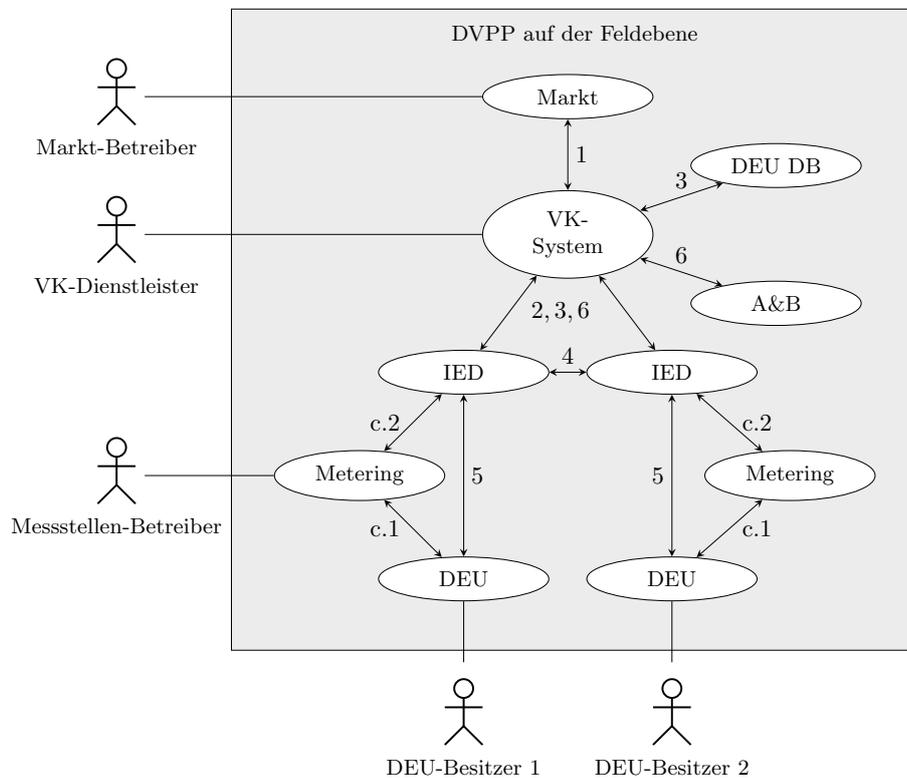


Abbildung 9.4: Anwendungsfall-Variante B: DVPP als Kontroll-Paradigma. Zahlen repräsentieren übermittelte Informationen; Erläuterungen im Text.

9.2 AKTEURE, KOMPONENTEN UND KOMMUNIKATIONSERFORDERNISSE

9.2.1 Analyse der beteiligten Akteure

In [Tabelle 9.1](#) sind die in den beiden Anwendungsfall-Varianten dargestellten Akteure dargestellt sowie mit einer Beschreibung der jeweiligen Aufgabe dargestellt. Unterschiede zwischen den Anwendungsfällen werden in der Beschreibung erläutert. Weiterhin werden die Akteure auf das Rollenmodell der ENTSO-E übertragen – so wird ermittelt, ob die Anwendungsfälle auf Basis der aktuellen europäisch festgelegten Rollenmodelle umsetzbar sind. Die Konkretisierung der vertraglichen Beziehungen zwischen den beteiligten Akteuren wäre Teil einer Geschäftsmodell-Entwicklung und ist daher nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Aus diesem Grund wird die Rolle des DEU-Betreiber nicht definiert und nicht verwendet, da diese Rolle – je nach vertraglicher Regelung – sowohl vom VK-Betreiber als auch vom DEU-Besitzer übernommen werden kann.

Die beiden Anwendungsfälle definieren die Akteure Markt-Betreiber, VK-Betreiber bzw. -Dienstleister, Messstellen-Betreiber und DEU-Besitzer. Die Akteure lassen sich in beiden Varianten auf das aktuelle Rollenmodell der ENTSO-E abbilden. Hervorzuheben sind die Aspekte des Datenmanagements bzgl. statischer (Anlagenregister) und dynamischer Anlagendaten (Messwesen): Dieser Themenbereich ist von starken Änderungen in der Praxis geprägt, in der eine Vielzahl unterschiedlicher Register zu finden sind. Einen Überblick über die Problematik und mögliche Entwicklungsoptionen findet sich in [\[Kor+14\]](#) mit dem Konzept des Data Access Point Manager. Bezüglich der energiewirtschaftlichen Rollen im Messwesen ist festzuhalten, dass im deutschen Marktrollenmodell nur nach Messstellen-Betreiber und Messdienstleister differenziert wird. Dagegen definiert das Netzwerk ENTSO-E auf europäischer Ebene deutlich mehr Rollen (Meter Administrator, Meter Operator, Metered Data Collector, Metered Data Responsible, Metered Data Aggregator, Metering Point Administrator). Wegen der grundlegenden Bedeutung einer Vereinheitlichung und Vereinfachung des Zugriffs auf statische und dynamische Daten für alle Smart Grid-Anwendungen wird im Rahmen der folgenden Analyse davon ausgegangen, dass der Zugang zu diesen Daten prinzipiell möglich ist. Die unterschiedlichen Daten-Bedarfe der beiden betrachteten Anwendungsfall-Varianten werden im Folgenden aber ebenfalls dargestellt.

9.2.2 Analyse der Subprozesse

Für den nun folgenden Schritt der Gap-Analyse wurden die bereits im [Abschnitt 1.3](#) dargestellten DVPP-Subprozesse auf die Anwendungsfall-Varianten abgebildet. Dazu wurden Sequenzdiagramme für alle Subprozesse in beiden Varianten erarbeitet, die zum einen die beteiligten Komponenten als auch die Übermittlung von Informationen zwischen diesen

Akteur	Beschreibung	ENTSO-E Akteur
Markt-Betreiber	Der Markt-Betreiber erhält die Gebote aller am Markt zugelassenen Akteure und führt das Markt-Matching durch.	Market Operator
VK-Betreiber / -Dienstleister	Aggregiert dezentrale Energieanlagen (Erzeugung und Verbrauch) und führt die Vermarktung am Energiemarkt durch. Trägt das finanzielle Risiko für eine ausgeglichene Bilanz zwischen vermarktetem und tatsächlich geliefertem Strom.	Balance Responsible Party
Messstellen-Betreiber	Der Messstellen-Betreiber hat Zugriff auf die Messeinrichtungen der Netzanschlusspunkte der dezentralen Energieanlagen und übermittelt diese Werte entsprechend der vertraglichen Regelungen an weitere Akteure wie z. B. den VK-Betreiber oder den DEU-Betreiber.	Meter Operator
DEU-Besitzer	Der DEU-Besitzer hat Zugriff auf eine an das Stromnetz angeschlossene dezentrale Energieanlage und ist berechtigt, Einfluss auf das Betriebsverhalten dieser Anlage auszuüben oder Dritten das Recht dazu zu gewähren. In Variante A gewährt der DEU-Besitzer dieses Recht dem VK-Betreiber, der somit auch DEU-Betreiber wird. In Variante B kann der DEU-Besitzer selbst DEU-Betreiber sein.	Party Connected to the Grid

Tabelle 9.1: Beschreibung der DVPP-Akteure und Abbildung auf das Rollenmodell gemäß ENTSO-E [ent11]

Komponenten abbilden. Die Details der (teils verteilten) Algorithmen in den Subprozessen werden an dieser Stelle nicht abgebildet, sondern stark abstrahiert dargestellt (in Variante A durch einen Funktionsaufruf innerhalb des VK-Systems, in Variante B durch eine einzelne stark vereinfachende Nachricht (z. B. *negotiate()*, *coalitionFormation()*, *ack*), so dass der Fokus auf den beteiligten Komponenten und der übermittelten Information liegt. Im Anhang A, Abschnitt A.3 sind die Sequenzdiagramme vollständig aufgeführt.

Ermittlung der Flexibilitäten In [Abbildung 9.5](#) ist der Subprozess zur Ermittlung der Flexibilitäten in beiden Anwendungsfall-Varianten dargestellt. In beiden Fällen besteht der Prozess aus dem Abruf von Messwerten und einer nachfolgenden Verarbeitung dieser Daten für die Abbildung der Flexibilitäten. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten ist in den beteiligten Komponenten zu finden: In Variante A wird die Ermittlung der Flexibilitäten vom zentralen VK-System vorgenommen. In Variante B findet die Analyse der Messwerte und Flexibilitätsermittlung anlagenlokal, d. h. auf dem IED der Anlage statt. In der vereinfachten Darstellung in [Abschnitt 1.3](#) wurde die Ermittlung der Flexibilitäten lediglich als initialer Prozess dargestellt. Im Rahmen der kontinuierlichen Einsatzplanung ist allerdings erforderlich, die zur Verfügung stehende Flexibilität der Anlagen nach einem Ereignis neu zu bewerten (siehe [Abbildung 5.4](#)).

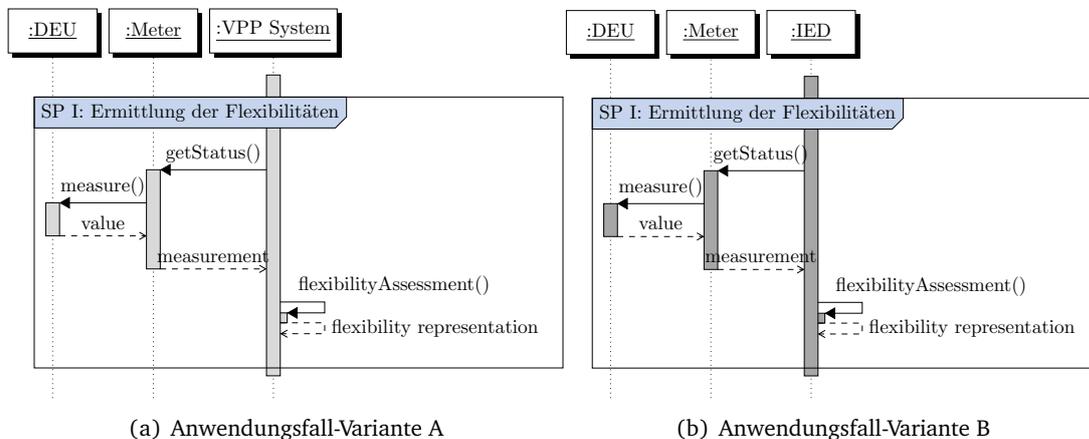


Abbildung 9.5: Sequenzdiagramme für die Ermittlung der Flexibilitäten

Interne Optimierung Beteiligte Komponenten bei der internen Optimierung sind in Variante A das VK-System und der Controller, in Variante B die IEDs (siehe [Abbildung 9.6](#)). Im Ergebnis des Prozesses liegt jedem Controller/ jeder IED ein abgestimmter Fahrplan für die Anlage vor. In Variante A wird die Abstimmung der Fahrpläne innerhalb des VK-Systems realisiert. In Variante B werden Fahrpläne zwischen den Software-Agenten auf den IEDs verhandelt. Das Kommunikationsaufkommen ist somit in Variante B deutlich höher und wird auf der Ebene der IEDs (Feldebene) realisiert. In Variante A dagegen werden die abgestimmten Fahrpläne vom VK-System bis in die Feldebene kommuniziert.

DVPP-Bildung In [Abbildung 9.7](#) sind die Prozesse der DVPP-Bildung in beiden Varianten dargestellt. Beteiligte Komponenten sind in Variante A Markt und VK-System, in Variante B weiterhin die IEDs. Das VK-System erfüllt in Variante B lediglich die Aufgabe des Mittlers

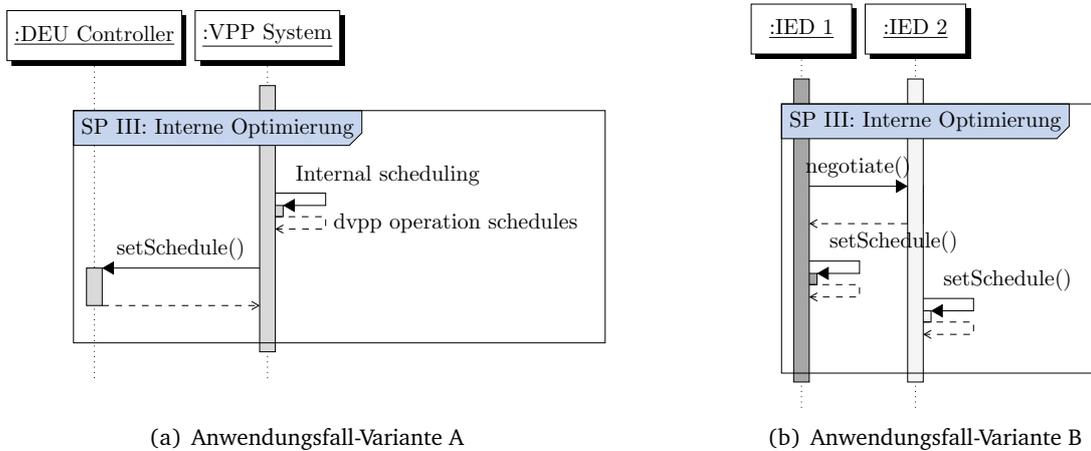


Abbildung 9.6: Sequenzdiagramme für die interne Optimierung

zwischen Anlagen und Markt bzw. die Aufgabe, die für die DVPP-Bildung relevanten Informationen über registrierte Anlagen weiterzugeben. In beiden Varianten werden zunächst die Produktinformationen vom Markt abgerufen. Während dieser Prozess in Variante A vom VK-System angestoßen wird, fordern in Variante B die Software-Agenten auf den IEDs diese Informationen beim VK-Dienstleister an. Die Bildung der DVPPs erfolgt in Variante A innerhalb des VK-Systems als verteilte Optimierung. In Variante B wird ein Koalitionsbildungsprozess zwischen den Agenten umgesetzt, in denen die Agenten über mögliche Produktbeiträge verhandeln (stark verkürzt über *coalitionFormation()*, *ack* dargestellt). Nach Abschluss der DVPP-Bildung übernimmt in beiden Fällen das VK-System die Interaktion mit dem Markt. Zusammenfassend ist festzustellen, dass in Variante B Produktbeiträge zwischen den IEDs kommuniziert werden, während diese Kommunikation in Variante A nicht erforderlich ist.

Kontinuierliche Einsatzplanung In [Abbildung 9.8](#) sind die Abläufe für die kontinuierliche Einsatzplanung in den Varianten A und B dargestellt. Die beteiligten Komponenten umfassen in Variante A die Anlagen (DEU), die Messeinrichtung (Meter), das Anlagen-Kommunikationsmodul (DEU Controller) sowie das VK-System (VPP System). In Variante B ist anstelle des Anlagen-Kommunikationsmoduls ein IED somit ein funktional mächtigeres Kontrollmodul beteiligt. Ein VK-System ist in den Prozess der kontinuierlichen Einsatzplanung nicht involviert – die Prozesse finden zwischen unterschiedlichen IEDs statt (exemplarisch sind zwei Instanzen dargestellt). In Variante A sendet das VK-System den Aufruf an den Controller, den übermittelten Fahrplan umzusetzen. Dieser setzt kontinuierlich Sollwerte in der Anlage. Ein kontinuierlicher Monitoring-Prozess überträgt Messwerte an das zentrale VK-System. Diese Messwerte müssen mindestens die zeitliche Auflösung

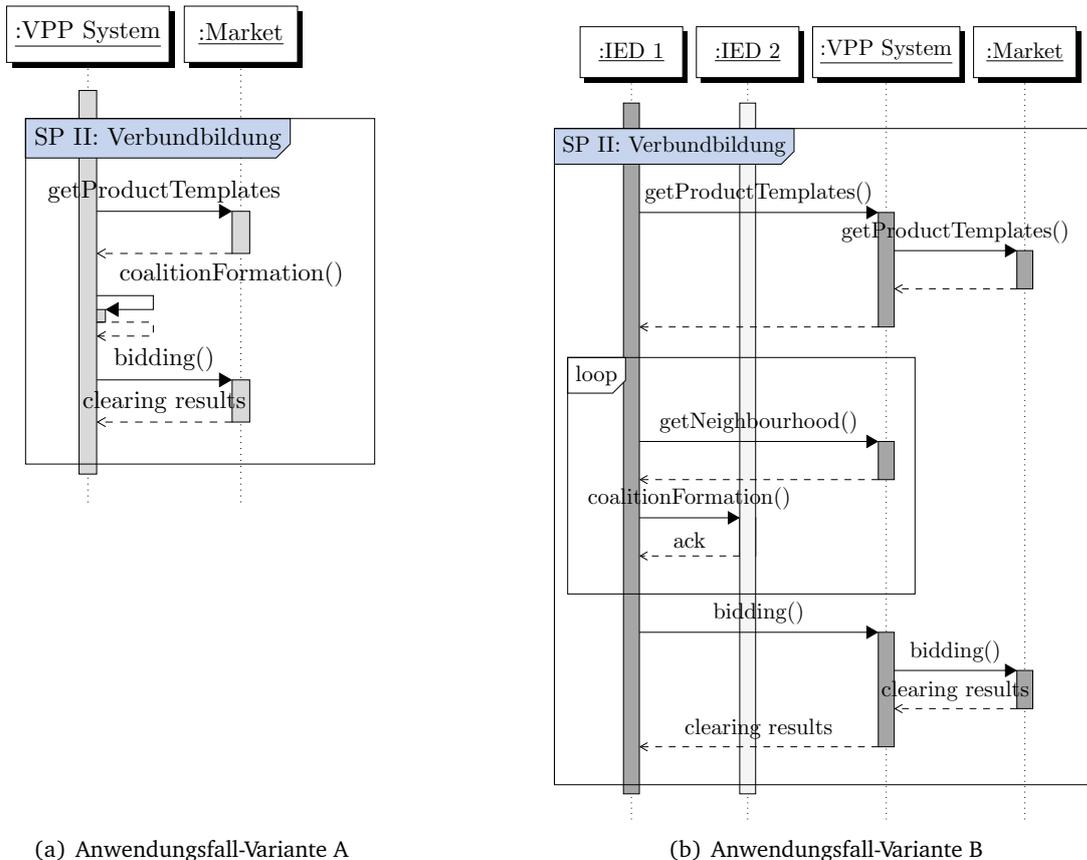


Abbildung 9.7: Sequenzdiagramme für die DVPP-Bildung

der Fahrpläne spiegeln, d. h. im Fall von 96 Intervallen im Fahrplan müssen 15-Minuten-Messwerte in das VK-System übermittelt werden. Mit dieser Information ermittelt das VK-System einen möglichen Umplanungsbedarf. In Variante B wird das Monitoring durch die IEDs und damit anlagenlokal übernommen, so dass keine Messwerte übermittelt werden müssen. Auch die Umsetzung der Umplanung erfolgt in beiden Varianten sehr unterschiedlich: Während in Variante A die Umplanung innerhalb des VK umgesetzt wird (verteilte Optimierung im zentralen VK-System), setzen in Variante B die Software-Agenten auf den IEDs die Planung als verteilte Optimierung um. Während in Variante A die neuen Fahrpläne als Ergebnis an die Controller kommuniziert werden, verhandeln die Software-Agenten auf den IEDs diese Fahrpläne untereinander.

Mehrwert-Verteilung Der Subprozess der Mehrwert-Verteilung wird in beiden Varianten stark vereinfacht als Funktionalität betrachtet, die das VK-System durch ein Subsystem *Accounting & Billing* realisiert (siehe [Abbildung 9.9](#)). Ergänzend zu diesen Komponenten sind

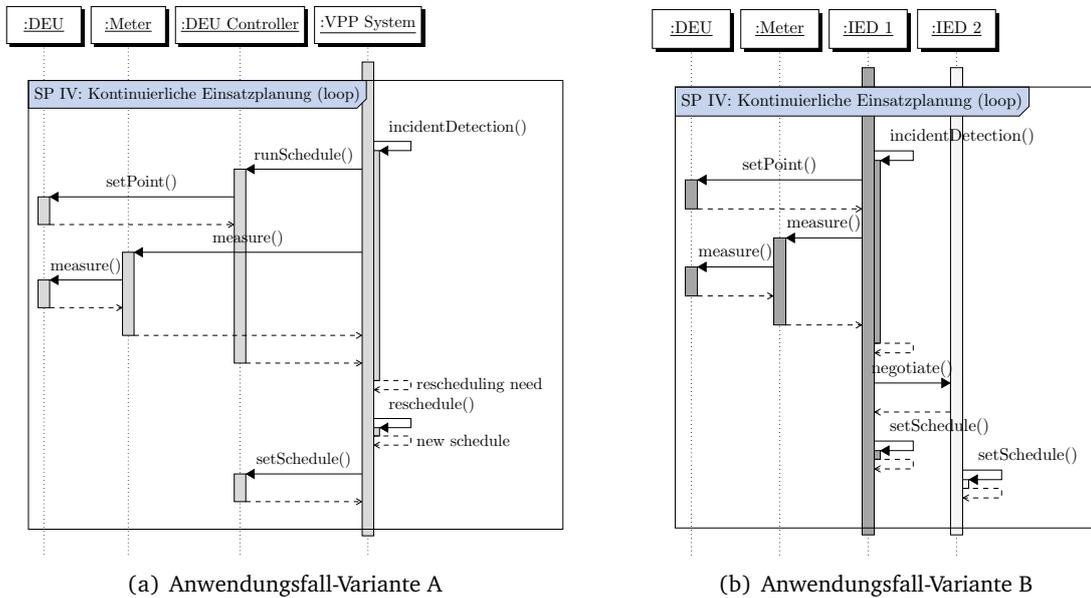


Abbildung 9.8: Sequenzdiagramme für die kontinuierliche Einsatzplanung

in Variante B die IEDs der im DVPP zusammengefassten Anlagen beteiligt: Sie stoßen den Prozess der Mehrwert-Verteilung an und liefern auf Anfrage ihre tatsächlich umgesetzten Produktbeiträge an das VK-System. Zwischen der Unternehmens- und Feldebene werden also in Variante B die in der Vergangenheit erfolgten Produktbeiträge übermittelt, während in Variante A (durch das kontinuierliche Monitoring im vorangegangenen Schritt) diese Informationen bereits vorliegen.

