



Fakultät II – Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften
Department für Informatik

Aktive Einsatzplanung in holonischen Virtuellen Kraftwerken

Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Inform. Martin Tröschel

2. November 2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Energie des Oldenburger Instituts für Informatik OFFIS. Ohne die uneingeschränkte, ausdauernde, aufmunternde, erleuchtende und zuweilen zynisch-sarkastische Unterstützung einer ganzen Reihe von Personen, denen ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte, wäre dies nicht möglich gewesen.

Zunächst gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Hans-Jürgen Appellrath für die umsichtige Betreuung und die bereichernden Diskussionen, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Ich danke ihm an dieser Stelle herzlich für die Möglichkeit, einen Beitrag zum noch jungen Feld der Energieinformatik leisten zu dürfen. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr. Jörg P. Müller, der als Zweitprüfer wertvolle und zielgerichtete Anregungen zum rechten Zeitpunkt beigesteuert hat. Herrn Prof. Dr. Michael Sonnenschein danke ich für die Übernahme der Leitung der Prüfungskommission und insbesondere auch für die vertrauensvolle Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen (FEN) und darüber hinaus. Frau Dr. Ute Vogel möchte ich für die Bereitschaft danken, diese Arbeit als Mitglied der Prüfungskommission kritisch zu durchleuchten.

Den externen Partnern insbesondere im FEN danke ich für die Geduld und Ausdauer, mit der sie einen Informatiker in die Welt der dezentralen Energieversorgung eingeführt haben. Besonderer Dank geht an Magnus Pielke von der TU Braunschweig, Fang Yang und Markus Messer von der FH Hannover, Benjamin Hühnerbein von der LU Hannover sowie Nadine Senkel vom CUTEC für die vielen Diskussionen und die Beiträge zur Evaluationsumgebung. Darüber hinaus möchte ich Mario Korte von der Uni Oldenburg für die gemeinsamen Arbeiten zur Ansteuerung von BHKW danken, die in Teilen ebenfalls in die Evaluationsumgebung eingeflossen sind. An dieser Stelle sei auch dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die Bereitschaft gedankt, einen interdisziplinären Forschungsverbund wie den FEN zu ermöglichen und zu unterstützen.

Weiterer Dank gilt OFFIS für die Möglichkeit, diese Arbeit im Rahmen eines Promotionsstipendiums sechs Monate lang intensiv voranbringen und abschließen zu können. Meinem Bereichsleiter Christoph Mayer danke ich für die eingeräumten Freiräume und die Chance, den Aufbau eines herausfordernden Themenfelds mitzuerleben und mitzugestalten. Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen Tanja Schmedes, Fabian Grüning, René Schuhmann und Ludger Winkels danke ich für die herzliche Aufnahme und die vielen Gespräche auch bzw. gerade in den Kaffeepausen. Herzlich bedanken möchte ich mich bei Mathias Uslar, von dessen in Zynismus gekleidete Weisheit ich viel profitieren konnte und der mich mit den Arbeiten von Jorge Cham bekannt machte, die sich oft genug als zutreffend erwiesen haben - thank you, good sir. Darüber hinaus danke ich Petra Beenken, Jan Stefan Addicks, Matthias Postina und José González, die sich als Mitglieder meines Erfolgsteams auch von den regelmäßigen Berichten über schleppenden Fortschritt nicht entmutigen ließen (und mich damit sehr ermutigt haben). Besonderer Dank gilt Astrid Nieße, die als Gruppenleiterin und gute Freundin stets ein offenes

Ohr und einen guten Ratschlag parat hat sowie Carsten Wissing, der nicht nur schlaue Algorithmen schreiben kann. Ich bedanke mich auch bei den aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen aus dem Bereich Energie, mit denen zu arbeiten ich das Vergnügen habe (oder hatte), und insbesondere bei Sebastian Beer, von dessen Diplomarbeit ich profitieren durfte.

Der größte Dank gilt schließlich meiner Familie, ohne deren uneingeschränkte Unterstützung ich diese Arbeit nicht hätte realisieren können. Meinen Schwiegereltern Sigrid und Gunther, meiner Schwägerin Konni sowie meinen Brüdern David und Jimmy danke ich für ihre großzügige Hilfsbereitschaft vor allem bei der Kinderbetreuung. Meiner Mutter Christine gilt zusätzlich großer Dank für den unermüdlichen Willen und die Kraft, uns mit Rat und Tat zur Seite zu stehen. Und meiner Frau Kerstin und meinem Sohn Jakob kann ich schließlich nicht genug danken - ihr seid mein Leben.

– Martin Tröschel

Zusammenfassung

Die zukünftige Energieversorgung wird sich durch eine wachsende Anzahl dezentraler Energiesysteme auszeichnen, die die historisch gewachsenen Strukturen zunehmend durchdringen und teilweise ablösen werden. Diese im Sinne einer nachhaltigen Umgestaltung der Energieversorgung wünschenswerte Entwicklung erfordert aber geeignete Energiemanagementsysteme, um den Übergang von einer zentralen hin zu einer dezentralen Struktur zuverlässig, d.h. ohne Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit, zu gestalten. Zentrale Aufgabe des Energiemanagements ist dabei der laufende Abgleich von (elektrischer) Erzeugung¹ und (elektrischem) Verbrauch, um die Unsicherheit, die sich aus der bislang ungesteuerten Einspeisung elektrischer Energie durch dezentrale Anlagen in das Stromnetz ergibt, einzuschränken und damit einerseits die Notwendigkeit sogenannter Schattenkraftwerke zu begrenzen und andererseits den Bedarf an Regenergie zu minimieren.

Virtuelle Kraftwerke leisten einen wertvollen Beitrag hinsichtlich der Integration und Koordination dezentraler Anlagen. Allerdings steht in den bisherigen Untersuchungen im Allgemeinen weniger die Zuverlässigkeit, als vielmehr die Optimierung des Einsatzes der dezentralen Anlagen nach ökonomischen bzw. ökologischen Kriterien im Vordergrund. Insbesondere mangelt es an Konzepten, wie im laufenden Betrieb auf Prognoseungenauigkeiten und Ausfälle dezentraler Energiesysteme so reagiert werden kann, dass ein aus Sicht des Gesamtsystems stabiler Zustand erhalten bleibt. Für die Realisierung einer solchen reaktiven, d.h. auf Ereignisse reagierenden Komponente werden im Rahmen dieser Arbeit Konzepte aus dem Bereich der Verteilten Künstlichen Intelligenz untersucht und auf dezentrales Energiemanagement übertragen.

Konzeptionelle Anknüpfungspunkte für den Umgang mit zur Laufzeit auftretenden Ereignissen bieten dabei ausgewählte Planungsansätze aus dem Kontext der industriellen Fertigung und der Logistik, die einerseits eine schnelle Reaktion auf Veränderungen im Betriebsablauf ermöglichen und andererseits die langfristige Qualität der Planung berücksichtigen. Mit der agentenbasierten *aktiven Einsatzplanung* wird ein Konzept zur reaktiven Koordination dezentraler Energiewandlungsanlagen vorgestellt, das auf ebendieser Kopplung reagierenden Verhaltens und vorausschauender Optimierung basiert. Durch eine Erweiterung des entwickelten Ansatzes zu einem *holonischen Virtuellen Kraftwerk*, das dezentrale Anlagen zu selbstähnlichen Virtuellen Ressourcen bündelt und hierarchisch anordnet, wird darüber hinaus eine insbesondere hinsichtlich des Kommunikationsaufwands verbesserte Skalierbarkeit des dezentralen Energiemanagementsystems angestrebt.

¹ Physikalisch betrachtet kann Energie im Sinne des Energieerhaltungssatzes natürlich weder erzeugt noch verbraucht, sondern nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden. Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit allerdings des öfteren von Energieerzeugung respektive -verbrauch die Rede sein.

Abstract

Distributed energy resources (DER) will play a vital role in future power supply systems. In terms of sustainability, distributed power plants relying on renewable energy or efficient energy conversion add to an optimised generation and transmission of electric power and allow for a reduction of conventional power plants. However, a reliable coordination of DER is an important prerequisite for a successful transformation of the historically evolved centralised power supply system into an efficient and distributed one. In order to minimise the necessity of balancing energy and conventional power capacities, energy management systems can be deployed to continuously supervise and control DER.

In this context, virtual power plants (VPP) contribute to a successful integration and coordination of DER. A main topic in current work regarding VPP is the optimisation of the operation of DER in terms of economical or ecological criteria. However, the requirements and challenges of a reliable supervision and control of distributed power plants have been neglected. This thesis therefore proposes a distributed reactive scheduling system especially allowing for the handling of unexpected events such as the technical failure of single DER.

Similar problems exist both in logistics and production planning and control. In the course of this thesis, selected agent-based scheduling systems allowing for both an adequate reactivity to unexpected events and a long-term optimisation of schedules are reviewed. The results of these analyses are then incorporated into the development of the agent-based *active scheduling*, comprising both reactive and deliberative scheduling for DER. In order to improve the scalability of this distributed energy management system, *holonic VPP* are introduced. Holonic VPP allow for a simple aggregation of DER into hierarchically structured virtual resources, thus reducing the communication overhead of the coordination.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation: Dezentrale Energieversorgung	1
1.2	Problemstellung: Reaktive Einsatzplanung in VK	3
1.3	Zielsetzung: Verteilte reaktive Einsatzplanung in VK	5
1.4	Lösungsansatz: Holonische Multiagentensysteme	7
1.5	Aufbau der Arbeit	8
2	Grundlagen	9
2.1	Dezentrale Energieversorgung	9
2.2	Virtuelle Kraftwerke	19
2.3	Intelligente Agenten und Multiagentensysteme	28
2.4	Zusammenfassung	42
3	Verwandte Arbeiten	43
3.1	Koordination von DER	43
3.2	Kooperative Transportplanung	54
3.3	Aktive Ablaufplanung	58
3.4	Zusammenfassung	72
4	Aktive Einsatzplanung	75
4.1	Das reaktive Einsatzplanungsproblem <i>RSP</i>	75
4.2	Problemzerlegung durch Konsistenzgrade	89
4.3	Das Konzept der aktiven Einsatzplanung	91
4.4	Das Multiagentensystem der aktiven Einsatzplanung	95
4.5	Zusammenfassung und Diskussion	116
5	Holonische Virtuelle Kraftwerke	121
5.1	Das holonische Virtuelle Kraftwerk	122
5.2	Aktive Einsatzplanung in holonischen VK	124
5.3	Adaptive Virtualisierung von DER	131
5.4	Zusammenfassung und Diskussion	140
6	Evaluation	143
6.1	Prototypische Implementierung	143
6.2	Einfluss unterschiedlicher Parameterbelegungen	148
6.3	Empirischer Performanzvergleich mit zentraler Planung	164

7 Zusammenfassung und Ausblick	171
7.1 Zusammenfassung der Arbeit	171
7.2 Abschließende Bewertung des Lösungsansatzes	173
7.3 Forschungsbedarf und Erweiterungsmöglichkeiten	176
A Simulationsergebnisse	179
A.1 Vorstudie „Deliberative Fahrplanverbesserung“	179
A.2 Parameterstudie „Gewichtung des Nutzens“	180
A.3 Parameterstudie „Sozial intelligente Entscheidungsfindung“	181
A.4 Parameterstudie „Adaptive Reorganisation“	182
A.5 Empirischer Performanzvergleich	184
Glossar	185
Abkürzungen	193
Literatur	195
Index	211

The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not 'Eureka!' but 'That's funny...'

– Isaac Asimov

1 Einleitung

Dezentrale Energiewandlungsanlagen (kurz¹: DER, von engl.: *distributed energy resources*) spielen in der Energieversorgung eine zunehmend wichtigere Rolle. Treibende Faktoren dieser Entwicklung sind unter anderem technologische Fortschritte in der Nutzbarmachung erneuerbarer Energieträger, sich ändernde politische Rahmenbedingungen und ein gestiegenes Nachhaltigkeitsbewusstsein innerhalb der Gesellschaft. Insbesondere die Veröffentlichung des vierten sogenannten Assessment Reports zum Klimawandel durch das Intergovernmental Panel on Climate Change (kurz: IPCC) im Jahr 2007 hat einen gesamtgesellschaftlichen Diskurs hinsichtlich einer klimaverträglichen Energieversorgung befördert. Die Experten des IPCC haben in ihrem Bericht dabei nicht nur (menschengemachte) Ursachen und Auswirkungen der Klimaveränderung aufbereitet, sondern auch Möglichkeiten dargestellt, diesen zu begegnen. Dabei wurde die Energieversorgung einerseits als derjenige Sektor mit dem größten prozentualen Anstieg an klimaschädlichen Emissionen seit 1970 identifiziert [IPC07], andererseits - oder gerade deswegen - aber auch als Bereich, der durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger und den Einsatz effizienter dezentraler Energiewandlungstechnologien wie der Kraft-Wärme-Kopplung (kurz: KWK) ein großes Potenzial zur Reduktion des Ausstosses von Treibhausgasen bietet [BBB⁺07]. Aus dieser Erkenntnis abgeleitete politische Maßnahmen wie das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, kurz: EEG) [EEG04] bzw. dessen Neuregelung [EEG08] fördern gezielt den Ausbau dieser räumlich verteilt und zumeist in, an oder auf Gebäuden installierten Systeme. DER werden in der Folge zukünftig insbesondere auf Nieder- und Mittelspannungsebene in die elektrische Netzinfrastruktur integriert werden und im Falle der Kraft-Wärme-Kopplung und der Solarthermie gleichzeitig für eine zumindest teilweise Deckung des thermischen Bedarfs der jeweiligen Gebäude sorgen. Um das Potenzial einer dezentralisierten Energieversorgung auch im Sinne der Nachhaltigkeit ausschöpfen zu können, müssen konventionelle Kraftwerkskapazitäten jedoch ohne maßgebliche Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit durch DER ersetzt werden können.

1.1 Motivation: Dezentrale Energieversorgung

Eine Umgestaltung der Energieversorgung ist dabei von zwei wesentlichen Anforderungen abhängig: Zunächst muss die kombinierte Bereitstellung elektrischer Energie durch dezentrale Anlagen einerseits und konventionelle Kraftwerkskapazitäten anderer-

¹ Sämtliche verwendeten Abkürzungen können in einem separaten Verzeichnis am Ende dieser Arbeit nachgelesen werden.

seits stets auf den jeweils aktuellen elektrischen Bedarf abgestimmt werden. Gelingt dies nicht oder nur sehr eingeschränkt, müssen sogenannte Schattenkraftwerke² bzw. größere Kapazitäten an Regelleistung vorgehalten werden. Beides ist sowohl unter ökonomischen als auch ökologischen Aspekten nicht wünschenswert. Darüber hinaus ist eine Teilhabe der DER an den sogenannten Systemdiensten - etwa der Bereitstellung von Blindleistung oder Regelenergie - für einen sicheren und störungsarmen Betrieb der elektrischen Netze erforderlich [BBF⁺08, LBC⁺08]. Insgesamt bedarf es damit nicht nur einer technischen bzw. funktionalen Integration von DER in die „historisch gewachsene“ elektrische Infrastruktur, sondern auch einer organisatorischen Integration des koordinierten Betriebs dieser Anlagen in die energiewirtschaftlichen Beschaffungs- und Handelsprozesse.

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen und des skizzierten Integrationsbedarfs³ werden in der Literatur aktuell zwei unterschiedliche Koordinationskonzepte für DER diskutiert: Virtuelle Kraftwerke (kurz: VK) [Bit00, Str03, WSK05] und elektronische Marktplätze [Cra03, SNVW06, BBP⁺09]. Der wesentliche konzeptionelle Unterschied zwischen VK und elektronischen Marktplätzen liegt in der Auffassung von Koordination: Während DER im Rahmen eines VK mittels eines Einsatzplanungsprozesses⁴ direkt, d.h. durch unmittelbare Leistungsvorgaben koordiniert werden und damit hinsichtlich der Erreichung eines übergeordneten, anwendungsfallabhängigen Ziels des VK kooperieren, setzen elektronische Marktplätze auf indirekt wirkende, in der Regel finanziell gestaltete Anreizmechanismen, die eine gewünschte Eigenschaft des Gesamtsystems - z.B. eine kostenoptimierte Bereitstellung elektrischer Energie - befördern sollen [BBP⁺09]. Aus organisatorischer Sicht ist zudem festzuhalten, dass VK in der Regel von einem einzelnen Verantwortlichen betrieben werden [BBF⁺08], während auf elektronischen Marktplätzen unterschiedliche, in der Regel konkurrierende Akteure - z.B. Erzeuger, Verbraucher, Händler oder Betreiber von VK - mit individuellen Zielen aktiv sein können [BBP⁺09]. Trotz dieser Unterschiede sind beide Ansätze insbesondere hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten nicht überschneidungsfrei: Etwa in [KKH⁺07] oder [WLH⁺07] werden marktbasierende Koordinationsansätze für das Supply-Demand-Matching (kurz: SDM), d.h. einem optimierten Abgleich von Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie in einem lokal begrenzten Netzabschnitt, diskutiert. SDM ist zugleich ein typischer Anwendungsfall für den Einsatz von VK in Niederspannungsnetzen⁵, mit dem Unterschied, dass hier ein einzelner Betreiber - etwa ein Stadtwerk - den Betrieb der Anlagen regelt [PTK⁺08]. Zusammenfassend sei festgehalten, dass VK ein übergeordnetes, den DER gemeinsames Ziel verfolgen, während elektronische Marktplätze eine Umgebung für individuell agierende Akteure schaffen, zu denen auch der Betreiber eines VK zählen kann. Zudem bieten VK durch unterschiedliche Ausgestaltungen der übergeordneten Zielfunktion eine große Flexibilität hinsichtlich

² Unter Schattenkraftwerken werden konventionelle Kraftwerke verstanden, die mit eingeschränkter Leistung - und damit in anlagentechnisch ungünstigen Betriebspunkten - laufen und gegebenenfalls eine fehlende Einspeisung von dezentralen Systemen ausgleichen können [BBF⁺08].

³ Eine ausführliche Betrachtung des Integrationsbedarfs findet in Abschnitt 2.1.4 statt.

⁴ Eine detaillierte Diskussion von Einsatzplanung in VK findet sich in Abschnitt 2.2.2.

⁵ Siehe dazu auch Beispiel 2.2 auf Seite 21.

der möglichen Anwendungen [Bit00, Str03, WSK05, BBF⁺08], wohingegen aktuelle elektronische Marktplätze auf den Handel mit elektrischer Wirkleistung beschränkt sind [KKW⁺06, KKH⁺07, WLH⁺07]. Nichtsdestotrotz werden beide Konzepte in einer zukünftigen, dezentralen Energieversorgung eine wichtige Rolle spielen; der Fokus dieser Arbeit wird im Weiteren jedoch auf VK und insbesondere der Einsatzplanung als Mittel der Koordination von DER liegen.

1.2 Problemstellung: Reaktive Einsatzplanung in VK

Wie im letzten Abschnitt bereits diskutiert wurde, basiert die Koordination von DER im Kontext von VK auf direkten Leistungsvorgaben, die im Rahmen eines Einsatzplanungsprozesses, der sich an der „konventionellen“ Einsatzplanung orientieren kann [Cra08, Win09], generiert werden. Dabei wird zunächst in einem prädiktiven Schritt auf der Grundlage von Prognosen ein initialer Einsatzplan erzeugt, der eine anwendungsfallabhängige Zielfunktion optimiert und im Rahmen der organisatorischen Integration als Grundlage für die Abstimmung des geplanten Einspeiseverhaltens des VK mit anderen Komponenten des Energieversorgungssystems dient. Aufgrund von unvermeidbaren Prognoseungenauigkeiten, dem Einfluss menschlichen Verhaltens und der Möglichkeit von technischen Anlagenausfällen kann der initiale Einsatzplan zur Ausführungszeit in der Regel jedoch nicht unverändert umgesetzt werden. Es ist daher notwendig, auftretende Abweichungen zu erkennen und mittels der Bereitstellung von Ausgleichskapazität durch alternative dezentrale Anlagen eines VK bestmöglich zu kompensieren. Der Prozess der reaktiven Einsatzplanung in VK besteht also im Wesentlichen aus einer kontinuierlichen Anpassung eines Einsatzplans an aktuelle - und gegebenenfalls von den Annahmen bzw. Prognosen der prädiktiven Planung abweichende - Gegebenheiten durch eine geeignete Überwachung und Steuerung von DER und trägt maßgeblich zu einer gelungenen Integration dezentraler Anlagen im Kontext von VK bei.

Trotz ihrer Relevanz ist der reaktiven Einsatzplanung in VK bisher nur unzureichend Aufmerksamkeit gewidmet worden. In [Bit00] und [BFA02] wird etwa das Konzept der Online-Optimierung als reaktiv agierende Komponente eines zentralisierten intelligenten Energiemanagementsystems erwähnt; allerdings finden sich weder eine systematische Aufbereitung der reaktiven Einsatzplanung noch eine explizite Diskussion des zugrundeliegenden Lösungsansatzes bzw. der Funktionsweise dieser Komponente. Zudem ergeben sich bei dem in der Literatur vorherrschenden Einsatz zentraler Informationssysteme in VK unter anderem⁶ folgende Probleme hinsichtlich einer möglichen Realisierung der reaktiven Einsatzplanung:

Kommunikationsaufwand Um Abweichungen vom initialen bzw. aktuell noch gültigen Einsatzplan eines VK erkennen und durch Kapazitätsbereitstellung durch alternative Anlagen kompensieren zu können, müssen stets aktuelle Zustandsdaten der DER eines VK vorliegen. Dies erfordert - in Abhängigkeit von der gewünschten zeitlichen

⁶ Eine ausführliche Diskussion der Anforderungen bezüglich der reaktiven Einsatzplanung findet in Abschnitt 2.2.2 statt.

Auflösung bzw. Reaktionsfähigkeit des Systems und der eingesetzten IT-Architektur - einen nicht zu vernachlässigenden Kommunikationsaufwand, zumal ein entsprechend umgestalteter Einsatzplan nach Abschluss der reaktiven Planung wiederum an die DER übermittelt werden muss.

Reaktionsfähigkeit Die Kompensation von im laufenden Betrieb auftretenden Abweichungen durch Anpassung des aktuellen Einsatzplans eines VK stellt ein Optimierungsproblem mit anlagenspezifischen Nebenbedingungen dar. Die Lösung dieses Problems durch ein zentrales Informationssystem kann in Abhängigkeit von der Anlagenanzahl eines VK einen Berechnungsaufwand mit sich bringen, der sich negativ auf die Reaktionsfähigkeit des Systems auswirkt. Dabei ist im Kontext der elektrischen Energieversorgung zu beachten, dass eine zeitlich stark verzögerte Reaktion keinen Nutzen für die Einhaltung des initialen Einsatzplanes bringt, da eine „nachträgliche“ Lieferung elektrischer Energie im Sinne eines Bilanzausgleiches nicht⁷ möglich ist.

Skalierbarkeit Mit einer steigenden Anzahl zu überwachender DER innerhalb eines VK wächst auch der Kommunikations- und Steuerungsaufwand. Dies erfordert letztlich eine aufwändigere - und damit auch teurere - Ausgestaltung eines zentralen Informationssystem für die Koordination der dezentralen Anlagen. Für den allgemeinen Fall ist die reaktive Einsatzplanung ein Optimierungsproblem mit kombinatorischer Komplexität, so dass im schlimmsten Fall ein mit der Anlagenanzahl exponentiell wachsender Aufwand betrieben werden muss, um eine gleichbleibende Qualität der Lösung zu ermöglichen⁸.

Einsatzplanqualität Häufige Anpassungen eines initial erstellten Plans an neue Rahmenbedingungen, etwa durch einen Neuaufwurf - d.h. eine erneute Lösung des initialen Planungsproblems unter gegebenenfalls angepassten Ausgangsbedingungen - oder den Einsatz von Umplanungsheuristiken, können zu einer Verschlechterung der an einer einzelnen oder mehreren Bewertungsfunktionen gemessenen Planqualität führen. Im Kontext von VK können sich Einsatzplanänderungen insbesondere negativ auf individuelle Anlagen auswirken, da etwa die Anzahl verschleißbedingender Starts zunehmen kann [PTK⁺08].

Single Point of Failure Der Ausfall eines zentralen Informationssystems hat zur Folge, dass zunächst keine reaktive Planung innerhalb eines betroffenen VK möglich ist. Eine Einführung von redundanten Systemen kann dieser Gefahr entgegenwirken, ist aber mit einem zusätzlichen ökonomischen und organisatorischen Aufwand verbunden.

⁷ Eingeschränkt sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine rein bilanztechnische bzw. über die Zeit integrierte Betrachtung der Einsatzplanung von DER unter der Prämisse ausreichend dimensionierter Speichersysteme für elektrische Energie zwar denkbar, aufgrund der notwendigen Investitionen für den massiven Ausbau von Speichern in Nieder- und Mittelspannungsnetzen [LBC⁺08] allerdings in naher Zukunft nicht realistisch ist.

⁸ Siehe dazu die Diskussion in Abschnitt 4.1.

1.3 Zielsetzung: Verteilte reaktive Einsatzplanung in VK

Vor dem Hintergrund der diskutierten Probleme stellt sich die Frage, ob der vorrangig verfolgte Einsatz zentralisierter Informationssysteme in VK dem inhärent verteilten Charakter eines dezentralen Energieversorgungssystems gerecht werden kann. Aus dieser Überlegung leitet sich hinsichtlich der reaktiven Einsatzplanung in VK die - im Sinne der Wichtigkeit - zentrale Vermutung dieser Arbeit ab: Ein geeignet gestaltetes, dezentral organisiertes Informationssystem, das die bislang im Wesentlichen zentral vorliegende Planungsintelligenz auf autonome und kooperierende Teilsysteme verteilt, vermeidet die Probleme eines zentralisierten Ansatzes und ermöglicht zeitnahe und qualitativ hochwertige Reaktionen auf im laufenden Betrieb auftretende Abweichungen von einem initial erstellten Einsatzplan. Dabei wird keine Aussage über eine mögliche Eignung eines verteilten Systems für die prädiktive Planung in VK getroffen, die insbesondere anderen zeitlichen Anforderungen unterliegt. Die im Folgenden formulierten Hypothesen systematisieren diese Vermutung.

Hypothese 1 (Globale Performanz)

Eine verteilte reaktive Koordination von DER erzielt bezogen auf die globale Performanz der reaktiven Einsatzplanung in VK vergleichbare Ergebnisse wie eine zentrale Steuerungskomponente, die einfache Heuristiken zur Umplanung einsetzt oder einen Neuaufwurf des Einsatzplanungsproblems durchführt.

Unter der globalen Performanz der reaktiven Einsatzplanung in VK wird in dieser Arbeit eine Bewertung der in einem bestimmten Zeitraum aufgetretenen Abweichungen vom initial erstellten Einsatzplan verstanden, die bestmöglich kompensiert werden sollten⁹. Die Beschränkung des Performanzvergleichs auf eine zentrale Steuerungskomponente, die im Weiteren als zentraler Dispatcher bezeichnet werden soll, ist dabei einerseits dem Mangel an dokumentierten Alternativansätzen in der aktuellen Literatur und andererseits der Notwendigkeit einer Einschränkung der in dieser Arbeit untersuchten Problemstellung geschuldet.

Hypothese 2 (Lokale Performanz)

Im Vergleich zu einem zentralen Dispatcher ist ein verteilter Koordinationsansatz eher in der Lage, anlagenspezifischen Anforderungen gerecht zu werden und erzielt hinsichtlich der reaktiven Einsatzplanung in VK daher signifikant bessere Ergebnisse bezogen auf die anlagenlokale Performanz.

Im Gegensatz zur globalen Performanz, die das reaktive Zusammenspiel der dezentralen Anlagen eines VK bewertet, bezieht sich die lokale Performanz auf die Auswirkungen von Anpassungen eines Einsatzplans auf einzelne DER. Eine Einsatzplananpassung zieht in der Regel die Notwendigkeit von Zustandsänderungen einzelner Anlagen nach

⁹ Siehe Abschnitt 4.1 für eine formale Definition des Performanzbegriffs.

sich: DER müssen mit erhöhter oder verminderter Kapazität laufen oder sogar an- bzw. abgeschaltet werden. Solche Zustandsänderungen können sich einerseits negativ auf die Anlagentechnik auswirken - z.B. hinsichtlich eines erhöhten Verschleißes von motorbetriebenen KWK-Anlagen [Mes07] oder einer Beeinträchtigung der Lebensdauer eines Speichersystems für Elektroenergie [LBC⁺08] - und andererseits die möglichst effiziente Nutzung des dezentralen Energiewandlungspotenzials beeinträchtigen, da z.B. die vor dem Hintergrund eines lokalen Wärmebedarfs mögliche Laufzeit einer dezentralen Anlage nicht vollständig ausgeschöpft wird.

Hypothese 3 (Skalierbarkeit)

Durch eine zustandsabhängige, adaptive Virtualisierung von DER kann die Skalierbarkeit einer verteilten reaktiven Einsatzplanung in VK hinsichtlich des Kommunikationsaufwands deutlich verbessert werden, ohne dabei signifikante Einbußen bezüglich der globalen Performanz zu verursachen.

Die Koordination von Handlungen und Entscheidungen innerhalb eines verteilten Informationssystems erfordert in der Regel einen mit der Anzahl autonomer Teilsysteme deutlich wachsenden Kommunikationsoverhead. Damit dieser Aufwand insbesondere in VK mit einer großen Anlagenanzahl nicht zu einer Beeinträchtigung der Reaktionsfähigkeit des verteilten Systems führt, kann eine geeignete Zusammenfassung von DER auf informationstechnischer Ebene zu Virtuellen Anlagen - gewissermaßen VK „im Kleinen“ - das notwendige Kommunikationsaufkommen vermindern. Im Gegensatz zu den bisher in der Literatur diskutierten statischen Kommunikationshierarchien [SRB⁺06, NBR07, Sch07], die etwa in Form von Datenkonzentratoren die für die Einsatzplanung notwendigen Informationen ihrer untergeordneten Anlagen aggregieren und an übergeordneten Systemkomponenten weitergeben [Bit06], wird in dieser Arbeit eine sich an den Zustand des VK-Gesamtsystems anpassende Hierarchisierung der autonomen Teilsysteme vorgeschlagen. Ziel dieser adaptiven Virtualisierung ist es, dezentrale Anlagen so zusammenzufassen, dass der Kommunikationsaufwand ohne signifikante Beeinträchtigung der globalen Systemperformanz vermindert werden kann. Dazu müssen insbesondere sich bezüglich der Abweichungen vom initial erstellten Einsatzplan gegenseitig „ausgleichende“ Anlagen identifiziert und in einer möglichst zeitlich stabilen Hierarchiestruktur angeordnet werden.

Die kritische Untersuchung der folgenden, aus den Hypothesen 1 bis 3 abgeleiteten Aussage stellt das wesentliche Ziel dieser Arbeit dar:

Hypothese 4 (Gesamtperformanz)

Ein verteilter Koordinationsansatz, der auf einer zustandsabhängigen, adaptiven Virtualisierung von dezentralen Energiewandlungsanlagen aufbaut, erzielt im Vergleich zu einem zentralen Dispatcher eine signifikant höhere Gesamtperformanz. Letztere setzt sich dabei aus der globalen und der lokalen Performanz der reaktiven Einsatzplanung in VK zusammen.

1.4 Lösungsansatz: Holonische Multiagentensysteme

Ausgehend von den im vorherigen Abschnitt formulierten Hypothesen wird im Folgenden der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz skizziert, der in einem simulativ evaluierten, verteilten Informationssystem für eine performante reaktive Einsatzplanung in VK resultiert.

Problemformalisierung In einem ersten Schritt wird die reaktive Einsatzplanung in VK in Form eines allgemeinen Optimierungsproblems formalisiert. Durch eine systematische Aufbereitung dieser Problemstellung wird zum Einen eine wesentliche Grundlage für die weitergehenden Lösungsschritte geschaffen, und zum Anderen eine bestehende Lücke in der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit der Koordination von DER geschlossen, da die erarbeitete Formalisierung als Ausgangspunkt für alternative reaktive Planungsansätze genutzt werden kann.

Problemzerlegung In Anlehnung an die Arbeiten von Henseler [Hen98], der sich mit der reaktiven Ablaufplanung im Kontext der industriellen Fertigung beschäftigt hat, wird das formalisierte reaktive Einsatzplanungsproblem in aufeinander aufbauende Teilprobleme zerlegt. Dazu wird das in [Hen98] eingeführte abgestufte Konsistenzverständnis eines Ablaufplans unter Berücksichtigung der domänenspezifischen Anforderungen und Gegebenheiten auf Einsatzpläne eines VK übertragen. Eine Lösung des reaktiven Einsatzplanungsproblems ergibt sich dann durch eine schrittweise Anpassung und Verfeinerung des Einsatzplans hinsichtlich des aktuellen Systemzustands der DER eines VK.

Multiagentenbasierte Lösung der Teilprobleme Zur Lösung der im Rahmen der Problemzerlegung identifizierten Teilprobleme wird ein verteiltes Informationssystem auf der Basis von intelligenten Agenten konzipiert, das damit die Grundlage einer verteilten reaktiven Einsatzplanung darstellt. Unter einem intelligenten Agenten wird nach Wooldridge [Woo99] ein autonomes, zielgerichtet agierendes Hardware- bzw. Softwaresystem, das zu flexiblem Verhalten fähig ist, verstanden. Die Flexibilität eines Agenten äußert sich dabei in der Fähigkeit, seine Umgebung wahrzunehmen und auf Änderungen zu reagieren (Reaktivität), in der Entscheidungsfreiheit, ohne externe Stimuli selbstständig Ziele zu verfolgen (Proaktivität), und in der Kompetenz, mit anderen Agenten zu kooperieren oder konkurrieren (soziale Fähigkeiten).

Adaptive Virtualisierung von DER Aufbauend auf dem zur Lösung des reaktiven Einsatzplanungsproblems entwickelten Multiagentensystem (kurz: MAS) wird eine adaptive Virtualisierung bzw. Aggregation von DER konzipiert, die insbesondere die Skalierbarkeit des Systems bezüglich des Kommunikationsaufwands optimieren soll. Dazu werden die Agenten des entwickelten MAS auf der Grundlage holonischer Organisationsstrukturen nach [FSS03] um die Fähigkeit erweitert, sich in Abhängigkeit des jeweils aktuellen Systemzustands zu moderierten Gruppen - sogenannten Holonen - zusammenzuschließen, die einen hinsichtlich der aufgetretenen Abweichungen möglichst ausgeglichenen Ausschnitt des Einsatzplans eines VK darstellen.

Simulative Performanzuntersuchung Die Evaluation des entwickelten Konzepts erfolgt im Rahmen einer Simulationsstudie, die unter Berücksichtigung variierender Parameterbelegungen einen Performanzvergleich des adaptiven MAS mit einem zentralen Dispatcher, der einfache Heuristiken zur Umplanung einsetzt oder einen Neuaufwurf des Einsatzplanungsproblems durchführt, zum Ziel hat. Dazu werden die prototypisch implementierten reaktiven Einsatzplanungssysteme mit einem Simulationsmodell gekoppelt, das in interdisziplinärer Anstrengung im Rahmen des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen (kurz: FEN) [Bec07, Kur08] entwickelt und bereits für mehrere simulative Untersuchungen [PTK⁺08, BT09, TA09] eingesetzt wurde.

1.5 Aufbau der Arbeit

Im Weiteren ist diese Arbeit wie folgt strukturiert: In Kapitel 2 werden die für das weitere Verständnis notwendigen Grundlagen eingeführt. Dazu gehören neben einer kurzen Übersicht der aktuellen Entwicklungen und Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft insbesondere eine vertiefte Diskussion der Einsatzplanung in VK sowie eine Einführung in den Agentenbegriff der Verteilten Künstlichen Intelligenz (kurz: VKI). Kapitel 3 dient der Einordnung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte. Dazu werden sowohl unterschiedliche Koordinationsansätze von DER im Kontext von VK als auch domänenübergreifende Planungskonzepte, die auf einer Verteilung von Planungswissen und -kompetenz basieren, diskutiert. Auf der Grundlage des im letzten Abschnitt beschriebenen Vorgehens wird die reaktive Einsatzplanung in VK in Kapitel 4 zunächst formal aufbereitet und schließlich durch ein geeignet gestaltetes MAS gelöst. Kapitel 5 erweitert diese Lösung um das Konzept der adaptiven Virtualisierung von DER mit dem Ziel, den Kommunikationsaufwand des verteilten Planungssystems bei möglichst gleichbleibender Lösungsqualität zu vermindern. Das dieserart realisierte holonische VK wird schließlich in Kapitel 6 im Rahmen einer Simulationsstudie kritisch hinsichtlich der resultierenden Gesamtperformanz untersucht. Den Abschluss dieser Arbeit bildet Kapitel 7, in dem der Beitrag dieser Arbeit zusammenfassend bewertet wird und Möglichkeiten zur weiteren Auseinandersetzung mit der gewählten Thematik aufgezeigt werden.

The trouble with having an open mind, of course, is that people will insist on coming along and trying to put things in it.

– Terry Pratchett

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Aspekte, die hinsichtlich der reaktiven Einsatzplanung in Virtuellen Kraftwerken (kurz: VK) zu beachten sind, systematisch aufbereitet. Ergänzend zu einer Einführung der im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendeten fachlichen Begriffe werden jeweils auch vertiefende Literaturhinweise gegeben.

2.1 Dezentrale Energieversorgung

Im Folgenden werden zunächst die grundlegenden Begriffe der elektrischen Energieversorgung erläutert. Neben einer Diskussion der Eigenschaften und Funktionsweisen einiger ausgewählter dezentraler Energiewandlungstechnologien liegt der Fokus dabei auf den Anforderungen, die sich an eine funktionale Integration von DER in die elektrischen Netze einerseits und die organisatorischen Strukturen des liberalisierten Energiemarktes andererseits ergeben. Weitergehende Themen wie etwa Aufbau und Akteure des liberalisierten Energiemarkts, rechtliche Entflechtung (Legal Unbundling) von Unternehmen der Energiewirtschaft oder Energiehandel können etwa in [HDS07], [Cra08] oder [HC06] nachgelesen werden.

2.1.1 Das elektrische Energieversorgungssystem

Das elektrische Netz in Deutschland zeichnet sich wie in Abbildung 2.1 dargestellt durch eine historisch gewachsene Unterteilung in mehrere, mittels Transformatoren gekoppelte Spannungsebenen aus [HDS07]:

- Höchstspannungsnetze werden in der Regel mit einer Nennspannung von 380 kV bzw. 220 kV betrieben und dienen dem Transport der durch zentrale Großkraftwerke generierten elektrischen Energie auch über weite Strecken hinweg.
- Hochspannungsnetze werden mit einer Nennspannung von 110 kV betrieben und dienen ebenfalls primär dem Transport elektrischer Energie. Neben der Kopplung mit dem Höchstspannungsnetz sind auf dieser Ebene Kraftwerke bis ca. 300 MW elektrischer Leistung und Großverbraucher wie z.B. energieintensive Industriebranchen angebunden.
- Mittelspannungsnetze dienen der Verteilung der elektrischen Energie in einem räumlich ausgedehnten, aber begrenzten Raum. Sie werden in ländlichen Gebieten typischerweise mit 20 kV, in Städten dagegen mit 10 kV betrieben und werden über Umspannstationen aus dem Hochspannungsnetz gespeist. Typische elektrische Einspei-

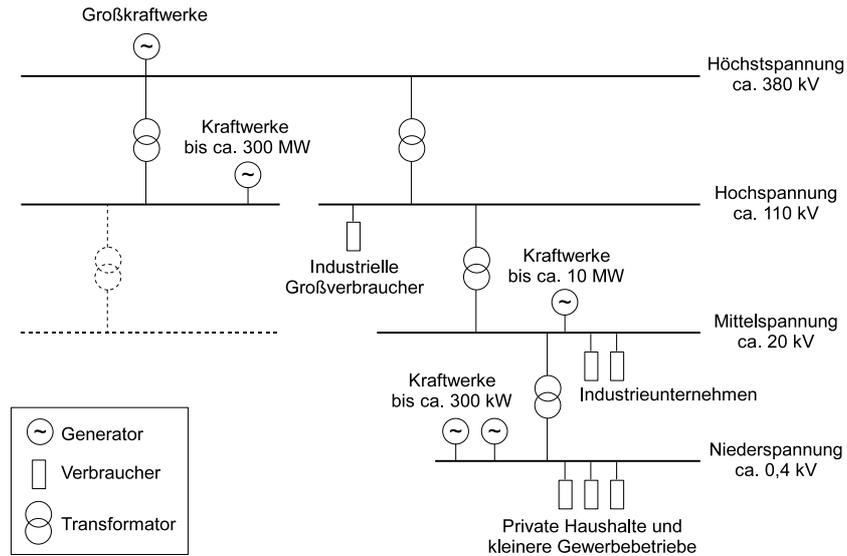


Abbildung 2.1: Die Spannungsebenen des elektrischen Netzes (nach [HDS07]).

ser auf Mittelspannungsebene sind etwa Windkraftanlagen oder große Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung in der Regel nicht größer als 10 MW. Auf Verbraucherseite sind Industriekunden mit einem entsprechenden Leistungsbedarf angebunden.

- Niederspannungsnetze werden über sogenannte Ortsnetzstationen aus dem Mittelspannungsnetz gespeist und mit einer Nennspannung von 0,4 kV betrieben. Sie dienen der Verteilung von elektrischer Energie in einem räumlich eng begrenzten Bereich und binden Haushalte, kleinere Gewerbeobjekte und Bürogebäude an das elektrische Energieversorgungssystem an. Darüber hinaus werden DER bis ca. 300 kW elektrischer Leistung auf Niederspannungsebene in das Netz integriert.

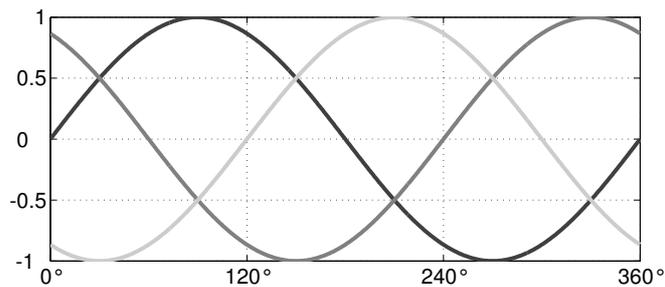


Abbildung 2.2: Exemplarische dreiphasige Wechselspannung.

Beim Betrieb des elektrischen Netzes stellt die Stabilität der Energieübertragung eine besondere Herausforderung dar. Um Leitungsverluste zu minimieren und eine effiziente

Übertragung elektrischer Leistung auch über große Strecken - im Extremfall mehrere hundert Kilometer - zu ermöglichen, wird der Betrieb des europäischen Verbundnetzes mittels einer Dreiphasenwechselspannung mit einer Nennfrequenz $f_N = 50$ Hz realisiert (siehe Abbildung 2.2). Da elektrische Energie bislang nur in vergleichsweise geringen Mengen und mit erheblichem ökonomischen und technischen Aufwand gespeichert werden kann [LBC⁺08], muss die elektrische Leistung stets in dem Moment bereitgestellt werden, in dem sie gebraucht wird. Abweichungen von Erzeugung und Bedarf können unterschiedliche Auswirkungen auf den Netzbetrieb haben. Ein Ungleichgewicht der Wirkleistung¹ führt zu Abweichungen von der Netznennfrequenz f_N , die durch entsprechende Inanspruchnahme von Regelleistung im Rahmen der Frequenzregelung kompensiert werden muss.

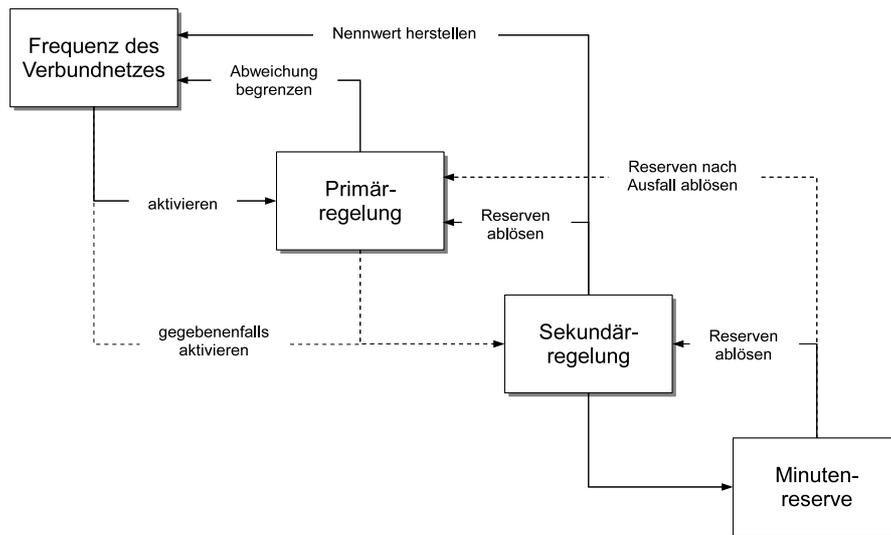


Abbildung 2.3: Frequenzregelung im europäischen Verbundnetz (nach [Eur04]).

Der Ausgleich der Wirkleistungsbilanz wird im Verbundnetzgebiet der *European Network of Transmission System Operators for Electricity* (kurz: ENTSO-E) durch die in Abbildung 2.3 dargestellten, aufeinander aufbauenden Regelstufen realisiert: Primärregelung, Sekundärregelung und Minutenreserve. Primärregelung wird im Wesentlichen durch eine entsprechende Drehzahlregelung der Turbinen großer Kraftwerke erbracht und kann entsprechend schnell zur Verfügung gestellt werden. Ziel ist dabei eine Begrenzung von Frequenzabweichungen innerhalb von der ENTSO-E festgelegter Sicherheitsgrenzen [Eur04]. Dazu müssen die entsprechenden Kraftwerke innerhalb von maximal dreißig Sekunden die Leistungsabgabe entsprechend anpassen können und bis zu fünfzehn Minuten lang für die Primärregelung zur Verfügung stehen [HDS07, Cra08]. Im Anschluss an die Stabilisierung der Netzfrequenz kann durch eine automatische Anforderung die Sekundärregelung dazu verwendet werden, die Netznennfrequenz f_N innerhalb von maximal fünfzehn Minuten wiederherzustellen. Zusätzlich wird durch die

¹ Unter Wirkleistung wird - im Gegensatz zur Blindleistung - die tatsächlich von den Verbrauchern nutzbare elektrische Leistung bezeichnet.

Sekundärregelung die Primärregelung abgelöst, die damit wiederum zur Kompensation weiterer Abweichungen eingesetzt werden kann [Spr03, Cra08]. Als Ergänzung der Sekundärregelung kann durch eine manuelle Anforderung - d.h. in der Regel durch eine telefonische Benachrichtigung entsprechender Lieferanten durch den betroffenen Übertragungsnetzbetreiber² - die Minutenreserve eingesetzt werden. Die Regelleistung der Minutenreserve wird meist dazu verwendet, Kapazitäten der Sekundärregelung abzulösen oder langfristige Ausgleichsmaßnahmen zu realisieren. Dazu müssen entsprechende Kraftwerke über einen Leistungsgradienten von minimal zwei Prozent ihrer Nennleistung pro Minute verfügen und die angeforderte Leistung über einen gegebenenfalls mehrere Stunden umfassenden Zeitraum bereitstellen können [HDS07, Cra08].

Neben Frequenzabweichungen durch ein Ungleichgewicht zwischen Bereitstellung und Bedarf von Wirkleistung können auch Abweichungen bezüglich der von Betriebsmitteln wie Transformatoren oder Stromrichtern benötigten Blindleistung auftreten, die sich in Form von Spannungsschwankungen an den betroffenen Netzknoten - d.h. den entsprechenden Entnahme- bzw. Einspeisepunkten der Netztopologie - äußern [Spr03, HDS07]. Aufgrund dieser Stabilitätsanforderungen ist neben der Bereitstellung von Regelleistung auch die Einbeziehung dezentraler Anlagen zur sogenannten Blindleistungskompensation, d.h. dem Ausgleich der Blindleistungsbilanz, eine langfristige elektrotechnische Anforderung an die funktionale Integration von DER in das elektrische Energieversorgungssystem [LBC⁺08].

2.1.2 Organisatorische Strukturen

Das elektrische Netz in Deutschland hat sich seit der Gründung der *Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité* im Jahre 1951 zu einem Teil eines internationalen Verbundnetzsystems entwickelt.



Abbildung 2.4: Das Verbundnetzgebiet der ENTSO-E.

Neben der Anbindung an ein westeuropäisches Verbundnetz (siehe Abbildung 2.4),

² Siehe dazu Abschnitt 2.1.2.

das bis Mitte 2009 von der *Union for the Coordination of Transmission of Electricity* (kurz: UCTE) und seit 01. Juli 2009 von der ENTSO-E koordiniert wird, bestehen teilweise Kopplungen zum Verbundnetz der skandinavischen Länder NORDEL, dem britischen Verbundnetz, sowie dem von der *Central Dispatching Organization of the Interconnected Power Systems* betriebenen osteuropäischen Verbundnetz [Spr03].

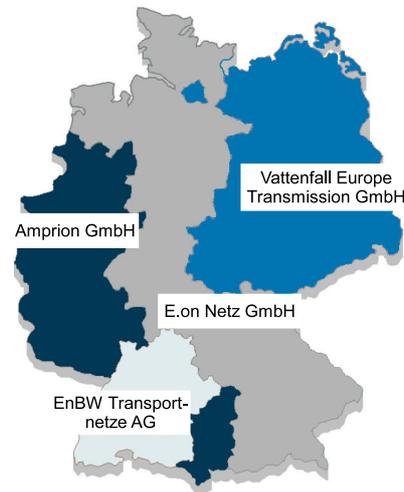


Abbildung 2.5: Die Regelzonen der Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland.

Für den Betrieb, die Wartung und den Ausbau der Netzinfrastruktur auf Höchst- und Hochspannungsebene sind innerhalb Deutschlands die sogenannten Übertragungsnetzbetreiber (kurz: ÜNB) verantwortlich. Entsprechend ist das Übertragungs- bzw. Transportnetz in die in Abbildung 2.5 dargestellten vier Regelzonen aufgeteilt, die unter anderem mittels der bereits diskutierten Frequenzregelung betrieben werden. Die vier Regelzonen sind intern jeweils in ein- bis zweihundert unterschiedliche Bilanzkreise organisiert, die insbesondere der Zuordnung und Abrechnung erbrachter Regelleistung auf unterschiedliche Akteure der Energiewirtschaft dienen [HDS07]. Ein Bilanzkreis setzt sich dabei aus einer Anzahl von Entnahme- bzw. Einspeisestellen innerhalb einer Regelzone zusammen und wird von einem Bilanzkreisverantwortlichen (kurz: BKV) geleitet. Der BKV garantiert durch entsprechende Strombezüge von gegebenenfalls mehreren Lieferanten eine Deckung des in seinem Bilanzkreis anfallenden Bedarfs an Elektroenergie. Dazu muss er am jeweils vorhergehenden Werktag bis spätestens 14.30 Uhr eine Lastprognose seiner Entnahmestellen sowie die entsprechend gestalteten Strombezüge - die sich letztlich in Form von Kraftwerksfahrplänen abbilden - an den jeweiligen ÜNB melden [HDS07]. Ein BKV muss dann für erbrachte Ausgleichsenergie - d.h. denjenigen Anteil an Regelleistung, der zum Ausgleich von Abweichungen innerhalb eines Bilanzkreises aufgewendet wird - aufkommen, wenn sein verantworteter Bilanzkreis jeweils zu einer vollen Viertelstunde eines Abrechnungstages nicht vollständig ausgeglichen ist [Bun05b]. Die Kosten für die Bereitstellung von Regelleistung, die in Reaktion auf kurzfristige Abweichungen innerhalb eines 15-Minuten-Intervalls erbracht wird, tragen die ÜNB.

2.1.3 Dezentrale Energiewandlungstechnologien

Ein wesentlicher Faktor für den verstärkten und politisch geförderten Ausbau dezentraler Energiesysteme, d.h. räumlich weit verteilter Energiewandlungsanlagen mit einer - bezogen auf die konventionellen Großkraftwerke - vergleichsweise geringen (elektrischen) Leistung, ist deren effiziente Verwendung konventioneller Primärenergieträger wie etwa Erdgas oder die Nutzung regenerativer Energiequellen. Im Folgenden werden mit der Kraft-Wärme-Kopplung (kurz: KWK) und der Photovoltaik (kurz: PV) zwei grundlegende Energiewandlungstechnologien für DER auf Niederspannungsebene³ diskutiert. Im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt bleibt der Einsatz von Windkraftanlagen, die aufgrund ihrer in der Regel deutlich höheren Leistung zumeist auf Mittelspannungsebene einspeisen. Als weiterführende Literatur zur Integrationsproblematik speziell von Windkraftanlagen seien u.a. [ER02], [Lun05] sowie [EWD06] empfohlen.

Kraft-Wärme-Kopplung

Unter KWK wird die gleichzeitige Wandlung eines Primärenergieträgers in mechanische bzw. elektrische Energie und Wärme verstanden (siehe Abbildung 2.6). Dabei muss im Wesentlichen zwischen zwei unterschiedlichen Energiewandlungsprozessen unterschieden werden: konventionelle Verbrennung und elektrochemische Reaktion. Während Letztere Grundlage der Brennstoffzellentechnologie ist, findet Erstere beispielsweise in Otto- und Stirlingmotoren sowie Gasturbinen Verwendung.

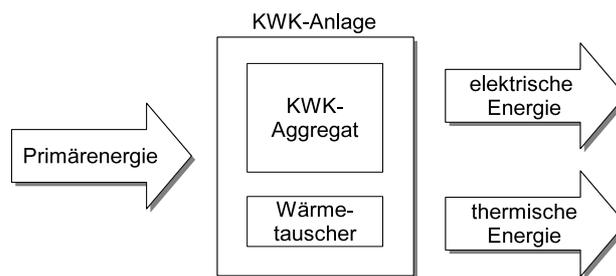


Abbildung 2.6: Grundprinzip der Kraft-Wärme-Kopplung.

In Anlehnung an [Bun05a] können KWK-Anlagen anhand ihrer elektrischen Maximalleistung $P_{el,max}$ kategorisiert werden:

- Mikro-KWK: $P_{el,max} \leq 15$ kW,
- Kleinst-KWK: $P_{el,max} \leq 50$ kW,
- Klein-KWK: $P_{el,max} \leq 2.000$ kW,
- Große KWK: $P_{el,max} > 2.000$ kW.

³ Es sei angemerkt, dass große PV-Anlagensysteme auch in das Mittelspannungsnetz integriert sein können.

Im Gegensatz zur Energiewandlung in den „klassischen“ Großkraftwerken zeichnet sich der Einsatz von KWK-Anlagen in der Regel durch einen wesentlichen höheren Primärenergienutzungsgrad aus. Die im Energiewandlungsprozess anfallende Wärme wird dabei nicht über Kühlaggregate oder -türme an die Umwelt abgeführt⁴, sondern kann etwa zur Deckung der thermischen Last eines Gebäudes genutzt werden [Bun05a, Yan08]. In Deutschland wird der Einsatz und Ausbau von KWK-Anlagen insbesondere aufgrund der ökologischen Vorteile durch das 2002 verabschiedete und 2009 novellierte Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz [KWK02] gefördert. Die KWK-Technologie wird unter anderem aufgrund steigender Energiepreise und des vor dem Hintergrund der Klimawandeldiskussion wachsenden ökologischen Bewusstseins als eine wesentliche Voraussetzung für die Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele der Bundesregierung gesehen [HHJ⁺07].

In Abhängigkeit von der eingesetzten Technologie, der Auslegung der Anlagen⁵ und dem Einsatzgebiet lassen sich im Wesentlichen zwei unterschiedliche Betriebsweisen von KWK-Anlagen differenzieren:

- Im wärmegeführten Betrieb erfolgt eine Regelung des Anlagenoutputs anhand des Wärmebedarfs des Objekts, das von der Anlage mit thermischer Energie versorgt wird. Überschreitet die thermische Last die thermische Maximalleistung $P_{th,max}$ der Anlage, so muss ein Zusatzheizgerät aktiviert werden. Analog muss die Anlage bei einer Unterschreitung der thermischen Minimalleistung $P_{th,min}$ abgeschaltet werden, wobei das Zusatzheizgerät den thermischen Bedarf dann vollständig deckt. Alternativ kann ein thermischer Pufferspeicher - in der Regel ein Wasserspeicher, der mindestens den thermischen Output einer Volllaststunde aufnehmen kann - dazu verwendet werden, die Betriebszeiten der KWK-Anlage teilweise vom momentanen thermischen Bedarf zu entkoppeln. Beim Betrieb mit Pufferspeicher sind dann entsprechende Ober- und Untergrenzen der Speichertemperatur zu beachten [Wol07, Yan08]. Die zeitgleich generierte elektrische Energie wird entweder im im „eigenen Umfeld“ (Objekt) verbraucht oder in das elektrische Versorgungsnetz eingespeist.
- Im stromgeführten Betrieb richtet sich der Einsatz der KWK-Anlage nach dem elektrischen Bedarf des jeweiligen Objekts. Die zeitgleich generierte thermische Energie wird im Objekt verbraucht oder kann auch in einem Pufferspeicher zwischengespeichert werden. Alternativ kann sie auch an die Umgebung abgeführt werden, wodurch allerdings der primärenergetische Vorteil hinsichtlich des Wirkungsgrads, d.h. des Verhältnisses von aufgenommener und abgegebener Leistung, von KWK-Anlagen verloren geht. Aus diesem Grund und wegen der erhöhten Anforderungen an die kurzfristige Regelbarkeit des Systems stellt die Stromführung eher eine Ausnahme beim Einsatz von KWK-Anlagen dar [Bun05a].

⁴ Es sei angemerkt, dass in Kombination mit Nah- bzw. Fernwärmenetzen auch beim Einsatz von Großkraftwerken die Möglichkeit einer Wärmeauskopplung besteht. Da sich dadurch allerdings der elektrische Wirkungsgrad des Kraftwerks verringert und zudem hohe Leitungsverluste beim Transport der thermischen Energie anfallen, wird von dieser Möglichkeit nur selten Gebrauch gemacht.

⁵ KWK-Anlagen werden aus ökonomischen Gründen typischerweise so ausgelegt, dass sie eine Jahresbetriebsdauer von ca. 5.000 Volllaststunden erreichen [Ver08].

Im Rahmen der Evaluation dieser Arbeit werden insbesondere Mikro-KWK-Anlagen betrachtet, die für einen Einsatz in Ein- oder Mehrfamilienhäusern geeignet sind und entsprechend auf Niederspannungsebene in das elektrische Netz integriert werden. Für Anlagen dieser Leistungsklasse wurde im Rahmen des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen (kurz: FEN) die sogenannte netzorientierte Betriebsweise als Alternative zur „klassischen“ Wärme- bzw. Stromführung entwickelt [PK08a, PK08b, PTK⁺08]. Ziel dieser Betriebsweise ist es, die Einspeisung elektrischer Energie durch KWK-Anlagen mittels einer externen Einsatzplanung so zu koordinieren, dass die in Niederspannungsnetzen punktuell auftretenden Spitzenlasten - d.h. bezogen auf den elektrischen Tageslastgang maximale Leistungsbedarfe - möglichst durch die lokale Erzeugung abgedeckt werden⁶. Durch einen so geregelten und netzverträglichen Anlagenbetrieb soll insbesondere auch das im bislang vorherrschenden wärmegeführten Betrieb aus Sicht des Netzbetreibers stochastisch erscheinende Einspeiseverhalten der KWK-Anlagen vermieden werden. Eine wesentliche Voraussetzung für diese Betriebsart ist die Nutzung eines ausreichend groß dimensionierten thermischen Pufferspeichers, der durch Aufnahme des thermischen Outputs mehrerer Volllaststunden [Yan08] eine zeitliche Entkopplung der thermischen und elektrischen Energiebereitstellung ermöglicht [PTK⁺08].

Photovoltaik

PV bezeichnet die Umwandlung von solarer Einstrahlung bzw. Lichtenergie in elektrische Energie (siehe Abbildung 2.7). Dazu werden aus unterschiedlich dotierten Halbleitern gefertigte PV- bzw. Solarzellen in Reihenschaltung zu Solarmodulen zusammengesetzt, die auf Grundlage des photovoltaischen Effekts - d.h. der lichtinduzierten Ladungsträgertrennung in den p- bzw. n-dotierten Halbleiterelementen - eine Gleichspannung generieren. Für die hinsichtlich der Netzintegration notwendige Umwandlung in eine netzkonforme Wechselspannung sorgt in der Regel ein Wechselrichter [KSW06, Qua07].

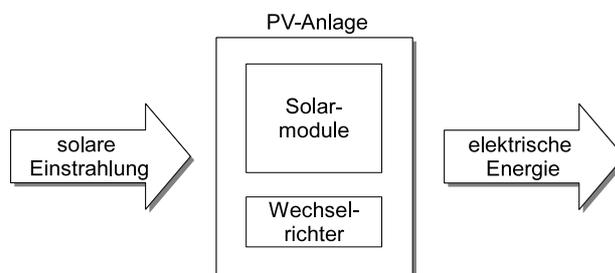


Abbildung 2.7: Grundprinzip der Photovoltaik.

Auf Grundlage des aktuell vorrangig als Halbleitermaterial eingesetzten Siliziums lassen sich Wirkungsgrade zwischen 16 % und 18 % erzielen. In Zukunft könnten alternative Technologien wie Dünnschichtsolarzellen sowohl den bislang noch sehr energieintensiven Herstellungsprozess als auch die erzielbaren Wirkungsgrade verbessern [Hah07].

⁶ Siehe dazu auch Beispiel 2.1 in Abschnitt 2.2.

Aufgrund der Modularität von PV-Anlagen ist eine Kategorisierung analog zu KWK-Anlagen nicht sinnvoll. Allgemein kann festgehalten werden, dass kleinere PV-Anlagen mit einer elektrischen Peakleistung⁷ von einigen Kilowatt direkt auf den zu versorgenden Objekten installiert werden können. Im Gegensatz dazu gibt es auch Systeme im Leistungsbereich einiger Megawatt [MFHK06], die in der Regel auf einer größeren Freifläche installiert und auf Mittelspannungsebene in das elektrische Netz integriert werden. Aufgrund der vergleichsweise „jungen“ Anlagentechnik wird der Ausbau von PV-Anlagen massiv durch die im EEG festgelegte Einspeisevergütung gefördert [EEG04]. Obwohl der Anteil der photovoltaisch erzeugter Elektroenergie an der Deckung des gesamten elektrischen Energieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2007 mit ca. 0,6 % noch sehr gering war, zeigt die Zuwachsrate von knapp 60 % im Vergleich zum Vorjahr deutlich die Wirksamkeit dieses Anreizprogramms [Bun08].

PV-Systeme können auf zwei prinzipiell unterschiedliche Weisen in das elektrische Netz integriert werden [KSW06]:

- Bei netzunabhängigen Anwendungen erfolgt der Einsatz der PV-Anlagen entweder als - vor allem ökonomisch oder ökologisch motivierte - Alternative zur öffentlichen Versorgung (netzfreier Betrieb), oder eine Integration in die elektrische Infrastruktur ist technisch etwa aufgrund der physikalischen Entfernung nicht möglich bzw. ökonomisch nicht sinnvoll (netzferner Betrieb).
- Im Kontext von netzgekoppelten Anwendungen ist das PV-System an das öffentliche Versorgungsnetz angeschlossen und kann überschüssige, d.h. den lokalen Bedarf überschreitende Elektroenergie in das elektrische Netz einspeisen. Aufgrund der Einspeisevergütung für regenerativ erzeugten Strom durch das EEG ist diese Variante in Deutschland die häufigere.

2.1.4 Integrationsbedarf dezentraler Energiesysteme

DER wie KWK- oder PV-Anlagen bieten ein Potenzial zur Reduktion von Energieträgerimporten und klimaschädlichen Emissionen. Allerdings ergeben sich aus einer verstärkten Einbindung dieser Anlagen in die elektrischen Netze auch neue Anforderungen an den zuverlässigen Betrieb des Gesamtsystems. Besonders problematisch stellt sich dabei das aus Gesamtsystemsicht stochastisch erscheinende Einspeiseverhalten dieser Anlagen dar, das sich einerseits aus der dargebotsabhängigen Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger wie der solaren Einstrahlung oder des Windes und andererseits aus der Kopplung der Erzeugung von Elektroenergie an objektabhängig unterschiedliche thermische Bedarfe ergibt. In beiden Fällen lässt sich die Einspeisung elektrischer Energie nur mit einer gewissen Unsicherheit prognostizieren und erfolgt zudem in der Regel nicht bedarfsgerecht [HHJ⁺07, BBF⁺08]. Ein stabiler und zuverlässiger Betrieb des Gesamtsystems erfordert daher die Vorhaltung von Leistungsreserven, um Abweichungen von der prognostizierten Energiebereitstellung durch DER kompensieren zu können. Die

⁷ Die Peakleistung wird zum Zeitpunkt der maximalen Sonneneinstrahlung erreicht.

Vorhaltung dieser Reserven erfolgt in der Regel durch einen Teillastbetrieb konventioneller thermischer Kraftwerke, die ihre Leistungsabgabe entsprechend der jeweiligen Anforderungen anpassen können. Der Teillastbetrieb wirkt sich allerdings ungünstig auf den Wirkungsgrad (siehe Abb. 2.8) und damit auch auf den spezifischen Primärenergiebedarf und die Emissionswerte der Kraftwerke aus. Die Vorhaltung konventioneller Leistungsreserven vermindert daher den durch den Einsatz dezentraler Energiesysteme intendierten Effizienzgewinn und sollte im Sinne einer Gesamtsystemoptimierung minimiert werden.

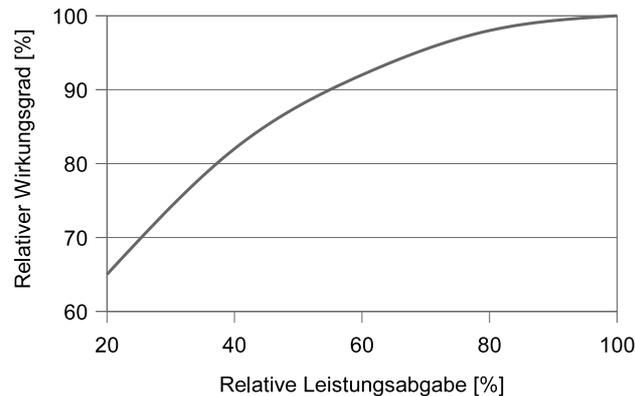


Abbildung 2.8: Exemplarische Abhängigkeit des relativen Wirkungsgrads konventioneller thermischer Kraftwerke von der Leistungsabgabe (nach [HHJ⁺07]).

Eine weitere wesentliche Anforderung ergibt sich aus der langfristig angestrebten Substitution konventioneller Kraftwerkskapazitäten durch DER. Die in der rotierenden Masse der Kraftwerksgeneratoren gespeicherte kinetische Energie wirkt über die Netzkopplung automatisch dämpfend auf Frequenzabweichungen [HDS07] und bestimmt damit insbesondere auch die zulässige zeitliche Verzögerung von Ausgleichsmaßnahmen im Sinne des Regelleistungsabrufs. Mit einer möglichen Reduktion konventioneller Kraftwerkskapazitäten gehen damit erhöhte Anforderungen an den stabilen Betrieb des Energieversorgungssystems einher [LBC⁺08], die eine Teilhabe dezentraler Energiesysteme an den Systemdiensten erforderlich machen.

Insgesamt lässt sich damit festhalten, dass der Bedarf an kurzfristiger Flexibilität mit einer zunehmenden Dezentralisierung der Energieversorgung wächst und einen Übergang von der bisher passiven Einbindung dezentraler Energiesysteme hin zu einer durch geeignete Steuerungs- bzw. Koordinationskonzepte realisierte aktive Integration dieser Anlagen erfordert [HHJ⁺07, BBF⁺08].

2.2 Virtuelle Kraftwerke

VK stellen ein in der domänenspezifischen Literatur intensiv diskutiertes Konzept zur aktiven Einbindung dezentraler Energiesysteme dar⁸. Die ursprüngliche Idee dieses Ansatzes war es, dezentral verfügbare Kapazitäten zu einem Ganzen zu bündeln, das sich aus Sicht des Energieversorgungssystems wie ein konventionell steuerbares Kraftwerk verhält [Bit00, BFA02]. Neuere Arbeiten diskutieren VK unter verschiedenen Schwerpunkten hinsichtlich Architektur [SWN⁺06, BT09], Zielfunktion [WSK05, Str06] oder Anlagenkonfiguration [NTA08]. Der Begriff „Virtuelles Kraftwerk“ wird dabei in der Literatur anwendungsfallabhängig mit verschiedenen Konnotationen verwendet. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt zunächst ein den unterschiedlichen Sichten gemeinsames - sozusagen „kondensiertes“ - Verständnis dieses Begriffs eingeführt und anhand einiger Anwendungsbeispiele erläutert. Anschließend wird die Einsatzplanung als übergeordneter Koordinationsmechanismus in VK vorgestellt und hinsichtlich der aus dem Integrationsbedarf dezentraler Energiesysteme abgeleiteten Anforderungen diskutiert. Den Abschluss bildet eine kurze Zusammenfassung der zentralen Problemstellung dieser Arbeit.

2.2.1 Begriffsklärung

Eine wesentliche Voraussetzung für die Koordination von dezentralen Anlagen ist eine informations- und kommunikationstechnische Anbindung [FWB⁺06, SRB⁺06, AC07, BBF⁺08], um auf der Grundlage von aktuell erhobenen oder prognostizierten Systemzuständen Koordinationsentscheidungen treffen und diese an die Anlagen übermitteln zu können. Dabei ist es zunächst unerheblich, ob die Entscheidungen von menschlichen Experten oder von geeigneten Informationssystemen getroffen werden. Charakteristisch für VK ist allerdings, dass eine *direkte* Koordination der einzelnen dezentralen Anlagen durch die Festlegung von Fahrplänen, d.h. zeitlich aufgelösten Leistungsvorgaben, angestrebt wird [BFA02, WSK05, SRB⁺06, Str06, KTS⁺07]. In Abgrenzung dazu setzen marktbasierende Integrationskonzepte für dezentrale Energiesysteme - in der Regel finanzielle - Anreizsysteme ein, die eine selbstbestimmte, *indirekte* Koordination des Verhaltens von DER realisieren sollen [Cra03, BNR⁺07]. Damit lässt sich Folgendes festhalten:

Begriffsklärung 1 (Virtuelles Kraftwerk)

Ein VK ist eine informationstechnische Zusammenfassung von dezentralen Energiesystemen (Erzeuger, Verbraucher, Speicher) mit dem Ziel einer direkten Koordination auf der IKT-Ebene.

Ein VK umfasst nach diesem Verständnis eine Menge von dezentralen Energiesystemen, die mittels einer Kommunikationsinfrastruktur an ein Informationssystem angebunden sind, welches die für die Koordination des VK notwendigen Daten bereitstellt

⁸ Siehe dazu auch Kapitel 3.

und die durch eine geeignete Planung generierten Fahrpläne an die Anlagen übermittelt. Art und Umfang der für den Planungsvorgang notwendigen Inputdaten, z.B. Anlageeigenschaften, Zustandsinformationen oder Verbrauchs- bzw. Erzeugungsprognosen, sind dabei ebenso wie die informationstechnische Architektur des Systems abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. Allgemein kann man sagen, dass dezentrale Anlagen im Rahmen eines VK zu Koordinationszwecken informationstechnischen Komponenten zugeordnet werden, die eine übergeordnete Planung ermöglichen (siehe Abbildung 2.9).

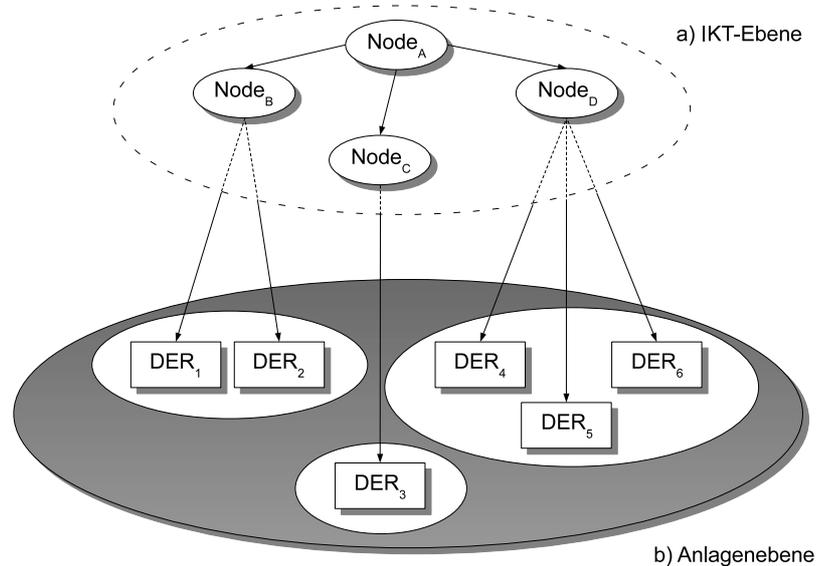


Abbildung 2.9: VK: Bündelung von Kapazitäten auf Anlagenebene b) durch eine geeignete informationstechnische Infrastruktur a).