9.2.3 Abbildung auf das SGAM

Die mit Hilfe der Sequenzdiagramme ermittelten Kommunikationsanforderungen werden nun auf den *component layer* des SGAM abgebildet, so dass ersichtlich wird, welche Informationen über welche Grenzen transferiert werden muss.¹ In [Abbildung 9.10](#) werden die Ergebnisse der Untersuchung für alle Subprozesse dargestellt, indem die zu kommunizierenden Informationen auf die Zonen des SGAM abgebildet werden. Durch die Übernahme der Marktkommunikation durch den VK-Betreiber bzw. VK-Dienstleister in beiden Varianten unterscheiden sich die Anforderungen zwischen der Unternehmens- und Markt-Zone nicht – in beiden Fällen werden Produkt-, Bidding- und Clearing-Informationen übertragen.

¹Für die Anwendungsentwicklung würde das Ergebnis dieser Analyse in die Ermittlung der nicht-funktionalen Anforderungen eingehen, wie in [\[TGD13\]](#) und [\[NIST10\]](#) (bezüglich Security-relevanter Aspekte) beschrieben. Im Rahmen der hier durchgeführten Gap-Analyse werden die Ergebnisse in die Bewertung der Technologiefelder eingespeist.

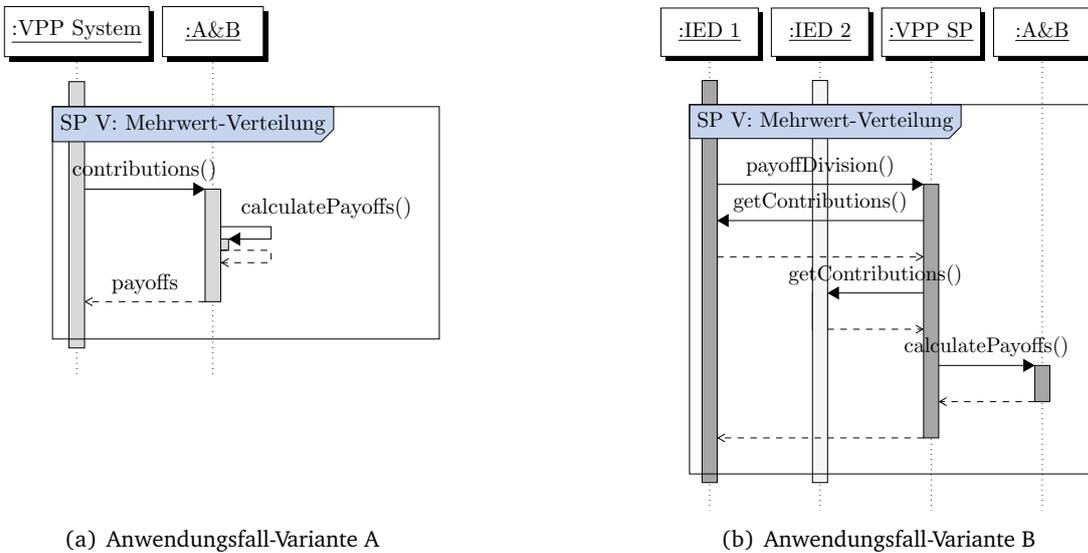


Abbildung 9.9: Sequenzdiagramme für die Mehrwert-Verteilung

In der Kommunikation zwischen Unternehmen und Feld (im mittleren Bereich von [Abbildung 9.10](#)) gibt es hingegen deutliche Unterschiede: Während in Variante A Messdaten (für die Ermittlung der Flexibilitäten) sowie Fahrpläne an die Anlagen-Controller übermittelt werden, werden in Variante B lediglich Meta-Informationen zu Anlagen kommuniziert (netztopologische Nachbarschaftsinformationen) sowie die tatsächlich erfolgte Lieferung. Zwischen diesen Ebenen erfolgt damit deutlich weniger Kommunikation, da das Monitoring sowie die Umplanung nach Ereignissen in die Feldebene verlagert ist. Dementsprechend werden in Variante B Fahrpläne und DVPP-Informationen zwischen den IEDs kommuniziert (DVPP-Bildung, Einsatzplanung) sowie Messdaten und Setzwerte zwischen IED und Anlage vermittelt (Ermittlung der Flexibilitäten, Monitoring).

Deutlich zu erkennen ist somit, dass durch die Verlagerung der DVPP-Funktionalität auf die Feldebene wesentliche Anlagen-Informationen zentral nicht mehr vorgehalten werden: Weder die Fahrpläne der Einheiten noch die tatsächlichen Betriebszustände werden zentral erfasst. In [Tabelle 9.2](#) sind diese Unterschiede zusammenfassend dargestellt.

9.3 ABLEITUNG TECHNOLOGISCHER ANFORDERUNGEN

9.3.1 Identifikation relevanter Technologiefelder

In der Studie *Future Energy Grid* [[AKM12](#)] werden 19 Technologiefelder vorgestellt, die für die Entwicklung von Smart Grid-Anwendungen von Bedeutung sein können und sich auf die

Beschreibung der Daten	Variante A	Variante B
Historische Daten zu bisherigem Betriebsverhalten	+	+
Messwerte zum aktuellen Betriebszustand	+	-
Fahrpläne (geplante Betriebszustände)	+	-

Tabelle 9.2: Vergleich der im VK-System vorgehaltenen dynamischen Einheiten-Daten zwischen den betrachteten Anwendungsfall-Varianten

unterschiedlichen Systemebenen beziehen: Auf der Ebene der abgeschlossenen IT-Systeme (*geschlossene Systemebene*) sind die Informations- und Kommunikationstechnologien in den Technologiefeldern angeordnet, die den stabilen Netzbetrieb betreffen und von hohen Echtzeitanforderungen gekennzeichnet sind (z. B. FACTS). In der vernetzten Systemebene findet sich die Betrachtung der Informations- und Kommunikationstechnologien in den Technologiefeldern, die heute von einer starken Interaktion vieler Akteure gekennzeichnet sind, wie z. B. Systeme zur Ansteuerung dezentraler Energieanlagen oder VK-Systeme. Im Folgenden werden diese Technologiefelder in unterschiedliche Kategorien bzgl. ihrer Relevanz für DVPP eingeteilt. Die übergreifenden Technologiefelder Integrationstechniken, Datenmanagement und Sicherheit werden nicht separat diskutiert, da der jeweils erforderliche Entwicklungsstand Teil in die Entwicklungsstufen der anderen Technologiefelder eingeht.

Kategorie I: Umsetzungsinvariante Technologiefelder In dieser Kategorie werden die Technologiefelder zusammengefasst, die für jede technologische Umsetzung eines VK gleichermaßen relevant sind, d. h. für zentrale VK-Systeme, hierarchische Konzepte oder verteilte Realisierungen, wie DVPP in Variante A und B sie darstellen. Sie sind damit zwar teils entscheidend für den Erfolg von VK-Systemen im Feld, allerdings invariant bezüglich der gewählten Realisierungsoption. Aus diesem Grund werden die folgenden Technologiefelder für die Gap-Analyse nicht in Betracht gezogen: Regionale Energiemarktplätze sind ein alternatives Konzept, mit dessen Hilfe Flexibilitäten im Verteilnetz für höhergelegene Marktebenen verfügbar gemacht werden soll. Für einige erforderliche Funktionen regionaler Energiemarktplätze könnten DVPPs technische Lösungen bieten, sie sind aber unabhängig von diesen zu betrachten und realisierbar. Prognosesysteme und Business Services sind ebenfalls unabhängig von der technischen Realisierung der VK-Systeme hochrelevant für die bessere bzw. ökonomisch vorteilhaftere Integration dezentraler Energieanlagen. Die zukünftige Entwicklung dieser Technologiefelder hat somit einen gleichermaßen großen Effekt auf DVPP und konventionelle VK-Systeme. Industrielles DSM/ DR ist außerhalb des Betrachtungsbereiches von DVPP.

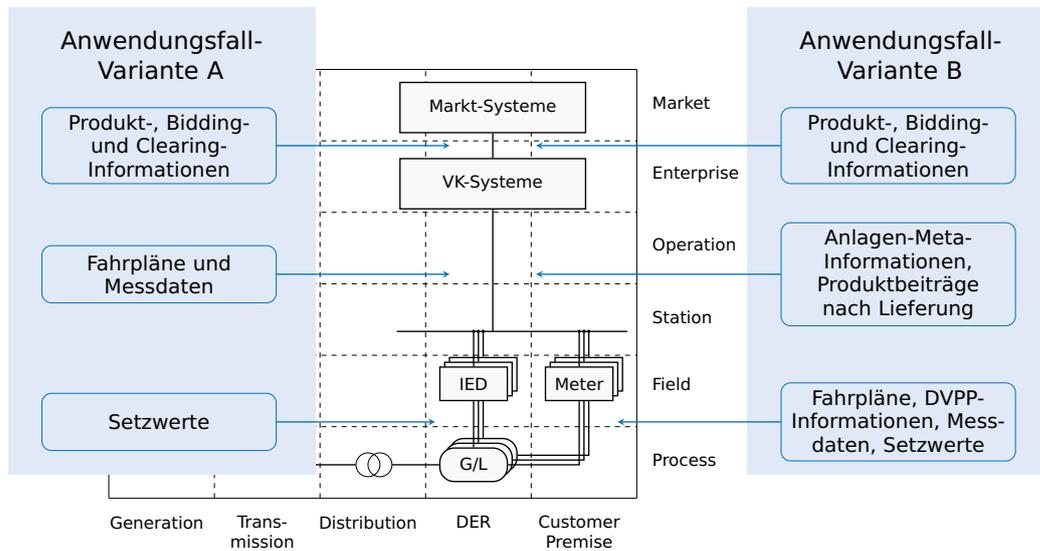


Abbildung 9.10: Gegenüberstellung der Kommunikationserfordernisse der untersuchten Anwendungsfall-Varianten

Kategorie II: Technologiefelder mit hoher Relevanz für technische DVPP In der FEG-Studie wird zwischen den Erfordernissen technischer und kommerzieller VKs nicht differenziert, obwohl die technischen Anforderungen sich sehr stark unterscheiden (siehe [Abschnitt 1.1](#)). Insbesondere gilt das für die Echtzeit-Anforderungen in der Kommunikation und den sensorischen und aktorischen Zugriff auf Netzkomponenten. Werden DVPPs für den Anwendungsbereich technischer VKs eingesetzt, so ist die Entwicklung der in dieser Kategorie verorteten Technologiefelder von hoher Relevanz. Der Kontext der vorliegenden Arbeit liegt aber im Bereich der kommerziellen VKs, so dass diese Technologiefelder nicht weitergehend betrachtet werden. In dieser Kategorie finden sich alle Technologiefelder der geschlossenen Systemebene wieder.

Kategorie III: DVPP-relevante Technologiefelder In Kategorie III sind die für kommerzielle und technische DVPPs relevanten Technologiefelder zusammengefasst. Sie werden daher im nachfolgenden Abschnitt bezüglich der für die jeweilige Anwendungsfall-Variante erforderlichen Entwicklungsstufen untersucht.

In [Tabelle 9.3](#) wird die dargestellte Kategorisierung der Technologiefelder zusammengefasst.

Kategorie	Zugeordnete Technologiefelder
I	Regionale Energiemarktplätze, Prognosesysteme, Business Services, Industrielles DSM/DR
II	AM für Netzkomponenten, WAMS, FACTS, Netzleitsysteme, Netzautomatisierung
III	IKT Konnektivität, AM für DER, Handelsleitsysteme, VK-Systeme, Anlagen-Kommunikation, AMI, Smart Appliances

Tabelle 9.3: Kategorisierung der FEG-Technologiefelder nach Relevanz für DVPPs

9.3.2 Ermittlung der erforderlichen Entwicklungsstufen

Für die im letzten Abschnitt als relevant identifizierten Technologiefelder wird im Folgenden dargestellt, welche Entwicklungsstufe für die Umsetzung von DVPPs in der Praxis erforderlich wäre. Für Anwendungsfall-Variante A (DVPP als Optimierungsparadigma auf der Unternehmensebene) wird zwischen zwei Stufen differenziert: In Stufe A.1 sind DVPPs als Optimierungsparadigma technisch umsetzbar (d. h. Pilotprojekte sind möglich), während in Stufe A.2 die technischen Voraussetzungen für einen großmaßstäblichen Roll-Out von DVPPs gegeben sind.

IKT-Konnektivität Das Technologiefeld IKT-Konnektivität umfasst die Kommunikationstechnologien und informationstechnischen Voraussetzungen »zur Auffindung und Anbindung [...] von Energiekomponenten in Smart Grid-Anwendungen« [AKM12, S. 112]. Im Bereich der Großkraftwerke und Übertragungsnetze kommt der IKT-Konnektivität eine sehr große Rolle zu, während in den Verteilnetzen nur die Energieanlagen informationstechnisch angebunden sind, auf die der Anlagen-Betreiber dem Netzbetreiber gemäß EEG Zugriff gewähren muss. In Entwicklungsschritt 1 sind wenige Anlagen in einem zentralen Verzeichnisdienst registriert und bieten Sensoren und Aktoren für externe Steuerungszugriffe. Für eine Umsetzung von DVPP Variante A ist Entwicklungsschritt 2 erforderlich, bei der eine funktional umfangreiche »IKT-Vernetzung innerhalb einzelner Regionen« [AKM12, S. 114] umgesetzt ist und den messenden und steuernden Zugriff auf Erzeuger, Verbraucher und Speicher erlaubt. Verbesserungen im Bereich der Datenintegrität und -sicherheit, wie sie im Entwicklungsschritt 3 beschrieben sind, würden eine breitere DVPP-Einführung in Variante A ermöglichen (Stufe A.2). Erst im Entwicklungsschritt 4 sind die Voraussetzungen für DVPP Variante B gegeben: Ein geringer Engineering-Aufwand bei der Anlagen-Anbindung sowie abgesicherte Datenverbindungen und -zugriffe im gesamten Netzwerk sind erforderlich, wenn Software-Agenten die Anlagensteuerung selbstorganisiert umsetzen. Das bereits genannte Konzept des Data Access Point Managers stellt Optionen für den Datenzugriff dar,

wie sie für Variante B erforderlich sind, ist aber als neueres Konzept in der FEG-Studie noch nicht berücksichtigt.

Asset Management für dezentrale Erzeugungsanlagen Asset Management Systeme verwalten technische und wirtschaftliche Daten von Anlagegütern. Für kleinskalige dezentrale Energieanlagen werden solche Systeme bisher nicht eingesetzt, während für mittlere Anlagen erste Systeme den Bereich des Condition Monitoring (Betriebsüberwachung und -bewertung für Wartungs- und Instandhaltungszwecke) übernehmen.

Für eine Einführung von DVPP in Variante A ist ein Asset Management für dezentrale Energieanlagen nicht erforderlich. Da solche Systeme aber das ökonomische Potential der verwalteten Anlagen deutlich verbessern können, wird eine automatische betriebswirtschaftliche Optimierung (Entwicklungsstufe 2) der Anlagen für DVPP Variante A, Stufe A.2 als sinnvoll erachtet. Für Anwendungsfall-Variante B könnte ein bidirektionaler Austausch von Asset Management Daten vorteilhaft sein, wie er in Entwicklungsschritt 4 beschrieben wird: Dezentrale Energieanlagen könnten so nicht nur automatisch in DVPPs integriert werden, sondern weiterhin durch einen Dienstleister in ein Condition Monitoring mit entsprechenden Wartungs- und Instandhaltungsverträgen eingebunden werden. In der weiteren Betrachtung wird diese Entwicklungsstufe aber nicht als Voraussetzung für Variante B aufgenommen, da die Details eines solchen Geschäftsmodells noch unklar sind.

Handelsleitsysteme Handelsleitsysteme werden bisher nicht für die Vermarktung der im Verteilnetz vorhandenen Flexibilitäten eingesetzt. Für die Direktvermarktung von Windstrom sind aber bereits Systeme im produktiven Einsatz, die einen Teil der erforderlichen Funktionalitäten zusammenführen. Ein System, das die heterogenen Daten aus dem Bereich der Vorhersage, dem Bilanzkreismanagement und der aktuellen Marktsituation vollständig integriert, ist aktuell nicht marktverfügbar.

In DVPP Variante A müssen Marktdaten und Daten zu dezentralen Anlagen zusammengeführt werden (Entwicklungsschritt 1). Eine integrierte Analyse dieser Daten – wie in Entwicklungsschritt 2 beschrieben – erhöht das ökonomische Potential der DVPPs und wird daher für DVPP Stufe A.2 als erforderlich erachtet. Die Bemessung der Kosten für Flexibilität wird als erforderlich für DVPP Variante B betrachtet, um die Entwicklung von geeigneten Verhandlungsstrategien bei der Verbundbildung und Einsatzplanung auf der Ebene der Software-Agenten zu ermöglichen (Entwicklungsschritt 3).

VK-Systeme Die Bündelung der Flexibilität einer großen Anzahl dezentraler Energieanlagen ist das grundlegende Ziel des DVPP-Konzepts. Entsprechend werden VK-Systeme der 2. Entwicklungsstufe benötigt, die das Management (Einsatzplanung und Überwachung) einer großen Anzahl dezentraler Anlagen erlauben. Für technische DVPPs ist die Überwa-

chung dezentraler Anlagen in Echtzeit erforderlich, während die Anforderungen für kommerzielle DVPPs geringer sind (abhängig von den adressierten Märkten und Produkten). In Entwicklungsschritt 4 werden die Voraussetzungen für DVPP Variante B beschrieben.

Anlagenkommunikations- und Steuerungsmodule Der sensorische und aktorische Zugriff auf dezentrale Energieanlagen ist eine Grundvoraussetzung für den Aufbau von DVPPs. Entsprechende Kommunikations- und Steuerungsmodule finden sich aktuell nur bei größeren Stromerzeugungsanlagen sowie steuerbaren Lasten entsprechend der jeweiligen technischen Anschlussbedingungen und gesetzlichen Regelungen. Die Umsetzung von Steuerungsfunktionen auf Basis standardisierter Schnittstellen nimmt allerdings in den letzten Jahren deutlich zu.

Für die Realisierung von DVPP Variante A müssen Anlagen-Controller mindestens die Fähigkeit zur Fahrplan-Kommunikation und -Umsetzung aufweisen (Entwicklungsstufe 2). Erst mit vollständig standardisierten Schnittstellen und weiterreichenden Funktionen auf der Seite der Anlagen-Controller, die unter dem Begriff der IED gefasst werden, sind DVPPs in größerem Maßstab (Stufe A.2) umsetzbar. Die dezentrale Ermittlung der Flexibilität (Variante B) ist ebenfalls erst auf solchen erweiterten Anlagen-Modulen möglich. Für DVPP Variante A, Stufe A.2 und DVPP Variante B ist daher Entwicklungsstufe 4 erforderlich.

Advanced Metering Infrastructure Systeme zur »performanten Übertragung und Verarbeitung von Massendaten aus den Smart Metern beim Endkunden« sowie zur Abbildung der damit zusammenhängenden Smart Metering-Prozesse [AKM12, S. 126] werden unter dem Begriff Advanced Metering Infrastructure (AMI) zusammengefasst. In den europäischen Ländern ist die Funktionalität dieser Systeme bisher nicht standardisiert, so dass die FEG-Studie in der Beschreibung der Entwicklungsstufen dieses Technologiefeldes wenig konkretisiert. Wegen der für DVPP erforderlichen zeitlichen Auflösung der Messdaten (1/Minute für kommerzielle DVPPs, für technische DVPPs im Millisekunden-Bereich) ist für eine Umsetzung von DVPPs in beiden Varianten Entwicklungsstufe 2 erforderlich.

Smart Appliances Flexibilitäten werden im DVPP-Ansatz nicht nur von dezentralen Stromerzeugern, sondern auch von steuerbaren elektrischen Lasten (Wärmepumpen, Klimaanlage, EVs) bereitgestellt. Um diese Flexibilitätspotentiale zu bemessen und zu erschließen, sind Kommunikations- und Steuerungsmodule auch bei den steuerbaren Lasten erforderlich, die als Smart Appliances bezeichnet werden. Mit Entwicklungsschritt 2 in diesem Technologiefeld sind Großgeräte der weißen Ware ansteuerbar, so dass DVPP Variante A in der Stufe A.1 umsetzbar ist. Die selbständige Verbindung der flexiblen Lasten mit anderen Systemen (Entwicklungsstufe 4) liefert die technischen Voraussetzungen für DVPP Variante A, Stufe A.2 und DVPP Variante B.

9.4 AUSWERTUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wurde das algorithmische Konzept der Dynamischen Virtuellen Kraftwerke auf zwei unterschiedliche technologische Realisierungsoptionen abgebildet. Die Aspekte der Selbstorganisation wurden dabei zum einen auf der Ebene der Unternehmens-IT (Variante A), zum anderen auf der Feldebene (Variante B) realisiert. Um zu ermitteln, ob und unter welchen Voraussetzungen DVPPs in der Praxis umgesetzt werden können, wurde eine Methodik entwickelt, die die Use-Case-Methodik nach IEC/PAS 62559 mit den technologischen Migrationspfaden nach [AKM12] kombiniert. Im Verlauf der bisherigen Analyse konnte gezeigt werden, dass die definierten DVPP-Realisierungsoptionen bezüglich ihrer technischen Anforderungen in den dargestellten Technologiefeldern aufeinander aufbauen. In [Abbildung 9.11](#) werden die Ergebnisse der Technologiefeld-Analyse zusammenfassend dargestellt.

Für DVPPs in der Anwendungsfall-Variante A sind für eine erste Umsetzung in Pilotprojekten (Stufe A.1) Anlagen-Controller erforderlich, die Fahrpläne von einem überlagerten System aufnehmen und auf der ihnen zugeordneten Anlage umsetzen können. In der FEG-Studie werden solche Controller mit einer ausreichenden Verbreitung für DVPP Stufe A.1 im Zeithorizont 2016 to 2020 erwartet. Für Stufe A.2, d. h. eine breite Umsetzung des DVPP-Konzeptes in Variante A, sind weitere Entwicklungsschritte in mehreren Technologiefeldern erforderlich: Weiterhin stellt die Anlagenkommunikation und -kontrolle mit den entsprechenden Abhängigkeiten bezüglich der IKT-Konnektivität einen der kritischen Pfade für die Umsetzung von DVPPs in Stufe A.2 dar. Eine starke Marktdurchdringung von Smart Appliances ist sowohl für diese DVPP-Umsetzung als auch für den Transfer der Selbstorganisationsansätze auf die Feldebene (DVPP Variante B) erforderlich. Aus diesem Grund stellen die Anlagenkommunikation und die Smart Appliances den kritischen Pfad für beide Varianten der DVPP-Umsetzung dar. Gemäß den technologischen Erfordernissen, die in der FEG-Studie aus den politischen Zielen der Energiewende abgeleitet werden, müssen die technologischen Anforderungen für DVPPs in diesen Varianten im Zeithorizont bis 2030 erfüllt sein.

Bei der dargestellten Analyse wurde keine Gegenüberstellung der Eigenschaften bezüglich der Sicherheitsanforderungen (*security*) durchgeführt. Es ist aber festzuhalten, dass z. B. die NIST im Bericht IR 7628 [NIST10] eine Analyse der Sicherheitsanforderungen mit Hilfe einer Abbildung auf das SGAM vorschlägt: Die Sicherheitsanforderungen werden umso höher eingestuft, je mehr Ebenen des SGAM in der Kommunikation überquert werden. Eine Erweiterung der Methodik um diesen Aspekt erscheint auf diese Grundlage möglich und sinnvoll, liegt aber außerhalb des Aufgabenbereichs der hier vorgelegten Arbeit.

Die wesentlichen Erkenntnisse der Analyse der technologischen und regulatorischen Rahmenbedingungen können wie folgt zusammengefasst werden:

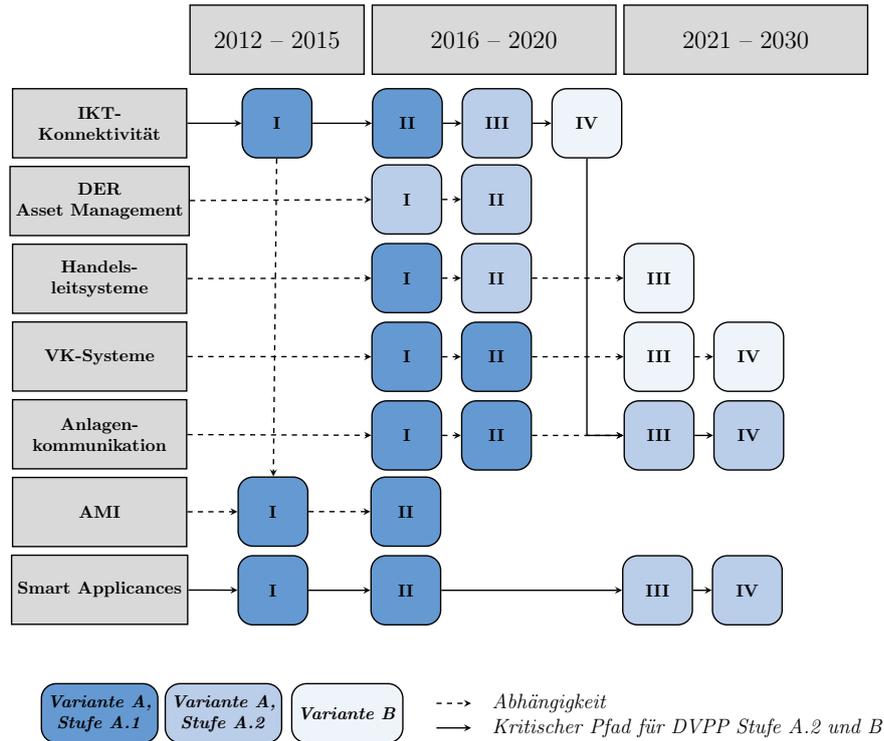


Abbildung 9.11: Erforderliche Entwicklungsschritte der relevanten Technologiefelder für DVPP Variante A (Stufe A.1 und A.2) sowie DVPP Variante B mit wesentlichen Abhängigkeiten

- Für das algorithmische Konzept Dynamischer Virtueller Kraftwerke können stark unterschiedliche technologische Realisierungsoptionen zu entwickeln, die sich in ihren technischen Anforderungen und damit auch im zeitlichen Horizont bezüglich ihrer Umsetzbarkeit stark unterscheiden.
- Regionale Energiemärkte sind ein alternatives Konzept zu DVPPs, mit denen ebenfalls die Verteilnetz-Flexibilität für höherliegende Marktebenen zur Verfügung gestellt werden soll. DVPPs können teilweise Funktionen bereitstellen, die für die Realisierung regionaler Energiemärkte erforderlich sind. Eine vergleichende Evaluation der Wirksamkeit dieser Konzepte sollte durchgeführt werden.
- Die definierten DVPP-Entwicklungsstufen zeigten in der Analyse der Technologiefelder deutliche Abhängigkeiten, so dass eine Transformation von einer verteilten Optimierung in zentralen VK-Systemen zu Selbstorganisation auf der Feldebene ohne technologische Brüche möglich ist.

- Der wesentliche Vorteil der Allokation der Selbstorganisation auf der Feldebene wird in der Verteiltheit der Information gesehen: Detaillierte Informationen über Haushalte, dezentrale Energieanlagen und flexible Lasten werden nicht an ein zentrales System übermittelt, so dass sich hier Vorteile bezüglich möglicher Privacy-Anforderungen ergeben.
- Die technologischen Anforderungen von DVPPs entsprechen den technologischen Entwicklungen, die für Energiesysteme mit einem großen Anteil dezentraler Energieanlagen erforderlich sind.
- Kommerzielle DVPPs, die den Kontext des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur kontinuierlichen Einsatzplanung darstellen, lassen sich auf Basis der aktuellen Energiesystem- und Energiemarktrollen nach ENTSO-E und BDEW abbilden. Neue Konzepte wie der Data Access Point Manager [Kor+14] sollten in Erweiterungen einbezogen werden.

Als überraschendes Ergebnis der durchgeführten Analyse kann zusammengefasst werden: Obwohl es zunächst technologisch einfacher erscheint, Selbstorganisationsverfahren lediglich als Optimierungsparadigma innerhalb eines zentralen Systems umzusetzen, folgen die wesentlichen technologischen Anforderungen den gleichen technologischen Migrationspfaden.

10

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSS

In der vorliegenden Arbeit wurde DynaSCOPE als Verfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung in Dynamischen Virtuellen Kraftwerken entwickelt und evaluiert. Eingebettet ist diese Entwicklung in eine erste Iteration des u.a. im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensmodells SGAE, dem Smart Grid Algorithm Engineering, als Vorgehensmodell für die Entwicklung verteilter Algorithmen im Smart Grid. Zum Abschluss der Arbeit soll ein zusammenfassender Überblick über **Ergebnisse und Forschungsbeitrag** gegeben werden ([Abschnitt 10.1](#)). Während das Verfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung von solchen DVPPs entwickelt wurde, die für den Handel von Wirkenergie am Day-Ahead-Markt gebildet wurden, ist es nicht auf diesen Anwendungskontext beschränkt – die **Erweiterbarkeit** für andere Anwendungen wird in [Abschnitt 10.2](#) diskutiert. Neben den bereits im Rahmen der Evaluation vorgestellten offenen Fragen, die sich aus der simulativen Bewertung des Verfahrens ergeben und in eine weitere Iteration des Vorgehensmodells SGAE eingespeist werden können, wird zum Abschluss der hier vorgelegten Arbeit **weiterführender Forschungsbedarf** dargestellt, der über den Kontext des entwickelten Verfahrens hinausgeht ([Abschnitt 10.3](#)).

10.1 ERGEBNISSE UND FORSCHUNGSBEITRAG

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines verteilten Verfahrens für die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP. Es sollte geprüft werden, ob verteilte Verfahren aus dem Bereich der Selbstorganisation und Agentensysteme für diese Aufgabe angewendet werden können, welche Anpassungen bisher vorgestellter Verfahren erforderlich sind und welche Anforderungen an eine Umsetzung im Feld gestellt werden müssen (siehe Forschungsfragen, [Abschnitt 1.4](#)).

Aufbau der Arbeit Eine geeignete Herangehensweise an die dargestellten Forschungsfragen wurde mit dem Vorgehensmodell SGAE vorgestellt, das u.a. im Kontext dieser Arbeit entwickelt wurde ([Kapitel 2](#)). Es wurde dargestellt, dass ein Vorgehen nach SGAE die Umsetzung der Design Science Richtlinien nach Hevner beinhaltet [[Hev+04](#)].

In [Kapitel 3](#) wurden methodische Grundlagen für die formale Beschreibung des Problems als Constraint Problem und die Lösung mittels eines agentenbasierten Steuerungssystems

beschrieben. Anhand des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ordnungsrahmens P-CASIT erfolgte die Analyse verwandter Arbeiten: Agentenbasierte Ansätze für unterschiedliche Problemstellungen im Smart Grid wurden vorgestellt und anhand des Ordnungsrahmens charakterisiert (Kapitel 4).

Die formale Beschreibung des Problems der kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP schließlich basiert auf einer Darstellung als dynamisches Scheduling Constraint Optimization Problem (Kapitel 5) und erfolgte in den identifizierten Ebenen der Einheiten, der Agenten sowie der DVPPs. Auf der Basis der Problembeschreibung in Kapitel 1 sowie der formalen Beschreibung in Kapitel 5 wurde schließlich eine zusammenfassende Anforderungsanalyse durchgeführt. Die identifizierten verwandten Arbeiten wurden anhand der beschriebenen Anforderungen diskutiert und COHDA als Basisverfahren für die Umsetzung der kontinuierlichen Einsatzplanung ausgewählt.

Erforderliche Erweiterungen des Basisverfahrens umfassten die Umsetzung des Produktbezuges, die Abbildung anlagenlokaler Restriktionen und Präferenzen sowie die Detektion und Verarbeitung von Ereignissen. Das Verfahren DynaSCOPE wurde in einem schrittweisen Vorgehen anhand dieser Aufgaben aufgebaut und vorgestellt. Die Evaluation in Kapitel 8 folgte ebenfalls diesen Designschritten. Als erste SGAE-Iteration stellen die ermittelten weiterführenden Fragen ein wesentliches Ergebnis dar; sie wurden nach jedem Designschritt sowie am Ende des Evaluationskapitels diskutiert.

Der Umsetzbarkeit des DVPP-Konzeptes in der Praxis wurde im Rahmen einer *gap to the field*-Analyse nachgegangen (Kapitel 9). Es konnte gezeigt werden, welche Erweiterungen für die Realisierung von DVPP als Ansatz zur Flexibilisierung von Erzeugern und Verbrauchern im Nieder- und Mittelspannungsnetz erforderlich sind.

Forschungsbeitrag Im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit wurden die nachfolgend beschriebenen Forschungsbeiträge erarbeitet und vorgestellt:

1. **DynaSCOPE:** Aufbauend auf der verteilten Einsatzplanungsheuristik COHDA wurde ein vollständig verteilter Ansatz zur kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP entwickelt und evaluiert.
2. **SGAE:** Das Vorgehensmodell SGAE zur Entwicklung verteilter Algorithmen im Smart Grid wurde u.a. im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Die hier beschriebene Arbeit folgt dem Vorgehensmodell und stellt eine erste Iteration dar.
3. **P-CASIT:** Für die vergleichende Darstellung Agenten-basierter Ansätze im Smart Grid wurde der Ordnungsrahmen P-CASIT entwickelt. Er erlaubt die strukturierte Gegenüberstellung wesentlicher Charakteristika, die für die Identifikation relevanter verwandter Arbeiten von Bedeutung sind.

4. **Gap to the field-Analyse für DVPP:** Ein Ansatz zur Prüfung der Passfähigkeit verteilter Steuerungsansätze in energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen und zur Prüfung technologischer Realisierungsoptionen wurde entwickelt und angewendet. Der Ansatz baut auf aktuellen konzeptuellen energiewirtschaftlichen Modellen wie dem SGAM auf.

DynaSCOPE Das wesentliche Ergebnis und Artefakt der vorliegenden Arbeit stellt DynaSCOPE als Verfahren für die kontinuierliche Einsatzplanung in Dynamischen Virtuellen Kraftwerken dar. Für die Entwicklung von DynaSCOPE wurde das heuristische Einsatzplanungsverfahren COHDA zunächst um eine Sensitivitätsschwelle sowie eine Möglichkeit zur Parametrierung einer Nachrichtenbündelung erweitert. Es wurde gezeigt, wie anlagenlokale Präferenzen in die lokale Fahrplanauswahl integriert werden können. Durch die gewählte Umsetzung der Präferenzen innerhalb des Suchraums wird gewährleistet, dass die Agenten eine generische Repräsentation der Anlagenflexibilität nutzen können. Die DynaSCOPE-Agenten müssen somit nicht spezifisch für einzelne Anlagentypen implementiert werden.

Ereignisse, bei denen eine Einheit den gewählten Fahrplan nicht mehr umsetzen kann, werden im Rahmen eines Phasenmodells – von der anlagenlokalen Kompensation bis zur kooperativen Lösungssuche – gestuft bearbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass mit diesem Phasenmodell Ereignisse zuverlässig erkannt und bearbeitet werden.

Die Konvergenz des verwendeten Basisverfahrens konnte bei der Entwicklung von DynaSCOPE erhalten bleiben. Weiterhin wurde die Ereigniskommunikation und Lösungssuche in DynaSCOPE verbindungslos umgesetzt – das Verfahren ist somit auch robust gegen Nachrichtenausfall und Nachrichtenverzögerung. Zur Dämpfung der Systemunruhe wurden unterschiedliche Mechanismen eingebracht, die für agentenbasierte Steuerungssysteme in der maschinellen Fertigung empfohlen werden.

Für eine zusammenfassende Beschreibung von DynaSCOPE soll der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ordnungsrahmen P-CASIT (siehe S. 46) verwendet werden:

- P DynaSCOPE löst das Problem der kontinuierlichen Einsatzplanung in DVPP: Es befähigt Agenten, die eine Einheit eines DVPP repräsentieren, zur Detektion von Abweichungen von einem vorab konfigurierten Fahrplan und führt einen somit nicht mehr gültigen Einsatzplan über eine kooperative Lösungssuche aller Agenten des entsprechenden DVPP zu einem neuen gültigen Einsatzplan, der die definierten globalen Optimierungsziele (beispielsweise ein Wirkleistungsprodukt) möglichst gut annähert.
- C DynaSCOPE wurde als vollständig verteiltes Verfahren entwickelt; es folgt dem in [Abschnitt 4.1](#) definierten Kooperationsparadigma K6. Die kooperative Lösungssuche

erfolgt spezifisch für einzelne DVPPs und damit Produkte. Die Agenten kommunizieren lediglich Ausschnitte von Fahrplänen, die dem Produktzeitraum entsprechen.

- A Das entwickelte Agentenmodell baut konzeptuell auf der hybriden Agentenarchitektur InteRRaP auf und bildet Anlagen- und Weltwissen in einer Schichtenarchitektur ab. Die Verarbeitung eines Ereignisses erfolgt in einem abgestuften Konzept ebenfalls entsprechend dieser Agentenarchitektur.
- S DynaSCOPE ist ein verteiltes heuristisches Verfahren. Eine Anfälligkeit für eine frühe Konvergenz in lokalen Minima konnte in den durchgeführten Experimenten durch verfahrensinterne Parametrierungen kompensiert werden, zeigt sich aber nicht in allen Fällen (z. B. nicht bei kleinen Szenarien und Suchräumen mit wenigen Fahrplänen).
- I Die Modellierung anlagenlokaler Informationen erfolgte mit einem existierenden stützvektorbasierten Ansatz aus dem Bereich des maschinellen Lernens. Lokale Präferenzen und Restriktionen werden nicht kommuniziert, sondern ausschließlich anlagenlokal modelliert.
- T DynaSCOPE konvergierte in den durchgeführten Experimenten innerhalb der identifizierten Zeitgrenzen. Eine weitergehende Prüfung auf Basis einer Parametrierung des Systems anhand der gewählten Realisierungsoption im Feld oder innerhalb einer geeigneten Laborumgebung sollte in nachfolgenden Untersuchungen vorgenommen werden.

In [Abschnitt 6.1](#) wurden funktionale und nichtfunktionale Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP ermittelt. In [Tabelle 10.1](#) werden Evaluationsergebnisse und Designentscheidungen von DynaSCOPE bezüglich dieser Anforderungen bewertet. Die Erweiterbarkeit des Ansatzes wird im nachfolgenden Abschnitt diskutiert.

10.2 ERWEITERBARKEIT

In der hier vorgelegten Arbeit wurde der Anwendungsfall der Wirkleistungsplanung für kommerzielle DVPPs mit einer Fahrplanauflösung von 15 Minuten fokussiert. Die Erweiterbarkeit des Verfahrens auf andere Anwendungsfälle wird im Folgenden kurz diskutiert.

Berücksichtigung von Netzrestriktionen Unter den aktuell gültigen regulatorischen Rahmenbedingungen ist es nicht möglich (und auch betriebswirtschaftlich nicht sinnvoll), eine solche Planung durchzuführen, deren Auswirkungen die Betriebsmittel des Stromnetzes möglichst wenig belastet: So ist es möglich, dass eine Umplanung zu kritischen

ID	DynaSCOPE	Bewertung
FA 1	Es konnte gezeigt werden, dass Ereignisse sicher detektiert werden und parallel auftretende Ereignisse durch die entsprechenden Agenten parallel bearbeitet werden.	✓
FA 2	DynaSCOPE führt mit einer kooperativen Lösungssuche zu neuen, gültigen Fahrplänen und stellt diese kontinuierlich für die Anlagen bereit.	✓
FA 3	Die Berücksichtigung anlagentypspezifischer Präferenzen wurde <i>exemplarisch</i> an der Anzahl von Kaltstarts gezeigt: Diese werden durch eine entsprechende Parametrierung von DynaSCOPE deutlich reduziert.	(✓)
FA 4	Es konnte gezeigt werden, dass mit DynaSCOPE sämtliche Produktverpflichtungen im Planungshorizont berücksichtigt werden.	✓
FA 5	DynaSCOPE wurde als vollständig verteiltes Verfahren umgesetzt, die Kommunikation wurde auf den Produktfahrplan reduziert.	✓
FA 6	Anhand einer <i>exemplarischen</i> Differenzierung der Kosten zwischen Anlagentypen konnte gezeigt werden, dass eine Berücksichtigung der Kostenstruktur durch DynaSCOPE möglich ist.	(✓)
NFA 7	Das Verfahren zeigt eine sehr gute Skalierbarkeit bei geringer Dynamik der Affiliationsmengen. Starke Wechsel in der DVPP-Zuordnung führen zu einer <i>Einschränkung der Ergebnisgüte</i> . Hier schränkt die starke Dynamik des DVPP-Konzeptes die Möglichkeiten der kontinuierlichen Einsatzplanung stark ein. Eine entsprechende Anpassung wie z. B. eine Reduktion der unterschiedlichen DVPP, denen ein Agent im Planungshorizont angehören kann, kann dieses Problem beheben.	(×)
NFA 8	Das Verfahren konvergierte in den durchgeführten Experimenten immer innerhalb der anwendungsspezifischen Zeitgrenzen, allerdings sollte in Folgearbeiten ein Abgleich mit dem <i>Zeitverhalten realer Komponenten</i> durchgeführt werden.	(✓)
NFA 9	Die Passfähigkeit in das energiewirtschaftliches Rollensystem wurde durch Abbildung auf das SGAM gezeigt.	✓

Tabelle 10.1: Abgleich: Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP und DynaSCOPE. ✓: Verfahren erfüllt Anforderungen. ×: Prüfung des übergeordneten DVPP-Konzeptes empfehlenswert. Angaben in Klammern: Weitere Untersuchungen erforderlich. *Kursiv:* Führt zur Abwertung bzw. Einschränkung der Bewertung.