Im Folgenden soll das Verständnis von Definition 1 anhand exemplarisch ausgewählter Einsatzarten von VK vertieft werden. Eine detaillierte Diskussion verwandter Arbeiten, die sich insbesondere den zur Koordination notwendigen Planungsprozessen in VK widmet, findet in Kapitel 3 statt.

Beispiel 2.1: Spitzenlastreduktion / Peak (Load) Shaving

Ziel des Peak Shaving bzw. Peak Load Shaving ist es, durch einen gezielten Einsatz dezentraler Anlagen eine signifikante Reduktion von Spitzenlasten insbesondere in Verteilnetzen zu erreichen (siehe Abbildung 2.10.). In [Ste77] wird eine frühe, durch einen Zentralrechnerrealisierte Variante dieses Betriebsführungskonzepts beschrieben. Neuere Arbeiten setzen sich u.a. mit spezialisierten Konzepten für unterschiedliche Anlagentypen wie Dieselgeneratoren [PFM⁺02] oder Mikro-BHKW [PK08a, PK08b] auseinander oder beziehen eine zeitliche differenzierte Zuverlässigkeitsbewertung in die Planung der Einsatzzeiten der dezentralen Anlagen mit ein [BKK⁺04]. Den aufgezeigten Ansätzen gemeinsam ist die Nutzung einer zentralisierten Architektur mit nur einer einzelnen IKT-Komponente zur Planung und Steuerung der verteilten Elektroenergieerzeugung.

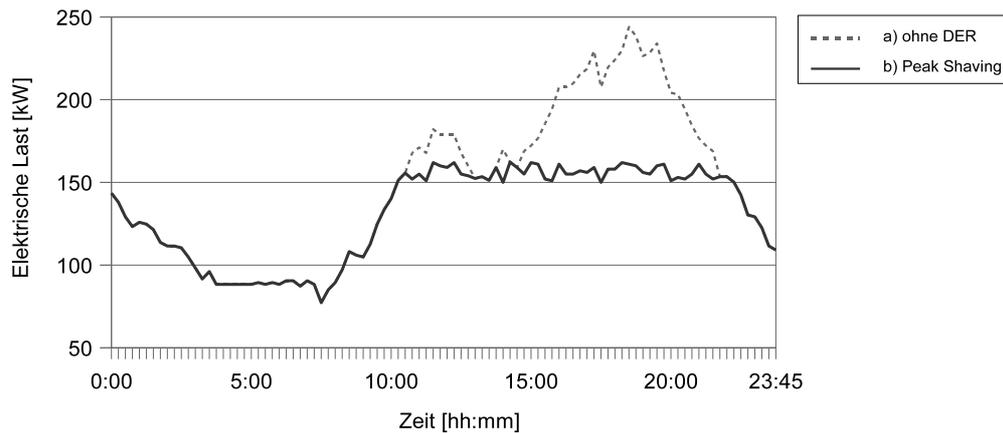


Abbildung 2.10: Exemplarischer Lastgang eines Niederspannungsnetzbezirks a) ohne Einspeisung von Elektroenergie durch DER und b) mit koordinierter Einspeisung (Peak Shaving, idealisiert).

Beispiel 2.2: Supply-Demand-Matching / MicroGrids

Supply-Demand-Matching [KKW⁺06, KKH⁺07, WLH⁺07] bzw. der (teil-)autarke Betrieb sogenannter MicroGrids [SWN⁺06, Wol07] stellen eine Verallgemeinerung der Spitzenlastreduktion dar. In Verteilnetzen mit einem - gemessen am durchschnittlichen Bedarf an elektrischer Energie - hohen Durchdringungsgrad an dezentralen Energiesystemen zielen diese Konzepte darauf ab, den lokalen Bedarf an Elektroenergie mit den vorhandenen dezentralen Anlagen möglichst gut abzudecken und somit den Energiebezug aus den übergeordneten Netzebenen zu minimieren (siehe Abbildung 2.11). Ein Spezialfall dieser Anwendung ist der sogenannte Inselbetrieb [RCS⁺00, Kal02], der allerdings weitreichende Anforderungen an Maßnahmen zur Wahrung der Systemstabilität und Energiequalität stellt [HHH⁺04, HDS07]. Die Umsetzung der vorgestellten Konzepte erfolgt in der Regel durch eine zentralisierte IT-Architektur, allerdings finden insbesondere bei einer steigenden Anzahl zu koordinierender Energiesysteme auch hierarchische Strukturen [KKW⁺06, KKH⁺07, WLH⁺07] Berücksichtigung.

Beispiel 2.3: Bereitstellung von Regelleistung

Wie bereits in Abschnitt 2.1.4 diskutiert, erfordert eine erfolgreiche Reduktion konventioneller Kraftwerkskapazitäten eine Beteiligung dezentraler Energiesysteme an den Systemdiensten. Die zuverlässige Bereitstellung von Regelleistung bzw. Regelenergie ist daher eine weitere mögliche Einsatzart von VK [BBF⁺08]. Dabei spielen neben den technischen Anforderungen [Str03, Str06] auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen [WSK05] eines solchen Einsatzes eine Rolle. Aus informationstechnischer Sicht sind bei dieser Einsatzart zentrale Steuerungssysteme, die eine mögliche Anforderung der vorgehaltenen Leistung an die dezentralen Anlagen übermitteln, dominant.

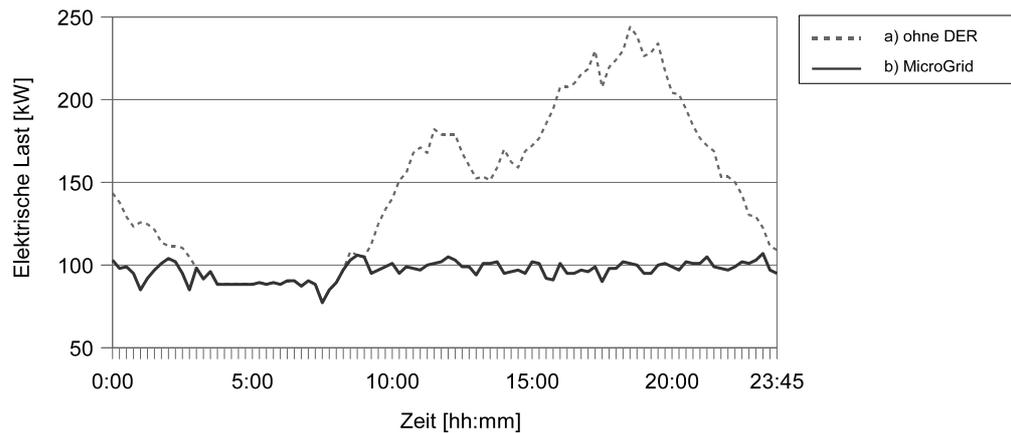


Abbildung 2.11: Exemplarischer Lastgang eines Niederspannungsnetzbezirks a) ohne Einspeisung von Elektroenergie durch DER und b) mit koordinierter Einspeisung (Supply-Demand-Matching / MicroGrid, idealisiert).

Neben den hier aufgeführten Einsatzmöglichkeiten von VK sind natürlich noch weitere, vor allem auf die Bereitstellung von Wirkleistung bezogene Anwendungsfälle vorstellbar. Insbesondere könnte ein Betreiber eines VK als Akteur an einer Strombörse wie der EEX oder einem regionalen Energiemarktplatz [Kra09] auftreten und entsprechend gehandelte Produkte anbieten. Als vertiefende Literatur zum Themenkomplex Energiehandel seien [Kon06], [HC06] sowie [ZS09] empfohlen.

2.2.2 Einsatzplanung in Virtuellen Kraftwerken

Nach Begriffsklärung 1 zeichnet sich ein VK durch eine direkte Koordination dezentraler Anlagen mittels Fahrplänen aus, die zeitlich aufgelöste Leistungsvorgaben für die einzelnen DER darstellen. Die Erstellung dieser Fahrpläne erfolgt dabei unter Berücksichtigung von gewissen technischen und betriebswirtschaftlichen Nebenbedingungen und hinsichtlich der Optimierung einer anwendungsfallabhängigen Zielfunktion. Aufgabe der Einsatzplanung in VK ist es, dieses Optimierungsproblem auf der Grundlage von Systemzustandsinformationen und Last- bzw. Leistungsprognosen zu lösen. Im Folgenden steht zunächst die in Abbildung 2.12 vereinfacht dargestellte Auffassung von Einsatzplanung als betriebswirtschaftliche Prozesskette im Vordergrund; ein formales Verständnis des Einsatzplanungsproblems findet sich in Abschnitt 4.1.

Nach [Cra08] lässt sich der energiewirtschaftliche Einsatzplanungsprozess in mehrere aufeinander aufbauende Planungsprozesse unterteilen. Dabei reicht der Planungshorizont von langfristigen, strategischen Planungsentscheidungen wie der Optimierung des Primärenergiebezugs durch langfristig abgeschlossene Lieferverträge bis in den Bereich der Realisierung von Einsatzplänen im Rahmen der Betriebsführung. Hinsichtlich der Koordination dezentraler Anlagen in VK sind dabei zwei Planungsprozesse von besonderem Interesse: Die *Tageseinsatzplanung* generiert auf der Grundlage von Prognosedaten

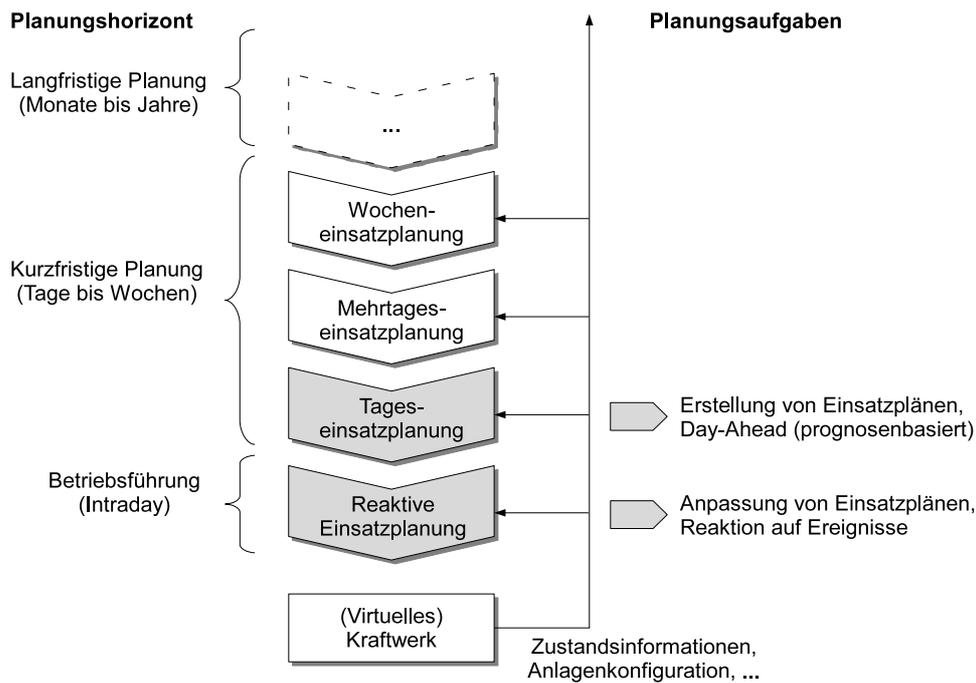


Abbildung 2.12: Einsatzplanung als betriebswirtschaftliche Prozesskette mit aufeinander aufbauenden Planungsprozessen (nach [Cra08]).

ten in der Regel Day-Ahead, d.h. bis zu 24 Stunden vor einer tatsächlichen Bereitstellung von Elektroenergie, einen Einsatzplan für das VK. Da sowohl die Leistungsprognosen dargebotsabhängiger Energiewandlungsanlagen als auch die Prognosen von thermischen bzw. elektrischen Bedarfen auf Gebäudeebene mit einer letztlich unvermeidbaren Unsicherheit behaftet sind [DBLA98, MKAP03, ZWXX08], ist es Aufgabe der *reaktiven Einsatzplanung*, auf Abweichungen vom initialen Einsatzplan im laufenden Betrieb geeignet zu reagieren. Im Folgenden werden diese beiden Planungsprozesse bezüglich der besonderen Anforderungen von VK diskutiert.

Tageseinsatzplanung

Der Betreiber eines VK ist in seiner energiewirtschaftlichen Rolle als Lieferant bzw. Erzeuger in das Management seines zugehörigen Bilanzkreises eingebunden⁹. Damit ist er verpflichtet, die bzgl. der Lieferstellen des Bilanzkreises aggregierten Fahrpläne der dezentralen Anlagen des VK im Voraus an den Bilanzkreisverantwortlichen zu melden [KSB⁺05]. Aus dieser Meldepflicht resultiert die Notwendigkeit der Tageseinsatzplanung, die den individuellen DER entsprechende Fahrpläne zuweist und damit die

⁹ Im Folgenden wird vereinfacht davon ausgegangen, dass sämtliche Anlagen eines VK an Lieferstellen eines einzelnen Bilanzkreises angeschlossen sind. Der allgemeine Fall eines bilanzkreisübergreifenden VK wird in Abschnitt 5.3 diskutiert.

Integration in das energiewirtschaftliche Gesamtsystem realisiert. Die Generierung der Fahrpläne stellt dabei ein Optimierungsproblem mit einer anwendungsfallabhängigen Zielfunktion und Nebenbedingungen in Form technischer Anlagencharakteristika sowie aktueller und prognostizierter Systemzustände dar. Abhängig insbesondere von der Anlagenanzahl und dem gewünschten Detaillierungsgrad der Problemmodellierung sind unterschiedliche algorithmische Ansätze zur Lösung des Tageseinsatzplanungsproblems geeignet [Win09]. Die Tageseinsatzplanung muss mindestens einmal täglich durchgeführt werden und aufgrund der Anforderungen des Bilanzkreismanagements nach heute geltender Regelung [HDS07, Cra08] bis spätestens 14.30 Uhr eine Lösung des auch als *Unit Commitment Problem* [MS83, TKW00, BRS⁺06] bezeichneten Optimierungsproblems in Form eines Einsatzplans liefern, der den dezentralen Anlagen eines VK entsprechend optimierte Fahrpläne zuordnet. Aus der Aggregation der Einzelfahrpläne resultiert dann ein in Abbildung 2.13 exemplarisch für die Spitzenlastreduktion dargestellte Gesamtfahrplan eines VK.

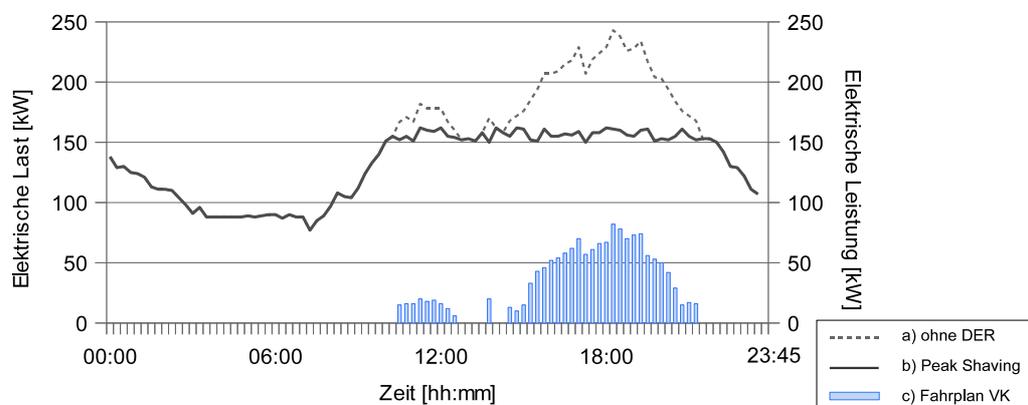


Abbildung 2.13: Exemplarischer Gesamtfahrplan c) eines VK mit dem Ziel der Spitzenlastreduktion b), erstellt auf der Grundlage einer Lastprognose a).

Die Durchführung des Tageseinsatzplanung lässt sich nach Winkels [Win09] in vier unterschiedliche Phasen bzw. Teilprozesse untergliedern (siehe Abbildung 2.14): Grunddatenerzeugung, Bedarfsplanung, Anlageneinsatzplanung und Marktkommunikation.



Abbildung 2.14: Die vier Phasen der Tageseinsatzplanung nach dem Referenzmodell in [Win09].

Die *Grunddatenerzeugung* wird bei Bedarf ausgeführt und dient der Erfassung der für die Parametrisierung des Unit Commitment Problems notwendigen Daten. Dazu gehören neben grundlegenden Informationen über die Zusammensetzung eines VK¹⁰ insbeson-

¹⁰ Bei einer statischen Zusammensetzung eines VK sind die Grunddaten im Wesentlichen zeitlich unverän-

dere die technischen Eigenschaften der einzelnen Anlagen sowie die anlagenabhängigen Start- bzw. Betriebskosten. Die *Bedarfsplanung* umfasst vor allem die Erstellung von Prognosen des thermischen bzw. elektrischen Bedarfs für den Erfüllungstag. Anwendungsfallabhängig werden dabei auch bereits abgeschlossene oder noch zu tätige Lieferverträge und Energieeinkäufe z.B. an der EEX sowie die Energiebereitstellung aus nicht-steuerbaren Energiesystemen wie etwa Photovoltaikanlagen berücksichtigt. Ergebnis der Bedarfsplanung ist der Nettoproduktionsbedarf, der durch das VK abgedeckt werden soll und in Form von Nebenbedingungen bzw. Ergänzungen der Zielfunktion auf das Unit Commitment Problem abgebildet wird. Der Teilprozess *Anlageneinsatzplanung* dient anschließend der Lösung des formulierten und parametrisierten Optimierungsproblems und generiert unter Einsatz eines geeigneten Lösungsverfahrens einen entsprechend der Zielvorgaben strukturierten Einsatzplan, der den DER eines VK individuelle Fahrpläne zuordnet. Die generierten Fahrpläne werden abschließend im Rahmen der *Marktkommunikation* sowohl an die dezentralen Anlagen übermittelt als auch bei den Bilanzkreisverantwortlichen angemeldet.

Reaktive Einsatzplanung

Die im Rahmen der Tageseinsatzplanung verwendeten Prognosedaten sind hinsichtlich der am Erfüllungstag tatsächlich eingetretenen Bedarfs- bzw. Erzeugungsverläufe mit einer unvermeidlichen Unsicherheit behaftet. Dies liegt zum einen an den notwendigen Vereinfachungen der mathematischen Modelle, die der Generierung der Prognosedaten zugrunde liegen [BRS⁺06, Bar07], und zum anderen an lokalen Einflüssen wie dem individuellen menschlichen Verhalten oder Störungen in technischen Prozessabläufen, die sich in Form unvorhersehbarer stochastischer Abweichungen von den prognostizierten thermischen und elektrischen Bedarfen niederschlagen [Tho07] können. Aus dieser Unsicherheit der Datengrundlage resultieren daher im Rahmen der Realisierung eines Einsatzplanes am Erfüllungstag positive bzw. negative Abweichungen von den initial generierten Fahrplänen der dezentralen Anlagen, die letztlich durch die Inanspruchnahme negativer bzw. positiver Regelenergie ausgeglichen werden müssen. Eine Möglichkeit, den durch Fahrplanabweichungen induzierten Bedarf an Regelenergie zu minimieren, ist der Einsatz stochastischer Optimierungsverfahren im Rahmen der Tageseinsatzplanung [BRS⁺06, Bar07]. Die Verwendung stochastischer Programmierung [KW94] zur Lösung des Unit Commitment Problems ermöglicht es, unsichere Eingangsgrößen durch geeignete Verteilungsfunktionen zu beschreiben. Dadurch konnte etwa Barth [Bar07] ein hinsichtlich der Unsicherheiten robusteres Optimierungsergebnis erzielen als mit deterministischen Verfahren.

Ein alternativer bzw. die stochastische Optimierung ergänzender Ansatz zur Behandlung von Planungsunsicherheiten ist die im Kontext der Betriebsführung angesiedelte reaktive Einsatzplanung (vgl. Abbildung 2.12). Vor dem Hintergrund der energiewirtschaftlichen Einbindung von VK im Rahmen des Bilanzkreismanagements und den in

derlich. Im Gegensatz dazu kann es bei den in [NTA08] vorgestellten dynamischen VK notwendig sein, das Tageseinsatzplanungsproblem nach jeder Konfigurationsänderung neu zu formulieren.

Abschnitt 2.1.4 diskutierten Anforderungen an die Koordination dezentraler Energiesysteme besteht die wesentliche Aufgabe der reaktiven Einsatzplanung darin, im laufenden Betrieb auftretende Abweichungen von individuellen Anlagenfahrplänen so zu kompensieren, dass der Gesamtfahrplan des VK möglichst zuverlässig eingehalten wird. Das folgende Beispiel soll diesen Sachverhalt illustrieren:

Beispiel 2.4: Reaktive Einsatzplanung

Gegeben sei ein VK, das durch den koordinierten Einsatz mehrerer Blockheizkraftwerke (kurz: BHKW) eine Spitzenlastreduktion in einem Niederspannungsnetzabschnitt zum Ziel hat. Mittels einer Tageseinsatzplanung werden den einzelnen Anlagen individuelle Fahrpläne zugeordnet, die sich zu dem in Abbildung 2.13 dargestellten Gesamtfahrplan aggregieren. Für die Erstellung der Anlagenfahrpläne greift die Tageseinsatzplanung u.a. auf eine Prognose der thermischen Bedarfe der durch die BHKW mit Wärme versorgten Objekte zurück. Durch Abweichungen von diesen Prognosedaten ergibt sich die Situation, dass der thermische Speicher einer KWK-Anlage des VK frühzeitig seine maximale Temperatur erreicht. Dadurch muss das entsprechende BHKW entgegen seines initialen Fahrplans abgeschaltet werden, wodurch sich eine Abweichung vom Gesamtfahrplan des VK in Höhe der eigentlich eingeplanten Leistung ergibt. Zur Kompensation dieser Abweichung wird die entsprechende Leistungsdifferenz einer Alternativanlage zugewiesen, deren thermischer Speicher über ausreichend Wärmekapazität zur Pufferung des thermischen Outputs verfügt. Dabei ist zu beachten, dass sich der Zustand des gewählten BHKW ändert und dadurch möglicherweise zukünftige Fahrplanabweichungen provoziert werden.

Trotz ihrer Bedeutung für einen zuverlässigen und optimalen Betrieb eines VK existiert bislang keine systematische Aufbereitung der reaktiven Einsatzplanung. Ein früher, wenngleich nur unzureichend dokumentierter Ansatz ist die insbesondere in [Bit00, BFA02] vorgestellte Online-Optimierung, die ein steuerndes bzw. reaktiv agierendes Modul eines Dezentralen Energiemanagementsystems (kurz: DEMS) darstellt. Die Umsetzung der Online-Optimierung erfolgt dabei durch ein zentrales Informationssystem, das über eine Prozessschnittstelle Zustandsdaten von dezentralen Anlagen empfangen und korrigierte bzw. optimierte Fahrpläne wieder an die Anlagen übermitteln kann (siehe dazu auch Abbildung 3.2 auf Seite 45). Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt der Intraday-Regler aus [Tho07], der für den spezialisierten Fall einer Batterieregelung im Rahmen einer optimierten Spitzenlastreduktion innerhalb eines Niederspannungsnetzabschnitts entwickelt wurde. Beide Konzepte werden in Kapitel 3 noch genauer vorgestellt und diskutiert; zunächst festzuhalten ist jedoch, dass sich die reaktive Einsatzplanung in VK analog zur Tageseinsatzplanung in mehrere Phasen bzw. Teilprozesse untergliedern lässt (siehe Abbildung 2.15): Zunächst wird im Rahmen der *Zustandsdatenerfassung* der aktuelle Systemzustand der dezentralen Anlagen ermittelt, um Fahrplanabweichungen entdecken zu können und eine Grundlage für geeignete Reaktionen zur Verfügung zu haben. Im Anschluß daran werden Abweichungen durch *Fahrplananpassungen*, d.h. dem Festlegen neuer Zielvorgaben für geeignete Alternativanlagen, kompensiert. Die aktualisierten Fahrpläne können bei Bedarf noch durch eine *Fahrplanoptimierung* hinsichtlich

technischer bzw. betriebswirtschaftlicher Nebenbedingungen verbessert werden. Zuletzt schließt die *Übermittlung* der überarbeiteten Fahrpläne an die betroffenen dezentralen Energiesysteme die reaktive Planung ab.



Abbildung 2.15: Die Phasen der reaktiven Einsatzplanung.

Die beschriebenen Teilprozesse können durch unterschiedlich gestaltete Informationssysteme realisiert werden. Dabei ergeben sich allerdings aus den bisher und insbesondere auch in Abschnitt 2.1.4 diskutierten Rahmenbedingungen für den Betrieb von VK eine Reihe von Anforderungen, denen die reaktiv agierenden Systeme genügen müssen.

Anforderungen an reaktive Einsatzplanung in VK

A₁ (Reaktionsfähigkeit) Um den Gesamtfahrplan eines VK möglichst zuverlässig einhalten zu können, ist eine zeitnahe Reaktion auf Fahrplanabweichungen notwendig. Vor dem Hintergrund des in der Energiewirtschaft üblichen Abrechnungsintervall von 15 Minuten hat sich in [Tho07] eine Regelgeschwindigkeit von ca. 5 Minuten als für die Praxis ausreichend erwiesen. Eine effiziente Vermeidung der Inanspruchnahme von Regelleistung kann darüber hinaus eine schnellere Reaktion erforderlich machen, die jedoch maßgeblich von der Regelbarkeit der Anlagen eines VK beschränkt wird. Die Kompensation kurzfristiger, d.h. im Bereich von Sekunden oder Millisekunden angesiedelter Leistungsschwankungen ist nur durch den Einsatz geeigneter Speichersysteme wie etwa Masseschwungräder oder Superkondensatoren zu erreichen [LBC⁺08] und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter diskutiert.

A₂ (Anlagenzahl) Zur Überwindung bestimmter Markteintrittsschranken können sich VK aus mehreren hundert bzw. tausend dezentralen Energiesystemen zusammensetzen, die dennoch zuverlässig reaktiv koordiniert werden müssen. Als Beispiel sei die Bereitstellung von Minutenreservekapazität genannt, die einerseits die Bereitstellung einer gewissen Gesamtleistungskapazität erfordert¹¹ und andererseits hohe Ansprüche an die Systemverfügbarkeit stellt.

A₃ (Systemdynamik) Aus einer möglicherweise großen Anlagenzahl und den Unsicherheiten der Tageseinsatzplanung kann ein sehr dynamisches System resultieren, in dem mehrere Fahrplanabweichungen zur gleichen Zeit auftreten können. Neben der bereits in Anforderung A₁ genannten Reaktionsfähigkeit ist es daher notwendig, Fahrplanabweichungen nach Möglichkeit frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls durch vorausschauende Fahrplanoptimierungen zu vermeiden. Zudem sollten die zur Kompensation von Abweichungen notwendigen Fahrplananpassungen so gewählt werden, dass sie möglichst wenig Folgeabweichungen hervorrufen.

¹¹ Aktuell wird eine Regelkapazität von mindestens 15 MW gefordert [BBF⁺08].

A₄ (Individualität) VK können sich aus unterschiedlichen Typen von Energiewandlungsanlagen zusammensetzen. Zudem sind die dezentralen Anlagen in der Regel räumlich weit verteilt, was sich insbesondere auch in orts- bzw. kontextabhängigen Rahmenbedingungen - etwa hinsichtlich der lokalen Abschattung von PV-Anlagen durch Bäume oder umgebende Gebäude - für einzelne Anlagen niederschlägt. Daraus kann ein individuelles Verhalten ansonsten baugleicher Systeme resultieren. Eine reaktiv agierende Komponente muss daher sowohl über die technischen Eigenschaften und Betriebsrestriktionen als auch über den aktuellen Systemzustand der dezentralen Anlagen eines VK informiert sein.

A₅ (Robustheit) Durch Fahrplananpassungen werden bei einer Anlage Zustandsänderungen wie etwa Ein- und Ausschaltvorgänge oder der Wechsel einer Modulationsstufe ausgelöst. Abhängig von den technischen Parametern und Möglichkeiten eines dezentralen Energiesystems können sich häufige Zustandsänderungen negativ auf die Lebensdauer der Anlage auswirken [Tho07, Mes07] und sollten daher im Sinne eines möglichst gleichmäßigen Anlagenbetriebs vermieden werden. Insbesondere vor dem Hintergrund der Systemdynamik sollte die reaktive Einsatzplanung deshalb die Generierung robuster Fahrpläne zum Ziel haben, die sich auch nach der Kompensation von Fahrplanabweichungen nahe an den ursprünglichen Leistungsvorgaben orientieren.

2.3 Intelligente Agenten und Multiagentsysteme

Die Künstliche Intelligenz (kurz: KI) ist eine verhältnismäßig junge Wissenschaftsdisziplin - erste Arbeiten stammen aus den 1950er Jahren - mit vielen Teilgebieten und unterschiedlichen Ansichten darüber, was KI eigentlich ausmacht. Russell und Norvig ordnen in [RN03] einige grundsätzliche Definition von KI-Systemen anhand der gewünschten Fähigkeiten ein: Auf der einen Seite die Fähigkeit zu menschlichem Denken - in [Hau85] mittels „*Maschinen mit Geist*“ subsumiert - bzw. die Fähigkeit, wie Menschen - und damit, wie von Alan Turing vorgeschlagen, ununterscheidbar von diesen - zu handeln und auf der anderen Seite analog die Fähigkeit zu rationalem - d.h. unter anderem auf Fakten, Zielen und Erwartungen basierendem, aber nicht notwendigerweise entlang menschlicher Entscheidungsprozesse ausgerichtetem - Denken bzw. rationalem Handeln. Letzteres ist der Ausgangspunkt für die Untersuchung und Entwicklung von Agenten bzw. Multiagentensystemen (kurz: MAS), die im Weiteren etwas genauer vorgestellt werden sollen. Dabei wird der Fokus nach einer kurzen Einführung in die grundlegenden Begrifflichkeiten insbesondere auf der Organisation von MAS und dem Konzept holonischer Agentensysteme liegen.

2.3.1 Intelligente Agenten

Der Begriff „Agent“ bzw. „intelligenter Agent“ ist - insbesondere auch aufgrund der bereits angedeuteten „Strömungen“ in der KI - bis heute nicht eindeutig definiert.

Nach Russell und Norvig ist ein Agent:

„[...] alles, was seine Umgebung über Sensoren wahrnehmen kann und in dieser Umgebung durch Aktuatoren handelt.“ [RN03]

Wie in Abbildung 2.16 dargestellt, dienen dabei die mittels der Sensoren aufgezeichneten Wahrnehmungen bzw. Perzepte als Input für eine Agentenfunktion bzw. deren Implementierung in Form eines Agentenprogramms, das entsprechende Aktionen auslösen kann, um auf die Umgebung einzuwirken.

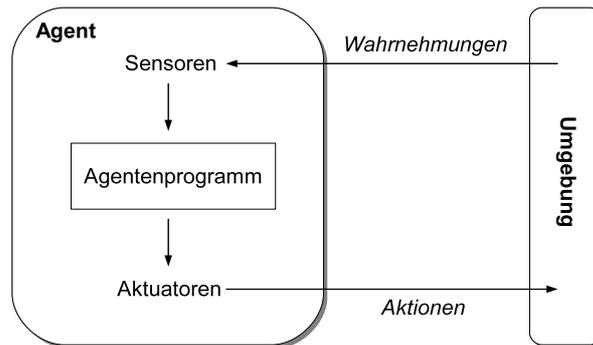


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung eines Agenten (nach [RN03]).

Eine rationale Auswahl möglicher Aktionen hängt dabei nach [RN03] von folgenden Faktoren ab, die auch als *PEAS* - *Performance, Environment, Actuators, Sensors* bezeichnet werden:

- Einer Leistungsbewertung (*Performance*), die den Erfolg des Handelns eines Agenten bewertet,
- dem Wissen des Agenten über die Umgebung (*Environment*),
- dem Aktionsrepertoire eines Agenten (*Actuators*), sowie
- den Wahrnehmungen eines Agenten (*Sensors*).

Letzteres muss dabei nicht auf das aktuelle Perzept beschränkt sein, sondern kann auch eine vollständige, chronologisch aufgezeichnete Wahrnehmungsfolge umfassen. Ein idealer rationaler Agent sollte demnach stets diejenige Aktion auswählen, die unter Berücksichtigung seines Wissens und seiner Wahrnehmungen zu einer Maximierung der Leistungsbewertung führt. Neben der Rationalität zählen Wooldridge und Jennings [WJ95, Woo99] insbesondere die Autonomie zu den wesentlichen Merkmalen intelligenter Agenten:

„Ein Agent ist ein Computersystem, das in einer Umgebung lokalisiert und in dieser fähig ist, autonome Aktionen auszuführen, um seine Zielvorgaben zu erreichen.“ [Woo99]

Unter Autonomie verstehen Wooldridge und Jennings in diesem Kontext die Fähigkeit eines Agenten, ohne externe Vorgaben oder Anstöße handeln zu können. Insbesondere besitzt ein Agent damit also die Kontrolle über seinen internen Zustand und die Auswahl von konkreten Aktionen. Die Intelligenz eines Agenten äußert sich nach diesem Verständnis durch autonomes und flexibles Handeln, welches durch folgende Eigenschaften definiert wird [WJ95]:

- Reaktivität ermöglicht es einem Agenten, seine Umgebung wahrzunehmen und auf Änderungen zu reagieren;
- Proaktivität umfasst die Fähigkeit zum zielgerichteten Handeln aus eigener Initiative heraus, d.h. insbesondere auch ohne Wahrnehmung einer Änderung der Umwelt, und
- soziale Fähigkeiten ermöglichen Interaktionen bzw. ein Zusammenarbeiten mit anderen Agenten innerhalb der gleichen Umgebung.

Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung von Agenten ist dabei eine effektive Balance zwischen reaktivem und proaktivem Verhalten [Woo99]: Veränderungen in der Umgebung müssen zeitnah erkannt und in die Entscheidungsfindung integriert werden, um unerwünschte Systemzustände - beispielsweise Kollisionen von physisch manifestierten Agenten mit Hindernissen - zu vermeiden. Im Gegensatz dazu erfordert die Optimierung der Leistungsbewertung im Allgemeinen eine systematische - und damit insbesondere auch zeitaufwändige - Abwägung der Handlungsmöglichkeiten. Zudem üben die Eigenschaften der Umgebung, in der ein Agent sich aufhält, ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf das Design des Agentenprogramms bzw. der Entscheidungsfindungsprozesse aus. Entsprechende Kategorisierungen von Umgebungen bzw. Umgebungseigenschaften sowie der resultierenden Anforderungen an das Agentendesign finden sich bei Russell und Norvig [RN03] sowie Huhns und Stephens [HS99] und sollen hier nicht weiter vertieft werden.

2.3.2 Multiagentensysteme

MAS haben - auch aufgrund der zunehmenden Durchdringung von Computersystemen in der Industrie, dem Dienstleistungssektor und dem Privatbereich - in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit im Kontext verteilter und offener Einsatzumgebungen von Informationssystemen erhalten. Offene Umgebungen, wie beispielsweise das Internet, innerbetriebliche Anwendungslandschaften oder Produktionssteuerungssysteme in der industriellen Fertigung, zeichnen sich im Allgemeinen durch eine heterogene und gegebenenfalls teilweise unbekannt Systemlandschaft sowie eine hohe Dynamik bzw. zeitliche Veränderlichkeit aus [Syc98, Wei99]. Abbildung 2.17 stellt das Konzept eines MAS schematisch dar: Mehrere interagierende und gegebenenfalls organisatorisch miteinander in Beziehung stehende Agenten beeinflussen Teile einer in der Regel offenen Systemumgebung. Dabei können die Agenten anwendungsfallabhängig sowohl individuelle als auch gemeinsame Ziele verfolgen und etwa hinsichtlich der Nutzung bestimmter

Ressourcen in den nicht notwendigerweise überschneidungsfreien Einflussbereichen kooperieren oder konkurrieren [Woo99, Jen00].

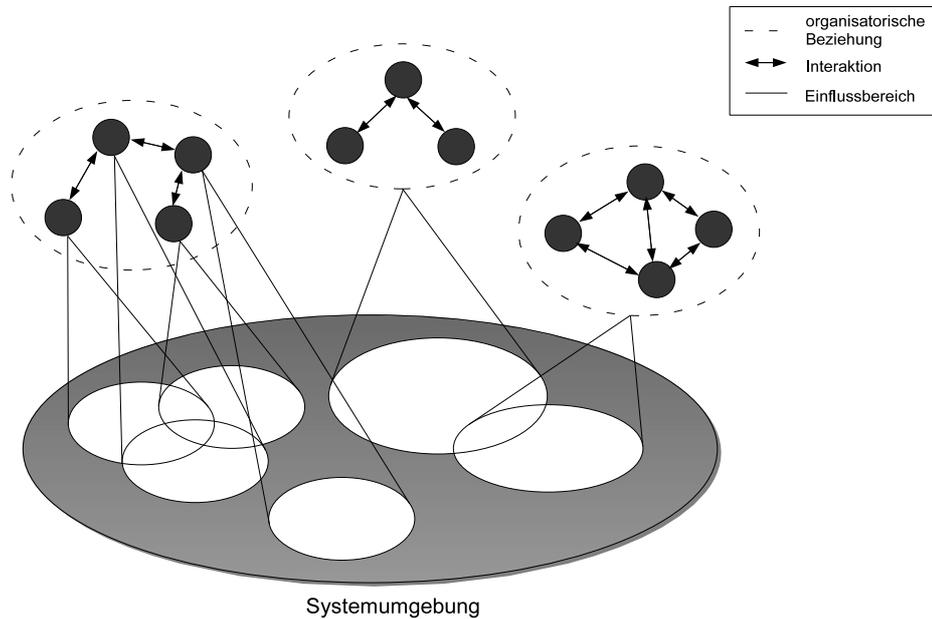


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung eines Multiagentensystems (nach [Jen00]).

Durfee und Lesser definieren MAS im Sinne der verteilten Problemlösung (engl.: *distributed problem solving*) als:

„[...] lose gekoppeltes Netzwerk von Komponenten [problem solvers], die interagieren, um Probleme zu lösen, die die individuellen Fähigkeiten oder das Wissen einzelner Komponenten übersteigen. [DL89]

Als wesentliche Eigenschaften eines MAS lassen sich etwa nach Sycara [Syc98] die folgenden festhalten:

- **Eingeschränkte Sicht:** Kein Agent verfügt über ausreichende Informationen oder Fähigkeiten, um eine gegebene Problemstellung allein - d.h. im Sinne eines zentralisierten Informationssystems - zu lösen.
- **Dezentrale Datenhaltung:** Die für die Lösung einer Problemstellung notwendigen Daten liegen - möglicherweise auf sehr unterschiedliche Systemen verteilt - dezentral in der Systemumgebung vor.
- **Asynchrone Berechnungen:** Die Erstellung von Teillösungen kann - insofern keine direkten Abhängigkeiten zu Inputdaten anderer Agenten bestehen - zeitlich nebenläufig erfolgen.

Aus dieser Beobachtung folgen - eine geeignete Implementierung vorausgesetzt - eine Reihe von Vorteilen hinsichtlich der Performanz von MAS gegenüber „konventionellen“ Informationssystemen [Syc98, HS99]:

- **Effizienz:** Durch die Ausnutzung der Nebenläufigkeit können - unter der Bedingung hinreichend niedriger Kommunikationskosten - Berechnungen effizienter durchgeführt werden.
- **Zuverlässigkeit und Robustheit:** Fehlerhaftes Verhalten einzelner Agenten kann aufgrund der im System verteilten und gegebenenfalls redundant vorliegenden Kompetenzen durch eine dynamische Koordination kompensiert werden. Durch einen geeigneten Informationsaustausch zwischen den Agenten ist das System darüberhinaus hinsichtlich des Umgangs mit Unsicherheit robuster.
- **Erweiterbarkeit und Wartbarkeit:** Aufgrund der modularen Struktur von MAS ist das System durch Hinzufügen von Agenten oder Anpassung ihrer Fähigkeiten leicht erweiterbar und einfacher wartbar als ein monolithisches Informationssystem.
- **Reaktionsfähigkeit und Flexibilität:** Auftretende Ereignisse bzw. Störungen können lokal von den jeweils zuständigen Agenten behandelt werden. Darüberhinaus können sich Agenten mit unterschiedlichen Fähigkeiten zur Lösung eines Problems selbstständig und adaptiv organisieren und auf neue - und gegebenenfalls beim Design unberücksichtigte - Sachverhalte einstellen.

Kommunikation

Die von Wooldridge und Jennings postulierte Fähigkeit intelligenter Agenten zur sozialen Interaktion erfordert den Austausch von Informationen, um etwa Handlungen bzw. Aktionen einzelner Agenten koordinieren zu können. Im Rahmen eines (softwarebasierten) MAS können Agenten dazu mittels einer Kommunikationsinfrastruktur Nachrichten austauschen, deren Syntax und Semantik durch Kommunikationsprotokolle festgelegt werden. Dabei muss zwischen der anwendungsunabhängigen Semantik des Protokolls und der anwendungsfallspezifischen Semantik des Inhalts einer Nachricht differenziert werden [HS99]. Kommunikationsprotokolle werden in der Regel mittels sogenannter *Agent Communication Languages* (kurz: ACL) definiert, die das Format der Nachrichten sowie die möglichen Übertragungswege - z.B. in Form geeigneter Netzwerkprotokolle wie SMTP, TCP/IP oder HTTP - festlegen. Grundlage eines Großteils der bis heute entwickelten Kommunikationssprachen ist die *Knowledge Query and Manipulation Language* (kurz: KQML) [Ext93], die neben der von der *Foundation for Intelligent Physical Agents* (kurz: FIPA) spezifizierten FIPA ACL als Quasi-Norm angesehen werden kann.

Abbildung 2.18 stellt einen exemplarischen Informationsaustausch zwischen zwei Agenten mittels in KQML spezifizierter Nachrichten dar. In diesem aus der Energiewirtschaft heraus motivierten Beispiel stellt ein Verbraucheragent eine Anfrage bezüglich des aktuellen Preises für Elektroenergie an einen Erzeugeragenten (1). Die angesprochene Unterscheidung zwischen Protokoll- und Nachrichtensemantik zeigt sich in der

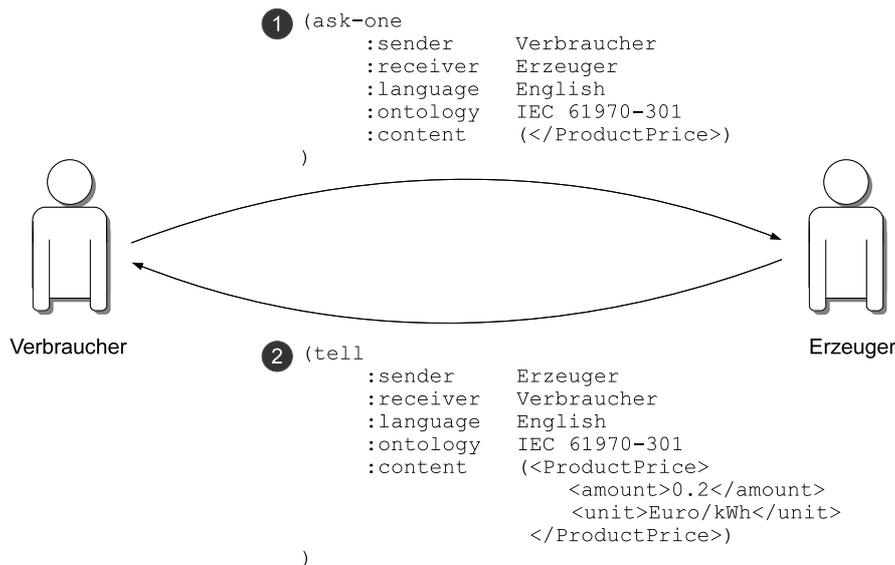


Abbildung 2.18: Exemplarischer Nachrichtenaustausch in KQML.

Struktur der Nachricht: Mittels des sogenannten Performativs¹² `ask-one` (1) wird die Bedeutung der gesendeten Nachricht - in diesem Fall eine Anfrage - gekennzeichnet, während die Semantik des Inhalts der Nachricht - d.h. der anwendungsfallspezifische Anteil der Semantik - mittels der Metainformationen `language` und `ontology` festgelegt wird. In obigem Beispiel wird das von der *International Electrotechnical Commission* (kurz: IEC) spezifizierte *Common Information Model* (kurz: CIM) bzw. dessen im Standard IEC 61970-301 festgelegte RDF-Repräsentation als energiespezifische Domänenontologie für ein agentenübergreifendes Verständnis des Nachrichteninhalts verwendet¹³. Nach Erhalt der Anfrage antwortet der Erzeuger unter Verwendung des Performativs `tell` mit einer Auskunft des aktuellen Preises pro bezogener Energieeinheit (2).

Es sei angemerkt, dass KQML die Semantik der Performativ nicht explizit beschreibt, sondern von einem impliziten Verständnis ausgeht [CL95]. Um dieses Defizit zu beheben, wurde etwa von Labrou und Finin [LF97, LF98] eine semantische Definition in Form logischer Zusicherungen vorgeschlagen, deren Erfüllung unterschiedliche Zustände im Verlauf der Kommunikation kennzeichnen. Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt die FIPA mit der Spezifikation der FIPA ACL, deren Nachrichtenformat sich eng an KQML orientiert. Analog zu den Performativen definiert die FIPA ACL eine Menge sogenannter Communicative Acts (kurz: CA), die die intendierte Bedeutung von Nachrichten repräsentieren [Fou03e]. Die Semantik der einzelnen CA wird dabei explizit durch die FIPA Semantic Language definiert, die als formale Sprache u.a. die Vorbedingung

¹² Ein Performativ kennzeichnet im Sinne der Sprechakttheorie die Absicht einer gesendeten Nachricht. Für eine vertiefte Diskussion von KQML sei etwa auf [FFM⁺94] verwiesen.

¹³ Die in diesem Beispiel verwendeten Konzepte entstammen einer Erweiterung des CIM, die im Rahmen des BMWI-geförderten Projekts eTelligence entwickelt wurde [S⁺09].

für das Senden einer Nachricht - die Feasibility Precondition - sowie das beabsichtigte Ziel der Ausführung einer mittels eines bestimmten CA typisierten Nachricht - den Rational Effect - spezifiziert [Fou03d]. In der Praxis häufig verwendete CA sind etwa [Woo99, Fou03e]:

- `inform`: Der Sender informiert den Empfänger über einen bestimmten von ihm als „wahr“ angenommenen Sachverhalt. Mittels `inform` typisierte Nachrichten stellen den grundlegenden Mechanismus zum Informationsaustausch zwischen Agenten dar.
- `request`: Der Sender bittet den Empfänger, eine bestimmte Aktion auszuführen.
- `agree`: Der Sender stimmt - oft in Reaktion auf einen erhaltenen `request` - der Ausführung einer Aktion zu.
- `refuse`: Der Sender lehnt die Ausführung einer Aktion - gegebenenfalls unter Angabe eines Grundes - ab.
- `propose`: Der Sender übermittelt ein Angebot - z.B. bezüglich der Kosten für die Durchführung einer Aktion - an den Empfänger.
- `failure`: Der Sender informiert den Empfänger über den Fehlschlag einer Aktion, deren Durchführung in der Regel zuvor erbeten wurde.

Koordination

Der Austausch von Nachrichten ermöglicht es Agenten, Informationen zu übermitteln und Aktionen zu koordinieren. Die Notwendigkeit koordinierten Handelns ergibt sich im Allgemeinen aus folgenden Faktoren [NLJ96, HS99]:

- Verteilte Kompetenzen oder Informationen: Einzelne Agenten haben - wie im letzten Abschnitt diskutiert - in der Regel eine eingeschränkte Sicht auf ihre Systemumgebung und können sich durch individuellen Fähigkeiten, Informationen oder Aufgaben auszeichnen. Eine gelungene Umsetzung der anwendungsfallabhängigen Zielsetzung eines MAS erfordert daher in der Regel einen Austausch von Informationen bzw. ein agentenübergreifend abgestimmtes Vorgehen.
- Erfüllung gemeinsamer Ziele bzw. Einhaltung globaler Randbedingungen: Neben individuellen Zielsetzungen einzelner Agenten existieren oft auch globale Zielvorgaben, die von übergeordneten Anforderungen - z.B. bezüglich der Reaktionszeit auf bestimmte Ereignisse - abhängig sein können. Die Einhaltung solcher Vorgaben ist in der Regel nur durch koordiniertes Handeln zu erreichen.
- Effizienz: Der Austausch von Informationen trägt dazu bei, dass Agenten Aktionen auswählen können, die - bezogen auf die individuelle oder globale Leistungsbewertung - zu höherwertigen Ergebnissen führen. Insbesondere ist ein - aus Sicht des Gesamtsystems - rationales Handeln in der Regel erst durch Koordination möglich.

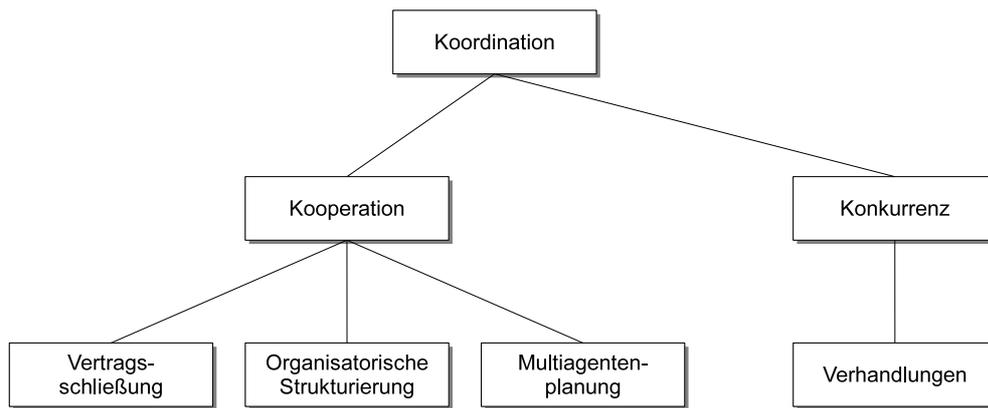


Abbildung 2.19: Kategorisierung von Koordinationsverfahren (nach [HS99]).

Generell lassen sich Koordinationsverfahren in die in Abbildung 2.19 dargestellte Taxonomie einordnen [DLC87, NLJ96, HS99]. Wesentlich ist die Unterscheidung zwischen kooperativen und konkurrierenden Ansätzen, die in folgende Kategorien differenziert werden können:

- **Vertragsschließung:** Auf der Grundlage von Ausschreibung, Gebot und Zuschlag - realisiert etwa mittels des FIPA Contract Net Protocols [Fou03c] - werden Probleme in Teilaufgaben zerlegt und an unterschiedliche Agenten verteilt.
- **Organisatorische Strukturierung:** Die Fähigkeiten, Informationsquellen und Verantwortlichkeiten der einzelnen Agenten eines MAS werden mittels vordefinierter Rollen, Beziehungen und Kommunikationswege - etwa in Form von Hierarchien - a priori festgelegt.
- **Multiagentenplanung:** Die Koordination von Aktionen erfolgt mittels der Erstellung eines agentenübergreifenden Plans, der alle zukünftigen Handlungen beinhaltet und kontinuierlich aktualisiert wird. Im Falle einer zentralen Multiagentenplanung existiert in der Regel ein übergeordneter, koordinierender Agent, der auf die Konsistenz des Plans achtet und widersprüchliche Ziele bzw. Aktionen mit den betroffenen Agenten abstimmt. Alternativ kann jeder Agent die Pläne der anderen Agenten in einem expliziten Modell abbilden, das mittels eines Koordinationsprozesses aktualisiert wird und zur Erkennung und Behebung von Konflikten herangezogen werden kann.
- **Verhandlung:** Im Rahmen eines Verhandlungsprozesses versuchen mehrere konkurrierende Agenten mit individuellen Zielstellungen, eine Einigung bezüglich eines Vorgehens, der Verteilung von Ressourcen etc. zu erzielen. Dabei müssen in der Regel widersprüchliche Wünsche bzw. Positionen durch Zugeständnisse in Einklang gebracht werden.

Im Rahmen der - kooperativen oder konkurrierenden - Koordination von Agenten ist neben Struktur bzw. Semantik einzelner Nachrichten insbesondere eine geregelte Reihenfolge der ausgetauschten Nachrichten wichtig, um unerwünschte Systemzustände wie Live- oder Deadlocks zu vermeiden. Aus diesem Grund definiert die FIPA eine Reihe standardisierter Interaktionsprotokolle, die den Nachrichtenaustausch zwischen Agenten durch Festlegung konkreter Nachrichtenreihenfolgen koordinieren. Abbildung 2.20 stellt auf der Grundlage einer Agent UML genannten Erweiterung der UML Notation exemplarisch die Interaktion mehrerer Agenten im Rahmen des Contract Net Protokolls (kurz: CNP) [Fou03c] dar, welches in unterschiedlichen Anwendungskontexten für die Ausschreibung und Vergabe von Aufträgen genutzt werden kann.

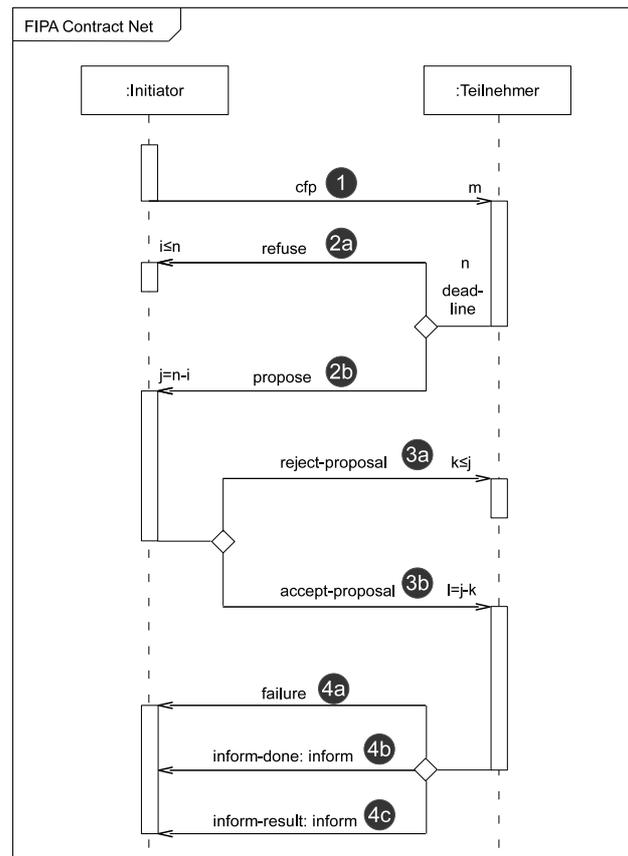


Abbildung 2.20: Das FIPA Contract Net Interaktionsprotokoll (nach [Fou03c]).

Der Initiator sendet einen Call for Proposals (cfp) bezüglich der Durchführung einer bestimmten Aktion an einen oder mehrere Verhandlungsteilnehmer (1). Diese lehnen eine Teilnahme an der Ausschreibung ab (2a) oder übermitteln ein Angebot, das in der Regel die bei Durchführung des Auftrags anfallenden Kosten bzw. Zeitdauer umfasst (2b). Auf Grundlage der eingegangenen Angebote entscheidet der Initiator über die Vergabe des ausgeschriebenen Auftrags und informiert die Verhandlungsteilnehmer entsprechend mittels einer Absage (3a) oder einem Zuschlag (3b). Nach Erhalt einer Auftragsbestäti-

gung führt der entsprechende Teilnehmer die verhandelte Aktion durch und meldet einen Fehlschlag (4a) oder den erfolgreichen Abschluss der Aktion (4b). Gegebenenfalls kann der Initiator auch über das Ergebnis der Durchführung informiert werden (4b).

Organisation

Das kommunikative Verhalten von Agenten innerhalb eines MAS wird in der Regel durch eine bestimmte Organisationsform beeinflusst. Horling und Lesser verstehen unter der Organisation eines MAS:

„[...] die Summe aller Regeln, Beziehungen und autoritären Strukturen, die das Verhalten [der Agenten] regeln.“ [HL04]

Die in einem konkreten Anwendungskontext gewählte Organisationsform ist dabei meist von den spezifischen Zielsetzungen und Anforderungen abhängig und kann einen signifikanten Einfluss auf die kurz- und langfristige Performanz des Systems haben [CG99, HL04]. Unterschiedliche Organisationsformen - etwa „klassische“ Hierarchien, Marktplätze oder koalitionsbasierte Heterarchien - haben jeweils individuelle Stärken und Schwächen, so dass die Auswahl eines konkreten Ansatzes in der Regel ein Abwägen bezüglich der Erfüllung der Anforderungen des Anwendungskontexts erfordert [CL98]. Im Folgenden werden in Anlehnung an die hervorragende Übersicht und Einordnung von Horling und Lesser [HL04], die auch für eine vertiefte Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Paradigmen empfohlen sei, einige ausgewählte Organisationsansätze kurz vorgestellt und vergleichend diskutiert.

Hierarchie: In einer Hierarchie sind die Agenten eines MAS in einer baumförmigen Struktur angeordnet, in der die höher gelegenen Agenten in der Regel umfassendere Informationen und Fähigkeiten haben als die untergeordneten Komponenten. Typisch für Hierarchien ist die Aggregation und Weitergabe von Informationen an Agenten auf übergeordneten Ebenen, die im Gegenzug Steuerbefehle oder Instruktionen an die ihnen zugeordneten Agenten übermitteln. Eine wesentliche Stärke dieser Organisationsform ist die Ausnutzung der Tatsache, dass viele Probleme in unterschiedlichen Anwendungsdomänen in aufeinander aufbauende Teilprobleme zerlegbar sind. Hierarchien skalieren daher in der Regel gut und können somit komplexe Aufgabenstellungen bearbeiten. Ein Nachteil ist dagegen insbesondere die Anfälligkeit für den Ausfall wichtiger, hierarchisch weit oben angeordneter Komponenten, der nicht ohne Weiteres kompensiert werden kann und im schlimmsten Fall zu einem globalen Versagen der Koordination führt.

Holarchie: Holarchien setzen sich aus selbstähnlichen Bausteinen, die Holone¹⁴ genannt werden, zusammen und ähneln verschachtelten hierarchischen Strukturen. Ein Holon kann dabei Teil eines oder mehrerer übergeordneter Holone sein und selbst

¹⁴ Die für das Verständnis dieser Arbeit wichtigen Begriffe Holon bzw. Holarchie werden im nächsten Abschnitt vertieft diskutiert.

ein oder mehrere Subholone umfassen. Im Gegensatz zu den Komponenten einer Hierarchie verfügen einzelne Holone über eine variierende Autonomie bezüglich der Umsetzung ihnen zugedachter Aufgaben und sind daher im Allgemeinen hinsichtlich der Lösung von (Teil-)Problemen flexibler. Eine wesentliche Herausforderung bei der Umsetzung einer holonischen Organisation ist allerdings die bezüglich eines konkreten Anwendungsfalls geeignete Ausgestaltung der Holarchie, d.h. insbesondere die Festlegung, welche Fähigkeiten, Informationen und Befugnisse einzelne Holone besitzen sollen.

Koalition: Koalitionen sind insbesondere aus der Spieltheorie heraus motivierte, strategische Zusammenschlüsse individueller Agenten. Im Allgemeinen agieren Koalitionen zielorientiert und werden nach Bedarf gebildet oder wieder aufgelöst. Wesentliche Herausforderungen beim Einsatz dieser Organisationsform sind die Identifikation und der Aufbau geeigneter Koalitionen, durch die etwa ökonomische Vorteile in Verhandlungen mit externen Partnern erzielt oder Problemstellungen, die die Fähigkeiten einzelner Agenten übersteigen, gelöst werden können. Dabei spielen auch die Kosten zur Aufrechterhaltung der typischerweise sehr flach strukturierten Organisation eine Rolle.

Team: Teams setzen sich aus einer Anzahl kooperierender Agenten zusammen, die in der Regel hinsichtlich eines gemeinsamen Ziels kooperieren. Im Unterschied zu Koalitionen, deren Agenten meist auf ihren individuellen Nutzen bedacht sind, steht dabei das gemeinsame Handeln im Vordergrund. Typischerweise verfügen die Agenten dabei über eine explizite Repräsentation der Ziele oder Pläne des Teams, mittels der sie Schlussfolgerungen über notwendige Lösungsschritte ziehen und entsprechende Absprachen treffen können. Der Einsatz von Teams ermöglicht dadurch insbesondere in Umgebungen mit einem hohen Grad an Unsicherheit bzw. Veränderlichkeit eine effiziente und flexible Koordination, erfordert aber gleichzeitig einen erhöhten Kommunikationsaufwand, um notwendige Informationen auszutauschen oder das gemeinsame Vorgehen abzustimmen.

Markt: Ein Markt oder Marktplatz dient im Allgemeinen dazu, begrenzt verfügbare Ressourcen zwischen Käufern und Verkäufern zu handeln. Typischerweise sind Marktplätze konkurrenzbetont und etwa mittels Auktionsverfahren organisiert, bei denen die einzelnen Käufer- und Verkäuferagenten durch individuelle Zielsetzungen und Strategien den eigenen Nutzen zu maximieren versuchen. Wesentlicher Vorteil marktorientierter Organisationsformen ist eine sehr gute, nutzenorientierte Zuweisung bzw. Allokation von Ressourcen zu Agenten, die auf Grundlage der Käufergebote durch die zentralisierte Entscheidung der Auktionatoren zustande kommt. Die Zentralisierung der zum sogenannten Clearing notwendigen Informationen ist aufgrund der inhärenten Komplexität dieses Entscheidungsprozesses allerdings auch ein entscheidender Nachteil von Marktplätzen. Zudem eröffnen einige Auktionsverfahren auch die Möglichkeiten betrügerischer Absprachen etwa mit dem Ziel, einen Preis künstlich in die Höhe zu treiben.

Ansatz	Vorteile	Nachteile
<i>Hierarchie</i>	Gute Skalierbarkeit; in vielen Anwendungsdomänen einsetzbar.	Potenziell zerbrechliche Struktur; kann zu kritischen Schwachstellen (Bottlenecks) oder Verzögerungen führen.
<i>Holarchie</i>	Nutzt Autonomie der funktionalen Einheiten aus.	Holone müssen organisiert werden; Mangel an Vorhersagbarkeit bzgl. Performanz.
<i>Koalition</i>	Ausnutzung von Aggregationseffekten durch Zusammenschluss vieler Agenten.	Organisationskosten können kurzfristige Vorteile überschreiten.
<i>Team</i>	Aufgabenzentriert; für veränderliche Umgebungen geeignet.	Erhöhter Kommunikationsaufwand.
<i>Markt</i>	Hohe Allokationsqualität; erhöhter Nutzen (utility) durch Zentralisierung; erhöhte Fairness durch Abgabe von Geboten.	Möglichkeit betrügerischer Absprachen und schädlichen Verhaltens; Entscheidungskomplexität der Allokation kann sehr hoch sein.

Tabelle 2.1: Vergleich unterschiedlicher Organisationsansätze nach [HL04].

Tabelle 2.1 stellt die diskutierten Organisationsformen zusammenfassend dar. Hierarchien und Holarchien zeichnen sich durch eine gute Skalierbarkeit aus, wobei letztere insbesondere die Autonomie der Agenten besser ausnutzt. Koalitionen und Teams eignen sich insbesondere für kooperative Aufgaben in veränderlichen Umgebungen, erfordern aber in der Regel einen großen Kommunikations- bzw. Organisationsaufwand. Marktplätze basieren dagegen meist auf Konkurrenz, erzielen aber - auch aufgrund der zentralisierten Entscheidungsfindung - eine qualitativ hochwertige Allokation begrenzter Ressourcen auf Agenten.

2.3.3 Holonische Multiagentensysteme

Das Wort „Holon“ ist eine Schöpfung des ungarischen Philosophen Arthur Koestler, der sich intensiv mit biologischen und sozialen Strukturen auseinandergesetzt hat. Seinen Beobachtungen nach repräsentieren die meisten realweltlichen Entitäten aus einer gewissen Perspektive ein Ganzes (gr.: „holos“), setzen sich jedoch bei genauerer Betrachtung gleichzeitig aus einer Menge von Teilen (gr.: Silbe „-on“) zusammen. Diese Struktur beschränkt sich dabei nicht auf eine einzelne Beobachtungsebene, sondern setzt sich gewissermaßen in fraktaler bzw. selbstähnlicher Weise fort [Koe67]. Ein eingängiges Beispiel eines holonischen Systems ist die soziale Organisation der (historischen) menschlichen Gesellschaft: Nationen umfassen mehrere Stämme, die selbst wiederum aus Familien bestehen, welche durch menschliche Individuen gebildet werden. Jedes Holon ist damit im Wesentlichen als eine unterscheidbare, aus mehreren Teilen zusammengesetzte Entität zu verstehen, die Teil eines größeren Ganzen ist [Koe67, HL04]. In der KI fand

das holonische Verständnis zunächst im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung im Sinne holonischer Produktionssysteme (engl.: *Holonic Manufacturing Systems*, kurz: HMS) Beachtung [Chr94, ZN99], bevor es unter anderem von Fischer, Schillo und Siekmann [Fis99, FSS03] als Organisationsform von MAS diskutiert wurde.

Abbildung 2.21 stellt exemplarisch eine holonische Struktur dar, die aufgrund des prinzipiell hierarchischen Aufbau auch als Holarchie bezeichnet wird. Strukturelle Bausteine einer Holarchie sind teilweise autonome Holone, die mehrere Subholone umfassen und selbst wiederum einem oder mehreren Superholonen untergeordnet sein können [HL04]. Der Grad der Autonomie ist dabei nicht von der Einordnung eines Holons bezüglich seiner Hierarchiestufe abhängig, sondern kann prinzipiell frei definiert werden. Ebenso können hierarchische Beziehungen zwischen Holonen auf unterschiedlichen Ebenen bestehen oder sich im Laufe der Zeit ändern [ZN99, Fis99].

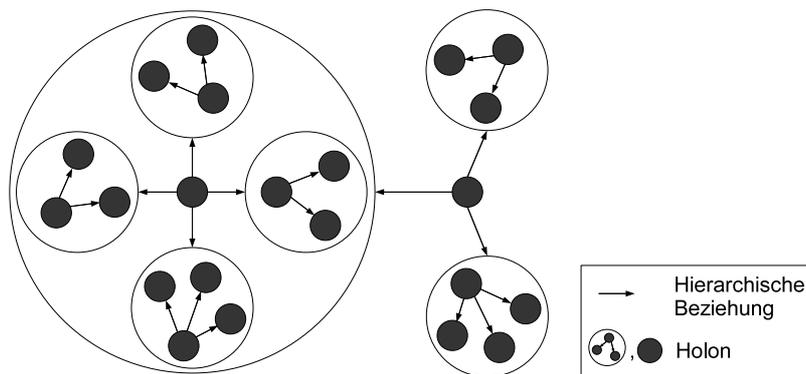


Abbildung 2.21: Exemplarische Holarchie (nach [HL04]).

Holarchien eignen sich - analog zu Hierarchien - insbesondere für Anwendungsdomänen, in denen Probleme in Teilaufgaben zerlegt und durch individuelle Holone bzw. Agenten gelöst werden können. Dabei verfügen Holone in Abhängigkeit der ihnen gewährten Autonomie über die Möglichkeit, entsprechende Anfragen in flexibler Art und Weise zu verarbeiten und so die Koordination durch die übergeordneten Holone zu erleichtern [HL04]. Allerdings erschwert dieser Mangel an Vorhersagbarkeit des Verhaltens einzelner Holone eine Prognose der Systemperformanz [BVB⁺97, Bon98]. Eine generelle Schwierigkeit beim Einsatz von Holarchien ist das Design einer bezüglich der Anforderungen eines Anwendungsfalls geeigneten holonischen Struktur. Dabei muss zwischen der konkreten Ausprägung der hierarchischen Beziehung der Holone untereinander - d.h. der eigentlichen Holarchie - und der (agentenbasierten) Realisierung der Fähigkeiten und des Verhaltens einzelner Holone differenziert werden. Eine Möglichkeit, eine für eine gegebene Problemstellung geeignete Holarchie a priori zu identifizieren, ist der Einsatz der von Uliuru vorgeschlagenen Fuzzy-Entropie-Minimierung [Uli02], die mittels eines genetischen Algorithmus den durch Clusterung von Agenten zu Holonen aufgespannten Möglichkeitsraum durchsucht und dabei eine Präferenzbewertung der Zusammenarbeit bestimmter Agentencluster minimiert [HL04]. Im Gegensatz dazu setzen Zhang und Norrie im Kontext der industriellen Fertigung sogenannte Mediator-

holone ein, um zur Laufzeit die zur Bearbeitung von Aufgaben benötigten Holone zu generieren bzw. bereits bestehende Holone an die jeweils aktuellen Gegebenheiten anzupassen [ZN99].

Hinsichtlich der Realisierung individueller Holone zeigen Fischer, Schillo und Siekmann eine Reihe von Möglichkeiten auf, Agenten hinsichtlich unterschiedlicher Autonomieabstufungen zu Holonen zusammenzufassen. Abbildung 2.22 zeigt die Bildung eines Holons unter vollständiger Wahrung der Autonomie der einzelnen Agenten. Das Superholon ergibt sich dabei ausschließlich implizit durch die vereinigten Fähigkeiten bzw. Eigenschaften der einzelnen Agenten, die miteinander interagieren. Eine explizite Repräsentation etwa durch einen neuen Agenten ist dabei nicht vorgesehen. In diesem Fall verhält sich eine Holarchie identisch zu „herkömmlichen“ MAS; der holonische Gedanke dient dabei im Wesentlichen als Strukturierungshilfe [FSS03].

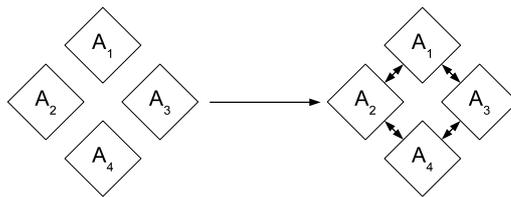


Abbildung 2.22: Ein Holon als eine Menge autonomer Agenten (nach [FSS03]).

Das - bezogen auf die Autonomie - andere Extrem ist die in Abbildung 2.23 dargestellte Vereinigung einer Menge von Agenten zu einem Holon. Dabei geben die einzelnen Agenten ihre Autonomie völlig auf, können aber bei Bedarf - etwa bei Terminierung des Superholons - wiederhergestellt werden. Voraussetzung dafür sind geeignete Vereinigungs- und Aufteilungsoperatoren, die eine Zusammenfassung bzw. Verteilung der ursprünglichen Fähigkeiten, Ressourcen, Ziele, etc. ermöglichen.

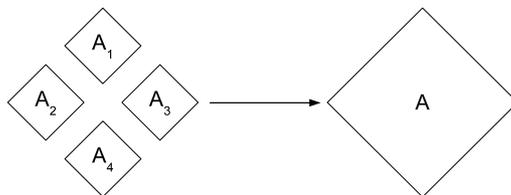


Abbildung 2.23: Ein Holon als Vereinigung mehrerer Agenten (nach [FSS03]).

Als Mittelweg bleibt das in Abbildung 2.24 dargestellte Konzept der Holonenbildung mittels moderierter Gruppen von Agenten. Dabei übernimmt in der Regel ein ausgewählter Agent, der sogenannte Head, die Repräsentation des Holons und agiert als Superholon für die untergeordneten, als Body bezeichneten Subholone. Die Wahl des Head kann durch festgelegte Regeln oder geeignete Interaktionsprotokolle für Wahlprozeduren gestaltet werden; alternativ kann zur Laufzeit auch ein zusätzlicher Agent initiiert werden [FSS03]. Der Grad der Autonomie insbesondere der Bodyholone ist dabei prinzipiell beliebig wählbar und kann von einfacher Kooperation bis hin zu einer strikt ausgeprägten

Hierarchie reichen.