Zuständen im Stromnetz führt, die dann durch ein Eingreifen des Netzbetreibers behoben werden müssen und ihrerseits damit wieder Ereignisse auslösen.

Im Rahmen des Forschungsverbundes Smart Nord, in den sich die hier vorgelegte Arbeit einbettet, wurde geprüft, ob eine Einsatzplanung diese Aspekte berücksichtigen kann und somit einen steuernden Eingriff des Netzbetreibers proaktiv verhindern kann. Entwickelt wurde die Metrik der Netzähnlichkeit, mit der es möglich ist, zwei Einsatzpläne bezüglich ihrer Ähnlichkeit in der Netznutzung gegenüber einem initialen Einsatzplan zu bewerten [NS13]. Die Einbindung dieser Metrik in die kontinuierliche Einsatzplanung würde es erlauben, einen aus Netzsicht günstigeren Einsatzplan zu wählen. Zukünftige Ereignisse durch ein Eingreifen des Netzbetreibers würden somit proaktiv vermieden.

In der hier vorgelegten Arbeit wurde der Ansatz aus unterschiedlichen Gründen nicht weiterverfolgt:

- Die Evaluation der entwickelten Metrik ist nur als interdisziplinäre Arbeit und somit nicht ausschließlich im Rahmen einer Dissertation umsetzbar (siehe auch die Ausführungen zum Vorgehensmodell in [Abschnitt 2.2.3](#)). Erste Analysen u.a. im Rahmen von zwei studentischen Abschlussarbeiten zeigten allerdings vielversprechende Ergebnisse, die zu einer solchen Evaluation motivieren [Bor14], [Fer14].
- Die für die Bestimmung der Netzähnlichkeit erforderlichen Daten erfordern eine Kenntnis des unterliegenden Netzes. Im bisher betrachteten Anwendungsfall ist es dagegen nicht erforderlich, dass die Agenten über die Verortung der Einheiten im Stromnetz informiert sind. Die Erweiterung ist somit zwar möglich, würde aber zu einer deutlichen Erhöhung des Wissens der Agenten über die physikalische Welt führen.

Eine Erweiterung von DynaSCOPE um Belange des stabilen Netzbetriebs ist möglich. Es sollte allerdings vorab entschieden werden, ob auch für diese Aspekte die vollständige Verteiltheit des Verfahrens sinnvoll ist. Alternativ wäre ein ergänzender Ansatz innerhalb einer Observer/Controller-Architektur möglich – eine Diskussion findet sich im nachfolgenden Abschnitt zum weiterführenden Forschungsbedarf.

Fahrplanauflösung Für die hier vorgestellte Umsetzung von DynaSCOPE wurde eine Fahrplanauflösung von 15 Minuten skizziert. Das der Konzeptualisierung vorangestellte Zeitmodell abstrahiert allerdings von dieser anwendungsfallspezifischen Parametrierung (siehe [Abschnitt 5.2](#)). Bezogen auf die Prozessabläufe ist es somit möglich, auch höhere Fahrplanauflösungen zu unterstützen. Zu prüfen ist allerdings, ob die somit erforderliche schnellere Rekonfiguration einer Einheit anlagenseitig möglich ist: Es werden somit höhere Anforderungen an den Anlagen-Controller gestellt. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Abweichungen der Produkterfüllung so reduziert werden können. Sinnvoll erscheint es, Untersuchungen zu höherer Fahrplanauflösung mit möglichen Folgearbeiten zur Online-

Optimierung und zu vorhersagefähigen Anlagenmodellen zu verbinden. Die rechtzeitige Konvergenz der kooperativen Lösungssuche muss auch in diesem Fall mit Annahmen bzgl. einer Realisierung im Feld verbunden werden.

Lokales Supply-Demand-Matching Als fahrplanbasiertes Verfahren ist DynaSCOPE auch für Planungsaufgaben außerhalb des DVPP-Kontextes anwendbar. So kann das Verfahren nicht nur für die kontinuierliche Einsatzplanung in klassischen (d. h. statischen) VK eingesetzt werden, sondern für alle Anwendungsfälle, bei denen ein diskretisierter Wirkleistungsverlauf von einer Menge von Einheiten erfüllt werden soll – als Beispiel sei das lokale Supply-Demand-Matching genannt: Werden innerhalb eines Netzbereiches sämtliche Energieanlagen zu einem Verbund (siehe [Definition 5.16](#)) zusammengefasst, so würden die Agenten mit DynaSCOPE gemeinsam einen vorgegebenen Ziellastgang erfüllen. Im Fall des lokalen Supply-Demand-Matchings würde es sich somit um eine möglichst niedrige Vorgabe handeln, um die verbleibende Residuallast zu minimieren.

10.3 WEITERFÜHRENDER FORSCHUNGSBEDARF

Die Evaluation von DynaSCOPE innerhalb einer ersten Iteration des Vorgehensmodells SGAE sowie die Einbettung des Verfahrens in die DVPP-Wertschöpfungskette haben weiterführenden Forschungsbedarf aufgedeckt, der teilweise bereits an unterschiedlichen Stellen der hier vorgelegten Arbeit dargelegt wurde (z. B. bezüglich der Evaluation, siehe [S. 233](#)). Im Folgenden werden diese Aspekte um übergeordnete weiterführende Forschungsfragen ergänzt.

Substitutionseffekt Die Motivation in der Entwicklung Dynamischer Virtueller Kraftwerke findet sich letztlich über die Flexibilisierung der Einheiten auf Nieder- und Mittelspannungsebene in der Dekarbonisierung der elektrischen Energieversorgung. Eine tatsächliche Substitution fossil befeuerter Großkraftwerke hängt allerdings von vielen Faktoren ab, nicht nur von einer technisch machbaren IKT-basierten Flexibilisierung dezentraler Energieanlagen im Verteilnetz. In nachfolgenden Forschungsarbeiten sollte daher geprüft werden, ob bzw. in welchem Maße eine tatsächliche Substitution erreicht werden kann. Methodische Ansätze werden z. B. innerhalb des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projektes D-Flex (Dezentral und zentral gesteuertes Energiemanagement auf Verteilnetzebene zur Systemintegration erneuerbarer Energien) erarbeitet.¹ Eine Diskussion zu den Herausforderungen, die mit der simulativ-experimentellen Bewertung des Substitutionseffektes verbunden wären, findet sich z. B. in [[Son+15](#)].

¹http://www.offis.de/f_e_bereiche/energie/projekt/projekte/d-flex.html, zuletzt besucht am 29.11.2014

Kontrollierte Selbstorganisation DynaSCOPE zeigt als heuristisches verteiltes Verfahren in manchen Szenarien eine frühe Konvergenz in ungünstigen lokalen Minima. In diesen Fällen konvergiert das Verfahren sehr schnell – es gelingt keinem Agenten, den aktuellen Lösungskandidaten (Einsatzplan) weiter zu verbessern. Mit der Observer/Controller-Architektur wurde ein Ansatz vorgestellt, der in solchen Situationen sehr gut geeignet scheint, um das Lösungsverfahren erneut anzustoßen und so das lokale Minimum zu verlassen (siehe S. 40). In weiterführenden Arbeiten könnte geprüft werden, wie sich das hier vorgestellte Verfahren in eine solche Umgebung einbetten lässt, um so die Vorteile des vollständig verteilten Verfahrens mit den Vorteilen klassischer Regelsysteme zu kombinieren.

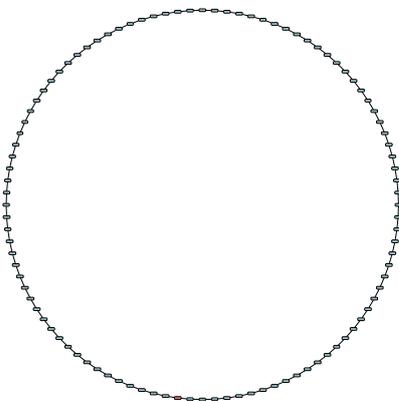
Ereignisinduzierte Planung vs. Online-Optimierung In den Untersuchungen zur Skalierbarkeit wurde die Frage aufgeworfen, ob eine Umplanung anders als im gewählten Ansatz nicht nur ereignisinduziert von dem jeweils betroffenen Agenten, sondern in einem regelmäßigen Abstand durchgeführt werden sollte. In weiterführenden Arbeiten sollte dieser Frage nachgegangen werden. Es empfiehlt sich, eine detailliertere Betrachtung der Umplankosten vorzunehmen, und diese mit der Verwendung echter Anlagenmodelle zu kombinieren, so dass die in der Realität erwartete Anzahl von Ereignissen berücksichtigt werden kann.

Ereignis-Prognose Die Ereignis-Detektion in DynaSCOPE wurde reaktiv umgesetzt: Erst nach Ende eines Planungsintervalls kann der Agent entscheiden, ob die Einheit im vergangenen Planungsintervall die Fahrplanvorgabe erfüllt hat. Als Erweiterung wäre es möglich, die Agenten um ein internes Einheitenmodell zu erweitern, mit dem eine Ereignisdetektion auch proaktiv umgesetzt werden könnte. Das agenteninterne Einheitenmodell müsste somit in der Lage sein, eine Vorhersage über das erwartete Verhalten der Einheit zu machen. Mögliche Ansätze finden sich im Forschungsbereich der modellprädiktiven Regelung (MPC). Für eine Anwendung der MPC im Kontext elektrischer Energiesysteme sei auf die Arbeiten von Negenborn hingewiesen [Neg07].

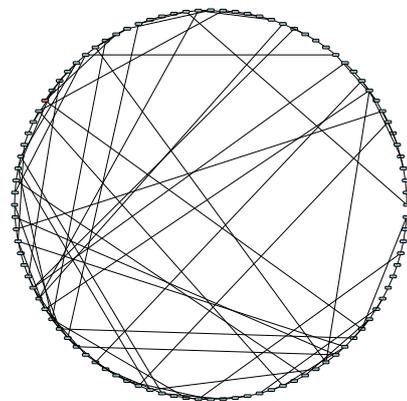
A

ANHANG

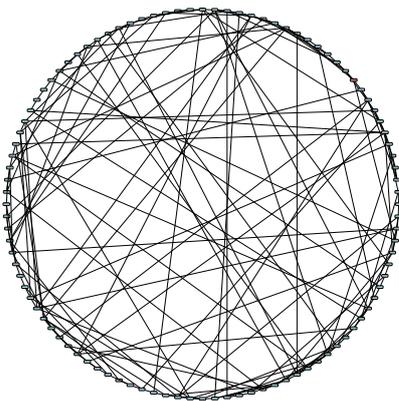
A.1 ERGÄNZENDE ABBILDUNGEN



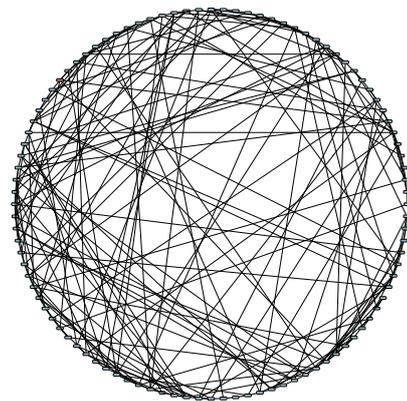
(a) $\phi = 0.0$



(b) $\phi = 0.5$



(c) $\phi = 1.0$



(d) $\phi = 1.5$

Abbildung A.1: Beispiele für Kommunikationstopologien mit unterschiedlicher Parametrierung des Dichteparameters SmallWorld ϕ . Dargestellt ist ein DVPP mit 100 Agenten.

A.2 WEITERFÜHRENDE DATEN ZUR EVALUATION

	SmallWorld ϕ				
	0.0	0.1	0.5	1.0	2.0
1.00037878788	0	1	12	13	22
1.00038535645	0	5	4	3	3
1.00039138943	0	4	3	1	2
1.00039514064	0	0	1	1	0
1.00040117362	0	0	0	1	1
1.00040774220	0	0	1	0	0
1.00041377517	0	0	1	0	0
1.00074779157	0	2	1	1	5
1.00075757576	0	0	1	6	4
1.00076414433	0	0	3	3	6
1.00077017731	0	0	1	2	1
1.00077392852	0	0	1	0	1
1.00078653008	0	0	0	1	0
1.00112336383	0	0	0	2	2
1.00113314802	0	0	0	1	2
1.00113971660	0	0	1	0	0
1.00114293221	0	0	1	1	0
1.00114574958	0	0	1	3	2
1.00115553377	0	0	4	1	2
1.00151850448	0	0	3	1	0
1.00153432164	0	0	0	1	0
1.00154846107	100	88	61	58	47

Tabelle A.1: Verteilung der lokalen Minima im Experiment E-BV-O.

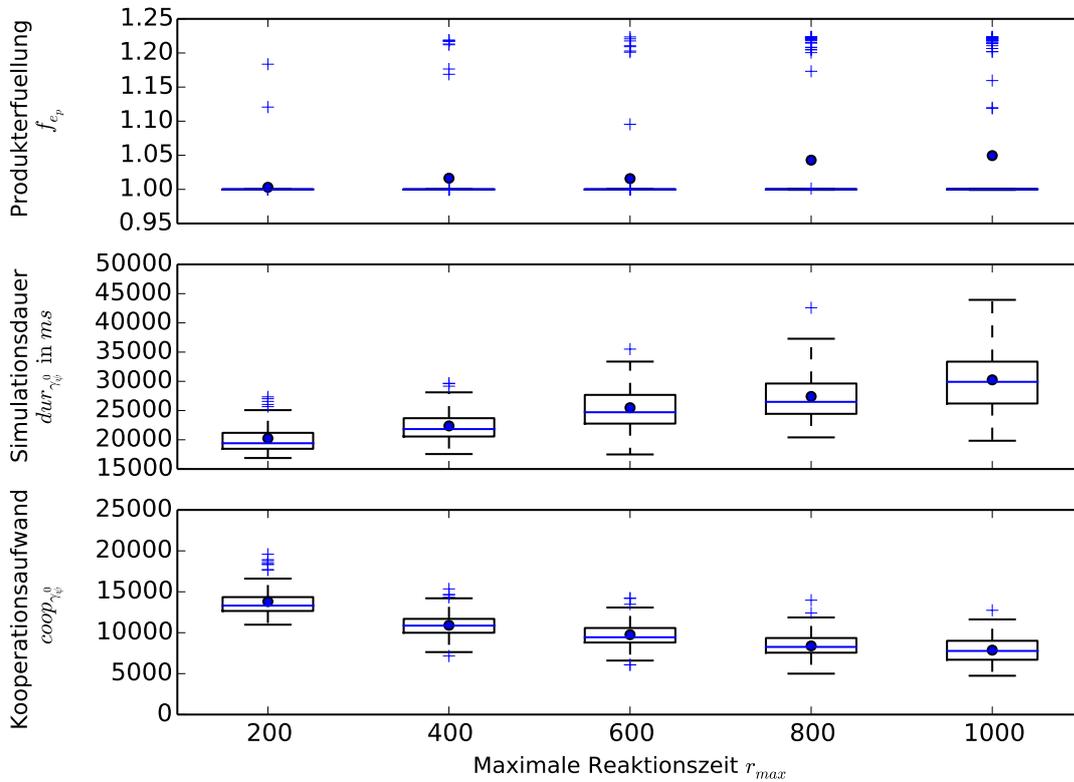
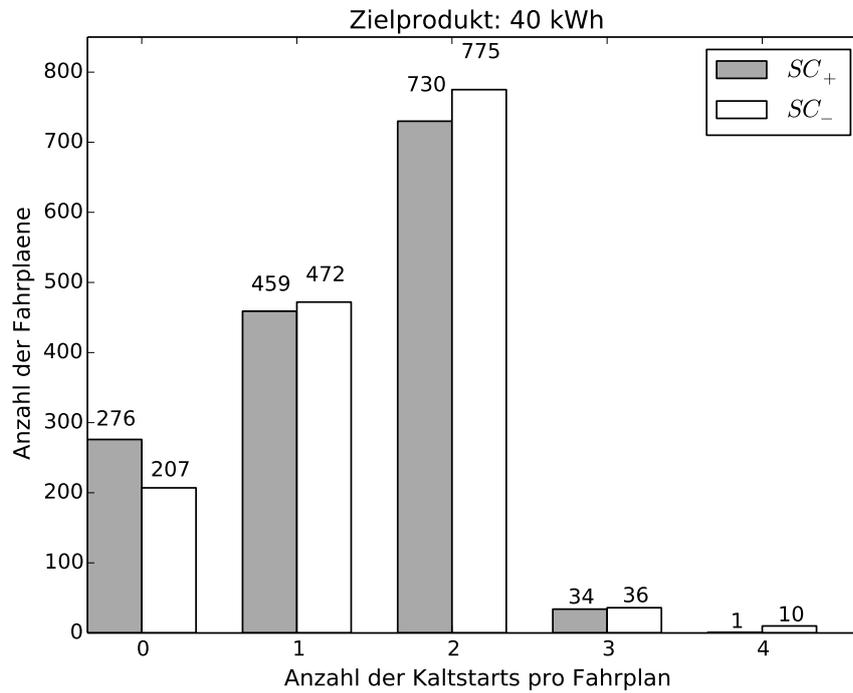


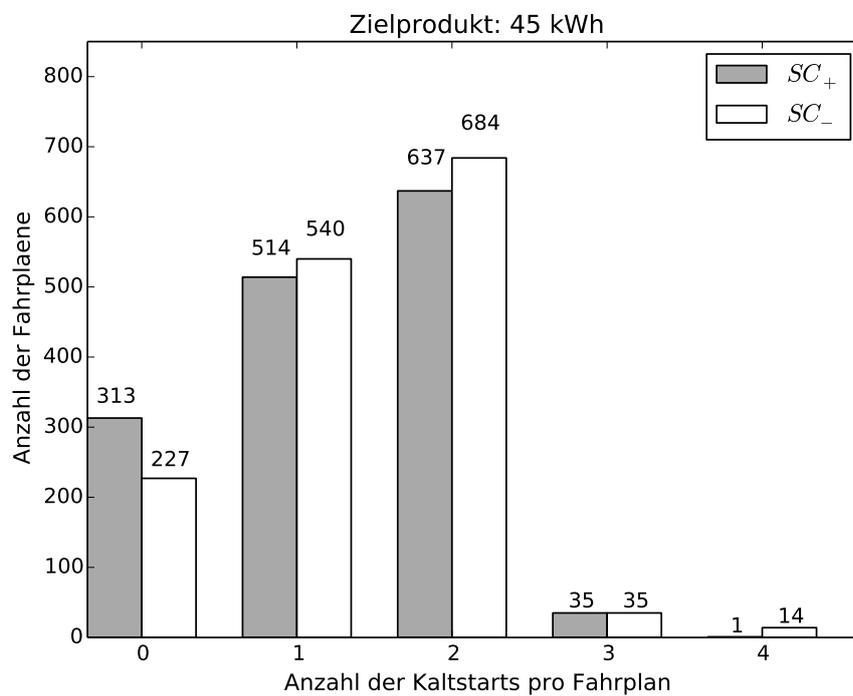
Abbildung A.2: Experiment E-SSM-4: Variation der maximalen Reaktionsverzögerung bei erhöhter zufallsbedingter Verzögerung der Nachrichtenlaufzeit δ_{msg} . Dargestellt sind die anteilige Produkterfüllung, die Simulationsdauer sowie der Kooperationsaufwand für unterschiedliche Werte der maximalen Reaktionsverzögerung. Jede Versuchsreihe stellt die Versuche von 100 Versuchen dar. Die maximale Nachrichtenlaufzeit betrug 800 ms.