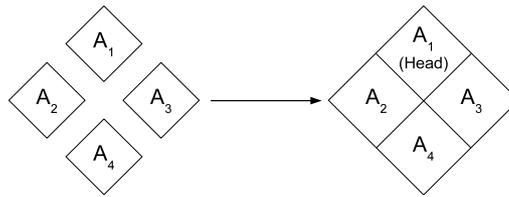


Abbildung 2.24: Ein Holon als moderierte Gruppe von (teil-)autonomen Agenten (nach [FSS03]).

2.4 Zusammenfassung

Mit einer zunehmenden Integration von DER wie etwa PV- oder KWK-Anlagen in das Energieversorgungssystem wächst der Bedarf an kurzfristiger Flexibilität hinsichtlich des Betriebs dieser räumlich verteilten Systeme. Hintergrund dieser Entwicklung sind die Anforderungen bezüglich des stabilen Betriebs der elektrischen Netzinfrastruktur, die insbesondere eine laufende Deckung des elektrischen Bedarfs durch entsprechende Bereitstellung von Elektroenergie beinhalten. VK, die DER mittels einer informationstechnischen Infrastruktur zu einem koordinierbaren Ganzen verknüpfen, stellen eine intensiv diskutierte Möglichkeit dar, diesem Integrationsproblem zu begegnen. In diesem Kontext kann die reaktive Einsatzplanung einen wichtigen Beitrag bezüglich der kurzfristigen Reaktion auf Abweichungen von einem initial erstellten und im Rahmen des Bilanzkreismanagements abgestimmten Einsatzplanes leisten und - u.a. bei geeigneter Reaktionsfähigkeit - den Bedarf insbesondere an Sekundärregelleistung und Minutenreserve vermindern.

Intelligente Agenten - d.h. rational und autonom agierende Hardware- bzw. Softwarekomponenten - können im Rahmen von MAS dazu verwendet werden, komplexe Problemstellungen in verteilter Art und Weise zu lösen. Insbesondere in Anwendungskontexten, in denen Daten bzw. Informationen über die Umwelt dezentral vorliegen, stellt der Einsatz von Agenten eine Alternative zu einer zentralisierten Lösung dar. In Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen können unterschiedliche Organisationsansätze dazu verwendet werden, das Zusammenwirken der autonomen Komponenten zu gestalten. Holarchien, d.h. prinzipiell hierarchisch gestaltete Beziehungen zwischen teilautonomen Holonen, die selbst wiederum eine Holarchie sein können, stellen eine solche Organisationsform dar. Für die Bildung von Holonen bzw. Holarchien aus einzelnen Agenten existieren wiederum unterschiedliche Möglichkeiten, die sich insbesondere durch den Grad der Autonomie der einzelnen Komponenten unterscheidet.

Human beings, who are almost unique in having the ability to learn from the experience of others, are also remarkable for their apparent disinclination to do so.

– Douglas Adams

3 Verwandte Arbeiten

Im vorangegangenen Kapitel wurde unter anderem die Integrationsproblematik von dezentralen Energiewandlungsanlagen (kurz: DER) aufgezeigt und das allgemeine Konzept des Virtuellen Kraftwerks (kurz: VK) - d.h. der informationstechnischen Zusammenfassung verteilter Anlagen - als möglicher Koordinationsansatz von DER vorgestellt. Darauf aufbauend werden im Folgenden zunächst einige ausgewählte Ansätze zur informationstechnischen Realisierung von VK vorgestellt und hinsichtlich der in Abschnitt 2.2.2 identifizierten Anforderungen in Bezug auf eine reaktive bzw. regelnde Koordination diskutiert. Im Rahmen dieser Arbeit sind darüber hinaus auch domänenübergreifende, multiagentenbasierte Planungs- und Koordinationsverfahren von Interesse. Als ausgewählte Ansätze werden daher Arbeiten unter anderem von Fischer, Müller und Pischel [FMP96] zur kooperativen, verteilten Transportplanung sowie die Arbeit von Henseler [Hen98] zur Ablaufplanung in der industriellen Fertigung diskutiert.

3.1 Koordination von DER

Die Koordination des Verhaltens dezentraler Anlagen erfordert im Kontext von VK insbesondere eine Infrastruktur, die die DER kommunikationstechnisch an ein geeignetes Informationssystem zur Überwachung und Steuerung anbindet [SRB⁺06, AML08]. Für die Realisierung dieser informationstechnischen Ebene werden aktuell im Wesentlichen zwei Ansätze bzw. Architekturkonzepte diskutiert: Zentralisierte Informationssysteme, bei denen eine einzelne Steuerungskomponente Vorgaben für die dezentralen Anlagen generiert, und hierarchisch strukturierte Systeme, die einen Teil der Planungs- bzw. Steuerungskompetenz auf untergeordnete Komponenten verteilt. Die im Folgenden vorgenommene Einordnung bezieht sich dabei auf die reaktiv bzw. regelnd agierende Komponente des Systems.

3.1.1 Zentralisierte Informationssysteme

Der Einsatz zentralisierter Informationssysteme zeichnet sich im Kontext der Koordination von DER dadurch aus, dass Entscheidungen über das Anlagenverhalten an zentraler Stelle getroffen werden. Dies bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass die IT-Architektur nur ein einzelnes Informationssystem umfasst; vielmehr können spezialisierte Systeme wie etwa die Datenkonzentratoren aus [Bit00] dazu eingesetzt werden, die für bestimmte Koordinationsaufgaben notwendigen Informationen aus einer Menge eingehender Daten zu extrahieren, aufzubereiten und zu aggregieren.

Virtuelle große Kraftwerke

Das Konzept virtueller großer Kraftwerke repräsentiert die „klassische“ Auffassung eines VK als kommunikations- bzw. leittechnische Zusammenfassung von DER zu einem steuer- bzw. planbaren Ganzen [Bit00, BFA02, Hab04, Wol07]. Die avisierten Vorteile dieses Ansatzes sind insbesondere eine bessere Planbarkeit der Bereitstellung von Elektroenergie durch dargebotsabhängige DER wie etwa PV- oder Windkraftanlagen sowie die Überwindung von Markteintrittsbarrieren für Anlagen kleiner Leistung [Bit06, Wol07].

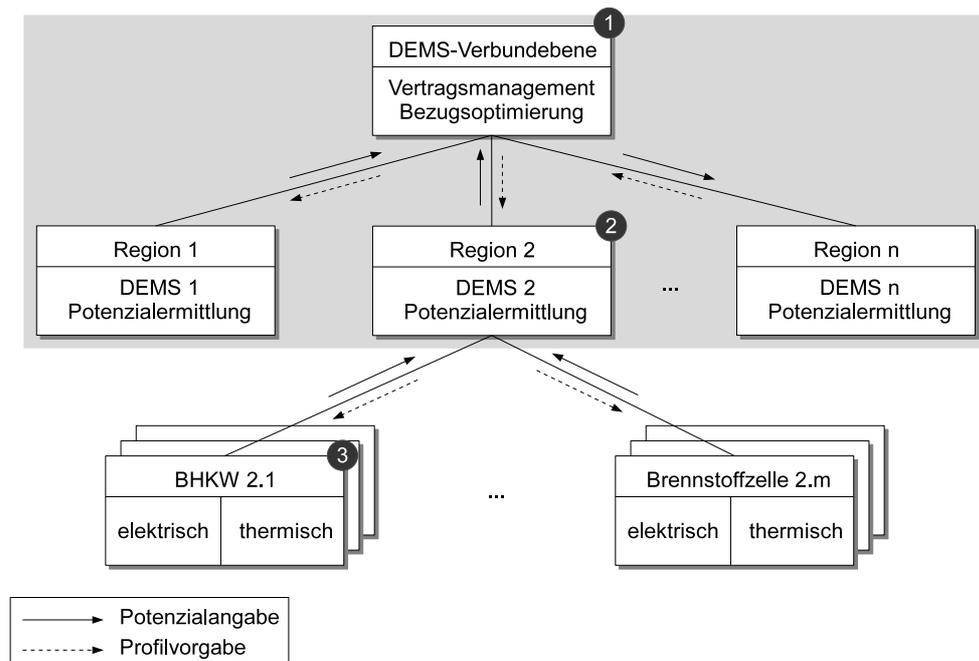


Abbildung 3.1: Optimierungshierarchie verschiedener DER-Cluster nach [BFA02].

Konzept: Abbildung 3.1 stellt den prinzipiellen Aufbau eines virtuellen großen Kraftwerks im Sinne eines dezentralen Energiemanagementsystems (kurz: DEMS) dar. Auf organisatorischer bzw. energiewirtschaftlicher Ebene erfolgt eine Einbindung des VK mittels des zentralen Informationssystems auf DEMS-Verbundebene (1). Diese nimmt Potenzialangaben, d.h. Profilbänder inklusive einer Kostenbewertung [BFA02], bezüglich der prognostizierten Bereitstellung von Elektroenergie von den untergeordneten DEMS entgegen und übermittelt im Gegenzug optimierte Fahrpläne bzw. Profilvorgaben. Auf Ebene einzelner DEMS (2) werden dezentrale Anlagen zu regionalen Clustern zusammengefasst und hinsichtlich der Potenzialermittlung aggregiert. Zudem werden die erhaltenen Profilvorgaben entsprechend auf die einzelnen DER-Cluster (3) aufgeteilt bzw. an diese weitergeleitet. Die Zusammenfassung einzelner DER auf Anlagenebene kann dabei anhand gemeinsamer Merkmale wie Anlagentyp oder Art der genutzten Primärenergie erfolgen.

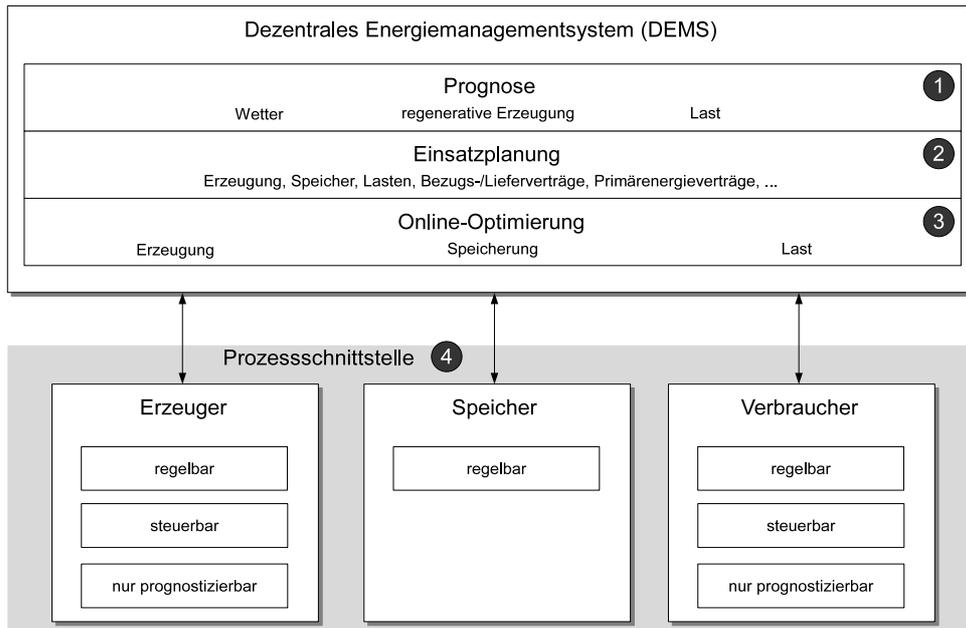


Abbildung 3.2: Konzeptuelle Darstellung eines intelligenten dezentralen Energieversorgungssystems in Anlehnung an [BFA02].

Die reaktive Planung erfolgt in virtuellen großen Kraftwerken auf der Ebene einzelner DEMS. Abbildung 3.2 illustriert den internen Aufbau dieses Informationssystems. Neben den Modulen für Prognose (1) und Einsatzplanung (2) realisiert die sogenannte Online-Optimierung (3) das reaktive bzw. regelnde Verhalten des DEMS. Dazu kann über eine Prozessschnittstelle (4) z.B. auf Grundlage des Industriestandards OPC [OPC03a, OPC03b] mit den DER kommuniziert und entsprechende Statuswerte abgefragt bzw. angepasste Fahrpläne übermittelt werden.

Kritik: Bitsch et al. [Bit00, BFA02, Bit06] beschränken die Diskussion der virtuellen großen Kraftwerke auf die informationstechnische Architektur; eine konkrete Umsetzung der Online-Optimierung etwa auf algorithmischer Ebene wird nicht vorgestellt. Eine Bewertung der Online-Optimierung in virtuellen großen Kraftwerken hinsichtlich der identifizierten Anforderungen A_1 bis A_5 ist damit nur sehr eingeschränkt möglich; insbesondere können keine Aussagen zur Beherrschung der Systemdynamik (A_3) und Berücksichtigung der Robustheit von Fahrplänen (A_5) gemacht werden. Bezüglich der Reaktionsfähigkeit (A_1) geben Bitsch et al. in [BFA02] eine Regelbarkeit im Minutenbereich an; größere Anlagenzahlen (A_2) können prinzipiell durch Clusterbildung verwaltet werden, wenn auch keine Angaben zur Skalierbarkeit des Systems vorliegen. Woldt [Wol07] merkt zudem an, dass der Ansatz insbesondere die anlagenlokalen Gegebenheiten (A_4) - etwa hinsichtlich der thermischen Bedarfe von Gebäuden mit KWK-Anlagen - vernachlässigt und somit das dezentrale Potenzial nur unzureichend ausschöpft.

Energiemanagement in Verteilnetzen

Im Gegensatz zu den „klassischen“ VK, die als energiewirtschaftliche Aggregation von Erzeugungskapazitäten angesehen werden können, hat das Energiemanagement in Verteilnetzen in der Regel einen stärker ausgeprägten Bezug zur jeweils lokal vorliegenden elektrischen Infrastruktur. Typische Zielsetzungen in diesem Kontext sind etwa die Minimierung des Austausches von Elektroenergie mit dem übergeordneten Netz [SWN⁺06] oder die optimierte Nutzung der in einem Niederspannungsnetzabschnitt lokal verfügbaren (dezentralen) Erzeugungskapazitäten [Tho07].

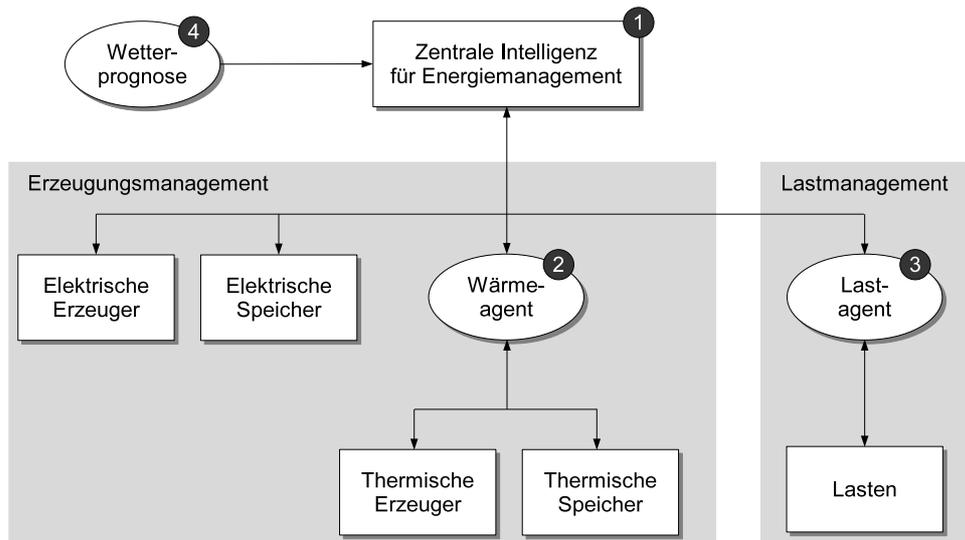


Abbildung 3.3: Koordination von DER durch zentrale Intelligenz nach [SWN⁺06].

Konzept: Abbildung 3.3 stellt den Energiemanagementansatz von Schlebusch et al. [SWN⁺06] dar, der im Wesentlichen auf der Koordination von DER durch ein zentrales Informationssystem, der sogenannten zentralen Intelligenz (kurz: ZI), beruht (1). Die ZI bündelt die Kompetenzen für ein kombiniertes Erzeugungs- und Lastmanagement, das auf eine Minimierung der elektrischen Austauschenergie mit dem übergeordneten Netz in einer zeitlichen Auflösung von 15-Minuten-Intervallen abzielt. Für die Einbindung wärmenutzungsabhängiger Erzeugungskapazitäten wie etwa KWK-Anlagen sowie die Nutzung des Verschiebepotenzials steuerbarer Lasten werden Wärme- bzw. Lastagenten definiert, die die entsprechenden Ressourcen informationstechnisch aggregieren und die für die Einsatzplanung notwendigen Daten an die ZI senden (2), (3). Dargebotsabhängige Erzeuger wie Windkraft- oder PV-Anlagen und Speichersysteme für Elektroenergie werden dagegen direkt von der ZI überwacht und gesteuert. Neben der prädiktiven Einsatzplanung, die auf der Grundlage externer Wetterprognosen (4) erfolgt, ist die ZI auch für die Einhaltung der generierten Anlagenfahrpläne zuständig. Abweichungen, die ein gewisses Toleranzband verletzen, werden gegebenenfalls durch Wärme- bzw. Lastagenten an die ZI gemel-

det und durch iterative Reoptimierung der Fahrpläne behandelt. Dabei werden auch aktualisierte Wärme- bzw. Lastprognosen berücksichtigt.

Kritik: Der Einsatz einer zentralen Steuerungskomponente wirkt sich sowohl auf die Reaktionsfähigkeit (A_1) als auch die Skalierbarkeit (A_2) des Gesamtsystems negativ aus. Fahrplanabweichungen können nur sequenziell behandelt werden und führen durch die Reoptimierung bzw. den Neuaufwurf des Einsatzplanungsproblems gegebenenfalls zu häufigen Fahrplanänderungen (A_5). Die Berücksichtigung aktualisierter Prognosedaten bei der Reoptimierung sowie die Nutzung von Schwellwerten bzw. Toleranzbändern zur Vermeidung von Fahrplananpassungen wirkt sich dagegen prinzipiell positiv auf die Systemdynamik (A_3) aus; und der Einsatz von Wärme- bzw. Lastagenten - die allerdings eher einem Dienst innerhalb einer service-orientierten Architektur [Sie07, Sch07] als einem intelligenten Agenten im Sinne von Wooldridge ähneln - berücksichtigt zumindest teilweise die lokalen Gegebenheiten, die auf einen DER einwirken können (A_4).

Einen vergleichbaren Koordinationsansatz stellt das im Rahmen des EU-Projekts DIS-POWER entwickelte *Power Flow and Power Quality Management System* (kurz: PoMS) dar [Tho07], das DER in einem abgeschlossenen Niederspannungsnetzabschnitt mittels eines zentralen Informationssystem überwacht und steuert (siehe Abbildung 3.4).

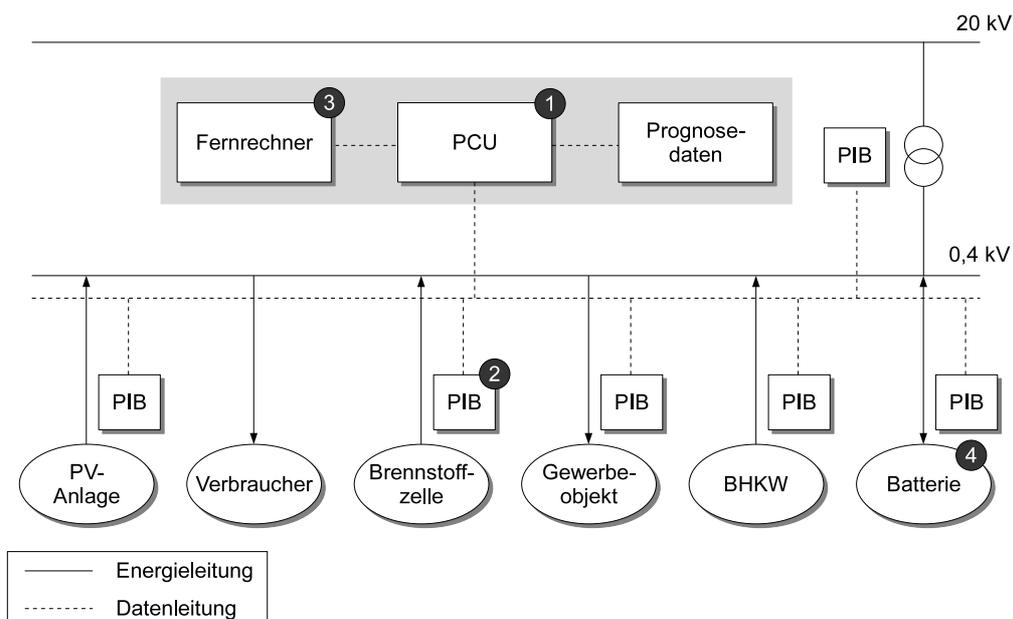


Abbildung 3.4: Konzeptueller Aufbau des PoMS nach [Tho07].

Konzept: Die Koordination der DER obliegt der PoMS Central Unit (kurz: PCU), die mittels sogenannter PoMS Interface Boxes (kurz: PIB) auf die dezentralen Anlagen zugreifen kann (1), (2). Die prädiktive Einsatzplanung erfolgt unter Berücksichtigung

von Wetter- und Lastprognosen, die unter anderem von Fernrechnersystemen (3) bezogen werden können, hinsichtlich der Minimierung des Bezugs elektrischer Energie aus der übergeordneten Mittelspannungsebene. Insbesondere sollen im Sinne des Peak Shavings¹ Lastspitzen vermieden werden [Tho07]. Die PCU realisiert auch das reaktive Verhalten des Systems, das auf den speziellen Anwendungsfall einer konkreten Wohnsiedlung und die Nutzung eines in diesem Szenario verfügbaren Batteriespeichersystems (4) zugeschnitten ist. In diesem Sinne können mittels Be- bzw. Entladen des Batteriespeichers Einspeisefluktuationen von PV-Anlagen und durch Prognoseunschärfen verursachte Fahrplanabweichungen ausgeglichen werden, wobei ein Schwellenwert dafür sorgt, dass kleinere Abweichungen ignoriert und die Netzkomponenten dadurch geschont werden können. Die Regelungsgeschwindigkeit im 5-Minuten-Bereich wird dabei als ausreichend angesehen, da aus energiewirtschaftlicher Sicht insbesondere der 15-Minuten-Mittelwert der bezogenen Leistung als Abrechnungsgrundlage dient [Tho07].

Kritik: Zunächst ist festzuhalten, dass der diskutierte Regelungsansatz auf einen spezifischen Anwendungsfall ausgelegt ist und nicht ohne weiteres auf andere Szenarien - etwa ohne Speichersysteme für Elektroenergie - übertragen werden kann. Durch die Beschränkung auf ein räumlich und anlagentechnisch begrenztes System und die Fokussierung auf das Batteriespeichersystem als reaktiv agierende Komponente kann allerdings auch mit einer einzelnen zentralen Steuerungskomponente eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit erreicht werden (A_1). Zudem ist die Dynamik des überschaubaren Systems beherrschbar (A_3); und die Belastungen durch Fahrplananpassungen bzw. Zustandsänderungen betreffen nur eine einzelne Komponente (A_5). Als Schwachpunkte sind die fehlende Skalierbarkeit (A_2) bzw. Übertragbarkeit sowie die mangelnde Berücksichtigung individueller Anlageneigenschaften (A_4) zu nennen.

3.1.2 Hierarchisch organisierte Multiagentensysteme

Im Gegensatz zu den bisher diskutierten zentralisiert strukturierten Koordinationsansätzen bieten die im Folgenden vorgestellten, hierarchisch organisierten MAS bereits einen gewissen Grad an Verteiltheit bezüglich der Entscheidungsfindung im dezentralen Energiemanagement. Sowohl PowerMatcher [KKW⁺06, KKH⁺07, HVW⁺08] als auch DEZENT [WLH⁺07] setzen dabei auf marktbasierende Verhandlungen bzw. Auktionsverfahren, um im laufenden Betrieb einen Abgleich von Erzeugung und Bedarf von Elektroenergie zu realisieren.

PowerMatcher

Konzept: Der PowerMatcher-Ansatz (siehe Abbildung 3.5) realisiert einen hierarchisch organisierten elektronischen Marktplatz, auf dem elektrische Energie gehandelt wird.

¹ Siehe dazu auch Beispiel 2.1 auf Seite 20.

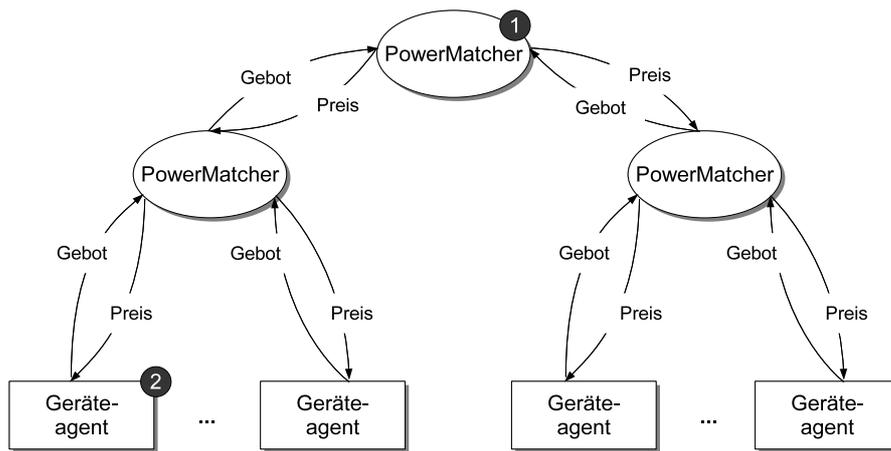


Abbildung 3.5: MAS des PowerMatcher-Ansatzes nach [KKH⁺07, HVW⁺08].

Kernstück des entsprechenden MAS sind sogenannte PowerMatcher-Agenten, die Angebote bzw. Nachfragen bezüglich Elektroenergie von untergeordneten Agenten entgegennehmen und in aggregierter Form an die jeweils übergeordneten Agenten weiterleiten [HVW⁺08]. Der PowerMatcher-Agent, der die Wurzel dieser Baumstruktur repräsentiert (1), bestimmt aus den eingegangenen Geboten schließlich einen Market Clearing Price (kurz: MCP), der an die untergeordneten Einheiten kommuniziert und zur Allokation der verfügbaren Elektroenergie genutzt wird [KKH⁺07]. Die eigentliche Gebotserstellung wird dabei durch Geräteagenten (2) realisiert, die individuelle Bietestrategien verfolgen können und in spezialisierte Typen differenziert werden: Agenten für Anlagen mit stochastischem Betrieb, verschiebbare Lasten, Speichersysteme für Elektroenergie, regelbare Anlagen etc. Die konkrete Ausgestaltung der Gebote hängt darüber hinaus auch von den a priori definierten Produkten des elektronischen Marktes ab: neben Geboten für die Bereitstellung bzw. den Bezug einer bestimmte Menge von Elektroenergie in einem einzelnen festgelegten Zeitraum bietet PowerMatcher auch eine Unterstützung für Multi-Item Auktionen, bei denen gekoppelte Gebote auf mehrere Zeiträume abgegeben werden können. Die Organisation des Marktplatzes obliegt analog zur Ermittlung des MCP dem Wurzelagenten. In Abhängigkeit von der gewählten zeitlichen Auflösung der Gebotszeiträume, die in [KKH⁺07] mit einer bis fünfzehn Minuten angegebenen wird, werden die untergeordneten Agenten dazu aufgefordert, entsprechende Gebote für den jeweils nächsten Zeitraum abzugeben. In [HVW⁺08] wird eine Erweiterung dieses diskreten Ansatzes um die Möglichkeit einer ereignisbasierten Gebotsabgabe in Aussicht gestellt, die prinzipiell zu jedem Zeitpunkt - und nicht nur nach Aufforderung durch die übergeordneten PowerMatcher-Agenten - erfolgen kann. Ziel ist dabei eine verbesserte Berücksichtigung der Systemdynamik, die sich unter anderem durch fluktuierende Einspeisung von Elektroenergie oder Leistungsrampen beim Anfahren eines steuerbaren DER manifestiert.

Kritik: Aus Sicht der Begriffsklärung 1 realisiert PowerMatcher einen spezifischen An-

wendungsfall von VK, das sogenannte Supply-Demand-Matching (kurz: SDM). Dabei erfolgt die Koordination der DER im laufenden Betrieb, ohne dass dazu eine prädiktive Einsatzplanung notwendig ist, weshalb PowerMatcher als ein rein reaktiv agierendes System aufgefasst werden kann. Durch die zeitliche Auflösung der Gebotszeiträume im Minutenbereich bzw. im Falle einer ereignisbasierten Gebotsabgabe ist prinzipiell eine gute Reaktionsfähigkeit gegeben (A_1); für die Errechnung des MCP geben Hommelberg et al. in [HVW⁺08] als Erfahrung aus Feldtests mit bis zu 40 Anlagen einen Aufwand im Sekundenbereich an. Eine geeignete Gestaltung der hierarchischen Organisation vorausgesetzt skaliert das Gesamtsystem sehr gut, wobei angemerkt sei, dass in der Literatur keine konkrete Aussage über das Skalierungsverhalten der Preisfindung gefunden wurde (A_2). Durch die Repräsentation einzelner Anlagen durch autonom agierende Geräteagenten kann die Gebotserstellung in paralleler Weise erfolgen (A_3); zudem können die unterschiedlichen Agententypen die individuellen Rahmenbedingungen und Eigenschaften der repräsentierten Anlage in die Bietestrategie miteinbeziehen (A_4). Die Robustheit der durch die Verhandlungen generierten Fahrpläne kann prinzipiell in die Gebotserstellung einfließen; inwieweit dies in diesem Ansatz der Fall ist, kann allerdings anhand der publizierten Ergebnisse nicht beurteilt werden. Auf energiewirtschaftlicher bzw. organisatorischer Ebene ist problematisch, dass etwa ein durch PowerMatcher repräsentierter Niederspannungsnetzbezirk nur auf Grundlage von Erfahrungswerten in das Bilanzkreismanagement aufgenommen werden kann, da das Verhalten der Anlagen im Voraus nicht bekannt ist.

DEZENT

Konzept: Analog zu PowerMatcher stellt auch das in Abbildung 3.6 dargestellte Konzept der dezentral vernetzten Energiebewirtschaftung (kurz: DEZENT) einen SDM-Ansatz auf Grundlage intelligenter Agenten dar [WLH⁺07]. Die hierarchische Organisation des MAS orientiert sich dabei allerdings eng an der elektrischen Infrastruktur: Erzeuger- und Verbraucheragenten auf der Nieder- (1a, 1b) und Mittelspannungsebene (2) werden zu Bilanzgruppen (kurz: BG) zusammengefasst, die durch BG-Manageragenten (3) verwaltet werden. Die Koordination der DER ist dabei unter dem Anspruch einer Echtzeitregelung wie folgt strukturiert: Auf jeder Spannungsebene werden zehn² Verhandlungszyklen mit dem Ziel, den Bedarf an Elektroenergie möglichst lokal zu decken, durchgeführt. Dazu erstellen Erzeuger- und Verbraucheragenten jeweils auf Grundlage individueller Strategien Gebote, die an den zuständigen BG-Manageragenten übermittelt werden. Diese werden unter Berücksichtigung der angebotenen bzw. geforderten Preise möglichst deckungsgleich aufeinander abgebildet. Bleibt ein Bedarf unberücksichtigt oder eine Leistungskapazität ungenutzt, so passt der betroffene Agent sein Gebot im Rahmen eines festgelegten Preisrahmens an und übermittelt es erneut. Bedarfe, die nach zehn Verhandlungszyklen unerfüllt bleiben, werden an die BG-Manageragenten der nächsthöheren Spannungsebene weitergeleitet, wobei der Preisrahmen weiter eingegrenzt wird. Dadurch soll eine

² Die Anzahl der Verhandlungszyklen ergibt sich insbesondere durch den Realzeitanpruch von DEZENT.

starke Konvergenz der angebotenen bzw. geforderten Preise und damit eine möglichst schnelle Deckung des elektrischen Bedarfs auf möglichst niedrigem Spannungsniveau erreicht werden [WLH⁺07]. Kann ein Bedarf nicht gedeckt werden, so muss der BG-Manageragent der höchsten Ebene (4) eine externe Reservekapazität - die in der Regel durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt wird - in Anspruch nehmen. Im Gegensatz zu PowerMatcher sind die Gebote im Kontext von DEZENT auf das jeweils nächste Zeitintervall beschränkt; gekoppelte Produkte sind also nicht vorgesehen. Als maximale Dauer der Verhandlungen - d.h. bis sämtliche Bedarfe spätestens durch Reservekapazität gedeckt sind - geben Wedde et al. in [WLH⁺07] 40 ms an.

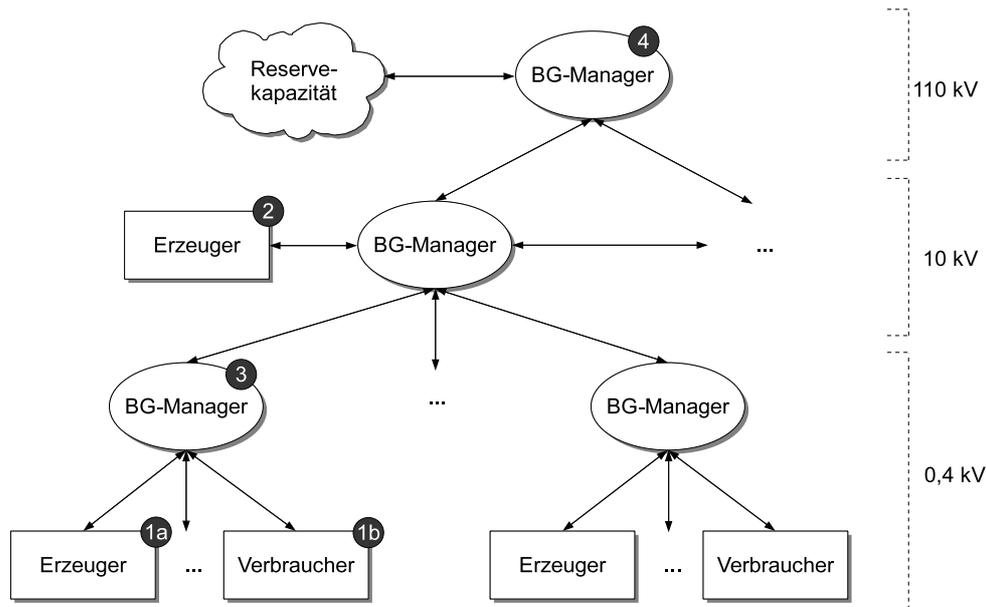


Abbildung 3.6: Dezentral vernetzte Energiebewirtschaftung mittels intelligenter Agenten. In Anlehnung an [WLH⁺07].

Kritik: Ebenfalls in Analogie zu PowerMatcher stellt DEZENT ein rein reaktiv agierendes System dar, das Bereitstellung und Bedarf von Elektroenergie kontinuierlich im laufenden Betrieb aufeinander anpasst. Die explizit in Hinblick auf eine Echtzeitregelung der dezentralen Anlagen gestalteten Verhandlungen stellen eine hohe Reaktionsfähigkeit des Systems sicher (A_1), und durch die Orientierung an der „natürlichen“ Hierarchie der elektrischen Infrastruktur können auch Szenarien mit einer großen, auf die Zuständigkeit mehrerer BG-Manageragenten verteilten Anlagenanzahl beherrscht werden (A_2). Die Repräsentation einzelner DER durch Erzeuger- bzw. Verbraucheragenten mit individuellen Strategien berücksichtigt darüber hinaus die jeweiligen Rahmenbedingungen der Anlagenkoordination (A_4) und ermöglicht eine dynamische Reaktion auf Änderungen im Betriebsverhalten (A_3). Wesentlicher Nachteil von DEZENT ist die - insbesondere dem Echtzeitanpruch geschuldete - hohe Unruhe im Anlagenbetrieb (A_5), die sich - bei ungünstigen Verhandlungsergebnissen - durch häufig notwendige Zustandsänderungen der dezentralen Anlagen sowie

einen sehr hohen Kommunikationsaufwand bemerkbar macht. Zudem ist - analog zu PowerMatcher - die organisatorische Einbindung mittels DEZENT koordinierter Nieder- oder Mittelspannungsnetzabschnitte in das übergeordnete Bilanzkreismanagement schwierig.

3.1.3 Zusammenfassung

Im Kontext von VK können hinsichtlich des zugehörigen Informationssystems aktuell im Wesentlichen zwei Architekturansätze unterschieden werden: zentralisierte Lösungen, in denen die Entscheidungskompetenzen durch eine einzelne Komponente gebündelt werden, und hierarchisch organisierte Systeme auf Grundlage intelligenter Agenten, die einen Teil eben dieser Kompetenzen auf die dezentralen Anlagen selbst auslagern. Tabelle 3.1 stellt die in diesem Abschnitt hinsichtlich der Anforderungen an die reaktive Einsatzplanung in VK diskutierten Koordinationsansätze zusammenfassend gegenüber. Dabei sei angemerkt, dass die angegebene Einschätzung auf einer rein qualitativen Diskussion beruht; quantitativ belastbare Aussagen können aufgrund mangelnder Vergleichsdaten nicht getroffen werden. Für die dunkel eingefärbten Tabelleneinträge war dabei aufgrund mangelnder Informationen keine Bewertung hinsichtlich des entsprechenden Kriteriums möglich.

Bewertung	Reaktionsfähigkeit	Anlagenzahl	Systemdynamik	Individualität	Robustheit
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
+ : positiv - : negativ ○ : neutral					
Ansatz	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
Online-Optimierung	○	○		-	
Zentrale Intelligenz (ZI)	-	-	○	○	-
PoMS (festes Szenario)	+	-	○	-	○
PowerMatcher	○	+	○	+	
DEZENT	+	+	○	+	-

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der betrachteten Koordinationsansätze.

Reaktionsfähigkeit: Aus energiewirtschaftlicher Sicht ist eine reaktive Planung nur dann sinnvoll, wenn sie innerhalb eines 15-minütigen Abrechnungsintervalls zu einem Ergebnis kommt. Mit Ausnahme der ZI können alle betrachteten Ansätze dieser Anforderung gerecht werden, wobei die Echtzeitregelung in DEZENT einen Spezialfall darstellt. Die agentenbasierten Ansätze haben dabei aufgrund der Repräsentation

einzelner DER durch je einen Agenten einen klaren Vorteil hinsichtlich der Behandlung unerwartet auftretender Ereignisse.

Anlagenzahl: Der Umgang mit einer möglicherweise sehr großen Anzahl dezentraler Anlagen stellt insbesondere die zentralisierten Ansätze vor Schwierigkeiten: Mit Ausnahme der Online-Optimierung in virtuellen großen Kraftwerken, die über hierarchisch organisierte Datenkonzentratoren verfügen kann, skalieren sie schlecht. Gerade hier zeigt sich der Vorteil des Einsatzes inhärent verteilter MAS, die für jede Anlage einen individuell agierenden Agenten umfassen können. Eine effiziente reaktive Koordination setzt dann allerdings eine geeignete Organisation des MAS voraus.

Systemdynamik: Für die Beherrschung der Systemdynamik stellen die betrachteten Ansätze unterschiedliche Strategien bereit: Die ZI nutzt Toleranzbänder, um kleinere Abweichungen zu ignorieren, PoMS setzt auf einen schnell regelbaren Batteriespeicher in einem begrenzten Szenario, und PowerMatcher und DEZENT sind in der Lage, zeitlich parallel auftretende Ereignisse - insofern sie unterschiedliche DER betreffen - durch die Anlagenagenten behandeln zu lassen. Für die Online-Optimierung kann aufgrund der nur eingeschränkt verfügbaren Beschreibung allerdings keine diesbezügliche Aussage getroffen werden.

Individualität: Die Berücksichtigung individueller Präferenzen oder lokaler Rahmenbedingung einzelner Anlagen gelingt insbesondere den agentenbasierten Ansätzen sehr gut. Der Einsatz sogenannter Wärme- bzw. Lastagenten zur Repräsentation von Energiewandlungsanlagen, bei denen ein lokaler Wärme- oder Elektroenergiebedarf einen Einfluss auf das Verhalten hat, ermöglicht der ZI zumindest eine teilweise Berücksichtigung dieser Nebenbedingungen. Sowohl die Online-Optimierung als auch PoMS nehmen dagegen keine Rücksicht auf lokale Gegebenheiten und schöpfen das dezentrale Potenzial damit gegebenenfalls nur unzureichend aus.

Robustheit: Die Robustheit der Anlagenfahrpläne, d.h. insbesondere eine Vermeidung zu häufiger Zustandsänderungen einzelner DER, wird in keinem der Ansätze explizit in das reaktive Verhalten miteinbezogen. Durch die ausschließliche Regelung des Batteriespeichers vermeidet PoMS diese Problematik zwar etwa für die KWK-Anlagen des betrachteten Szenarios; allerdings ist fraglich, inwieweit dies vor dem Hintergrund hoher Investitionskosten für Speichersysteme für Elektroenergie in Anwendungsfällen mit sehr großer Anlagenzahl sinnvoll ist [LBC⁺08].

Abschließend festzuhalten ist, dass die agentenbasierten Ansätze den Anforderungen an die reaktive Einsatzplanung in VK im Allgemeinen besser gerecht werden als zentralisierte Koordinationsverfahren. Ein wesentlicher Schwachpunkt von PowerMatcher und DEZENT ist allerdings die mangelnde organisatorische Integration in das bestehende Energieversorgungssystem, das auch mittelfristig - d.h. innerhalb der nächsten Jahrzehnte - zu einem nicht zu vernachlässigenden Anteil konventionelle Großkraftwerke umfassen und daher auf eine prädiktive Einsatzplanung angewiesen sein wird.

3.2 Kooperative Transportplanung

Die Bereitstellung von Elektroenergie durch dezentrale Anlagen lässt sich grundsätzlich als dynamischer Prozess auffassen, der externen Einflüssen bzw. Störgrößen unterworfen ist und deshalb durch reaktiv wirkende Maßnahmen gesteuert werden muss. Vergleichbare Probleme - und damit auch Lösungsansätze - finden sich auch in anderen Anwendungsdomänen wie etwa der industriellen Fertigung oder der Logistik. Im Folgenden wird daher zunächst ein multiagentenbasierter Ansatz zur kooperativen Transportplanung vorgestellt und unter Berücksichtigung der domänenspezifischen Anforderungen hinsichtlich seiner Eigenschaften diskutiert; Abschnitt 3.3 behandelt dann analog einen Ansatz zur Ablaufplanung im Produktionsumfeld.

Im Kontext der Transportplanung verfügen in der Regel geographisch verteilte Transportunternehmen über eine Menge von Lastwagen bzw. Transportern, mit denen dynamisch eintreffende Logistikaufträge erfüllt werden können. Ziel eines Unternehmens - und damit Qualitätsmaß für die Transportplanung - kann etwa die Minimierung der Kosten für den Warentransport oder die Maximierung der genutzten Transportkapazität sein. Aufgrund der hohen inhärenten Komplexität dieser Problemstellung - bereits das Teilproblem „Routenplanung“ ist NP-vollständig - schlagen Fischer et al. in [FMP96] eine agentenbasierte, kooperative Transportplanung vor, der einerseits eine Verteilung des Aufwands zur Planerstellung und andererseits - unter anderem aufgrund der Einbeziehung des lokalen Wissens der Transporter - eine dynamische Reallokation von Aufträgen im Falle unerwarteter Ereignisse wie beispielsweise Verkehrstaus ermöglicht.

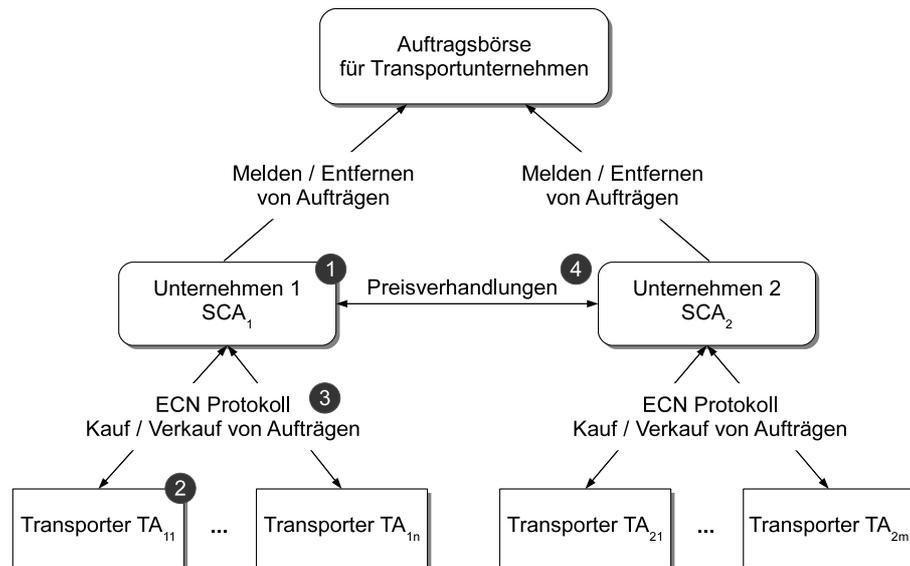


Abbildung 3.7: Hierarchisch organisierte Transportplanung nach [FMP96].

Abbildung 3.7 stellt das hierarchisch organisierte MAS der kooperativen Transportplanung dar. Eine Menge von Transportunternehmen (1), repräsentiert durch Unternehmensagenten (kurz: SCA, von engl.: *shipping company agent*), verwaltet einen Pool von

Transportern (2), die durch sogenannte Transporteragenten (kurz: TA, von engl.: *truck agent*) abgebildet werden. Die Transportplanung wird dabei durch vertikale - d.h. innerbetriebliche - Kooperation auf der Grundlage eines erweiterten Contract Net Protokolls (3) sowie horizontale - d.h. unternehmensübergreifende - Kooperation mittels bilateraler Preisverhandlungen (4) realisiert. Im Folgenden werden diese Kooperationsformen sowie die darauf aufbauende dynamische Reallokation von Aufträgen näher betrachtet.

Vertikale Kooperation in der Planung

Die vertikale Kooperation dient der optimierten Verteilung von Aufträgen auf Transporter innerhalb eines Unternehmens. Erhält ein SCA durch Partizipation an der Auftragsbörse oder direkt durch andere SCA eine Anfrage bezüglich eines Auftrags, so muss er zunächst anhand der gegebenenfalls entstehenden Kosten abschätzen, ob sich eine Übernahme des Auftrags hinsichtlich seiner Zielfunktion rentiert. Einflussfaktoren hinsichtlich der Kosten sind dabei insbesondere die Auslastung der Transporter sowie deren aktuelle Route. Um diese verteilt vorliegenden Informationen in die Kostenkalkulation miteinzubeziehen, initiiert der betroffene SCA auf Grundlage des in [FMP96] diskutierten Extended Contract Net Protocol (kurz: ECNP) Verhandlungen mit den entsprechenden TA. Das ECNP erweitert dabei das „konventionelle“ CNP um temporäre Zu- bzw. Absagen und ermöglicht dadurch eine effiziente Behandlung von Aufträgen, die die Kapazität einzelner Transporter überschreiten und deshalb aufgeteilt werden müssen. Als Antwort auf die Anfrage des SCA formulieren die TA jeweils ein Gebot in Form eines Tripels (a, c, w) , wobei a der Bezeichner des entsprechenden TA ist und c die individuellen Kosten sind, die bei Übernahme der Menge w des angefragten Auftrags durch a entstehen. Aus der Menge der eingegangenen Gebote B wählt der SCA schließlich das von TA a_{\min} aus, falls das Auswahlkriterium

$$(a_{\min}, c_{\min}, w_{\min}) \in B \text{ mit } \forall (a, c, w) \in B : \frac{c_{\min}}{w_{\min}} \leq \frac{c}{w}$$

erfüllt ist. Der SCA kann dann anhand der - gegebenenfalls über mehrere Zuschläge hinweg aufsummierten - Kosten entscheiden, ob er einen Auftrag annimmt oder nicht.

Horizontale Kooperation in der Planung

Im Rahmen der Transportplanung kann es für Unternehmen sinnvoll sein, mit anderen Unternehmen z.B. durch den Austausch von Informationen oder das Anbieten von Transportkapazitäten zu kooperieren. Dadurch können etwa Aufträge, die mit der verfügbaren Restkapazität der TA eines SCA nicht erfüllbar sind, durch Aufteilen unter mehreren SCA angenommen werden. Die kooperative Transportplanung von Fischer et al. bietet dazu die Möglichkeit, Aufträge auf der Ebene gleichberechtigter SCA anzubieten. Dabei kommt ein eigenständiges Verhandlungsprotokoll zum Einsatz, das im Kern auf dem Austausch von Angeboten und Gegenangeboten (engl.: *alternating offers*)

und der Zulieferung insbesondere von Kosteninformationen mittels der bereits bekannten vertikalen Kooperation basiert. Die konkrete Ausgestaltung der Verhandlungen kann dabei durch individuelle Strategieparameter wie etwa dem minimal akzeptablen Profit oder Konvergenzeigenschaften der Gegenangebotserstellung variiert werden. Auf eine vertiefte Diskussion sei an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf [FMP96] verwiesen.

Dynamische Reallokation von Aufträgen

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnitts angemerkt, zeichnet sich auch die Logistikdomäne durch eine inhärente Dynamik bezüglich der Umsetzung von Plänen aus: Transporter können in Staus geraten oder einen Unfall erleiden, Aufträge können zu praktisch beliebigen Zeitpunkten eingehen oder auch wieder storniert werden. Solche Ereignisse beeinflussen im Allgemeinen die Qualität oder sogar die Zulässigkeit des - möglicherweise bereits teilweise realisierten - Plans. Die kooperative Transportplanung stellt daher mit einer anwendungsfallsspezifischen Anpassung des Simulated Trading von Bachem et al. [BHM93] einen Mechanismus zur Verfügung, der für die dynamische Reallokation von Aufträgen und die iterative Verbesserung der individuellen Pläne bzw. Routen der TA genutzt werden kann. Simulated Trading ist eine Optimierungsheuristik, die auf dem Konzept einer virtuellen Börse basiert. Ein Stock Manager koordiniert dabei den Austausch von Aufträgen zwischen den Börsenteilnehmern - im Fall der kooperativen Transportplanung insbesondere die TA -, die unter Angabe eines Preises Gebote für den Kauf bzw. Verkauf von Aufträgen abgeben können. Die Preisangaben ergeben sich dabei durch Hinzufügen bzw. Entfernen von Aufträgen aus der Tourenplanung der TA und können damit etwa Zeiteinsparungen darstellen. Das Matching der eingegangenen Gebote, d.h. das Finden einer optimalen Zuordnung von Käufern und Verkäufern, realisiert der Stock Manager mittels eines sogenannten Trading Graphs.

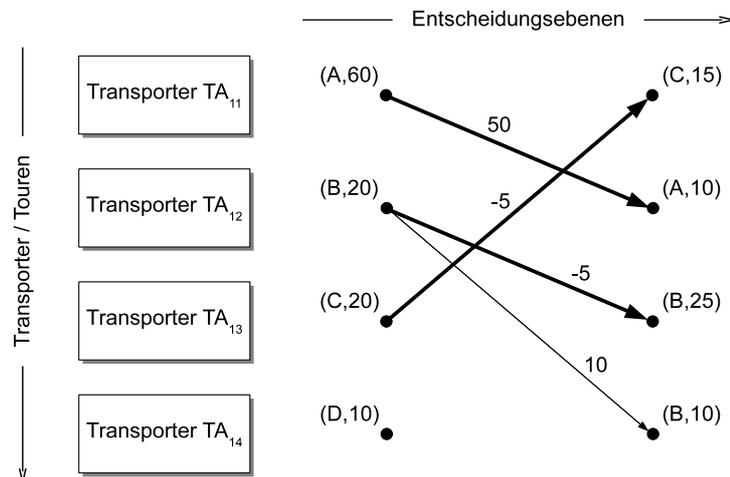


Abbildung 3.8: Exemplarischer Trading Graph in Anlehnung an [BHM93].

Abbildung 3.8 stellt exemplarisch einen vereinfachten Trading Graph für den Auftragshandel zwischen vier TA eines Transportunternehmens dar, deren gemeinsames Ziel eine Minimierung der globalen Dauer bis zur Erfüllung aller Aufträge ist. Die Knoten des Graphen repräsentieren Gebote für den Kauf bzw. Verkauf von Aufträgen und sind mit der Bezeichnung des zu beliefernden Kunden (A, B, C, oder D) sowie Kosten in Form der geschätzten Dauer bis zur Erfüllung des entsprechenden Auftrags in Minuten annotiert. Darüber hinaus sind die Knoten über mehrere Entscheidungsebenen hinweg angeordnet, die der Stock Manager in einem iterativen Verfahren durch Anfragen bei den involvierten TA aufbaut [BHM93]. Die Kanten des Trading Graph repräsentieren den potenziellen Austausch eines Auftrags zwischen zwei TA und sind mit den entsprechend resultierenden Kosteneinsparungen annotiert. Ein Matching ist dann eine Teilmenge der Kanten eines Graphen, die einen Austausch von Aufträgen zwischen den TA beschreibt; in Abbildung 3.8 ist ein solches Matching durch hervorgehobene Kanten markiert. Die Kosteneinsparungen ergeben sich durch einfache Summation der entsprechenden Kantengewichte.

Zusammenfassung

Die von Fischer et al. konzipierte kooperative Transportplanung nutzt das Potenzial intelligenter, kooperierender Agenten, um eingehende Aufträge auf die verfügbare Transportkapazität eines Unternehmens aufzuteilen. Durch die vertikale Kooperation auf Grundlage des ECNP wird dabei eine kostenoptimale Verteilung der Aufträge auf einzelne Transporter realisiert. Im Falle nicht ausreichender Kapazitäten oder drohender Verletzung von zeitlichen Constraints besteht darüber hinaus die Möglichkeit, mittels der horizontalen Kooperation Aufträge zwischen Unternehmen auszutauschen. Dem Einfluss unerwartet auftretender Ereignisse wie etwa Verkehrsstaus kann durch eine dynamische Reallokation von Aufträgen auf Grundlage des Simulated Tradings begegnet werden. Dazu koordiniert ein Stock Manager - etwa der SCA - eine virtuelle Börse, auf der Gebote zum Kauf oder Verkauf einzelner Aufträge abgegeben werden können. Mittels der Repräsentation der Gebote durch einen Trading Graph kann dann ein aktuell optimales Matching bestimmt werden.

Da das ECNP analog zum CNP Deadlines für die Beantwortung der initialen Anfrage beinhaltet und damit garantiert innerhalb einer maximalen Zeitspanne durchlaufen werden kann, kann der Prozess der dynamischen Reallokation von Aufträgen als Anytime-Algorithmus im Sinne von Dean und Boddy [DB88] angesehen werden: Bei Auftreten eines Ereignisses ist nach einer festen, von der Laufzeit bzw. den Deadlines des ECNP abhängigen Zeitspanne t_{\min} eine zulässige Lösung in Form eines Transportplans gefunden. Die Qualität dieses Plans kann mittels des Simulated Trading weiter verbessert werden, ohne die Ausführbarkeit zu beeinträchtigen. Damit steht zu jedem Zeitpunkt $t > t_{\min}$ - unter der Voraussetzung, dass eine Lösung des Problems existiert - eine zulässige, mit zunehmender Zeit in der Regel sogar qualitativ bessere Lösung zur Verfügung. Allerdings erfordert das Simulated Trading aufgrund der kombinatorischen Problemstellung einen exponentiellen Aufwand zur Ermittlung des optimalen Matching

[FMP96] und ist daher nur für eine begrenzte Anzahl von Aufträgen und Verhandlungsteilnehmern praktikabel. Aus Sicht der reaktiven Einsatzplanung in VK ist zunächst festzuhalten, dass eine Anytime-Eigenschaft im Sinne der kooperativen Transportplanung ebenfalls wünschenswert ist, da so einerseits eine schnelle Reaktion (A_1) möglich ist, aber auch langfristige Ziele wie die Beherrschung der Systemdynamik (A_3) und die Generierung robuster Fahrpläne (A_5) verfolgt werden können. Aufgrund der gegebenenfalls sehr großen Anlagenzahl (A_1) ist das Simulated Trading allerdings nicht (direkt) für eine Übertragung auf VK geeignet.

3.3 Aktive Ablaufplanung

Das von Henseler [Hen98] entwickelte Konzept der aktiven Ablaufplanung hat zum Ziel, prädiktive und reaktive Ablaufplanung in der industriellen Fertigung zu einem Gesamtansatz zu integrieren und diesen mit Strategien zur kontinuierlichen Planverbesserung anzureichern. Ein wesentlicher Beitrag ist dabei die Einführung eines abgeschwächten Konsistenzverständnisses, das letztlich - analog zur kooperativen Transportplanung - eine algorithmische Umsetzung von Ablaufplanungsprozessen im Sinne eines Anytime-Algorithmus [DB88] ermöglicht. Im Folgenden werden die Kernpunkte der aktiven Ablaufplanung einschließlich der Implementierung in Form eines MAS vorgestellt und abschließend diskutiert.

3.3.1 Exkurs: Produktionsplanung und -steuerung

Unter Produktionsplanung und -steuerung wird im Allgemeinen die Koordination aller planerischen Tätigkeiten in produzierenden Betrieben verstanden [DSV97, BEP⁺07]. Dabei kommt seit Anfang der 1990er Jahre dem unter anderem von Scheer diskutierten Computer Integrated Manufacturing, d.h. einer informationstechnischen Unterstützung und Steuerung des Produktionsprozesses, eine besondere Bedeutung zu [Sch90].

Abbildung 3.9 stellt eine vereinfachte Gesamtkonzeption des Computer Integrated Manufacturing dar. Beginnend mit der Auftragssteuerung werden eine Reihe aufeinander aufbauender Planungsschritte durchlaufen, wobei jede Ebene den - zunächst auf zu produzierende Mengen und dazu notwendige Materialien beschränkten - Produktionsplan durch Anreicherung um teilproblemspezifische Informationen und Nebenbedingungen verfeinert und an den nachfolgenden Planungsschritt weitergibt. Die Ablaufplanung stellt dabei die Schnittstelle zwischen letztem Planen und danach beginnender Realisierung dar und hat damit analog zur reaktiven Einsatzplanung Betriebsführungsanteile. Wesentliche Aufgabe der Ablaufplanung ist die Festlegung, welche im Herstellungsprozess eines Produkts notwendige Operation zu welchem Zeitpunkt auf welcher produzierenden Maschine durchgeführt werden soll [Hen98, BEP⁺07]. Im Rahmen der Fertigungssteuerung muss darüber hinaus der Ablaufplan, der oft in Form sogenannter Gantt-Charts vorliegt, an sich dynamisch ergebende Sachverhalte wie etwa neu eintreffende Produktionsaufträge oder Maschinenausfälle angepasst werden. Da durch Er-

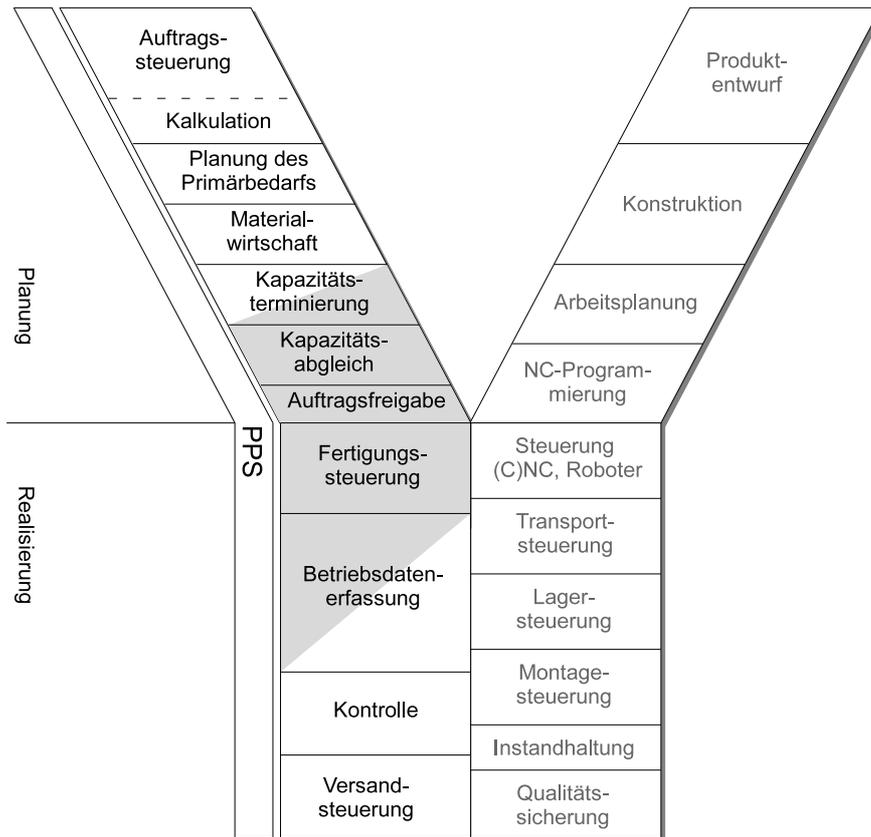


Abbildung 3.9: Computer Integrated Manufacturing (nach [Sch90]). Der hervorgehobene Teil entspricht dabei den Aufgaben der Ablaufplanung.

eignisse ausgelöste Störungen des Betriebsablaufs aus Sicht der Planung in der Regel Inkonsistenzen bezüglich der maschinen- und produktionsspezifischen Nebenbedingungen auslösen, zielt Henseler mit der agentenbasierten aktiven Ablaufplanung [Hen98] zunächst darauf ab, die Konsistenz des bereits teilweise umgesetzten Ablaufplans wiederherzustellen.

3.3.2 Das abgeschwächte Konsistenzverständnis

Die Lösung eines Planungsproblems ist genau dann zulässig, wenn alle harten Konsistenzbedingungen bzw. Restriktionen - wie beispielsweise die Einhaltung der Produktionsreihenfolgen für alle Produkte - erfüllt werden. Für den laufenden Betrieb ergibt sich damit das Problem, dass der Ablaufplan einerseits zu jedem Zeitpunkt des Produktionsgeschehens konsistent sein muss, andererseits eine Aussage über die tatsächliche Konsistenz des Plans aber aufgrund von Verzögerungen z.B. in der Betriebsdatenerfassung praktisch unmöglich ist. Diese Einsicht führte Henseler zur zentralen Idee der aktiven Ablaufplanung: die gezielte Abschwächung des Konsistenzverständnisses.



Abbildung 3.10: Konsistenzgerade mit abgestuften Zulässigkeitsgraden (nach [Hen98]).

Abbildung 3.10 stellt die verschiedenen Zulässigkeitsgrade der aktiven Ablaufplanung in zeitlicher Abhängigkeit vom Auftreten eines Ereignisses zum Zeitpunkt t_E dar. Ereignisse können sich dabei aus mehreren atomaren Operatoren zusammensetzen, zu denen beispielsweise das Erzeugen eines neuen Auftrags, das Entfernen von Maschinen aus dem Produktionsprozess oder die Änderung der Operationenreihenfolge auf einer Maschine gehören. An die Stelle des rein binären Verständnisses „zulässig“ - „nicht zulässig“ treten damit mehrere Abstufungen, die wie folgt zu interpretieren sind:

- Ein Ereignis gilt zum Zeitpunkt t_A als *akzeptiert*, wenn eine einfache Plausibilitätsprüfung erfolgreich verläuft. Getestet wird dabei beispielsweise, ob durch das Ereignis betroffene Maschinen überhaupt existieren.
- Ein Ablaufplan wird zum Zeitpunkt t_K als *konsistenzfähig* bezeichnet, wenn ausschließlich Konsistenzbedingungen bezüglich der Überlappungsfreiheit und der Reihenfolgenkorrektheit von Operationen bestehen. Innerhalb eines konsistenzfähigen Plans können also auf einzelnen Maschinen zeitliche Überschneidungen von Operationen oder Verstöße gegen die einzuhaltende Operationenreihenfolge bestehen, die sich jedoch gegebenenfalls später auflösen und deshalb zunächst toleriert werden.
- Ein Ablaufplan heißt zum Zeitpunkt t_L *lokal zulässig*, wenn er konsistenzfähig ist und keine Verletzungen gegen die Vorrangrelation³ vorliegen. Der Plan ist damit aus der lokalen Sicht einer einzelnen Maschine zulässig, da Verstöße bezüglich der Operationenreihenfolge über mehrere Maschinen hinweg aufgelöst werden müssen.

Zu bemerken sind an dieser Stelle mehrere Dinge: Zunächst kann der Übergang vom Zustand der Konsistenzfähigkeit zur lokalen Zulässigkeit für jede Maschine separat und damit auch parallelisiert und etwa durch einfache zeitliche Verschiebung sich überlappender Operationen (engl.: *right-shift rescheduling*) zeitlich effizient erfolgen. Desweiteren kann für einen Ablaufplan auch nach diesem Verständnis nicht ohne weiteres entschieden werden, ob er zulässig ist oder nur für alle Maschinen lokal zulässig, da noch Umplanungsprozesse bezüglich der Operationenreihenfolge im Gange sein können⁴. Dies stellt jedoch kein Problem dar, da in einem dynamischen Planungsumfeld stets unvorhersehbare Ereignisse auftreten und eine „echte“ Zulässigkeit somit kaum jemals

³ Die Vorrangrelation legt eindeutig eine zeitlich gestaffelte Abfolge von Operationen, die zur Herstellung eines Produkts notwendig sind, fest.

⁴ Die genaue Umsetzung der Umplanung in der aktiven Ablaufplanung wird in Abschnitt 3.3.4 diskutiert.

erreicht wird. Ein wesentlicher Vorteil des Konzepts der aktiven Ablaufplanung gegenüber anderen reaktiven Planungskonzepten ist dagegen die schnelle Reaktionsfähigkeit [RS02], da durch einfache Maßnahmen die lokale Zulässigkeit hergestellt werden kann, ohne dass der laufende Betrieb durch Umplanungsmaßnahmen beeinträchtigt wird.

3.3.3 Der Anytime-Algorithmus

Der eigentliche Algorithmus der aktiven Ablaufplanung baut sehr stark auf dem abgeschwächten Konsistenzbegriff auf. Abbildung 3.11 stellt den prinzipiellen Planungsablauf dar, der sich in Aktivitäten auf drei unterschiedlichen Ebenen unterteilen lässt.

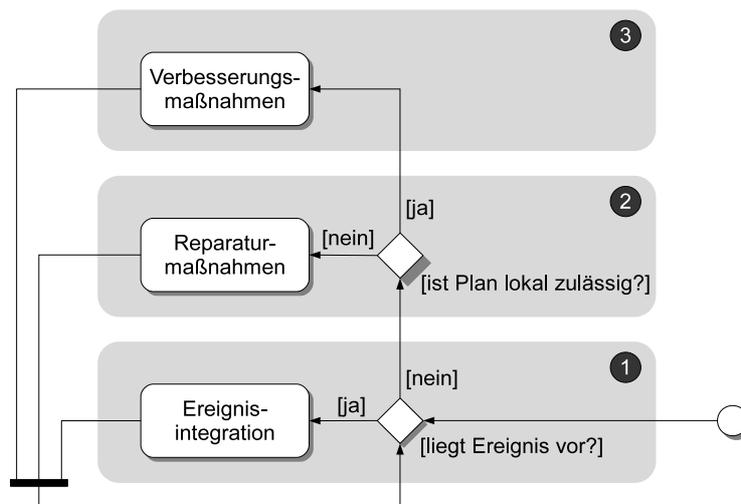


Abbildung 3.11: Grundlegender Algorithmus der aktiven Einsatzplanung (nach [Hen98]).

Wesentliche Aufgabe der Ebene 1 ist die Prüfung von Ereignissen auf Plausibilität und die anschließende Integration der sich ergebenden Auswirkungen in den Ablaufplan. Da hierbei keinerlei Konsistenzbedingungen berücksichtigt werden, ist eine schnelle Reaktionsfähigkeit im Sinne der Verarbeitung eines Ereignisses⁵ gewährleistet. Die darüber liegende Ebene 2 behandelt sämtliche durch die Ereignisintegration entstandenen Konsistenzverletzungen, die aufgelöst werden müssen, um lokale Zulässigkeit zu erreichen. Für Maschinen in der industriellen Fertigung umfasst dies insbesondere die Auflösung von nicht überschneidungsfrei eingeplanten Operationen. Die Behandlung weitergehender Konsistenzverletzungen, die in der Regel mehrere Maschinen betreffen, wird im nächsten Abschnitt diskutiert. Zuletzt umfasst Ebene 3 sämtliche Maßnahmen und Heuristiken zur iterativen Planverbesserung. Liegt für eine Maschine lokale Zulässigkeit vor, so können die auf ihr verplanten Operationen z.B. bezüglich der Maximierung des Durchsatzes oder der Minimierung der Endzeiten bewertet und gegebenenfalls verschoben werden. Auch diese Umplanungsprozesse können in der Regel nur über mehrere

⁵ Es sei daran erinnert, dass sich Ereignisse im Sinne der aktiven Ablaufplanung aus unterschiedlichen atomaren Operatoren, wie etwa der Verschiebung einer Operation auf einer Maschine, zusammensetzen.

Maschinen hinweg erfolgreich sein und werden im anschließenden Abschnitt 3.3.4 diskutiert. Allerdings sei bemerkt, dass die Planoptimierung jederzeit zu Gunsten eines zu integrierenden Ereignisses abgebrochen werden kann.

Anhand der bisherigen Ausführungen lässt sich bereits nachvollziehen, dass das Konzept der aktiven Ablaufplanung auf eine Stärkung der lokalen Autonomie produzierender Maschinen abzielt. Durch die maschinenlokale Ereignisintegration und Wiedererlangung der (lokalen) Zulässigkeit entsteht ein hochgradig parallelisierbares Gesamtsystem, das bezüglich der Reaktionsfähigkeit bedeutend effizienter arbeiten kann als beispielsweise eine zentrale Leitwarte mit Umplanungsheuristiken, die sich auf den gesamten Ablaufplan beziehen [RS02]. Ein möglicher Schwachpunkt des Ansatzes liegt aber in der resultierenden Qualität des Ablaufplans, da auch die Verbesserungsmaßnahmen im Wesentlichen nur mit lokalem Wissen arbeiten können. Die geforderte Anytime-Eigenschaft, d.h. die Fähigkeit des Systems, zu praktisch jedem beliebigen Zeitpunkt eine (lokal) zulässige Lösung liefern zu können, legt den Fokus der Aktivitäten zusätzlich auf die Ereignisverarbeitung und die Wiedererlangung der lokalen Zulässigkeit. Diese vorläufigen Schlussfolgerungen sollen im folgenden Abschnitt durch eine Analyse des Agentenmodells der aktiven Ablaufplanung gestützt werden.

3.3.4 Das Agentenmodell

Sowohl der Konsistenzbegriff als auch der Anytime-Algorithmus der aktiven Ablaufplanung sind in [Hen98] strukturell sehr stark an die Umsetzung in einem MAS gebunden. Das Verständnis eines Agenten nach [Woo99] als autonomes, reaktives und sozial agierendes Computersystem ergänzt einerseits die bereits algorithmisch angestrebte Parallelisierbarkeit der Ereignisverarbeitung⁶ und ermöglicht andererseits durch den Einsatz geeigneter Interaktionsprotokolle eine dezentralisierte Umsetzung der maschinenübergreifenden Reparatur- und Verbesserungsprozesse. Abbildung 3.12 stellt den prinzipiellen Aufbau des von Hensler entwickelten Agentenmodells dar. Einzelne Agenten repräsentieren darin entsprechend ihres Typs physische oder logische Objekte wie Maschinen oder Aufträge, die als passive Informationsquellen aufgefasst werden.

Agententypen

Hensler unterscheidet mehrere Agententypen, die sich insbesondere durch typabhängige Zielsetzungen, mögliche Handlungen und das jeweils verfügbare Wissen differenzieren. Die Wissensbasis eines Agenten wird dabei in interne und externe Fakten unterteilt. Interne Fakten liegen dem Agenten lokal vor und beziehen sich auf das jeweils repräsentierte Objekt, während unter externen Fakten Verweise auf interne Fakten anderer Agenten verstanden werden. Diese Unterscheidung und sich daraus ergebende Konsequenzen werden in Abschnitt 3.3.5 diskutiert. Das Konzept der aktiven Ablaufplanung umfasst die folgenden fünf Agententypen:

⁶ Die Verarbeitung eines Ereignisses umfasst sowohl die Integration als auch die notwendigen Reparaturmaßnahmen.