Experiment	Lokale Kompensation
<i>DVPP100</i>	6 - 12 %
<i>DVPP200</i>	16 - 37 %
<i>DVPP300</i>	ca. 18 %
<i>DVPP400</i>	21.5 %

Tabelle A.2: Experimente E-SK-1 bis E-SK-4: Prozentualer Anteil lokal kompensierter Ereignisse. Angegeben ist jeweils der Bereich von minimal bis maximal beobachtetem Anteil an lokaler Kompensation.

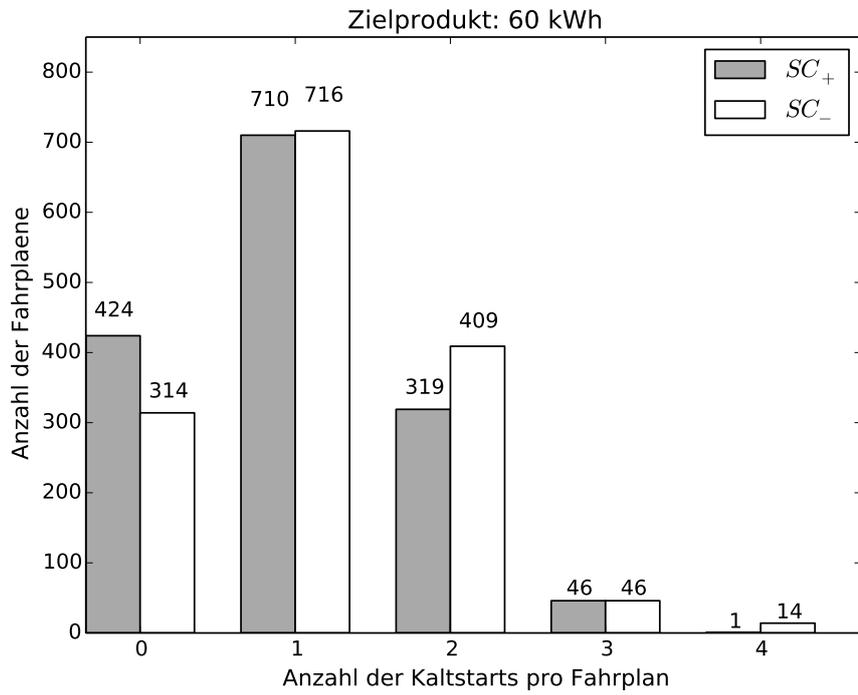


(a)

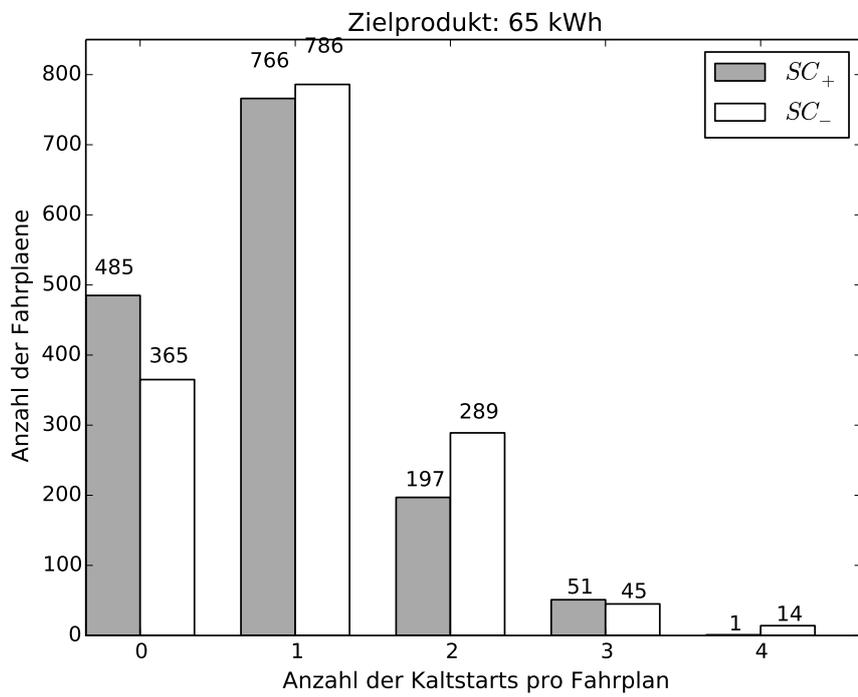


(b)

Abbildung A.3: Experiment E-SC-1: Anzahl der Fahrpläne differenziert nach Anzahl der Kaltstarts für die Zielprodukte (a) 40kWh und (b) 45 kWh.



(a)



(b)

Abbildung A.4: Experiment E-SC-1: Anzahl der Fahrpläne differenziert nach Anzahl der Kaltstarts für die Zielprodukte (a) 60kWh und (b) 65 kWh.

A.3 SEQUENZDIAGRAMME ZUR ANALYSE DER ANWENDUNGSFALL-VARIANTEN

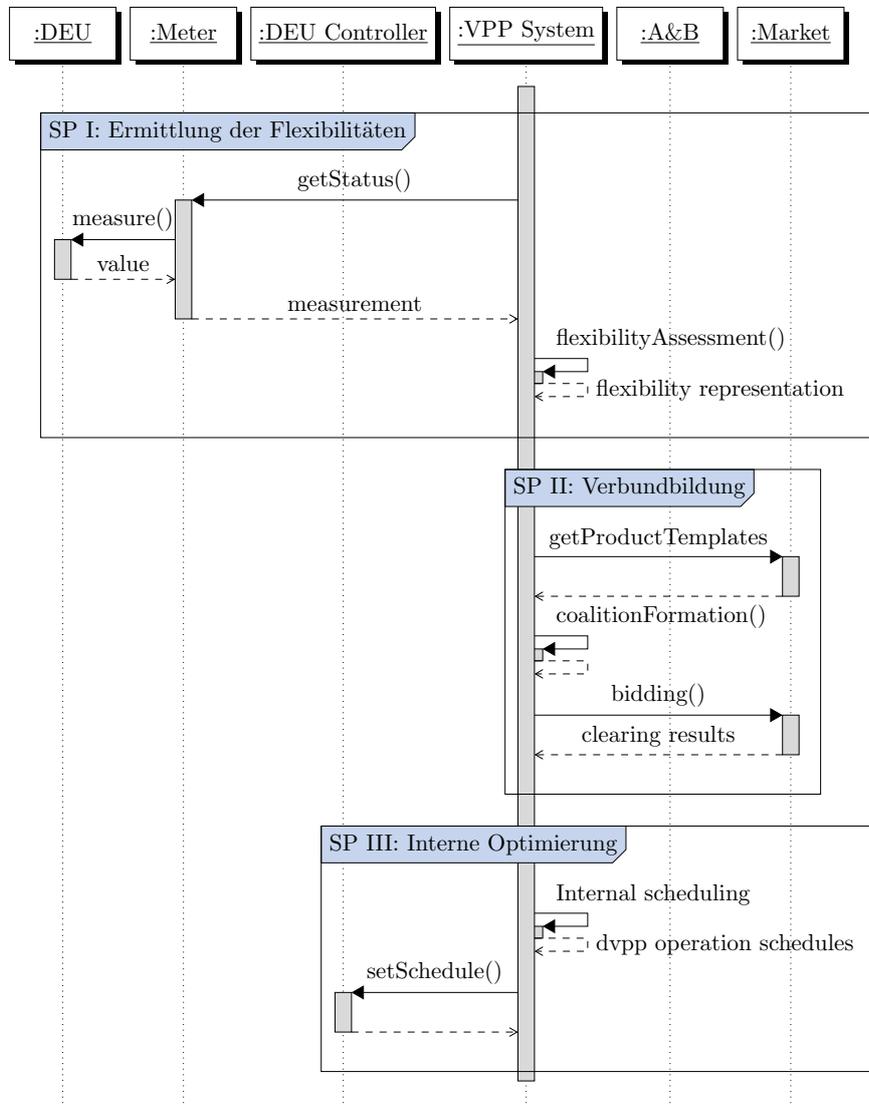


Abbildung A.5: Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante A): Ermittlung der Flexibilität, Verbundbildung und interne Optimierung.

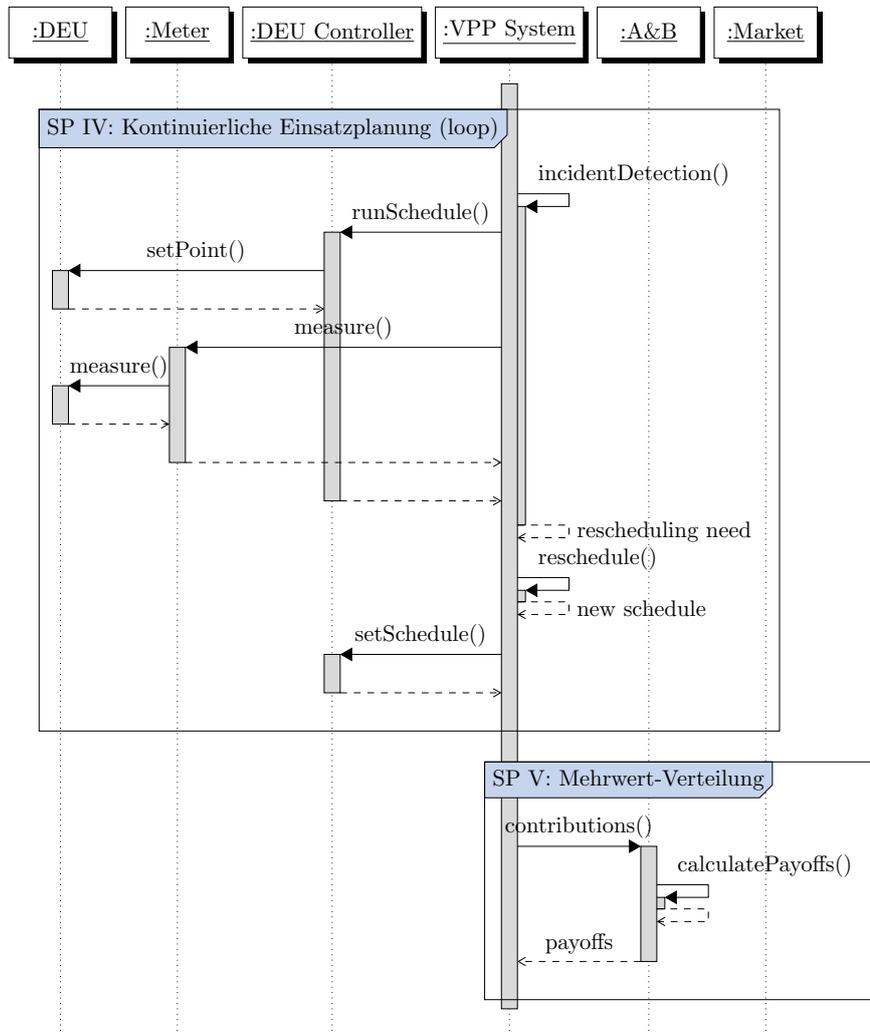


Abbildung A.6: Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante A): Kontinuierliche Einsatzplanung und Mehrwert-Verteilung.

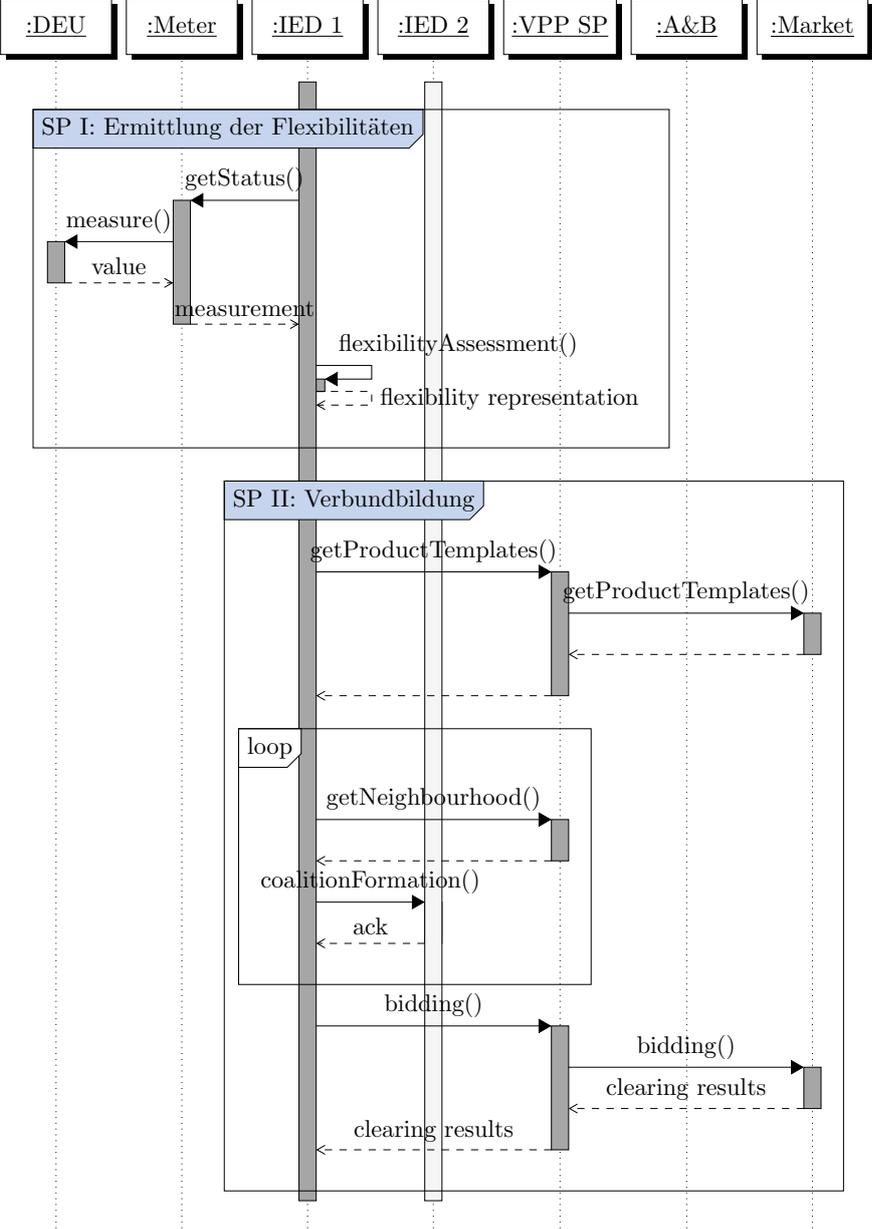


Abbildung A.7: Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante B): Ermittlung der Flexibilität und Verbundbildung.

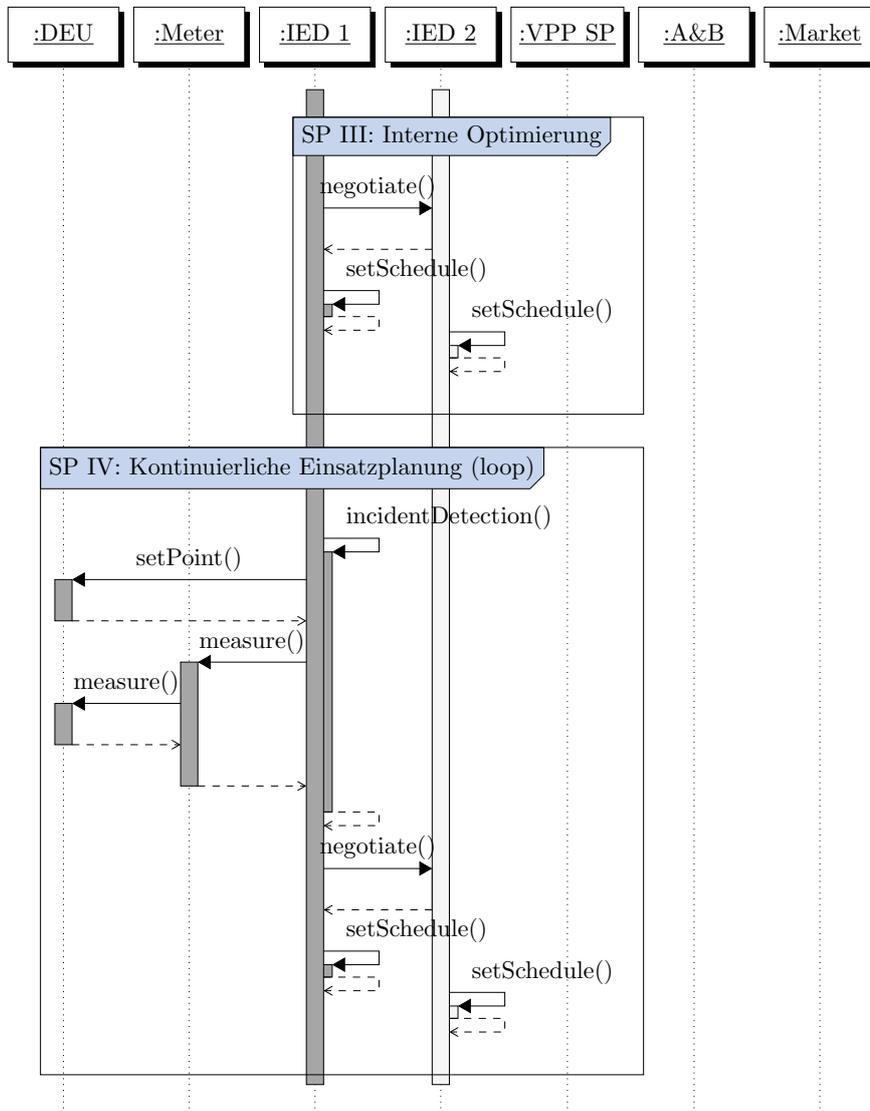


Abbildung A.8: Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante B): Interne Optimierung und kontinuierliche Einsatzplanung.

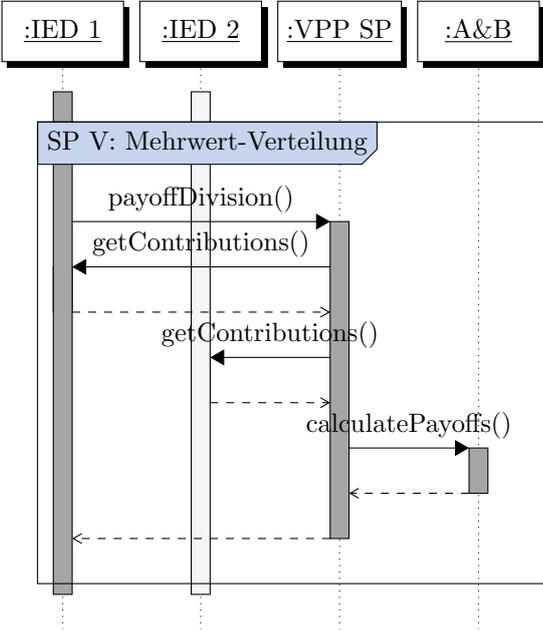


Abbildung A.9: Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante B): Mehrwert-Verteilung.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Marktinteraktion Dynamischer Virtueller Kraftwerke	7
1.2	Markt- und DVPP-Prozesse in der Übersicht	8
2.1	Smart Grid Architectural Model (SGAM)	17
2.2	Algorithm Engineering	21
2.3	Smart Grid Algorithm Engineering (SGAE)	22
3.1	Mehrzweck-Produktionsumfeld	29
3.2	Kartenfärbeproblem	34
3.3	Kontrolle eines Produktionsprozesses über ein Agentensystem	37
3.4	InteRRaP-Architektur	39
3.5	Observer/Controller-Architektur	41
4.1	Koordinationsparadigmen im Ordnungsrahmen P-CASIT	49
5.1	Zeitmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung	70
5.2	Fahrplan	73
5.3	Wesentliche Definitionen auf der Einheiten-Ebene	75
5.4	Einfluss eines Ereignis auf die Zulässigkeit der Fahrpläne	78
5.5	Wesentliche Definitionen auf der Ebene der Agenten	79
5.6	Fahrpläne, Produkte und Produkteinsatzpläne.	82
5.7	Wesentliche Definitionen auf DVPP-Ebene	84
5.8	Übersicht: Definitionen der Konzeptualisierung	86
6.1	Ermittlung der Zeitanforderungen	95
6.2	Suchraummodell und Dekoder	105
6.3	Erweiterungskonzept	111
7.1	Austausch-Topologien für DVPP ψ_1 und ψ_2	117
7.2	Beispiel: Konvergenzproblem bei agentenspezifischer Gütefunktion	118
7.3	Beispiel: Kommunikation des produktspezifischen Fahrplanausschnittes	122
7.4	Untermengen der Domäne eines Agenten	123
7.5	Exemplarische Darstellung des Konvergenzverlaufes bei starker Exploration der Domäne der Agenten	127