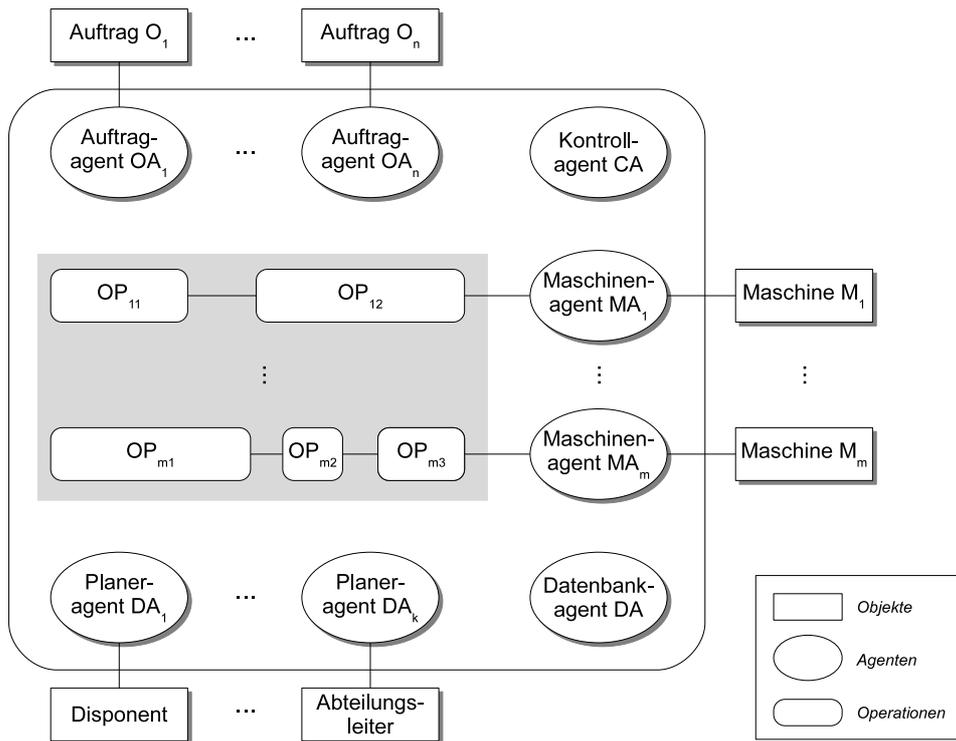


Abbildung 3.12: Prinzipieller Aufbau des Agentenmodells der aktiven Ablaufplanung (nach [Her98]). Der eigentliche Ablaufplan liegt nur in verteilter Form als internes Wissen der Maschinenagenten vor.

- *Maschinenagenten* repräsentieren produzierende Maschinen und verfügen als interne Fakten die Menge aller auf der zugehörigen Maschine eingeplanten Operationen. Zusätzlich sind Maschinenagenten in Form von externen Fakten für jede geplante Operation sowohl über die Vorgänger- als auch die Nachfolgermaschine informiert.
- *Auftragsagenten* repräsentieren einen Auftrag an das Produktionssystem, der insbesondere Angaben zu dem zu fertigenden Produkt und den gewünschten Start- und Endterminen umfasst. Die internen Fakten des Auftragsagenten beinhalten sämtliche Informationen des Auftrags einschließlich des Bearbeitungszustands. Zu den externen Fakten gehört das Wissen um die erste und die letzte Operation, die zur Erfüllung des Auftrags notwendig ist⁷.
- *Planeragenten* stellen eine Schnittstelle zur Einbindung menschlicher Experten dar. Sie können dazu genutzt werden, Ereignisse z.B. in Form neuer Aufträge in das Produktionssystem einzuspeisen. Planeragenten besitzen keine interne Fakten. Die externen Fakten sind anwendungsfallabhängig und umfassen einen frei definierbaren Ausschnitt des Ablaufplans, der sich aus dem Zustand unterschiedlicher Maschinen- und Auftragsagenten zusammensetzen kann.

⁷ Diese Informationen liegen als interne Fakten von Maschinenagenten vor.

- Der *Datenbankagent* stellt zeitlich unveränderliche Informationen bereit. Als interne Fakten verfügt er über Beschreibungen aller herstellbaren Produkte; externe Fakten besitzt er nicht.
- Der *Kontrollagent* überwacht das MAS und administriert unter anderem das Erzeugen bzw. Terminieren von Maschinen- oder Auftragsagenten. Er besitzt weder interne noch externe Fakten.

An dieser Stelle ist Folgendes anzumerken: Die rein administrativen Aufgaben des Kontrollagenten werden in FIPA-konformen Multiagentenplattformen vom Agent Management System übernommen [Fou03a]. Insofern spielt er für die weitere Betrachtung der Ablaufplanung keine Rolle. Ähnliches gilt für den Datenbankagenten, der ausschließlich passiv agiert und Informationen für Maschinen- oder Auftragsagenten auf Anfrage bereit stellt. Zuletzt ist der Planeragent als Schnittstelle für menschliche Akteure gedacht und hat ebenfalls keine weiteren Aufgaben im Planungsprozess. Die weiteren Ausführungen beschränken sich daher auf die aktiv in den kontinuierlichen Planungsprozess integrierten Maschinen- und Auftragsagenten.

Ziele und Handlungsmotivation

Übergeordnetes Ziel der aktiven Ablaufplanung - und damit auch der entsprechenden Agenten - ist die reibungslose Ereignisverarbeitung im laufenden Betrieb unter möglichst guter Wahrung der Planqualität. Die Erreichung dieses Ziels ergibt sich als emergentes Verhalten des MAS, in dem Maschinen- und Auftragagenten eigene Teilziele mit unterschiedlicher Motivation verfolgen. Henseler identifiziert mehrere grundlegende Zielsetzungen wie die Einhaltung von Endterminen oder der Minimierung der Durchlaufzeit eines Produktionsauftrags, deren Verfolgung auf lokaler Ebene zur Erreichung des globalen Ziels beitragen sollen [Hen98].

Bezeichner	Kategorie
K ₁	Position, die sich aus Restriktionen ergibt.
K ₂	Mit anderem Agent verhandelte Position.
K ₃	Aktuelle Position.
K ₄	Position in initialer Lösung.
K ₅	Lokal optimale Position.
K ₆	Von anderem Agent gewünschte Position.
K ₇	Von Planeragent vorgegebene Position.

Tabelle 3.2: Kategorien für die Positionierung einer Operation (nach [Hen98]).

Die Verknüpfung lokaler und globaler Zielsetzungen erfolgt in der aktiven Ablaufplanung über sogenannte Positionslisten. Eine Positionsliste ordnet jeder auf einer Maschine eingeplanten Operation eine Menge von Wunschpositionen - d.h. insbesondere eine Startzeit - in der Bearbeitungsreihenfolge zu. Die Einträge einer Positionsliste können dabei etwa durch Meldungen aus der Betriebsdatenerfassung, Verhandlungen zwischen

verschiedenen Agenten oder planerischem Einwirken menschlicher Disponenten entstehen und sind den in Tabelle 3.2 aufgeführten Kategorien zugeordnet. Durch die Integration der Positionsanforderungen in einer solchen Positionsliste zu einem zeitlich differenzierten Präferenzprofil können bei Umplanungsoperationen sowohl lokale als auch globale Einflüsse bzw. Ziele berücksichtigt werden. Eine typische, auch von Henseler vorgeschlagene Funktion zur Erstellung des Präferenzprofils ist etwa die gewichtete Aufsummierung der Listeneinträge (die dann natürlich in mathematisch geeigneter Form vorliegen müssen). Differenzierte Planungsheuristiken können damit unkompliziert in Form unterschiedlicher Gewichtigungen der einzelnen Kategorien umgesetzt werden. So kann etwa die Forderung nach einem möglichst stabilen Ablaufplan durch eine verstärkte Gewichtung der Kategorie K_3 unterstützt werden. Bemerkenswert ist außerdem, dass die dauerhafte Speicherung der im initialen Plan vorgesehenen, als optimal identifizierten Position einer Operation in Kategorie K_4 dazu beitragen kann, die Planqualität langfristig zu erhalten. Über Einträge der Kategorie K_7 können externe Planer Einfluss auf den Ablaufplan nehmen. Insbesondere bietet sich hierdurch eine Schnittstelle für unabhängige, extern ablaufende Optimierungsalgorithmen, die die Qualität des Ablaufplans positiv beeinflussen können, ohne durch umfangreiche Umdispositionen unnötige „Unruhe“ im Sinne weiterer notwendiger Plananpassungen im Gesamtsystem zu schaffen.

Eng mit den Zielen verknüpft ist die Handlungsmotivation eines Agenten. Diese hat entscheidenden Einfluss darauf, welche Aktion (unter Umständen von einer Vielzahl möglicher Handlungsoptionen) zu welchem Zeitpunkt ausgeführt wird. Das Agentenmodell der aktiven Ablaufplanung orientiert sich dabei an der Maslowschen Bedürfnishierarchie [Mas43] und verknüpft damit die in Abschnitt 3.3.2 diskutierten Konsistenzgrade auf Modellebene mit der Motivation eines Agenten.

Ebene	Maslow-Motivklasse	„Bedürfnis“	Konsistenzgrad
E_1	Grundbedürfnis	Prozesszustand	initialisiert / terminiert
E_2	Sicherheitsbedürfnis	aktuelle Daten	Ereignis akzeptiert
E_3	Zugehörigkeit	lokale Konsistenz	konsistenzfähig
E_4	(Selbst-)Achtung	globale Konsistenz	lokal zulässig
E_5	Selbstverwirklichung	Optimierung	optimal

Tabelle 3.3: Motivationshierarchie der Agenten (nach [Hen98]).

Die Verfolgung individueller Ziele und die Auslösung von Handlungen zur Erreichung bestimmter Konsistenzgrade wird in den Maschinen- und Auftragagenten über eine Abbildung der in Tabelle 3.3 aufgeführten Motivationsebenen auf den jeweiligen internen Zustand realisiert. Der interne Zustand wird dabei insbesondere über das Vorliegen von Nachrichten anderer Agenten oder Meldungen aus der Betriebsdatenerfassung bestimmt. Analog zu Maslows Verständnis kann das Bedürfnis der Ebene E_n nur dann erfüllt werden, wenn bereits die Bedürfnisse der Ebenen E_1 bis E_{n-1} erfüllt sind. Insbesondere agieren die Agenten der aktiven Ablaufplanung nur dann proaktiv im Sinne von Planverbesserungsmaßnahmen, wenn sämtliche vorliegenden Ereignisse verarbeitet und die

lokale Zulässigkeit wieder hergestellt ist. Dadurch passt sich das Verhalten des Gesamtsystem an die Dynamik der Planungsumgebung an: Treten viele Ereignisse kontinuierlich über die Zeit hinweg auf, so verhalten sich die Agenten im Wesentlichen reaktiv, während in einer weniger dynamischen Umgebung die Optimierung des Ablaufplans in den Vordergrund tritt.

Kommunikation und Interaktion

Koordination bzw. Kooperation in einem MAS erfolgt in der Regel über den Austausch von Nachrichten zwischen autonom agierenden Einheiten. In der aktiven Ablaufplanung verfügt jeder Agententyp über eine Nachrichtenwarteschlange (engl.: message queue), die Nachrichten aufnehmen und nach der Motivationshierarchie aus Tabelle 3.3 sortieren bzw. priorisieren kann. Die message queue hat damit einen wesentlichen Einfluss auf den internen Zustand und damit auch auf das Verhalten eines Agenten. Im Folgenden werden die wesentlichen Interaktionsprotokolle, die zur Auflösung von Inkonsistenzen und der Erreichung (lokaler) Zulässigkeit notwendig sind, vorgestellt. Interaktionen auf Ebene E_1 betreffen ausschließlich die Initialisierung oder Terminierung von Agenten sowie der Registrierung bzw. Deregistrierung beim Kontrollagenten und werden daher nicht weiter betrachtet.

Handlungen bzw. Kommunikationsabläufe, die der Ebene E_2 zugeordnet sind, dienen dazu, das Bedürfnis eines Agenten nach Aktualität seiner internen Fakten zu erfüllen und Änderungen an dadurch betroffene Agenten zu kommunizieren. Beispiel 3.1 stellt in Kombination mit Abbildung 3.13 einen typischen Nachrichtenaustausch zwischen Auftrag- und Maschinenagenten dar, der als Reaktion auf eine Änderung eines Auftrags hin initiiert wird.

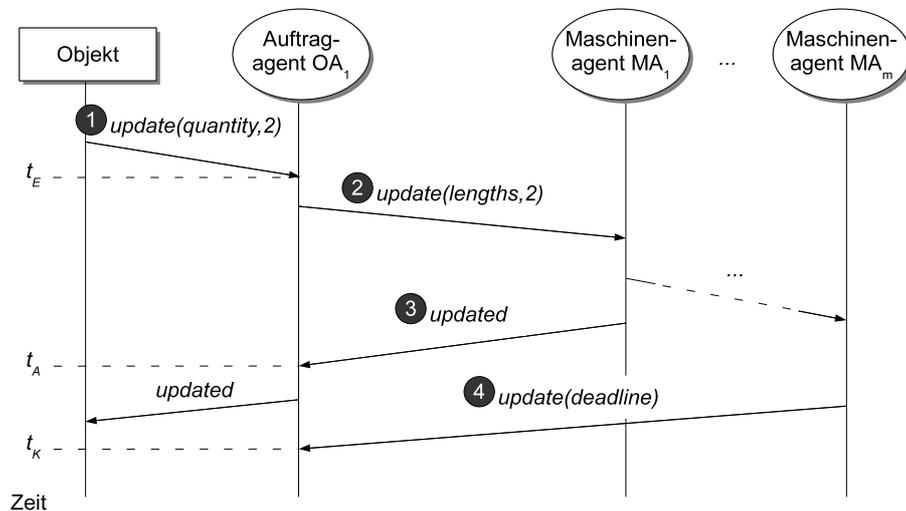


Abbildung 3.13: Exemplarische Kommunikationsverlauf bei Verlängerung einer Operation (nach [Hen98]).

Beispiel 3.1: Reaktion auf Auftragsänderung

Zum Zeitpunkt t_E löst die Meldung eines Objekts (z.B. die Lagerverwaltung eines Produktionsbetriebs) die Änderung eines Auftrags aus, indem die Anzahl der herzustellenden Produkte (*quantity*) verdoppelt wird (1). Für den betroffenen Auftragagenten OA_1 bedeutet dies zunächst, dass er seine internen Fakten ebenfalls durch Verdopplung der Länge der notwendigen Operationen aktualisiert. Diese Änderung veranlasst OA_1 daraufhin, den Maschinenagenten MA_{i_1} , auf dessen Maschine die erste Operation verplant ist, über diesen Sachverhalt zu informieren (2). MA_{i_1} aktualisiert die betroffene Operation (ohne jedoch lokale Inkonsistenzen aufzulösen), leitet die Nachricht zur Verdopplung der Operationenlängen an den Agenten MA_{i_2} der Nachfolgermaschine weiter und bestätigt die Anfrage gegenüber OA_1 (3). Damit ist das Ereignis zum Zeitpunkt t_A akzeptiert. Die Änderungsbenachrichtigungen kaskadieren weiterhin entlang der Operationenfolge über die jeweiligen Nachfolgermaschinen, bis schließlich Maschinenagent MA_{i_m} , auf dem die letzte Operation des entsprechenden Auftrags verplant ist, den Auftragagenten OA_1 über die resultierende Verschiebung des Endtermins in Kenntnis setzt (4). Damit ist die Konsistenzfähigkeit des Ablaufplans zum Zeitpunkt t_K erreicht, und die Handlungen der Ebene E_2 sind abgeschlossen.

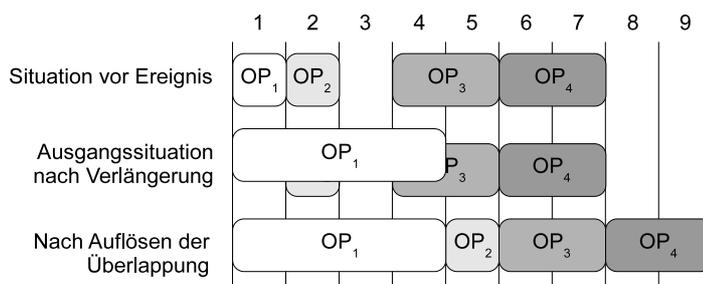


Abbildung 3.14: Lösen von lokalen Inkonsistenzen eines Maschinenagenten am Beispiel einer Überlappung von Operationen (nach [Hen98]).

In der Regel liegen nach dem Akzeptieren eines Ereignisses und dem Durchlaufen der Handlungen der Ebene E_2 bei einzelnen Agenten lokale Inkonsistenzen vor. Abbildung 3.14 zeigt eine typische Ausgangssituation eines Maschinenagenten, bei dem die Verlängerung der Operation OP_1 von ursprünglich einer auf vier Zeiteinheiten zu Überlappungen mit anderen bereits eingeplanten Operationen geführt hat. Die Auflösung der agentenlokalen Inkonsistenzen mit dem Ziel, lokale Konsistenz zu erreichen, fällt in den Aufgabenbereich der Ebene E_3 . Dabei finden keine Interaktionen zwischen verschiedenen Agenten statt, sondern es werden auf der Grundlage (möglicherweise) unterschiedlicher Heuristiken lokale Umplanungen vorgenommen. Henseler präferiert dabei die Verschiebung sich überschneidender Operationen in die Zukunft als einfache, schnell vorzunehmende Handlungsoption, um den Zustand lokaler Zulässigkeit möglichst schnell zu erreichen. Lokale Optimierungen der Operationenreihenfolge finden dabei nicht (oder nur unabsichtlich) statt. Zu bemerken ist dabei, dass die zeitliche Verschiebung von Ope-

rationen in die Zukunft insbesondere deshalb möglich ist, da die Einhaltung des Endtermins eines Auftrags im Sinne der aktiven Ablaufplanung eine Präferenz, nicht jedoch eine harte Restriktion ist [Hen98].

Die Auflösung lokaler Inkonsistenzen durch zeitliche Verschiebung von Operationen kann Verletzungen der Produktionsvorschriften bzw. der Vorrangrelation der Reihenfolge nach sich ziehen. Diese können nicht mehr nur lokal behandelt werden und sind daher Gegenstand der Interaktionen auf Handlungsebene E_4 . Beispiel 3.2 stellt in Kombination mit Abbildung 3.15 eine typische Interaktion zwischen drei Maschinenagenten dar. Auf ein Sequenzdiagramm der ausgetauschten Nachrichten wird aus Übersichtsgründen verzichtet.

Beispiel 3.2: Lösen von Inkonsistenzen

In Schritt (1) führt die Verlängerung von Operation OP_{11} zu einer Überschneidung mit OP_{21} , die lokal aufgelöst wird. Gleichzeitig entsteht bezüglich der Nachfolgeoperation OP_{12} , die auf MA_2 eingeplant ist, eine Verletzung der Vorrangrelation. Zu deren Auflösung übermittelt MA_1 in Schritt (2) den neuen Endzeitpunkt von OP_{11} an MA_2 . Die Verschiebung von OP_{21} zieht ebenfalls eine Vorrangverletzung mit OP_{22} nach sich. Diese wird in Schritt (3) zwischen MA_1 und MA_3 aufgelöst. Die noch verbliebene Überschneidung von OP_{12} und OP_{31} auf MA_2 kann lokal aufgelöst werden, so dass in Schritt (4) ein (global) zulässiger Ablaufplan entstanden ist, der anschließend optimiert werden könnte.

Nach Erreichen der lokalen Zulässigkeit kann sich etwa ein Maschinenagent dazu entscheiden, in Ebene E_5 aktiv zu werden und Maßnahmen zur Planverbesserung einzuleiten. Letztere beschränken sich in der aktiven Ablaufplanung dabei auf die Optimierung der Positionen von Operationen, die unter Ausnutzung lokaler Präferenzprofile bzw. Positionslisten erfolgt. Darüber hinausgehende Maßnahmen etwa zur Minimierung der Überstunden von Mitarbeitern werden nicht explizit betrachtet, können aber in Form von Positionsvorschlägen über Planeragenten in den Ablaufplan integriert werden.

Positionsverbesserungen von Operationen, die auf Maschinen eingeplant sind, können sowohl lokal, d.h. innerhalb eines Agenten, als auch global, d.h. durch Interaktion mehrerer Agenten, erfolgen. Gemäß der Motivationshierarchie aus Tabelle 3.3 werden zunächst lokale Maßnahmen durchgeführt. Um eine (fast) jederzeitige Unterbrechbarkeit des Optimierungsvorgangs zu gewährleisten und damit dem Anspruch eines Anytime-Algorithmus gerecht zu werden, beschränkt Henseler das Optimierungsproblem für jeden Durchlauf auf eine einzelne Operation. Für diese wird mittels des Präferenzprofils zunächst die lokal günstigste Position gesucht. Im Anschluss daran wird ein sogenanntes Verschiebungsprofil [Hen98] erstellt, das u.a. die notwendigen Umplanungsmaßnahmen nach einer potenziellen Verschiebung einer Operation berücksichtigt. Eine lokal optimale Position für eine Operation findet sich dann durch kombinierte Betrachtung der präferierten Positionen und den im Verschiebungsprofil abgebildeten „Kosten“ für eine Umpositionierung. Ergebnis der lokalen Verbesserungsversuche kann sein, dass die

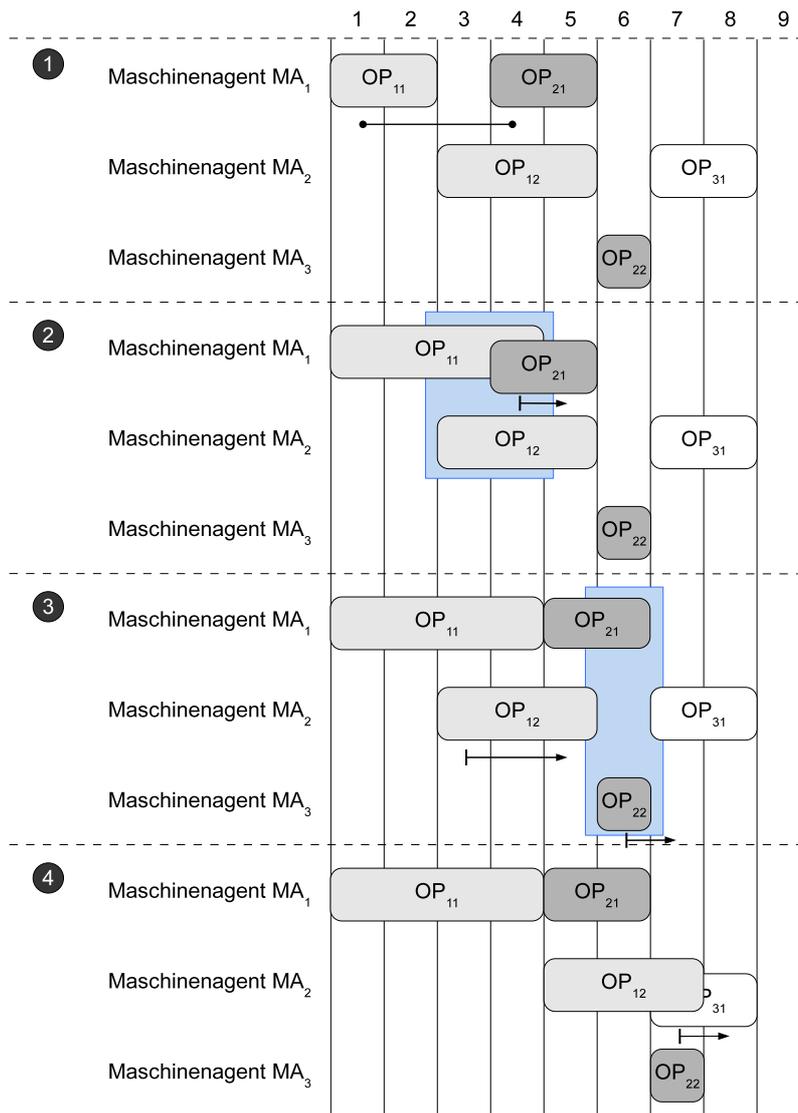


Abbildung 3.15: Lösen von Inkonsistenzen zwischen Maschinenagenten (nach [Hen98]). Die hervorgehobenen Konflikte in Schritt (2) und Schritt (3) erfordern Kommunikation zwischen MA₁ und MA₂ bzw. MA₁ und MA₃.

Verschiebung einer Operation auf eine Alternativmaschine deutlich lokale Vorteile ermöglichen würde. In einem solchen Fall kann ein Maschinenagent versuchen, mittels bilateraler Verhandlungen mit einem Maschinenagenten einer bezüglich der Operation gleichwertigen Maschine diese Verschiebung zu erreichen. Abbildung 3.16 stellt das von Henseler vorgeschlagene Interaktionsprotokoll dar, das sich eng am Contract Net Protocol orientiert. Auf eine Verschiebungsbitte (1) hin evaluiert der angesprochene Agent die Möglichkeit, die entsprechende Operation in seinen lokalen Plan zu integrieren und antwortet entsprechend zustimmend oder ablehnend (2). Eine Zustimmung kann darüber-

hinaus an eine Bedingung⁸ geknüpft sein. Der Initiator kann daraufhin die Verhandlung abbrechen oder die Verschiebung der Operation anweisen (3). Zuletzt wird dem Partner noch die Möglichkeit zur Ablehnung der zuvor zugesagten Verschiebung eingeräumt, um etwaigen Änderungen seiner internen Fakten während der Verhandlungsdauer Rechnung zu tragen. Andernfalls bestätigt er die Verschiebung (4) und integriert die Operation in seine interne Faktenbasis.

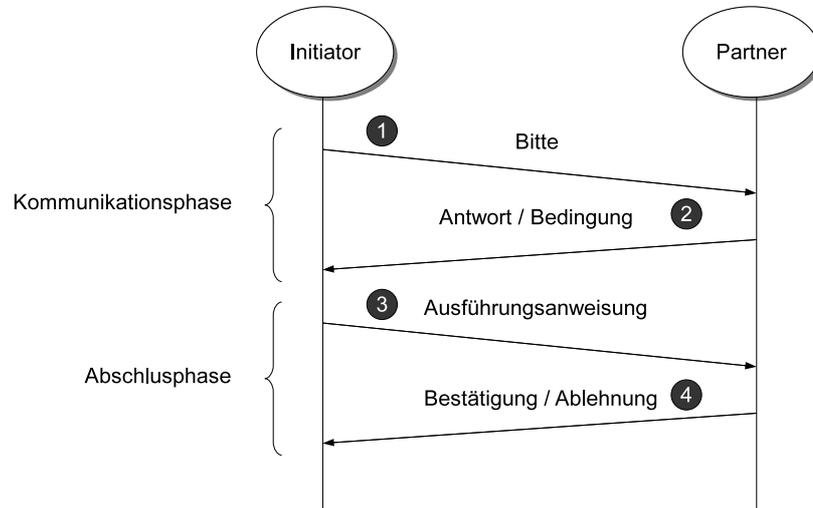


Abbildung 3.16: In [Hen98] vorgeschlagenes Verhandlungsprotokoll, das vorwiegend während der Optimierungsphase der aktiven Ablaufplanung zum Einsatz kommt.

In der Regel verursachen Positions- oder Maschinenverschiebungen von Operationen lokale Inkonsistenzen, so dass sich insgesamt eine kontinuierliche Iteration von Ereignisverarbeitung, lokaler Konsistenzerlangung und Planverbesserung ergibt. Zudem soll abschließend noch angemerkt werden, dass jeder Agent des System natürlich einen individuellen Zustand besitzt, so dass aus Gesamtsystemssicht zu einem Zeitpunkt Handlungen auf unterschiedlichen Ebenen vorgenommen werden.

3.3.5 Zusammenfassung

Die agentenbasierte aktive Ablaufplanung ermöglicht durch eine Verteilung von Planungswissen und -kompetenzen und insbesondere aufgrund eines differenzierten Konsistenzverständnisses eine hohe Reaktionsfähigkeit im Kontext der industriellen Ablaufplanung. Dabei integriert Henseler Ereignisintegration, Reparatur- und Planverbesserungsmaßnahmen zu einen Anytime-Algorithmus, der sowohl ein reaktives als auch ein deliberatives - d.h. vorausschauendes bzw. im Wortsinn „erwägendes“ - Agieren der Auftrag- und Maschinenagenten ermöglicht. Die Interaktionen insbesondere zwischen den Maschinenagenten sind teilweise durch die Vorrangrelation der Operationenfolge

⁸ Henseler schlägt vor, jeden Agenten mit einer Liste von „Gefallen“ auszustatten, die er einem anderen Agenten noch schuldet oder die ihm geschuldet werden.

vorgegeben, wodurch ein einfaches Propagieren von Änderungen an lokalen Ausschnitten des Ablaufplans ohne großen Kommunikationsaufwand ermöglicht wird. Der Einsatz von Positionslisten dient als Heuristik für die lokale Planverbesserung; eine agentenübergreifende Abstimmung wird durch ein Contract Net-ähnliches Interaktionsprotokoll realisiert. Insgesamt ergibt sich dadurch ein kontinuierlich agierendes System, das Ereignisse nicht mehr als „Störungen“ auffasst, sondern als „natürliche“ Einflussmöglichkeit auf den Ablaufplan [Hen98].

Analog zur in Abschnitt 3.2 diskutierten kooperativen Transportplanung ist festzuhalten, dass die Anytime-Eigenschaft der aktiven Ablaufplanung auch für die reaktive Einsatzplanung in VK interessant ist. Eine direkte Übertragung der aktiven Ablaufplanung auf VK ist jedoch insbesondere aufgrund der folgenden domänenspezifischen Unterschiede zwischen industrieller Fertigung und dezentraler Energieversorgung nicht möglich:

- Für einen stabilen Netzbetrieb ist es notwendig, Erzeugung und Bedarf von Elektroenergie zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen zu gestalten. Vor diesem Hintergrund ist die in A_1 geforderte Reaktionsfähigkeit eines reaktiven Einsatzplanungssystems als kritischer zu betrachten als im Kontext der industriellen Fertigung, da eine verspätete Lieferung elektrischer Energie wenig bis keinen Nutzen im Sinne der Kompensation von Fahrplanabweichungen bietet.
- Im Rahmen einer möglichen Beteiligung von VK an der Bereitstellung von Regelleistung kann es notwendig sein, mehrere hundert bzw. tausend dezentrale Anlagen zu koordinieren. Die Anzahl der Systemkomponenten kann damit um mehrere Größenordnungen über Anwendungen in der industriellen Fertigung liegen. Hieraus ergeben sich insbesondere Schwierigkeiten hinsichtlich der optimalen Auswahl von Alternativressourcen, die zur Kompensation von Fahrplanabweichungen geeignet sind. Zudem erfordert die Koordination einer größeren Zahl an Akteuren in der Regel auch einen größeren kommunikativen Aufwand.
- In der aktiven Ablaufplanung wird die Menge der Kommunikationspartner, die für eine Umplanung von Operationen in Frage kommt, einerseits durch die Vorrangregelung, die sich aus den Produktionsvorschriften bzw. Herstellungsvarianten ableitet, und andererseits durch die von unterschiedlichen Maschinentypen erbringbaren Operationen beschränkt. In der dezentralen Energieversorgung bestehen keine solchen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Ressourcen, mit der Folge, dass prinzipiell jede Anlage als potenziell interessant für die Kompensation von Fahrplanabweichungen angesehen werden kann.
- Die dezentralen Energiesysteme eines VK sind räumlich deutlich weiter verteilt als die produzierenden Maschinen einer Fabrik. Diese Verteilung äußert sich insbesondere in ortsabhängigen Rahmenbedingungen für einzelne Ressourcen, die sich wiederum in zustandsabhängigen Restriktionen⁹ niederschlagen. Damit ist das Verhalten

⁹ Siehe dazu Definition 4.6 sowie die nachfolgende Diskussion auf Seite 78ff.

der Ressourcen eines VK stärker von äußeren, nicht beeinflussbaren Gegebenheiten des Planungsumfelds abhängig, als dies in der industriellen Fertigung der Fall ist.

Von besonderem Interesse und zunächst unabhängig von einer spezifischen Anwendungsdomäne ist allerdings das konzeptionelle Vorgehen Henselers: Durch die Einführung abgestufter Konsistenzgrade konnte das Ablaufplanungsproblem in mehrere Teilprobleme - Ereignisintegration, Planreparatur und Planverbesserung - zerlegt werden, die effizient durch ein verteiltes Informationssystem gelöst werden können. Im nächsten Kapitel wird gezeigt, dass eine schrittweise Anpassung und Verfeinerung eines durch Ereignisse beeinflussten Einsatzplanes in Anlehnung an [Hen98] prinzipiell geeignet ist, das reaktive Einsatzplanungsproblem in VK in verteilter Art und Weise zu lösen.

3.4 Zusammenfassung

In Abschnitt 3.1 wurden unterschiedliche Ansätze zur Koordination dezentraler Anlagen vorgestellt und hinsichtlich der in Abschnitt 2.2.2 identifizierten Anforderungen an die reaktive Einsatzplanung in VK diskutiert. Auf der Grundlage dieser Analyse und der Gegenüberstellung der zentralisiert bzw. hierarchisch organisierten Energiemanagementsysteme können die folgenden Punkte als wesentliche noch zu lösende Herausforderungen bezüglich einer effizienten reaktiven Koordination von DER festgehalten werden:

Systemdynamik: Die Bereitstellung von Elektroenergie durch die DER eines VK kann als dynamischer Prozess aufgefasst werden, der Umgebungseinflüssen unterliegt und deshalb kontinuierlich überwacht und gesteuert werden muss. Dazu gehört nicht nur eine hohe Reaktionsfähigkeit auf unerwartet auftretende Ereignisse, sondern - um den Prozess vor dem Hintergrund einer im Allgemeinen großen Anlagenzahl beherrschbar zu gestalten - auch eine frühzeitige Erkennung und gegebenenfalls Vermeidung von Fahrplanabweichungen. Weder die untersuchten zentralisierten Informationssysteme noch die - rein reaktiv agierenden - hierarchischen MAS bieten diesbezüglich adäquate Lösungsansätze.

Robustheit: Analog zur Systemdynamik zeigt sich in den untersuchten Koordinationsansätzen auch hinsichtlich der Robustheit der Anlagenfahrpläne das Fehlen einer vorausschauend agierenden Planungskomponente. Insbesondere die kurzfristig orientierten Verhandlungen in PowerMatcher und DEZENT erschweren dabei eine strategische Optimierung von Anlagenfahrplänen hinsichtlich einer Minimierung von Zustandsänderungen oder der Vermeidung von Folgeabweichungen.

Organisatorische Integration: Die Diskussion der unterschiedlichen Koordinationsansätze in Abschnitt 3.1.3 hat gezeigt, dass die hierarchischen MAS insbesondere hinsichtlich Reaktionsfähigkeit, Skalierbarkeit und Individualität deutliche Vorteile gegenüber den zentralisierten Energiemanagementsystemen bieten. Allerdings fokussieren sowohl PowerMatcher als auch DEZENT mit dem Supply-Demand-Match-

ing eine einzelne Einsatzmöglichkeit von VK. Aufgrund der Realisierung der Anlagenkoordination in Form eines rein reaktiv agierenden Prozesses stellt sich dabei auf organisatorischer Ebene - etwa im Rahmen des Bilanzkreismanagements - die Frage nach einer geeigneten Integration dieserart gesteuerter DER in die übergeordneten Planungs- und Beschaffungsprozesse der Energiewirtschaft. Darüber hinaus ist eine von der globalen Zielsetzung der Anlagenkoordination weitestgehend unabhängige Gestaltung der reaktiven Einsatzplanung vorteilhaft, da so unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten von VK¹⁰ unterstützt werden können.

Mit der in Abschnitt 3.2 vorgestellten kooperativen Transportplanung und der im letzten Abschnitt diskutierten aktiven Ablaufplanung stehen für verwandte Problemstellungen Lösungsansätze zur Verfügung, die insbesondere eine Anytime-Eigenschaft gemeinsam haben: Nach einer abschätzbaren oberen Zeitschranke liefern die Algorithmen bzw. Koordinationsverfahren eine zulässige Lösung des jeweiligen Planungsproblems, deren Qualität mit zunehmender Zeit noch weiter verbessert wird. Die Übertragung dieser - vor allem auch hinsichtlich der aufgezeigten Probleme bezüglich der Systemdynamik und der Robustheit - wünschenswerten Eigenschaft auf eine verteilte reaktive Einsatzplanung in VK wird ein Ziel der Diskussion im nächsten Kapitel sein.