7.6	Hybrides Agentenmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung im Überblick	134
7.7	Einheiten-Konfiguration und Beginn des Monitorings	136
7.8	Einheitenwissen des Agenten	138
7.9	Beispiel: Produktbezogene Planabweichung $\chi_p^{(k)}$	141
7.10	Phase I: Prozesse der Ereignisdetektion und lokalen Kompensation	144
7.11	Phase II/III: Prozesse der Umplanung	146
7.12	Beispiel: Integration von Ereignisinformationen bei Mehrfachereignissen	149
7.13	Agentenmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung	152
7.14	Übergeordnetes Prozessmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung	153
7.15	Eintrittspunkte in die Prozesse der kontinuierlichen Einsatzplanung. <i>inc?</i> : Wurde ein Ereignis detektiert? <i>P?</i> : Ist ein Produkt betroffen? <i>loc?</i> : Ist eine lokale Kompensation möglich?	154
7.16	Ablauf aus Sicht eines Ereignis-detektierenden Agenten (Eintrittspunkt 1)	156
7.17	Ablauf aus Sicht eines über Nachrichten von einem Ereignis in Kenntnis gesetzten Agenten (Eintrittspunkt 2)	158
8.1	DynaSCOPE-Evaluationssystem	163
8.2	Prozessintegration: Konzeption des technischen Durchstichs	166
8.3	Experiment E-BV-1	173
8.4	Experiment E-BV-2	175
8.5	Experiment E-BV-3	176
8.6	Experiment E-SSM-0	181
8.7	Experiment E-SSM-1	182
8.8	Experiment E-SSM-2	183
8.9	Experiment E-SSM-3	187
8.10	Experiment E-SSM-3 (erhöhte Dichte der Kommunikationstopologie)	188
8.11	Experiment E-SSM-5	189
8.12	Integration von Lieferungsqualität und Kosten in die Fahrplanauswahl	191
8.13	Experimente E-CO-0 bis E-CO-4	194
8.14	Experimente E-CO-3 und E-CO-4 (Scatterplot)	195
8.15	Integration von Präferenzen in die Fahrplanauswahl	197
8.16	Experiment E-SC-1	201
8.17	Experiment E-SC-1: Rohdaten	204
8.18	Experiment SC-0	205
8.19	Experiment E-RE-1 (Beispielverlauf erwartete lieferungsbezogene Qualität)	209
8.20	Experiment E-RE-1	212
8.21	Experiment E-RE-1: Lieferungsbezogene Qualität (BHKW-Sicht)	214
8.22	Experiment E-RE-1: Lieferungsbezogene Qualität (PV-Sicht)	215
8.23	Experimente E-AF-0 bis E-AF-4: Konstruktion der Produkte.	221

8.24	Experiment E-RE-1: Analyse des Nachrichtenaufkommens	223
8.25	Experimente E-SK-1 bis E-SK-4 (Histogramm zur Umplanningdauer)	224
8.26	Experimente E-SK-1 bis E-SK-4 (Umplanningdauer und Nachrichtenanzahl)	226
8.27	Experiment E-AF-0	228
8.28	Experimente E-AF-0 bis E-AF-4 (Einfluss der Affiliation)	229
8.29	Experiment E-AF-2	230
8.30	Experimente E-AF-0 bis E-AF-4 (Lieferungsbezogene Qualität Initialplanung)	231
9.1	Herangehensweise für die <i>gap-to-the-field</i> -Analyse von DVPP	238
9.2	SGAM Component Layer: Technologische Realisierungsoptionen für DVPP (E/L: Erzeuger bzw. Lasten)	239
9.3	Anwendungsfall-Variante A: DVPP als Optimierungsparadigma. Zahlen repräsentieren übermittelte Informationen; Erläuterungen im Text.	241
9.4	Anwendungsfall-Variante B: DVPP als Kontroll-Paradigma. Zahlen repräsentieren übermittelte Informationen; Erläuterungen im Text.	242
9.5	Sequenzdiagramme für die Ermittlung der Flexibilitäten	245
9.6	Sequenzdiagramme für die interne Optimierung	246
9.7	Sequenzdiagramme für die DVPP-Bildung	247
9.8	Sequenzdiagramme für die kontinuierliche Einsatzplanung	248
9.9	Sequenzdiagramme für die Mehrwert-Verteilung	249
9.10	Kommunikationserfordernisse der Anwendungsfall-Varianten	251
9.11	Erforderliche Entwicklungsschritte der relevanten Technologiefelder	256
A.1	Beispiele für Kommunikationstopologien	267
A.2	Experiment E-SSM-4 (erhöhte Nachrichtenlaufzeit)	269
A.3	Experiment E-SC-1: Rohdaten	270
A.4	Experiment E-SC-1: Rohdaten	271
A.5	Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante A): Ermittlung der Flexibilitäten, Verbundbildung und interne Optimierung.	272
A.6	Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante A): Kontinuierliche Einsatzplanung und Mehrwert-Verteilung.	273
A.7	Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante B): Ermittlung der Flexibilitäten und Verbundbildung.	274
A.8	Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante B): Interne Optimierung und kontinuierliche Einsatzplanung.	275
A.9	Subprozess-Analyse (Anwendungsfall-Variante B): Mehrwert-Verteilung.	276

TABELLENVERZEICHNIS

2.1	Evaluationsansatz dieser Arbeit	14
2.2	Abbildung der Design Science Richtlinien im SGAE-Vorgehensmodell	24
2.3	Zuordnung Ergebnisse – SGAE-Vorgehensmodell	25
3.1	Planreparatur im DVPP-Kontext	31
4.1	Agentenbasierte Ansätze im Überblick	64
6.1	Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung in DVPP	95
6.2	Abgleich Anforderungen mit möglichen Basisverfahren	96
6.3	Erweiterungsbedarf nach Anforderungen	108
7.1	Direkte Übertragung von COHDA auf den Produktbezug	115
8.1	Hypothesen zum Eigenschaftserhalt des Basisverfahrens	168
8.2	Experiment E-BV-0	172
8.3	Hypothesen zum Eigenschaftserhalt des erweiterten Verfahrens bei Verwendung der kontinuierlichen Suchraumdarstellung	178
8.4	Hypothesen zu den Effekten der gewichteten Kostenberücksichtigung in der globalen Gütefunktion	192
8.5	Hypothesen zur Berücksichtigung von anlagenlokalen Soft Constraints in der lokalen Fahrplanauswahl	197
8.6	Experimente E-SC-0 / E-SC-1	203
8.7	Hypothesen zur Evaluation der Umplanung	206
8.8	Hypothesen zur Skalierbarkeit der Umplanung	218
8.9	Experimente E-SK-1 bis E-SK-4 (Umplanungsdauer und Nachrichtenanzahl)	225
9.1	DVPP-Akteure nach ENTSO-E-Rollenmodell	244
9.2	Dynamische Einheiten-Daten im VK-System	250
9.3	Kategorisierung der FEG-Technologiefelder	252
10.1	Abgleich: Anforderungen an die kontinuierliche Einsatzplanung	263
A.1	Verteilung der lokalen Minima im Experiment E-BV-O.	268

A.2 Experimente E-SK-1 bis E-SK-4: Prozentualer Anteil lokal kompensierter Ereignisse. 269

LISTE DER DEFINITIONEN

5.1	Definition (Basiseinheit der Zeit)	68
5.2	Definition (Planungsintervall)	69
5.3	Definition (Planungshorizont)	69
5.4	Definition (Zeitmodell der kontinuierlichen Einsatzplanung)	70
5.5	Definition (Stromnetz)	70
5.6	Definition (Einheit)	71
5.7	Definition (Betriebszustand)	71
5.8	Definition (Kostenfunktion)	72
5.9	Definition (Fahrplan)	72
5.10	Definition (Betriebsconstraint)	73
5.11	Definition (Netz-Constraint)	73
5.12	Definition (Zulässigkeit eines Fahrplans)	74
5.13	Definition (Präferenzen)	74
5.14	Definition (Einheiten-Agent)	75
5.15	Definition (Domäne)	76
5.16	Definition (Verbund)	76
5.17	Definition (Einsatzplan)	77
5.18	Definition (Ereignis)	77
5.19	Definition (Produktzeitraum)	79
5.20	Definition (Produktauflösung, Produktintervall)	80
5.21	Definition (Produkt)	80
5.22	Definition (Produktbeitrag)	80
5.23	Definition (DVPP)	81
5.24	Definition (Produktbeiträge des DVPP)	82
5.25	Definition (Umplanungsansatz)	83
5.26	Definition (Produktabweichung)	83
5.27	Definition (Umplanungskosten)	84
5.28	Definition (Planungsgrundlage für die kontinuierliche Einsatzplanung für dynamische Virtuelle Kraftwerke)	85
6.1	Definition (Größe eines DVPP, Affiliationsmenge)	93

7.1	Definition (DVPP-spezifische Nachbarschaft)	114
7.2	Definition (Produkt-Fahrplan)	119
7.3	Definition (Zählvariable eines Fahrplans)	119
7.4	Definition (Produkt-Einsatzplan)	120
7.5	Definition (Wahrgenommener DVPP-Zustand, DVPP-Lösungskandidat) . . .	120
7.6	Definition (DVPP-reduziertes Arbeitsgedächtnis)	120
7.7	Definition (Arbeitsgedächtnis)	120
7.8	Definition	121
7.9	Definition (Anteilige Produktintervallerfüllung, energiebezogene Lieferungs- qualität)	124
7.10	Definition (Güte eines Lösungskandidaten)	125
7.11	Definition (Nachrichtenspeicher und Reaktionsverzögerung)	129
7.12	Definition (Suchraum eines Agenten)	130
7.13	Definition (Aktivierter Fahrplan)	135
7.14	Definition (Aktuelles Planungsintervall und Historie)	137
7.15	Definition (Geplante Produkteinsatzplanerfüllung)	138
7.16	Definition (Erwartete Produkterfüllung)	139
7.17	Definition (Produktspezifische Planabweichung)	139
7.18	Definition (Ereignisgrenze und Ereignis)	142
7.19	Definition (Lokale Kompensation)	143
7.20	Definition (Ereignis-Speicher)	145
7.21	Definition (Erweitertes Arbeitsgedächtnis)	147
8.1	Definition (Simulationsdauer der Initialplanung $dur_{\gamma_{\psi}^0}$)	169
8.2	Definition (Kooperationsaufwand der Initialplanung eines DVPP $coop_{\gamma_{\psi}^0}$) . .	169
8.3	Definition (Anlagenlokale Qualität bezüglich Kaltstarts)	198
8.4	Definition (Anzahl der Nachrichten für die Ereignisbearbeitung)	221
8.5	Definition (Anzahl verworfener Kandidaten)	228

GLOSSAR

Nachfolgend sind die wichtige Begriffe aus dem energiewirtschaftlichen Anwendungskontext dieser Arbeit zusammengefasst und erläutert, um Leserinnen und Lesern ohne den entsprechenden Kontext das Verständnis dieser Arbeit zu erleichtern. Informatische Fachbegriffe werden nicht aufgenommen – es sei hier auf die entsprechenden Informatik-Lehrbücher verwiesen. Das in diesem Glossar verwendete Symbol \sim bezieht sich jeweils auf den im Einzelnen vorgestellten Begriff, das Symbol \uparrow verweist auf einen anderen ebenfalls im Glossar erklärten Begriff. Die in diesem Glossar verwendeten Erläuterungen wurden aus mehreren Quellen zusammengeführt und gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen innerhalb des Forschungsverbundes Smart Nord abgestimmt.

Anlage Eine \sim bezeichnet eine \uparrow [Energie](#) bereitstellende \uparrow [Einheit](#).

Arbeit \uparrow [Energie](#)

Ausgleichsenergie Die \sim bezeichnet die Differenz zwischen der in einem vereinbarten Zeitintervall prognostizierten und tatsächlichen Entnahme oder Einspeisung von elektrischer \uparrow [Energie](#) in einem \uparrow [Bilanzkreis](#). Im Gegensatz zur \uparrow [Regelenergie](#) dient sie im Rahmen der Bilanzkreisabrechnung ausschließlich zur ökonomischen Bilanzierung.

Bilanzkreis Ein \sim ist ein bilanzielles Gebilde, das sich aus einer beliebigen Anzahl von Einspeise- und Entnahmestellen zusammensetzt und zum Zweck des Ausgleichs zwischen Einspeisung und Entnahme gegenüber dem jeweiligen \uparrow [Übertragungsnetzbetreiber](#) eingerichtet wird. Ein \sim kann lediglich innerhalb von \uparrow [Regelzonen](#) gebildet werden und wird zwischen dem \uparrow [Bilanzkreisverantwortlicher](#) und dem \uparrow [Bilanzkreiskoordinator](#) vertraglich vereinbart.

Bilanzkreiskoordinator Der \sim verwaltet die Bilanzierungsgebiete für die eigene \uparrow [Regelzone](#). Die Rolle des \sim wird in Deutschland durch die \uparrow [Übertragungsnetzbetreiber](#) wahrgenommen.

Bilanzkreisverantwortlicher Ein \sim ist gegenüber dem \uparrow [Bilanzkreiskoordinator](#) für die Ausgeglichenheit der Leistungsbilanz eines \uparrow [Bilanzkreises](#) in ökonomischer und administrativer Hinsicht verantwortlich.

Biogasanlage Eine ~ produziert aus ↑**Biomasse** durch Vergärung Biogas. Dieses kann im Weiteren durch ↑**Blockheizkraftwerke** in elektrische und thermische ↑**Energie** umgewandelt werden.

Biomasse Organische nicht fossile Materialien, die zur Energiegewinnung genutzt werden können.

Blindleistung ~ ist der Teil der ↑**Scheinleistung**, der zum Aufbau von magnetischen (z.B. in Motoren und ↑**Transformatoren**) oder elektrischen Feldern (z.B. Kondensatoren) benötigt wird und nicht zur nutzbaren ↑**Arbeit** beiträgt. Bei überwiegend magnetischem Feld ist die ~ induktiv, bei überwiegend elektrischem Feld kapazitiv. Es gibt blindleistungsliefernde und -beziehende Verbraucher und Erzeuger. In manchen Bereichen des elektrischen Netzes hat die ~ erheblichen Einfluss auf die Spannung.

Blindleistungskompensation Bei der ~ wird die Phasenverschiebung von Spannung und Strom reduziert, so dass in Stromnetzen die zu übertragende ↑**Scheinleistung** verringert und die vorhandenen Leitungskapazitäten besser ausgenutzt werden können. Kompensationen können kapazitiv oder induktiv vorgenommen werden.

Blockheizkraftwerk Ein ~ ist eine ↑**Anlage**, die einen ↑**Primärenergieträger** wie etwa Erdgas mit Hilfe eines Verbrennungsmotors, einer ↑**Brennstoffzellen** oder einer kleinen Gasturbine direkt oder über mechanische ↑**Energie** in elektrische ↑**Energie** wandelt. Die dabei entstehende Wärme kann zur Erhöhung des primärenergetischen Wirkungsgrades für die lokale Wärmeversorgung genutzt werden.

Brennstoffzelle Eine ~ ist eine batterieähnlich aufgebaute ↑**Anlage**, die einen zugeführten Brennstoff und ein Oxidationsmittel auf der Grundlage einer chemischen Reaktion in elektrische ↑**Energie** und das entsprechende Oxidationsprodukt wandelt.

Common Information Model Das ~ ist eine internationale Norm der ↑**International Electrotechnical Commission**, die inzwischen weltweit anerkannt und verbreitet ist. Im CIM (IEC 61970-301 und 61968-11) sind wichtige technische Objekte der elektrischen Energieversorgung (z.B. Stationen, Felder, Schalter, Leitungen, ↑**Transformatoren**) sowie energiewirtschaftliche Objekte wie Kunden und Verträge definiert. Ziel des CIM ist die horizontale Integration zwischen Akteuren der Energiewirtschaft bzw. die vertikale Integration von Systemen innerhalb eines energiewirtschaftlichen Unternehmens.

Dezentrales Energiemanagementsystem Ein ~ ist ein Softwaresystem zur informationstechnischen Überwachung und Steuerung von dezentralen ↑**Einheiten**.

Einheit Eine ~ (engl.: unit) bezeichnet eine technische Komponente, die über einen ↑Netz-knoten mit dem elektrischen Versorgungsnetz verbunden ist und Einfluss auf Strom und Spannung im Stromnetz nehmen kann.

Einsatzplan Ein ~ ordnet den ↑Einheiten eines ↑Virtuelles Kraftwerkes einen jeweils für einen bestimmten Zeitraum gültigen ↑Fahrplan zu.

elektrische Leistung Die ~ im physikalischen Sinne als Produkt von Strom und Spannung ist ein Momentanwert. Bei Angabe von Momentanwerten ist der Zeitpunkt anzugeben. In der Elektrizitätswirtschaft werden neben Momentanwerten auch mittlere Leistungen für definierte Zeitspannen verwendet. Leistung ist dann der Quotient aus in einer Zeitspanne geleisteten ↑Arbeit W und derselben Zeitspanne T : $P = W/T$.

elektrisches Energieversorgungsnetz Ein ~ auch Stromnetz, ist ein Netzwerk aus Entnahme- und Einspeisestellen, die über Stromleitungen in verschiedenen Spannungsebenen miteinander verbunden sind. Das ~ dient der Versorgung von Endverbrauchern mit elektrischer ↑Energie.

Energie Als ~ bezeichnet man die in einem System oder Körper gespeicherte ↑Arbeit sowie das Vermögen, ↑Arbeit zu verrichten oder Wärme abzugeben. Elektrische Energie ist das Integral der ↑elektrischen Leistung über ein Zeitintervall.

Energiemanagement Das ~ bezeichnet die vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von ↑Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer und sicherheitsbezogener Zielsetzungen.

Erneuerbare Energien Unter ~ werden ↑Energieträger verstanden, die praktisch unbegrenzt zur Verfügung stehen (solare Einstrahlung, Wind und Erdwärme) bzw. durch biologische Prozesse in anderer Form verfügbar gemacht werden können (↑Biomasse).

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) Das ~ regelt den vorrangigen Anschluss von ↑Anlagen zur Erzeugung von Strom aus ↑Erneuerbaren Energien und aus Grubengas im Bundesgebiet einschließlich der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone an die Netze für die allgemeine Versorgung mit Elektrizität, die vorrangige Abnahme, Übertragung, Verteilung und Vergütung dieses Stroms durch die ↑↑Netzbetreiber einschließlich des Verhältnisses zu Strom aus ↑Kraft-Wärme-Kopplung sowie einschließlich Prämien für die Integration dieses Stroms in das Elektrizitätsversorgungssystem sowie den bundesweiten Ausgleich des abgenommenen Stroms, für den eine Vergütung oder eine Prämie gezahlt worden ist.

Fahrplan Ein ~ legt für einen in Intervalle unterteilten Zeitraum die mittlere Leistungsabgabe oder -aufnahme einer ↑[Einheit](#) fest.

Frequenzhaltung Die ~ ist eine ↑Systemdienstleistung und bezeichnet die Ausregelung von Frequenzabweichungen infolge von Ungleichgewichten zwischen Einspeisung und Entnahme (Wirkleistungsregelung) und erfolgt im europäischen Verbundnetz durch Primär- und Sekundärregelung sowie ↑[Minutenreserve](#).

IEC 61850 Der internationale Standard ~ definiert ein Informationsmodell für die durchgängige Kommunikation in elektrischen Schaltanlagen. Der ~ setzt sich aus den vier Teilen genormte Informationen, genormte Dienste, genormte Kommunikation und genormte Konfiguration zusammen. Die Abbildung von Eigenschaften oder Verhalten dezentraler Energiewandlungsanlagen ist insbesondere über die spezielle Erweiterung ↑[IEC 61850 7-420](#) möglich.

IEC 61850 7-420 Die Norm ~ Communications Systems for Distributed Energy Resources (DER) ist eine Erweiterung der Normreihe ↑[IEC 61850](#) zur Kommunikation mit verteilten ↑[Anlage](#). Die Norm baut auf den Vorgaben des ↑[IEC 61850](#) auf und definiert eigenständige Erweiterung des Objektmodells, der Dienste und der Mappings.

Intelligent Electronic Device ~ ist ein eingebettetes System, das Informationen von Sensoren und Betriebsmitteln empfangen und Steuerungsbefehle an eine ↑[Einheit](#) übermitteln kann.

International Electrotechnical Commission Die ~ ist das internationale Normierungsgremium für Normen im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik. Einige Normen werden gemeinsam mit der ISO entwickelt. Die Satzung der IEC schließt die gesamte Elektrotechnik ein, inklusive Erzeugung und Verteilung von ↑[Energie](#), Elektronik, Magnetismus und Elektromagnetismus, Elektroakustik, Multimedia und Telekommunikation, wie auch allgemeine Disziplinen wie Fachwortschatz und Symbole, elektromagnetische Verträglichkeit, Messtechnik und Betriebsverhalten, Zuverlässigkeit, Design und Entwicklung, Sicherheit und Umwelt.

Interoperabilität ~ bezeichnet allgemein die Fähigkeit unterschiedlicher technischer Systeme, zusammenarbeiten zu können. Die Zusammenarbeit umfasst dabei den syntaktisch und semantisch korrekten Austausch von Informationen mittels Kommunikation.

Kraft-Wärme-Kopplung Mit ~ wird eine Methode bezeichnet, bei der durch Wandlung eines ↑[Primärenergieträgers](#) sowohl elektrische als auch thermische ↑[Energie](#) für eine weitere Nutzung verfügbar gemacht wird. Typische ↑[Anlage](#) auf Grundlage der ~ sind ↑[Blockheizkraftwerk](#) oder ↑[Brennstoffzellen](#).

Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz Durch das ~ werden ↑↑**Netzbetreiber** verpflichtet, ↑**KWK-Anlagen** in ihr Netz zu integrieren, wobei der eingespeiste Strom zu festgelegten Preisen vergütet werden muss.

KWK-Anlage Eine ~ ist eine ↑**Anlage** auf Basis der ↑KWK-Technologie. ~ variieren in ihrer Größe von Kleinanlagen zur Haushaltswärmeversorgung hin zu Großanlagen zur Fernwärmeversorgung.

Lastprofil Ein ~ gibt den Verlauf des elektrischen oder thermischen Verbrauchs einer ↑**Einheit** innerhalb eines definierten Zeitraumes an. Für bestimmte Verbrauchergruppen gibt es sogenannte Standardlastprofile, die einen repräsentativen Verbrauch dieser Gruppen darstellen.

Markt Ein elektronischer ~ ist eine informationstechnische Organisationsform, die im Allgemeinen einen Handel zwischen unterschiedlichen Akteuren ermöglicht. In Abhängigkeit der konkreten Ausgestaltung des ~ kann etwa ein Koordinator eingesetzt werden, um Angebot und Nachfrage zu vermitteln und preisoptimal aufeinander abzubilden.

Merit-Order Die ~ stellt die preislich sortierte Reihenfolge von Geboten auf einem Energiemarkt dar.

Merit-Order-Effekt Mit ~ werden die Auswirkungen der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien auf die Strompreise bezeichnet. Da die Teilnahme entsprechender ↑**Einheiten** eine Verschiebung der Merit-Order-Kurve bewirkt, werden die Einnahmen von Stromerzeugern und damit die Kosten von Stromverbrauchern reduziert.

Minutenreserve ~ (auch Tertiärreserve) ist ↑**Regelleistung**, die die zuvor aktivierte ↑**Sekundärregelleistung** ablöst, so dass diese für einen neuen Abruf zur Verfügung steht. Die ~ muss innerhalb von 15 Minuten nach Anforderung durch den ↑**Übertragungsnetzbetreiber** aktiviert oder deaktiviert sein. (Siehe auch ↑**Präqualifikation**).

↑**Netzbetreiber** Ein ~ ist für den sicheren und zuverlässigen Betrieb, d.h. Netzführung und Netzbereitstellung, eines ↑**elektrischen Energieversorgungsnetzes** in einem bestimmten Gebiet verantwortlich. Entsprechend der betriebenen Spannungsebene wird grundsätzlich zwischen ↑**Übertragungsnetzbetreiber** und ↑**Verteilnetzbetreiber** unterschieden.

Photovoltaik ~ bezeichnet den direkten Umwandlungsprozess von solarer Strahlungsenergie in elektrische ↑**Energie** mittels Solarzellen.

Präqualifikation Eine ~ beschreibt einen technischen Prüfungsprozess, dem eine ↑**Einheit** unterzogen werden muss, um an einem ↑**Markt** zugelassen zu werden. Dabei werden technische Mindeststandards gefordert, die sicherstellen, dass die ↑**Einheit** in der Lage ist, die entsprechenden Systemdienstleistungen zu erbringen.

Primärenergieträger Ein ~ ist ein natürlich vorkommendes Medium, dessen gespeicherte ↑**Energie** in nutzbare ↑**Energie** gewandelt werden kann.

Primärregelleistung ~ ist ↑**Regelleistung**, die innerhalb von 30 Sekunden nach einem Störfall aktiviert sein muss und automatisch durch Kraftwerke bereitgestellt wird, die für diesen Zweck einen Anteil ihrer Erzeugungsleistung als Reserve vorhalten. Die ~ hat zum Ziel Änderungen der Netzfrequenz entgegen zu wirken (keine Rückführung auf den Sollwert).

Produkt Ein ~ repräsentiert im Kontext der Elektrizitätswirtschaft ein ↑**Wirkleistungs-**, ↑**Systemdienstleistungs-** oder ↑**Regelleistungsprodukt**.

Regelbarer Ortsnetztransformator (rONT) Bei einem regelbaren Ortsnetztransformator kann das Übersetzungsverhältnis im Betrieb verändert werden, so dass die Spannung gezielt verändert werden kann. Siehe auch ↑**Spannungshaltung**.

Regelenergie Die ~ bezeichnet die Energiemenge, welche durch Aktivierung von ↑**Regelleistung** abgerufen wurde.

Regelleistung ~ ist für den Abruf vorgehaltene Leistung für die Frequenzregelung im ↑**elektrisches Energieversorgungsnetz**. Im Fall einer Unterspeisung des ↑**elektrisches Energieversorgungsnetzes** erfolgt ein Abruf von positiver Regelleistung in Form von Leistungssteigerungen von Erzeugungseinheiten oder Leistungssenkungen von Verbrauchseinheiten. Im Fall einer Überspeisung erfolgt der Abruf von negativer Regelleistung analog. Darüber hinaus wird ~ zeitlich gestaffelt eingesetzt (siehe ↑**Primärregelleistung**, ↑**Sekundärregelleistung**, ↑**Minutenreserve**).

Regelleistungsprodukt Ein ~ dient der marktbasieren Umsetzung der Frequenzhaltung über Regelleistung. Gebote enthalten einen Leistungs- und Arbeitspreis für die getrennte Vergütung von vorzuhaltender Regelleistung bzw. gelieferter Regelenergie.

Regelzone Eine ~ ist ein geografisch abgegrenzter Raum, in dem einem ↑**Übertragungsnetzbetreiber** der zuverlässige Betrieb seines ↑**Übertragungsnetzes** obliegt.

Scheinleistung ~ ist die Gesamtleistung, die einem elektrischen Verbraucher zugeführt wird. Sie setzt sich zusammen aus ↑**Wirkleistung** und ↑**Blindleistung**.

Schwarzstart ~ beschreibt das Anfahren einer Erzeugungsanlage aus dem ausgeschalteten Zustand, ohne dabei auf die Bereitstellung von ↑**Energie** aus einem ↑**elektrischen Energieversorgungsnetz** zurückzugreifen.

Sekundärregelleistung Die ~ ist ↑**Regelleistung**, die unmittelbar nach einem Störfall durch den zuständigen ↑**Übertragungsnetzbetreiber** automatisch aktiviert wird und innerhalb von fünf Minuten vollständig zur Verfügung stehen muss. Die ~ löst die ↑**Primärregelleistung** ab und hat zum Ziel, die Netzfrequenz wieder auf ihren Sollwert zurückzuführen.

Smart Grid Ein ~ repräsentiert ein ↑**elektrisches Energieversorgungsnetz**, dessen Komponenten auf intelligente Weise, d.h. mittels Informations- und Kommunikationstechnologie miteinander vernetzt sind, um eine energie- und kosteneffiziente sowie sichere und zuverlässige Versorgung zu gewährleisten.

Spannungsebene Der Transport und die Verteilung von elektrischer Energie findet über verschiedene ~ statt. Für den Transport elektrischer Energie über längere Strecken werden hohe Spannungen genutzt, da so Leitungsverluste verringert werden können. Für die Verteilung und Nutzung beim Endverbraucher werden hingegen niedrigere Spannungen verwendet.

Spannungshaltung Die ~ ist als ↑**Systemdienstleistung** eine Aufgabe der Netzbetreiber. Ziel ist es, die lokale Spannung innerhalb definierter Grenzen (sogenannte Spannungsbänder) zu halten. Die ~ kann über Wirk- oder Blindleistungseinspeisung gesteuert werden.

Strommarkt siehe ↑**Markt**

Stromnetz siehe ↑**elektrisches Energieversorgungsnetz**

Stufenschalter Ein ~ an einem ↑**Transformator** dient zum Einstellen der sekundärseitigen Spannung und werden zur Spannungsstabilisierung im ↑**Verteilnetz** eingesetzt.

Supervisory Control and Data Acquisition ~ (kurz SCADA) wird zur Steuerung und Überwachung von technischen Prozessen in der elektrischen Energieversorgung eingesetzt. ~ -Systeme stellen grundlegende technische Funktionen zur Steuerung von und Datenerhebung in der elektrischen Energieversorgung bereit.

Supply-Demand-Matching ~ ist ein Ansatz zur Koordination dezentraler ↑**Einheiten**, der auf einen optimalen, netztopologisch lokalen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von elektrischer ↑**Energie** abzielt.

Systemdienstleistungsprodukt Werden Systemdienstleistungen über marktbasierende Mechanismen koordiniert, so werden diese als ~ vermarktet. ↑[Frequenzhaltung](#), ↑[Spannungshaltung](#)

Transformator Ein ~ ist ein Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung, das die Transformation von Spannungen zwischen verschiedenen Spannungsebenen erlaubt.

Übertragungsnetz Ein ~ ist ein Teil des ↑[elektrischen Energieversorgungsnetzes](#) und dient der verlustarmen Übertragung elektrischer ↑[Energie](#) über große Distanzen.

Übertragungsnetzbetreiber Ein ~ ist ein ↑[Netzbetreiber](#) eines ↑[Übertragungsnetzes](#), der zusätzlich zum Netzbetrieb systemsichernde Aufgaben wahrnimmt.

Versorgungsqualität ~ ist ein Oberbegriff zur Bewertung der öffentlichen Energieversorgung, der die Begriffe Versorgungszuverlässigkeit, Spannungsqualität, operative Versorgungssicherheit und Servicequalität (mit Vertrags-, Abrechnungs- und Störungsmanagement) zusammenfasst.

Versorgungszuverlässigkeit ~ definiert die Fähigkeit eines elektrischen Systems, seine Versorgungsaufgaben unter vorgegebenen Bedingungen während einer bestimmten Zeitspanne zu erfüllen.

Verteilnetz Ein ~ ist ein Teil des ↑[elektrischen Energieversorgungsnetzes](#) und dient der lokalen Verteilung elektrischer Energie.

Verteilnetzbetreiber Ein ~ ist ein ↑[Netzbetreiber](#), dessen Verantwortung sich auf seinen Teil des ↑[Verteilnetzes](#) beschränkt.

Virtuelles Kraftwerk Ein ~ ist eine informationstechnische sowie organisatorische Aggregation vornehmlich dezentraler ↑[Einheiten](#) geringerer Leistung. Dabei dient typischerweise ein zentrales ↑[Energiemanagementsystem](#) zur Planung, Steuerung und Überwachung des Anlagenverhaltens.

Windenergieanlage Eine ~ ist eine ↑[Anlage](#), die die kinetische ↑[Energie](#) des Windes in elektrische ↑[Energie](#) wandelt.

Wirkleistung ~ ist im Gegensatz zur ↑[Blindleistung](#) der Teil der ↑[Scheinleistung](#), der von elektrischen Verbrauchern nutzbar ist, d.h. in andere Energieformen umgewandelt werden kann.

Wirkleistungsprodukt Ein \sim definiert für einen (ggf. in Intervalle unterteilten) Zeitraum die durchschnittliche \uparrow elektrische Leistung, die zu definierten Kosten nachgefragt oder angeboten wird. Die gehandelte Energiemenge ist durch Leistung mal Zeit definiert.

Wirkungsgrad Der \sim einer Energiewandlungsanlage ist das Verhältnis zwischen abgegebener und zugeführter Leistung bzw. \uparrow Energie.

Zuverlässigkeit Die \sim einer \uparrow Einheit oder einer Menge von Einheiten trifft eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der diese ein \uparrow Produkt erbringen kann.

LITERATUR

- [ABS14] F. Andren, R. Brundlinger und T. Strasser. „IEC 61850/61499 Control of Distributed Energy Resources: Concept, Guidelines, and Implementation“. In: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 29.4 (Dez. 2014), S. 1008–1017. DOI: [10.1109/TEC.2014.2352338](https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2352338) (siehe S. [136](#))
- [Ada+12] Franziska Adamek u. a. *VDE-Studie Energiespeicher für die Energiewende*. 2012 (siehe S. [2](#))
- [AKM12] H.-Jürgen Appelrath, Henning Kagermann und Christoph Mayer, Hrsg. *Future Energy Grid. (acatech STUDY). Migration to the Internet of Energy*. acatech, Munich, 2012 (siehe S. [1](#), [239](#), [249](#), [252](#), [254](#), [255](#))
- [AMG10] O. Abarrategui, J. Marti und A. Gonzalez. „Constructing the Active European Power Grid“. In: *The Online Journal on Power and Energy Engineering (OJPEE)* 1.4 (2010) (siehe S. [4](#))
- [And+05] Thomas Anderson u. a. „Overcoming the Internet Impasse through Virtualization“. In: *Computer* 38.4 (2005), S. 34–41 (siehe S. [59](#))
- [And+10] Gerrit Anders u. a. „Structuring and Controlling Distributed Power Sources by Autonomous Virtual Power Plants“. In: *Proceedings of the IEEE Power and Energy Student Summit (PESS) 2010*. 2010 (siehe S. [62](#))
- [Ape+12] Rolf Apel u. a. *VDE-Studie Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland*. Frankfurt, 2012 (siehe S. [3](#))
- [ASR13] Gerrit Anders, Florian Siefert und Wolfgang Reif. „A System of Systems Approach to the Evolutionary Transformation of Power Management Systems“. In: *43. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), Informatik angepasst an Mensch, Organisation und Umwelt*. Koblenz: Gesellschaft für Informatik, Köllen Druck+Verlag, 2013 (siehe S. [45](#), [62](#))
- [ASR14] Gerrit Anders, Alexander Schiendorfer und Wolfgang Reif. „Robust Scheduling in a Self-Organizing Hierarchy of Autonomous Virtual Power Plants“. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on „Self-optimisation in Organic and Autonomic Computing Systems“ (SAOS14) in conjunction with ARCS 2014*. Lübeck, 2014 (siehe S. [63](#), [96](#))

- [AWM09] Christopher Auer, Patrick Wüchner und Hermann De Meer. „The Degree of Global-State Awareness in Self-Organizing Systems“. In: *Self-Organizing Systems. Proceedings of the 4th IFIP TC 6 International Workshop, IWSOS 2009*. Zürich: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 125–136. DOI: [10.1007/978-3-642-10865-5_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10865-5_11) (siehe S. 92)
- [AYG96] Hans Akkermans, Frederik Ygge und Rune Gustavsson. „Homebots: Intelligent decentralized services for energy management“. In: *Fourth International Symposium on the Management of Industrial and Corporate Knowledge ISMICK'96*. Rotterdam, NL, Oktober 1996 (siehe S. 5, 45, 52)
- [Bel+11] Régine Belhomme u. a. „The ADDRESS project: Developing Active Demand in smart power systems integrating renewables“. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011. DOI: [10.1109/PES.2011.6038975](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6038975) (siehe S. 45)
- [BF10] Rabie Belkacemi und Ali Feliachi. „Multi-agent design for power distribution system reconfiguration based on the artificial immune system algorithm“. In: *ISCAS 2010 - 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems: Nano-Bio Circuit Fabrics and Systems*. 2010, S. 3461–3464. DOI: [10.1109/ISCAS.2010.5537841](https://doi.org/10.1109/ISCAS.2010.5537841) (siehe S. 59)
- [BFA02] R. Bitsch, W. Feldmann und G. Aumayr. „Virtuelle Kraftwerke - Einbindung dezentraler Energieerzeugungsanlagen“. In: *etz 9* (2002) (siehe S. 3)
- [BJW04] Stefan Bussmann, Nicolas R. Jennings und M.J. Wooldridge. *Multiagent Systems for Manufacturing Control*. Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 289 (siehe S. 36–38, 65, 107)
- [Bla+14] Marita Blank u. a. „Agentenbasierte Vorhaltung und Erbringung von Primärregelleistung“. In: *at – Automatisierungstechnik* (2014), S. 1–17. DOI: [10.1515/auto-2014-1088](https://doi.org/10.1515/auto-2014-1088) (siehe S. 6, 11)
- [Bor14] Marina Borchers. „Dynamische Lastganganalyse mittels Netzähnlichkeit“. Masterarbeit, Universität Oldenburg, 2014 (siehe S. 264)
- [Bra+12] Günther Brauner u. a. *VDE-Studie Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien bis 2020*. Frankfurt, 2012 (siehe S. 1)
- [Bru07] Peter Brucker. *Scheduling algorithms*. 5. Bd. 93. 1. Springer, Juli 2007. DOI: [10.1007/978-3-540-69516-5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69516-5) (siehe S. 28)
- [BS00] Stefan Bussmann und Klaus Schild. „Self-Organizing Manufacturing Control : An Industrial Application of Agent Technology“. In: *Proc. of the 4th Int. Conf. on Multi-agent Systems (ICMAS'2000)*. Boston, MA, USA, 2000, S. 87–94 (siehe S. 43)

- [BS13a] Jörg Bremer und Michael Sonnenschein. „Constraint-handling for optimization with support vector surrogate models“. In: *ICAART 2013*. Barcelona, 2013 (siehe S. [51](#), [104](#), [105](#), [164](#), [196](#))
- [BS13b] Jörg Bremer und Michael Sonnenschein. „Sampling the Search Space of Energy Resources for Self-organized, Agent-based Planning of Active Power Provision“. In: *EnviroInfo*. Hamburg, 2013 (siehe S. [105](#))
- [Büc+14] Jens Büchner u. a. *Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie)*. 2014 (siehe S. [2](#))
- [Bün+09] Ulrich Bünger u. a. *VDE-Studie Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger*. 2009 (siehe S. [2](#))
- [Bun11] Bundesnetzagentur. *Smart Grid und Smart Market. Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems*. 2011 (siehe S. [3](#))
- [Bun12] Bundesumweltministerium. *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2012 (siehe S. [1](#))
- [Cha+11] Archie C. Chapman u. a. „A unifying framework for iterative approximate best-response algorithms for distributed constraint optimization problems“. In: *The Knowledge Engineering Review* 26.04 (Nov. 2011), S. 411–444. DOI: [10.1017/S0269888911000178](#) (siehe S. [46](#), [99](#), [130](#))
- [CIS1111] Cisco Systems, Inc., International Business Machines Corporation, Southern California Edison Company. *Smart Grid Reference Architecture*. 2011 (siehe S. [92](#))
- [Cra08] Valentin Crastan. *Elektrische Energieversorgung, Teil 2*. Springer Verlag, 2008 (siehe S. [10](#))
- [DZ13] Ed Durfee und Shlomo Zilberstein. In: *Multiagent Systems*. Hrsg. von Gerhard Weiss. MIT Press, 2013. Kap. Multiagent Planning, Control, and Execution (siehe S. [42](#), [143](#))
- [EG00] Matthias Ehrgott und Xavier Gandibleux. „A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization“. In: *OR Spektrum* 22 (2000), S. 425–460 (siehe S. [9](#))
- [ent11] entsoe (European Network of Transmission System Operators for Electricity). *THE HARMONISED ELECTRICITY MARKET ROLE MODEL*. 2011 (siehe S. [17](#), [244](#))

- [ES99] *The ISES Project*. Techn. Ber. EnerSearch AB, 1999 (siehe S. 52)
- [Eur06] Europäische Kommission. *European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. 2006 (siehe S. 3)
- [FB12] Ali Feliachi und Rabie Belkacemi. „Intelligent Multi-agent system for Smart Grid Power Management“. In: *Smart Power Grids 2011*. Hrsg. von A. Keyhani und M. Marwali. Springer, 2012, S. 515–542 (siehe S. 47, 59)
- [Fer14] Raffaella Ferrari. „Untersuchungen für die Entwicklung einer Netzähnlichkeits-Heuristik für die dynamische Lastgangsanalyse“. Masterarbeit, Universität Oldenburg, 2014 (siehe S. 264)
- [FY05] Boi Faltings und Makoto Yokoo. „Introduction: Special Issue on Distributed Constraint Satisfaction“. In: *Artificial Intelligence* 161.1-2 (Jan. 2005), S. 1–5. DOI: [10.1016/j.artint.2004.10.001](https://doi.org/10.1016/j.artint.2004.10.001) (siehe S. 34)
- [Gib+94] Michael Gibbons u. a. *The new production of knowledge*. Bd. 32. 4. Sage Publications, 1994, S. 599–614. DOI: [10.1177/0306312702032004004](https://doi.org/10.1177/0306312702032004004) (siehe S. 15, 20)
- [Gra+79] R.L. Graham u. a. „Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey.“ In: *Annals of Discrete Mathematics* 5 (1979), S. 287–326 (siehe S. 27)
- [Gus99] Rune Gustavsson. „Agents with Power“. In: *Communications of the ACM* 42.3 (1999), S. 41–47 (siehe S. 5, 45, 52)
- [Hak83] Herman Haken. *Synergetik*. 2. Aufl. Springer Verlag, 1983 (siehe S. 8)
- [Ham+07] D.J. Hammerstrom u. a. *Pacific Northwest GridWise™ Testbed Demonstration Projects Part I. Olympic Peninsula Project*. Techn. Ber. 2007 (siehe S. 60)
- [Hat08] Nikos D. Hatziaargyriou. „Smart Agent Technology to Help DER Integrate Markets: Experiments in Greece“. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on the Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*. December. Nizza, Frankreich, 2008 (siehe S. 47, 55)
- [Hat14] Nikos Hatziaargyriou, Hrsg. *Microgrids*. Wiley, 2014 (siehe S. 50, 55)
- [HBS13] Christian Hinrichs, Jörg Bremer und Michael Sonnenschein. „Distributed Hybrid Constraint Handling in Large Scale Virtual Power Plants“. In: *IEEE ISGT 2013*. Kopenhagen, Dänemark: IEEE Power & Energy Society, 2013 (siehe S. 106)
- [Hen98] Herwig Henseler. „Aktive Ablaufplanung mit Multiagenten“. Diss. Universität Oldenburg, 1998 (siehe S. 30)

- [Hev+04] Alan R. Hevner u. a. „Design Science in Information Systems Research“. In: *MIS Quarterly* 28.1 (2004), S. 75–105 (siehe S. 20, 24, 259)
- [Hin14] Christian Hinrichs. „Selbstorganisierte Einsatzplanung dezentraler Akteure im Smart Grid“. Diss. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2014. DOI: [10.13140/2.1.1792.0008](https://doi.org/10.13140/2.1.1792.0008). URN: [urn:nbn:de:gbv:715-oops-20410](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:715-oops-20410) (siehe S. 9, 47, 63, 97, 98, 101, 111, 127, 166, 171)
- [HL05] Bryan Horling und Victor Lesser. „A survey of multi-agent organizational paradigms“. In: *The Knowledge Engineering Review* 19.04 (Nov. 2005), S. 281. DOI: [10.1017/S0269888905000317](https://doi.org/10.1017/S0269888905000317) (siehe S. 47, 61)
- [HLS14] Christian Hinrichs, Sebastian Lehnhoff und Michael Sonnenschein. „A Decentralized Heuristic for Multiple-Choice Combinatorial Optimization Problems“. In: *Operations Research Proceedings 2012. Selected Papers of the International Annual Conference of the German Operations Research Society (GOR)*. Or 2012. Springer, 2014, S. 297–302. DOI: [10.1007/978-3-319-00795-3_43](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00795-3_43) (siehe S. 45, 98, 170, 171)
- [HMB08] Richard Holzer, Hermann De Meer und Christian Bettstetter. „On Autonomy and Emergence in Self-Organizing Systems“. In: *SelfOrganizing Systems. Lecture Notes in Computer Science* 51.1 (2008). Hrsg. von K. Hummel und J. Sterbenz, S. 157–169. DOI: [10.1007/978-3-540-92157-8_14](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92157-8_14) (siehe S. 8)
- [Hol+13] Raphael Hollinger u. a. *Speicherstudie 2013*. Techn. Ber. Fraunhofer ISE, 2013 (siehe S. 2)
- [HS14a] Christian Hinrichs und Michael Sonnenschein. „The Effects of Variation on Solving a Combinatorial Optimization Problem in Collaborative Multi-Agent Systems“. In: *Multiagent System Technologies*. Hrsg. von Jörg P. Müller, Michael Weyrich und Ana L.C. Bazzan. Bd. 8732. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014, S. 170–187. DOI: [10.1007/978-3-319-11584-9_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11584-9_12) (siehe S. 103, 190)
- [HS14b] Christian Hinrichs und Michael Sonnenschein. „The Effects of Variation on Solving a Combinatorial Optimization Problem in Collaborative Multi-Agent Systems“. In: *Multiagent System Technologies*. Hrsg. von Jörg P. Müller, Michael Weyrich und Ana L.C. Bazzan. Bd. 8732. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014, S. 170–187. DOI: [10.1007/978-3-319-11584-9_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11584-9_12) (siehe S. 171)
- [Hül+12] Claas Hülsen u. a. *Anpassungs- und Investitionserfordernisse der Informations- und Kommunikationstechnologie zur Entwicklung eines dezentralen Energiesystems (Smart Grid)*. Techn. Ber. Bonn: KEMA Consulting GmbH, 2012, S. 223 (siehe S. 2)

- [Int08] International Electrotechnical Commission (IEC). *Publicly Available Specification (PAS) 62559 IntelliGrid Methodology for Developing Requirements for Energy Systems*. 2008 (siehe S. [16](#), [17](#), [89](#))
- [Int10] International Electrotechnical Commission (IEC). *IEC 61850 Std. Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*. 2010 (siehe S. [136](#))
- [INT11] INTEGRAL-Konsortium. *Deliverable D9.4*. Techn. Ber. 2011 (siehe S. [54](#))
- [Kam+10] René Kamphuis u. a. „Architectural design and first results evaluation of the PowerMatching City field test“. In: *4th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*. Albuquerque: EPRI, 2010 (siehe S. [54](#))
- [Kno+14] Kaspar Knorr u. a. *Kombikraftwerk 2 Abschlussbericht*. Techn. Ber. August. Kassel: Fraunhofer IWES, 2014 (siehe S. [4](#))
- [Köh09] Michael Köhler-Bußmeier. *Koordinierte Selbstorganisation und selbstorganisierte Koordination (Habilitationsschrift). Eine formale Spezifikation reflexiver Selbstorganisation in Multiagentensystemen unter spezieller Berücksichtigung der sozialwissenschaftlichen Perspektive*. Universität Hamburg, 2009 (siehe S. [8](#))
- [Kok+05] Koen Kok u. a. „Distributed Control in the Electricity Infrastructure“. In: *Proceedings of the International Conference on Future Power Systems*. 2005 (siehe S. [47](#))
- [Kok10] Koen Kok. „Multi-Agent Coordination in the Electricity Grid , from Concept towards Market Introduction“. In: *Ninth Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems AAMAS 2010*. Toronto, Canada, 2010, S. 1681–1688 (siehe S. [54](#))
- [Kok13] Koen Kok. „PowerMatcher“. Diss. Vrije Universiteit Amsterdam, 2013 (siehe S. [54](#))
- [Kor+14] Felix Korb u. a. „Data Access-Point Manager – definierte Informationsflüsse für Betriebsführung und Markt“. In: *energiewirtschaftliche tagesfragen* 64.3 (2014) (siehe S. [243](#), [257](#))
- [KS07] Anne-Marie Kermarrec und Maarten van Steen. „Gossiping in Distributed Systems“. In: *ACM SIGOPS Operating Systems Review - Gossip-based computer networking* 41.5 (2007), S. 2–7 (siehe S. [60](#))
- [KS10] Jinu Kurian und Kamil Sarac. „A survey on the design, applications, and enhancements of application-layer overlay networks“. In: *ACM Computing Surveys* 43.1 (Nov. 2010), S. 1–34. DOI: [10.1145/1824795.1824800](https://doi.org/10.1145/1824795.1824800) (siehe S. [60](#))

- [Leh+13] Sebastian Lehnhoff u. a. „Towards a Mapping of Self-Organization Properties and Non-Functional Requirements in the Operation of Future Smart Grids“. In: *7th International Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS)*. Palma, 2013 (siehe S. 4)
- [Leh10] Sebastian Lehnhoff. *Dezentrales vernetztes Energiemanagement - Ein Ansatz auf Basis eines verteilten Realzeit-Multiagentensystems*. Vieweg + Teubner, 2010 (siehe S. 45, 50, 57)
- [Lyn96] Nancy A. Lynch. *Distributed Algorithms*. Hrsg. von Richard Zurawski. Bd. 13. Morgan Kaufmann series in data management systems. Morgan Kaufmann, 1996. Kap. Chapter 14. DOI: [10.1016/S1571-0653\(04\)00444-5](https://doi.org/10.1016/S1571-0653(04)00444-5) (siehe S. 8)
- [Mat89] Friedeman Mattern. *Verteilte Basisalgorithmen*. Bd. 226. Informatik-Fachberichte. Springer, 1989. DOI: [10.1007/978-3-642-84002-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84002-9) (siehe S. 8)
- [MMW04] Christian Müller-Schloer, Christoph von der Malsburg und Rolf P. Würtz. „Organic Computing“. In: *Informatik-Spektrum* 27.4 (Aug. 2004), S. 2–6. DOI: [10.1007/s00287-004-0409-6](https://doi.org/10.1007/s00287-004-0409-6) (siehe S. 40, 91)
- [MP93] Jörg P. Müller und Markus Pischel. „InteRRaP: eine Architektur zur Modellierung flexibler Agenten.“ In: *Verteilte Künstliche Intelligenz – Methoden und Anwendungen (Distributed Artificial Intelligence – Methods and Applications)*. Hrsg. von Jürgen Müller. Mannheim: BI Wissenschaftsverlag, 1993. Kap. InteRRaP: S. 45–54 (siehe S. 38)
- [MSR10] Tomasz Michalak, Jacek Sroka und Talal Rahwan. „A Distributed Algorithm for Anytime Coalition Structure Generation“. In: *Proc of 9th Int Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*. Aamas. Toronto, Canada: International Foundation for Autonomous Agents und Multiagent Systems, 2010 (siehe S. 8)
- [Mül99] Jörg P. Müller. „The Right Agent (Architecture) to Do the Right Thing“. In: *Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages*. Hrsg. von Jörg P. Müller, Anand S. Rao und Munindar P. Singh. Bd. 1555. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 1999, S. 211–225. DOI: [10.1007/3-540-49057-4_14](https://doi.org/10.1007/3-540-49057-4_14) (siehe S. 38, 132)
- [Neg07] Rudi R. Negenborn. „Multi-Agent Model Predictive Control with Applications to Power Networks“. Diss. Technische Universiteit Delft, 2007 (siehe S. 234, 266)
- [Nie+12] Astrid Nieße u. a. „Market-based self-organized provision of active power and ancillary services: An agent-based approach for Smart Distribution Grids“. In: *Complexity in Engineering (COMPENG), 2012*. Aachen, 2012 (siehe S. 6)

- [Nie+14a] Astrid Nieße u. a. „Conjoint Dynamic Aggregation and Scheduling Methods for Dynamic Virtual Power Plants“. In: *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FEDCSIS)*. Hrsg. von Maria Ganzha, Leszek A. Maciaszek und Marcin Paprzycki. Bd. 2. Annals of Computer Science and Information Systems. IEEE, 2014, S. 1505–1514. DOI: [10.15439/2014F76](https://doi.org/10.15439/2014F76) (siehe S. 8, 165, 166)
- [Nie+14b] Astrid Nieße u. a. „Dynamic Virtual Power Plants in Future Energy Grids: Defining the Gap to the Field“. In: *VDE-Kongress »Smart Cities«*. Frankfurt, 2014 (siehe S. 237)
- [NIST10] The Smart Grid Interoperability Panel Cyber Security Working Group. *Introduction to NISTIR 7628 Guidelines for Smart Grid Cyber Security*. 2010 (siehe S. 248, 255)
- [NS13] Astrid Nieße und Michael Sonnenschein. „Using Grid Related Cluster Schedule Resemblance for Energy Rescheduling - Goals and Concepts for Rescheduling of Clusters in Decentralized Energy Systems“. In: *SMARTGREENS*. Aachen: SciTePress, 2013 (siehe S. 264)
- [NTS13] Astrid Nieße, Martin Tröschel und Michael Sonnenschein. „Designing Dependable and Sustainable Smart Grids - How to Apply Algorithm Engineering to Distributed Control in Power Systems“. In: *Environmental Modelling & Software* (2013). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.003> (siehe S. 15, 17, 22)
- [Pad04] N.P. Padhy. „Unit Commitment - A Bibliographical Survey“. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 19.2 (Mai 2004), S. 1196–1205. DOI: [10.1109/TPWRS.2003.821611](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.821611) (siehe S. 50)
- [PB05] Christian Prehofer und Christian Bettstetter. „Self-Organization in Communication Networks : Principles and Design Paradigms“. In: *IEEE Communications Magazine* 43.7 (2005), S. 78–85. DOI: [10.1109/MCOM.2005.1470824](https://doi.org/10.1109/MCOM.2005.1470824) (siehe S. 40)
- [Peñ06] Yoseba L. Peña Landaburu. „Optimal Allocation and Scheduling of Demand in Deregulated Energy Markets“. Diss. Universität Wien, 2006 (siehe S. 32)
- [PFR09] M. Pipattanasomporn, H. Feroze und S. Rahman. „Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation“. In: *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition* (2009), S. 1–8. DOI: [10.1109/PSCE.2009.4840087](https://doi.org/10.1109/PSCE.2009.4840087) (siehe S. 47)
- [Pin95] Michael Pinedo. *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. 1. Prentice-Hall International (UK) Limited, Kondon, 1995 (siehe S. 27, 30)

- [Pop76] Karl Raimund Popper. *Die Einheit der Gesellschaftswissenschaften*, Bd. 4. J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), 1976 (siehe S. 13)
- [Pou13] Evangelos Pournaras. „Multi-level Reconfigurable Self-organization in Overlay Services“. Diss. TU Delft, 2013 (siehe S. 51, 59, 96)
- [Psi99] Stathis Psillos. „Scientific Realism: How Science Tracks Truth“. In: *Metascience An International Review Journal for the History Philosophy and Social Studies of Science*. Philosophical Issues in Science 10.3 (1999), S. 142–147 (siehe S. 13)
- [Put75] Hilary Putnam. *Mathematics, Matter and Method*. Cambridge: Cambridge University Press, 1975 (siehe S. 14)
- [Ram+12] Sarvapali D Ramchurn u. a. „Putting the 'Smarts' into the Smart Grid: a Grand Challenge for Artificial Intelligence“. In: *Communications of the ACM* 55.4 (2012), S. 86–97. DOI: [10.1145/2133806.2133825](https://doi.org/10.1145/2133806.2133825) (siehe S. 5)
- [Ric+06a] Olivier Richardot u. a. „Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Using Distributed Generation“. In: *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. Texas, USA, 2006, S. 1–6 (siehe S. 57)
- [Ric+06b] Urban Richter u. a. „Towards a Generic Observer/Controller Architecture for Organic Computing“. In: *INFORMATIK 2006: Informatik für Menschen!* Hrsg. von Christian Hochberger und Rüdiger Liskowsky. Bd. P-93. LNI. Bonner Köllen Verlag, Oktober 2006, S. 112–119 (siehe S. 38, 40, 41)
- [Ric+09] Olivier Richardot u. a. „Optimal Location of Pilot Buses by a Genetic Algorithm Approach for a Coordinated Voltage Control in Distribution Systems“. In: *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. Bucharest, Romania, 2009, S. 1–7 (siehe S. 57)
- [Ric06] Olivier Richardot. „Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée“. Diss. Université de Grenoble, Frankreich, 2006 (siehe S. 45, 56)
- [RN10] Stuart Russel und Peter Norvig. *Artificial Intelligence. A Modern Approach*. Third edition. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2010, S. 1132 (siehe S. 4, 32, 35)
- [Rom+10] P. Romanos u. a. „Single Agents in Smart Grids“. In: *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*. Nov. 2010, S. 1–9. DOI: [10.1049/cp.2010.0907](https://doi.org/10.1049/cp.2010.0907) (siehe S. 51, 56)
- [RR12] Suzanne Robertson und James Robertson. *Mastering the Requirements Process*. Third Edition. Addison-Wesley, 2012, S. 541 (siehe S. 89)

- [RRJ09] Talal Rahwan, Sarvapali D. Ramchurn und Nicholas R. Jennings. „An Anytime Algorithm for Optimal Coalition Structure Generation“. In: *Journal of Artificial Intelligence Research* 34.1 (2009), S. 521–567 (siehe S. 45)
- [San09] Peter Sanders. „Algorithm Engineering – An Attempt at a Definition“. In: *Efficient Algorithms*. Springer, 2009, S. 321–340 (siehe S. 20, 21)
- [SB01] Kurt Sundermeyer und Stefan Bussmann. „Einführung der Agententechnologie in einem produzierenden Unternehmen - Ein Erfahrungsbericht“. In: *Wirtschaftsinformatik* 43.2 (2001), S. 135–142 (siehe S. 43)
- [SB07] Klaus Schild und Stefan Bussmann. „Self-Organization in Manufacturing Operations“. In: *Communications of the ACM* 50.12 (2007), S. 74–79 (siehe S. 43)
- [SGK05] Giovanna Di Marzo Serugendo, Marie-Pierre Gleizes und Anthony Karageorgos. „Self-organization in multi-agent systems“. In: *The Knowledge Engineering Review* 20.2 (2005), S. 165–189. DOI: [10.1017/S0269888905000494](https://doi.org/10.1017/S0269888905000494) (siehe S. 8, 92)
- [SL09] Yoav; Shoham und Kevin Leyton-Brown. *Multigent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press, 2009 (siehe S. 32, 102)
- [Son+12] Michael Sonnenschein u. a. „Dezentrale und selbstorganisierte Koordination in Smart Grids“. In: *VDE-Kongress 2012 Smart Grid*. VDE. Stuttgart, 2012 (siehe S. 67)
- [Son+15] Michael Sonnenschein u. a. In: *ICT Innovations for Sustainability, Springer Advances in Intelligent Systems and Computing*. Hrsg. von Lorenz M. Hilty und Berndt Aebischer. Springer, 2015. Kap. Supporting Renewable Power Supply by Distributed Coordination of Energy Resources (siehe S. 7, 265)
- [SR12] Jan-Philipp Steghöfer und Wolfgang Reif. „Die Guten, die Bösen und die Vertrauenswürdigen – Vertrauen im Organic Computing“. In: *Informatik-Spektrum* 35.2 (Feb. 2012), S. 119–131. DOI: [10.1007/s00287-012-0600-0](https://doi.org/10.1007/s00287-012-0600-0) (siehe S. 62)
- [Ste+10] Jan-Philipp Steghöfer u. a. „Trustworthy Organic Computing Systems: Challenges and Perspectives“. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Autonomic and Trusted Computing (ATC 2010)*. Springer, 2010, S. 62–76 (siehe S. 63)
- [Ste+14] Jan-Philipp Steghöfer u. a. „PosoMAS : An Extensible , Modular SE Process for Open Self-organising Systems“. In: *PRIMA 2014: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Hrsg. von Hoa Khanh Dam u. a. Gold Coast, Australien: Springer, 2014. Kap. PosoMAS : S. 1–17 (siehe S. 40)

- [Tal09] El-Ghazali Talbi. *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, Inc., 2009 (siehe S. 98, 130)
- [TB01] V. T'Kindt und J.-C. Billaut. „Multicriteria Scheduling Problems: A Survey“. In: *Rairo Operations Research* 35 (2001), S. 143–163 (siehe S. 28)
- [TGD13] Jörn Trefke, José González und Christian Dänekas. „IEC/PAS 62559-based Use Case Management for Smart Grids“. In: *Standardization in Smart Grids*. Springer, 2013 (siehe S. 19, 238, 248)
- [Töp12] Armin Töpfer. *Erfolgreich Forschen: Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden*. Springer, 2012 (siehe S. 14)
- [Trö10] Martin Tröschel. *Aktive Einsatzplanung in holonischen Virtuellen Kraftwerken*. Oldenburg: OLWIR, Oldenburger Verl. für Wirtschaft, Informatik und Recht, 2010 (siehe S. 29, 61, 96)
- [VDI09] *VDI/VDE 2653: Blatt 1 Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen*. 2009 (siehe S. 5)
- [Vrb+14] Pavel Vrba u. a. „A Review of Agent and Service-Oriented Concepts Applied to Intelligent Energy Systems“. In: *IEEE Transactions of Industrial Informatics* 10.3 (2014), S. 1890–1903 (siehe S. 46, 54)
- [Wei13] Gerhard Weiss. *Multiagent Systems*. MIT Press, 2013, S. 867 (siehe S. 38)
- [Wit+09] Rolf Witzmann u. a. „Verbesserung der Spannungsqualität bei dezentraler Einspeisung durch gesteuerte Wechselrichter“. In: *ETG-Kongress 2009*. 2009 (siehe S. 17, 57)
- [WJ95] Michael Wooldridge und Nicolas R. Jennings. „Intelligent agents: theory and practice“. In: *The Knowledge Engineering Review* 10.2 (1995), S. 115–152 (siehe S. 35)
- [Woo13] Michael Wooldridge. In: *Multiagent Systems*. Hrsg. von Gerhard Weiss. MIT Press, 2013. Kap. Intelligent Agents, S. 867 (siehe S. 39)
- [Yok01] Makoto Yokoo. *Distributed constraint satisfaction: foundations of cooperation in multi-agent systems*. London, UK: Springer-Verlag, 2001 (siehe S. 32, 35)
- [ZV12] Gulnara Zhabelova und Valeriy Vyatkin. „Multiagent Smart Grid Automation Architecture Based on IEC 61850/61499 Intelligent Logical Nodes“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59 (5 2012), S. 2351–2362. DOI: [10.1109/TIE.2011.2167891](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2167891) (siehe S. 45)