¹⁰ Siehe dazu etwa die Beispiele 2.1 bis 2.3 sowie die Diskussion auf Seite 20ff.

Planning is an unnatural process; it is much more fun to do something. The nicest thing about not planning is that failure comes as a complete surprise, rather than being preceded by a period of worry and depression.

– Sir John Harvey

4 Aktive Einsatzplanung

In Abschnitt 2.2 wurden Virtuelle Kraftwerke (kurz: VK) als eine Möglichkeit zur langfristigen Integration dezentraler Anlagen in die Energieversorgung vorgestellt. Dabei ergeben sich aus den technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft besondere Anforderungen an den zuverlässigen Betrieb von VK. Eine wesentliche Rolle zur Begrenzung der unter anderem aus Prognoseunsicherheiten resultierenden Abweichungen vom erwarteten Verhalten des Gesamtsystems spielt dabei die reaktive Einsatzplanung. Im vorangegangenen Kapitel 3 wurden zunächst unterschiedliche Planungs- und Optimierungsverfahren diskutiert und hinsichtlich der Anforderungen A_1 bis A_5 aus Abschnitt 2.2.2 bewertet. Mit der aktiven Ablaufplanung wurde schließlich in Abschnitt 3.3 ein Ansatz aus dem Kontext der industriellen Fertigung vorgestellt, der zwar nicht direkt auf die dezentrale Energieversorgung übertragbar ist, aber dennoch einige interessante Ansatzpunkte zur Gestaltung eines reaktiven Planungssystems für VK bietet, das den genannten Anforderung genügt.

Auf Grundlage der hinsichtlich der Koordination dezentraler Energiesysteme bisher festgehaltenen Eigenschaften und Anforderungen wird in diesem Kapitel die *aktive Einsatzplanung* als reaktives Planungs- bzw. Steuerungskonzept für VK konzipiert und diskutiert. Das Vorgehen ist dabei wie folgt: Zunächst wird das reaktive Einsatzplanungsproblem in VK formal spezifiziert und in Anlehnung an die aktive Ablaufplanung in mehrere Teilprobleme zerlegt. Für die Lösung dieser Teilprobleme wird dann ein multiagentenbasiertes Kontrollsystem vorgeschlagen, das das reaktive Einsatzplanungsproblem im Sinne eines Anytime-Algorithmus lösen soll. Dabei liegt der Fokus zunächst auf dem zeitnahen Finden eines zulässigen Einsatzplans. Durch eine geeignet gestaltete Kooperation von Agenten sowie der Nutzung von lokalen Entscheidungsheuristiken wird darüberhinaus die Frage nach der langfristigen Qualität der gefundenen Lösung adressiert. Die kritische Diskussion der resultierenden, agentenbasierten aktiven Einsatzplanung bildet den Abschluss dieses Kapitels.

4.1 Das reaktive Einsatzplanungsproblem *RSP*

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 angemerkt, existiert bislang keine gängige Formalisierung von Einsatzplanung im Kontext von VK. In [Win09] wird ein mathematischer bzw. graphentheoretischer Ansatz diskutiert, der insbesondere auf Wiederverwendbarkeit für unterschiedliche Planungs- bzw. Optimierungsansätze hinsichtlich der Tageseinsatzplanung abzielt. Die im Folgenden vorgestellte Formalisierung baut konzeptuell auf Teilen dieser Vorarbeit auf und erweitert die bereits in [TA09] diskutierten Begrifflichkeiten.

Zunächst umfasst ein VK eine Menge von Ressourcen:

Definition 4.1 (Ressourcen)

$R = \{r_1, \dots, r_n\}$ ist eine endliche, nichtleere Menge von **Ressourcen**.

Im Gegensatz zur Ablaufplanung in der industriellen Fertigung beziehen sich Ressourcen im Sinne der Einsatzplanung in VK ausschließlich auf technische Anlagen, d.h. dezentrale Energiewandler und Speichersysteme.

Definition 4.2 (Planungszeitpunkt, Planungszeitraum)

$T = \{t_1, \dots, t_m\}$, $t_i \in \mathbb{N}$, $1 \leq i \leq m$ ist eine endliche, nichtleere Menge von **Planungszeitpunkten**, der sogenannte **Planungszeitraum**. Dabei ist T o.B.d.A. mittels der üblichen Relation $<$ der natürlichen Zahlen streng aufsteigend geordnet.

Der Planungszeitraum T ist gemäß Definition 4.2 als eine streng geordnete Menge von Bezeichnern zu interpretieren, die realweltliche Zeitpunkte darstellen. Die Auflösung bzw. Granularität des Planungszeitraums kann sich dabei anwendungsfallabhängig unterscheiden: In der Energiewirtschaft ist - etwa für die Abrechnung von Energiebilanzen im Kontext des Bilanzkreismanagements - eine zeitliche Auflösung in 15-Minuten Intervallen typisch, d.h. $T = [1, 96]$ für einen Planungszeitraum von einem Tag. Betrachtet man die Einsatzplanung dagegen unter dem Aspekt der Netzstabilität, so kann eine deutlich feinere Granularität von T notwendig sein¹. Abbildung 4.1 verdeutlicht diese Auffassung der Planungszeit.

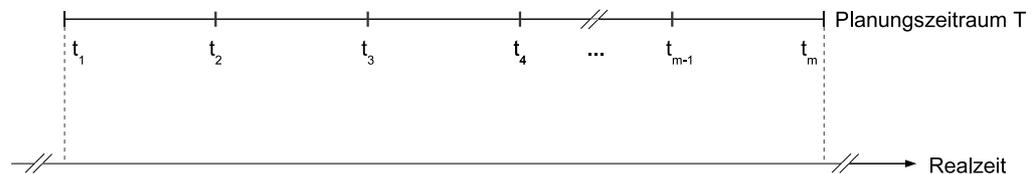


Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen Realzeit und Planungszeit.

Im Sinne eines optimalen Anlagenbetriebs muss für jede zugehörige Ressource des VK ein Fahrplan erstellt werden, der die Leistungsbereitstellung der einzelnen Anlagen für den Planungszeitraum festlegt. Dabei sind die Planungszeitpunkte $t_i \in T$ als untere Intervallgrenze des halboffenen bzw. uneigentlichen Intervalls $[t_i, t_{i+1})$ aufzufassen, das einen Abschnitt der Realzeit repräsentiert, für den die Leistungsabgabe als konstant angenommen wird. Die physikalische Einheit der angeforderten Leistung kann dabei von der Anlagenkapazität abhängen, sollte aber zu Planungszwecken konsistent gewählt werden.

¹ Aufgrund der im europäischen Verbundnetz festgelegten Nennfrequenz von 50 Hz ist etwa für frequenzstützende Maßnahmen mindestens eine zeitliche Auflösung von $\frac{1}{50}\text{s} = 20\text{ ms}$ erforderlich. Für einen Planungszeitraum von einem Tag folgt damit $T = [1, 4.320.000]$.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Einsatzplanung in VK typischerweise auf den Leistungstyp „elektrische Leistung“ bezieht. Es ist aber durchaus vorstellbar, auch die thermische Leistung der dezentralen Anlagen, die in bisherigen Ansätzen nur aufgrund der lokalen Nebenbedingung der Wärmeabnahme betrachtet wird, aktiv in die Planung einzubeziehen. Ein mögliches Anwendungsszenario ist z.B. der optimale Betrieb von KWK-Anlagen bei Vorhandensein eines Nahwärmenetzes. Eine konsequente Weiterführung dieses energieformübergreifenden Gedankens ist etwa das von Geidl und Andersson in [GA05a, GA05b] diskutierte Konzept des EnergyHubs, das an dieser Stelle allerdings nicht vertieft werden soll.

Definition 4.3 (Fahrplan)

Eine Funktion $s : T \rightarrow \mathbb{R}$, $s(t) = p$, heißt **Fahrplan** (engl.: *schedule*), wobei $t \in T$ ein Planungszeitpunkt und $p \in \mathbb{R}$ eine Leistungsvorgabe ist. $S \subset 2^{(T \times \mathbb{R})}$ ist die Menge aller Fahrpläne.

Ein Fahrplan ordnet jedem Planungszeitpunkt des Planungszeitraums eine Leistungsvorgabe (mit einer eindeutig definierten Einheit) zu. Damit sind alle Voraussetzungen für die Definition eines Einsatzplanes geschaffen:

Definition 4.4 (Einsatzplan)

Eine Funktion $os : R \rightarrow S$, $os(r) = s$, heißt **Einsatzplan** (engl.: *operation schedule*), wobei $r \in R$ eine Ressource und $s \in S$ ein Fahrplan ist. $OS \subset 2^{(R \times S)}$ ist die Menge aller Einsatzpläne.

Ein Einsatzplan ordnet jeder Ressource eines VK einen Fahrplan zu. Damit verfügt jede Anlage für jeden Planungszeitpunkt über eine Leistungsvorgabe, die im Sinne eines optimalen Betriebs eingehalten werden sollte. Anhand dieser Beobachtung lässt sich der Gesamtfahrplan eines VK aus einem Einsatzplan ableiten:

Definition 4.5 (Gesamtfahrplan)

Für einen Planungszeitraum T , eine Menge von Ressourcen R und einen Einsatzplan $os \in OS$ ist der **Gesamtfahrplan** \hat{s}_{os} definiert durch

$$\hat{s}_{os}(t) := \sum_{r \in R} s_r(t) \text{ mit } s_r = os(r) \text{ und } t \in T.$$

Die Erstellung eines Einsatzplans bzw. Gesamtfahrplans erfolgt dabei nicht willkürlich, sondern hinsichtlich der Optimierung bezüglich einer Zielfunktion und unter Beachtung bestimmter Rahmenbedingungen.

Definition 4.6 (Restriktionen)

$HC = \{hc_1, \dots, hc_h\}$ ist eine endliche Menge von **Restriktionen** bzw. **Hard Constraints**. Die Ausprägung von HC ist dabei abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall.

Restriktionen sind - in Form logischer Prädikate oder Relationen bezüglich der Wertebereiche von Variablen formulierte - anlagenspezifische Nebenbedingungen, die durch den Fahrplan s_r einer Ressource $r \in R$ nicht verletzt werden dürfen. Die im Folgenden exemplarisch aufgelisteten Restriktionen stellen dabei eine relativ generische Grundlage dar, die anwendungsfallabhängig erweitert werden kann. Aus Übersichtsgründen wird dabei auf eine explizit formale Darstellung der Restriktionen verzichtet².

Konsistenzgruppe HC₁: Zeitinvariante Restriktionen

- hc₁: Einhaltung der technisch möglichen Maximalleistung eines Erzeugers
- hc₂: Einhaltung der technisch möglichen Minimalleistung eines Erzeugers
- hc₃: Einhaltung der minimalen Laufzeit eines Erzeugers
- hc₄: Einhaltung der maximalen Laufzeit eines Erzeugers
- hc₅: Einhaltung des maximalen Füllstands eines Energiespeichersystems
- hc₆: Einhaltung des minimalen Füllstands eines Energiespeichersystems

Konsistenzgruppe HC₂: Zustandsabhängige Restriktionen

- hc₇: Berücksichtigung der dargebotsabhängigen Maximalleistung eines Erzeugers
- hc₈: Berücksichtigung des aktuellen Füllstands eines Energiespeichersystems
- hc₉: Berücksichtigung des aktuellen Verschiebepotenzials eines steuerbaren Verbrauchers

Restriktionen lassen sich in zeitinvariante und zustandsabhängige Constraints unterteilen. Zu den zeitinvarianten Restriktionen zählen insbesondere die anlagentechnischen Rahmenbedingungen für den Betrieb einer Ressource, die im Wesentlichen unveränderlich sind. Einschränkend sei angemerkt, dass dies streng genommen nur unter Vernachlässigung der verschleißbedingten Leistungsminderungen z.B. bei KWK-Anlagen oder der Kapazitätsdegradation bei Speichersystemen für elektrische Energie korrekt ist. Unter Berücksichtigung dieser Effekte könnten bestimmte Aspekte der Anlagentechnik alternativ den zustandsabhängigen Restriktionen zugeordnet werden.

Die zustandsabhängigen Restriktion beziehen sich - wie das nachfolgende Beispiel 4.1 verdeutlicht - auf den jeweils im Betrieb gemessenen oder im Planungsprozess prognostizierten Zustand einer Anlage, der zeitlich veränderlich und durch die Entscheidungen der Einsatzplanung beeinflussbar ist. Dies kann etwa den Energieinhalt eines thermischen oder elektrischen Speichersystems betreffen oder sich auf dargebotsabhängige Eigenschaften wie beispielsweise die Maximalleistung einer PV-Anlage beziehen.

² Restriktion hc₁ lässt sich noch übersichtlich etwa in Form des Ausdrucks $\forall t \in T : s_r(t) \leq p_{r,\max}$ mit $p_{r,\max}$ als Maximalleistung der Ressource r darstellen. Die Abbildung von Fahrplaneinträgen auf Laufzeiten oder Speicherfüllstände würde dagegen einen für eine verständliche Formalisierung sinnvollen Rahmen sprengen.

Beispiel 4.1: Zustandsabhängige Restriktionen

Im Rahmen der in Beispiel 2.4 beschriebenen Fahrplananpassung eines BHKW ändert sich der Zustand sowohl der KWK-Anlage als auch des angeschlossenen thermischen Speichers, der die zusätzlich zugewiesene thermische Leistungsabgabe zwischenspeichert. Dadurch können sich zu einem in der Zukunft liegenden Planungszeitpunkt $t \in T$ Inkonsistenzen bzgl. der zustandsabhängigen Restriktion hc_s ergeben, da die vorgesehene Leistungsabgabe $s_{\text{BHKW}}(t)$ über der verbleibenden - und durch die Fahrplananpassung gegenüber der ursprünglichen Planung verminderten - Restkapazität des thermischen Speichers liegt.

Im Weiteren wird häufig von der Erfüllung von Restriktionen die Rede sein. Zur Vereinfachung der Diskussion wird die folgende Erfüllungsfunktion eingeführt:

Definition 4.7 (Erfüllungsfunktion bzgl. Restriktionen)

Für eine Ressource $r \in R$ mit einem Fahrplan $s_r \in S$ ist die **Erfüllungsfunktion** $v_{hc} : S \rightarrow \{0, 1\}$ definiert durch

$$v_{hc}(s_r) := \begin{cases} 1 & \text{falls } s_r \text{ die Restriktion } hc \in HC_r \text{ erfüllt,} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dabei ist $HC_r \subseteq HC$ die Menge aller bezüglich r definierten Restriktionen.

v_{hc} entspricht damit der charakteristischen Funktion über der Menge aller Fahrpläne $S_{hc} \subseteq S$, die den bezüglich einer Ressource $r \in R$ definierten Hard Constraint hc erfüllen. Es gilt also $v_{hc}(s_r) = 1$ genau dann, wenn $s_r \in S_{hc}$ erfüllt ist.

In Abhängigkeit der zeitinvarianten und zustandsabhängigen Restriktionen und des aktuellen Fahrplans lässt sich die zeitlich veränderliche Leistungskapazität eines DER definieren, die insbesondere von den zu einem Zeitpunkt $t \in T$ realisierbaren Modulationsstufen - d.h. regelungstechnisch einstellbaren Leistungsabgaben - eines DER abhängt. Dazu sei zunächst die Aktualisierung von Fahrplänen eingeführt:

Definition 4.8 (Fahrplanaktualisierung)

Für eine Ressource $r \in R$ mit einem Fahrplan s_r ist die **Aktualisierung des Fahrplans** $s_r \oplus (t, p)$ mittels $(t, p) \in T \times \mathbb{R}$ definiert durch

$$(s_r \oplus (t, p))(t_i) := \begin{cases} s_r(t_i) + p & \text{falls } t_i = t, \\ s_r(t_i) & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Aktualisierung $s_r \oplus (t, p)$ hat also zur Folge, dass der Fahrplaneintrag $s_r(t)$ um die Leistungsvorgabe $p \in \mathbb{R}$ erhöht bzw. vermindert wird. Damit ergibt sich die zeitlich veränderliche Kapazität einer dezentralen Anlage wie folgt:

Definition 4.9 (Leistungskapazität)

Die **Leistungskapazität** einer Ressource $r \in R$ mit Fahrplan $s_r \in S$ ist gegeben durch die Funktion $c_r : T \rightarrow 2^{\mathbb{R}}$ mit

$$c_r(t) := \{p \in \mathbb{R} \mid \forall hc \in HC_r : v_{hc}(s_r \oplus (t, p)) = 1\}.$$

Unter der Kapazität eines DER ist damit dessen Fähigkeit zu verstehen, den entsprechenden Anlagenfahrplan - und damit auch die abgegebene bzw. bezogene Leistung - in einem gewissen Rahmen anzupassen, ohne dass dadurch anlagenspezifische Hard Constraints verletzt werden. Aus regelungstechnischen Gründen ist die Anzahl der Modulationsstufen einer Anlage stets endlich; als exemplarisches BHKW sei das ecopower von PowerPlus Technologies genannt, das im leistungsmodulierenden Betrieb über maximal 13 unterschiedliche Modulationsstufen verfügt [PK08a].

Neben den „harten“, also unbedingt einzuhaltenden Nebenbedingungen (Hard Constraints bzw. Restriktionen) kann es in der Einsatzplanung - analog zu anderen Planungs- bzw. Optimierungsproblemen - auch „weiche“ Nebenbedingungen geben:

Definition 4.10 (Präferenzen)

$SC = \{sc_1, \dots, sc_s\}$ ist eine endliche Menge von **Präferenzen** bzw. **Soft Constraints**. Die Ausprägung von SC ist dabei abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall.

Im Gegensatz zu Restriktionen stellen Präferenzen also Nebenbedingungen dar, die nicht exakt eingehalten werden müssen, sondern innerhalb gewisser Grenzen verletzt werden können. Typische Präferenzen sind - der eigentlichen Zielfunktion untergeordnete - betriebswirtschaftliche Ziele wie etwa möglichst geringe Wartungskosten durch eine gleichmäßige Auslastung aller Ressourcen. Ob eine Nebenbedingung als Restriktion oder Präferenz eingeordnet wird, kann dabei von Anwendungsfall zu Anwendungsfall unterschiedlich sein. Analog zur Diskussion der Restriktionen stellen die im Folgenden aufgelisteten Präferenzen wiederum nur eine generische Grundlage dar, die anwendungsfallabhängig erweitert werden kann.

Konsistenzgruppe SC_1 : Betriebswirtschaftliche Präferenzen

- sc_1 : Möglichst hohe Auslastung einer Ressource
- sc_2 : Möglichst gleichmäßige Auslastung einer Ressource
- sc_3 : Möglichst wenige Ein- bzw. Ausschaltvorgänge bzgl. einer Ressource
- sc_4 : Möglichst genaue Deckung des lokalen thermischen oder elektrischen Bedarfs

Im Gegensatz zu Restriktionen können Präferenzen, die sich auf unterschiedliche Eigenschaften von dezentralen Anlagen oder betriebswirtschaftlichen Anforderungen an die Einsatzplanung beziehen, im Allgemeinen durch Funktionen mit heterogenen Wertebereichen ausgedrückt sein. Zur Einbeziehung von Präferenzen in sogenannte Constraint Satisfaction Probleme (kurz: CSP) - d.h. der Problemstellung, für eine Menge

miteinander durch Constraints in Beziehung stehende Variablen eine Belegung zu finden, die alle diese Bedingungen erfüllt - wurden daher unter anderem Ansätze aus der Wahrscheinlichkeitstheorie [Sch92] und der Fuzzy-Logik [DFP93, ASS97] vorgeschlagen, die eine einheitliche Formalisierung von Präferenzen vorsehen. Alternativ können Präferenzen auch auf Kostenfunktionen - in der Regel analog zur allgemeinen Zielfunktion eines Optimierungsproblems - abgebildet werden [FW92]. Im Rahmen dieser Arbeit wird in Anlehnung an [DFP93] ein vereinfachtes Verständnis von Präferenzen verwendet, das insbesondere eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Nebenbedingungen hinsichtlich deren Erfüllungsgrad ermöglicht:

Definition 4.11 (Erfüllungsfunktion bzgl. Soft Constraints)

Für eine Ressource $r \in R$ mit einem Fahrplan $s_r \in S$ drückt die **Erfüllungsfunktion** $v_{sc} : S \rightarrow [0, 1]$ den Erfüllungsgrad von s_r bezüglich einer Präferenz $sc \in SC_r$ aus. Dabei ist $SC_r \subseteq SC$ die Menge aller bezüglich r definierten Präferenzen.

Hinsichtlich eines Fahrplans s_r einer Ressource r ergeben sich damit folgende Interpretationen des Erfüllungsgrads:

- $v_{sc}(s_r) = 0$ entspricht einer Verletzung der Präferenz $sc \in SC_r$,
- $v_{sc}(s_r) = 1$ entspricht einer vollständigen Erfüllung der Präferenz $sc \in SC_r$, und
- $v_{sc}(s_r) \in (0, 1)$ entspricht einer teilweisen Erfüllung der Präferenz $sc \in SC_r$.

Die folgenden Definitionen setzen die Nebenbedingungen in Zusammenhang mit den Fahr- bzw. Einsatzplänen:

Definition 4.12 (Zulässigkeit eines Fahrplans)

Ein Fahrplan $s_r \in S$ einer Ressource $r \in R$ heißt **zulässig** (engl.: *feasible*) genau dann, wenn $\forall hc \in HC_r : v_{hc}(s_r) = 1$ gilt, d.h falls alle Restriktionen $hc \in HC_r$ erfüllt sind. Dabei ist $HC_r \subseteq HC$ die Menge aller bezüglich r definierten Restriktionen der Konsistenzgruppen HC_1 und HC_2 , und $S_f \subseteq S$ ist die Menge aller zulässigen Fahrpläne.

Zu bemerken ist, dass ein zulässiger Fahrplan auf den entsprechend eingeplanten Ressourcen physisch ausgeführt werden kann, da insbesondere keine Verletzungen technischer Rahmenbedingungen vorliegen. Für Einsatzpläne gilt folgender Zusammenhang:

Definition 4.13 (Zulässigkeit eines Einsatzplans)

Ein Einsatzplan $os \in OS$ heißt **zulässig** (engl.: *feasible*) genau dann, wenn allen Ressourcen $r \in R$ ein zulässiger Fahrplan $s_r \in S_f$ zugeordnet wird. $OS_f \subseteq OS$ ist die Menge aller zulässigen Einsatzpläne.

Auf dem Verständnis der Zulässigkeit aufbauend ist der Konsistenzbegriff für Fahrpläne wie folgt definiert:

Definition 4.14 (Konsistenz eines Fahrplans)

Ein zulässiger Fahrplan $s \in S_f$ heißt **konsistent** (engl.: consistent) genau dann, wenn $\forall sc \in SC_r : v_{sc}(s_r) = 1$ gilt, d.h. falls alle Präferenzen $sc \in SC_r$ vollständig erfüllt sind. Dabei ist $SC_r \subseteq SC$ die Menge aller bezüglich r definierten Präferenzen der Konsistenzgruppe SC_1 , und $S_c \subseteq S_f$ ist die Menge aller konsistenten Fahrpläne.

Entsprechend obiger Definition seien im Weiteren Fahrpläne, die eine oder mehrere Präferenzen nur teilweise erfüllen, als teilweise konsistent bezeichnet. Analog zu Definition 4.13 ist die Konsistenz eines Einsatzplans zu verstehen:

Definition 4.15 (Konsistenz eines Einsatzplans)

Ein zulässiger Einsatzplan $os \in OS_f$ heißt **konsistent** (engl.: consistent) genau dann, wenn alle Ressourcen $r \in R$ ein konsistenter Fahrplan $s_r \in S_c$ zugeordnet wird. $OS_c \subseteq OS_f$ ist die Menge aller konsistenten Einsatzpläne.

Aufgrund der anhand der Beispiele 2.1 - 2.3 auf Seiten 20 - 21 illustrierten Flexibilität des Einsatzes von VK ist neben den Constraints auch die Zielfunktion der Einsatzplanung anwendungsfallabhängig.

Definition 4.16 (Zielfunktion)

Eine Funktion $t_f : OS \rightarrow \mathbb{R}$ mit $t_f(os) = v_{os}$ heißt **Zielfunktion** (engl.: target function) und ordnet einem Einsatzplan $os \in OS$ einen Wert $v_{os} \in \mathbb{R}$ zu. O.B.d.A. steht dabei ein größerer Wert für eine bessere Planqualität.

Typischerweise stehen hinsichtlich der Zielfunktionen die Maximierung³ betriebswirtschaftlicher Kennzahlen (z.B. der an einer Strombörse wie der EEX erzielte Erlös) im Vordergrund. Es ist aber genauso vorstellbar, etwa den CO₂-Ausstoß durch geschickte Nutzung erneuerbarer Energiequellen oder netzbezogene Größen wie die Spitzenlast zu minimieren. Zudem lassen sich durch Gewichtungen auch unterschiedliche Ziele zu einer gemeinsamen Zielfunktion zusammenfassen.

Definition 4.17 (Optimalität)

Ein konsistenter Einsatzplan $os_{opt} \in OS_c$ heißt **optimal** bezüglich einer Zielfunktion t_f genau dann, wenn gilt: $t_f(os) \leq t_f(os_{opt})$ für alle $os \in OS_c$.

³ Man beachte: Für eine Funktion $f : D_x \rightarrow \mathbb{R}$ mit Definitionsbereich D_x gilt $\max f(x) = -\min -f(x)$.

Damit lässt sich zunächst die prädiktive Einsatzplanung in VK definieren:

Definition 4.18 (Prädiktives Einsatzplanungsproblem)

Das *prädiktive Einsatzplanungsproblem* oder *Tageseinsatzplanungsproblem* (engl.: *day-ahead scheduling problem*) in VK ist gegeben durch das 5-Tupel $DASP = (R, T, t_f, HC, SC)$. Es besteht darin, einen Einsatzplan für die Ressourcen $r \in R$ und den Planungshorizont T zu finden, der bzgl. der Nebenbedingungen in HC und SC konsistent ist und die Zielfunktion t_f maximiert.

Aufgabe der prädiktiven Einsatzplanung ist also, für das in Definition 4.18 gegebene Problem eine Lösung in Form eines optimalen - d.h. insbesondere konsistenten - Einsatzplanes zu finden. Der Lösungsraum umfasst dabei prinzipiell alle kombinatorisch erzeugbaren Einsatzpläne und kann in der Regel nicht vollständig durchsucht werden [Win09]. Für ein konkretes Einsatzplanungsproblem ist die Größe des Lösungsraum abhängig vom Planungszeitraum T , von der Anzahl der einplanbaren Ressourcen R und von deren technisch realisierbaren Leistungs- bzw. Modulationsstufen M_r . Allgemein lässt sich die Lösungsraumgröße mit $O(|T| \cdot \prod_{r \in R} |M_r|)$ nach oben abschätzen.

Ausgehend von den bisher erarbeiteten Begrifflichkeiten wird im Weiteren ein formales Verständnis der reaktiven Einsatzplanung in VK erarbeitet. Zuvor stellt Abbildung 4.2 nochmals die wichtigsten der bisher betrachteten Definitionen zusammenfassend dar und verdeutlicht die wesentlichen Zusammenhänge und Abhängigkeiten.

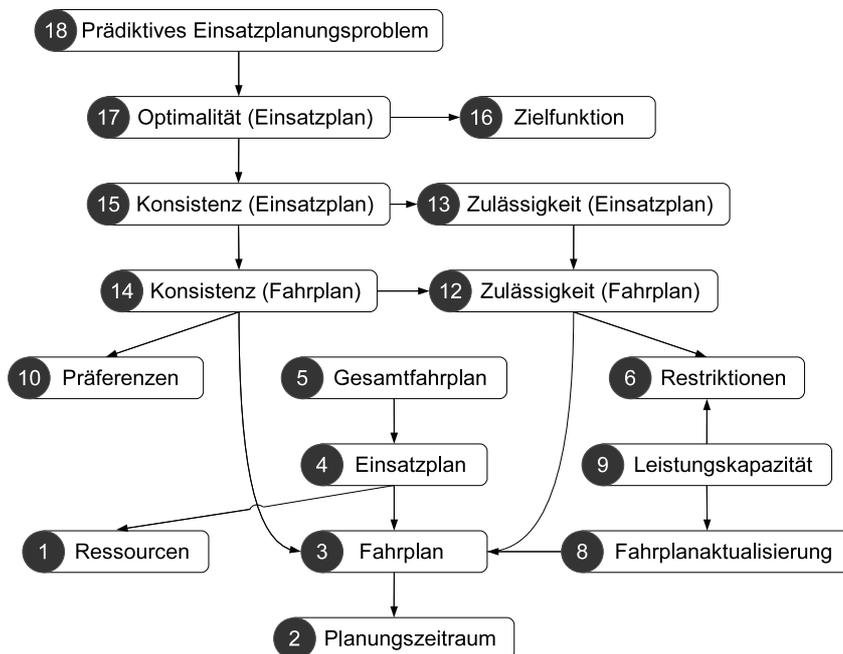


Abbildung 4.2: Vereinfachte Übersicht der Definitionen 4.1 bis 4.18.

Die reaktive Einsatzplanung fällt nach der Einordnung in Abbildung 2.12 in den Bereich der Betriebsführung und baut damit auf einem durch die Tageseinsatzplanung bereitgestellten initialen Einsatzplan auf. Der Diskussion aus Abschnitt 2.2.2 folgend kann man sagen, dass die reaktive Planung der Anpassung eines initialen Plans an eine dynamische Planungsumgebung dient. Der Begriff Dynamik bezieht sich dabei auf die Eigenschaft einer Planungsumgebung, durch Ereignisse auf die Konsistenz eines Plans einzuwirken. Die folgenden Definitionen dienen der Klärung dieser zentralen Begriffe.

Definition 4.19 (Ereignis)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$ und eine Ressource $r \in R$ ist das 3-Tupel

$$e := (t, r, \delta^{(e)})$$

ein bezüglich r ressourcenlokales **Ereignis** zum Zeitpunkt t mit der Auswirkung $\delta^{(e)}$. $E_{(t,r)}$ ist die Menge aller ressourcenlokalen Ereignisse zum Zeitpunkt t .

Die Zuordnung eines Ereignisses zu einem eindeutigen Planungszeitpunkt hat folgenden Hintergrund: Im laufenden Betrieb eines VK kann ein Ereignis e prinzipiell zu einem beliebigen Zeitpunkt t_e der Realzeit auftreten. Aufgrund des bereits hinsichtlich Definition 4.2 diskutierten Intervallcharakters des Planungszeitraums fällt das Ereignis in ein eindeutig durch einen Planungszeitpunkt $t_i \in T$ festgelegtes Teilintervall $[t_i, t_{i+1})$ und wirkt sich damit - wie im Folgenden noch vertieft diskutiert wird - auf die Erfüllung des Fahrplaneintrags $s_r(t_i)$ einer Ressource $r \in R$ aus (siehe Abbildung 4.3). Eine erfolgreiche Behandlung eines Ereignisses setzt dann eine Reaktion innerhalb der Zeitspanne $\Delta_t := [t_e, t_{i+1})$, d.h. vor Erreichen des nächsten Planungszeitpunktes, voraus.

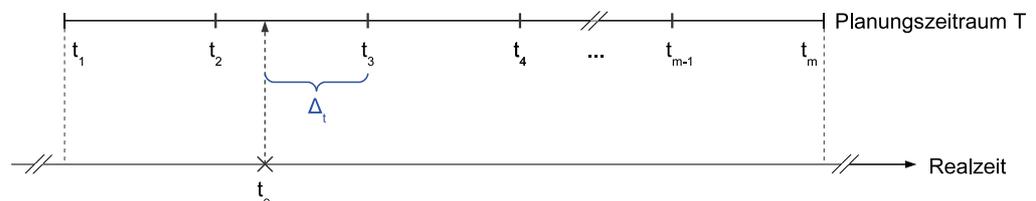


Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen Ereignissen und Planungszeitpunkten.

Für einen beliebigen Zeitpunkt $t \in T$ der Ausführungszeit liegt damit eine (möglicherweise leere) Menge von Ereignissen bzgl. unterschiedlicher Ressourcen vor:

Definition 4.20 (Ereignismenge)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$ ist die **Menge aller Ereignisse** zum Zeitpunkt t definiert als

$$E_{(t)} := \bigcup_{r \in R} E_{(t,r)}$$

Ereignisse können sich sowohl auf die Menge der zustandsabhängigen Restriktionen HC_2 als auch direkt auf den Fahrplan $s_r \in S$ einer dezentralen Anlage $r \in R$ auswirken und repräsentieren dadurch einerseits Abweichungen von den Annahmen und Prognosen der Tageseinsatzplanung und andererseits nachträgliche Eingriffe des Betreibers eines VK in den initialen Einsatzplan. Letztere basieren notwendigerweise auf einem Abbild des Systemzustands des VK zu einem Zeitpunkt $t_e < t$, das nicht mit dem Systemzustand zum Zeitpunkt t , d.h. dem Zeitpunkt des Inkrafttretens der Einsatzplanänderung, übereinstimmen muss. Beim Auftreten eines Ereignisses ist es also stets notwendig, den Fahrplan der Ressource hinsichtlich Konsistenz zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen:

Definition 4.21 (Ereignisintegration)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$, eine Ressource $r \in R$ mit einem Fahrplan $s_r \in S$ und eine Ereignismenge $E_{(t,r)}$ besteht die **Integration der Ereignisse** $e \in E_{(t,r)}$ darin, den Fahrplan s_r in einen neuen, konsistenten Fahrplan $\bar{s}_r \in S_c$ zu überführen.

Der durch die Ereignisintegration entstehende Fahrplan \bar{s}_r einer Ressource $r \in R$ reflektiert das im laufenden Betrieb von der Ressource gezeigte Verhalten:

Definition 4.22 (Teilweise realisierter Fahrplan)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$ und eine Ressource $r \in R$ mit einem Fahrplan $s_r \in S$ ist \bar{s}_r definiert durch:

$$\bar{s}_r(t_i) := s_r(t_i) + \delta_{s_r}(t_i) \text{ für alle } t_i \in T.$$

Dann heißt \bar{s}_r **Realisierung** oder **teilweise realisierter Fahrplan** von s_r zum Zeitpunkt t mit $\delta_{s_r}(t_i) \in \mathbb{Q}$.

Die Integration von Ereignissen führt nach diesem Verständnis zu einer Abweichung des umgesetzten Fahrplans \bar{s}_r - d.h. der tatsächlich erbrachten Leistung - vom vorgesehenen Fahrplan s_r einer Ressource $r \in R$:

Definition 4.23 (Fahrplanabweichung)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$, eine Ressource $r \in R$ mit einem Fahrplan $s_r \in S$ und dem zum Zeitpunkt t teilweise realisierten Fahrplan \bar{s}_r heißt

$$\delta_{s_r}(t) = \bar{s}_r(t) - s_r(t)$$

die **Fahrplanabweichung zum Zeitpunkt t** .

Ein teilweise realisierter Fahrplan spiegelt damit drei unterschiedliche Aspekte wider:

- Eine Historie des in der Vergangenheit realisierten Verhaltens, das durch Ereignisse um den Betrag $\delta_{s_r}(t_i)$, $t_i < t$ vom geplanten Verhalten abgewichen ist,
- den zum aktuellen Zeitpunkt t der Ausführungszeit durch Ereignisintegration generierte konsistente Fahrplan, der um $\delta_{s_r}(t)$ vom ursprünglichen Fahrplan abweicht,
- das in Zukunft zu erwartende Verhalten der Ressource, das voraussichtlich um den Betrag $\delta_{s_r}(t_i)$, $t_i > t$ vom geplanten Verhalten abweichen wird.

Im Sinne der Kapazitätsbündelung dezentraler Energiesysteme nach dem Verständnis von Definition 1 können sich individuelle Fahrplanabweichungen auf der Ebene des VK ausgleichen. Hinsichtlich der Integration von VK in ein übergeordnetes Bilanzkreismanagement ist daher die Abweichung vom Gesamtfahrplan maßgeblich für einen bilanztechnisch zuverlässigen Betrieb:

Definition 4.24 (Gesamtfahrplanabweichung)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$ und eine Menge von Ressourcen R ist die **Gesamtfahrplanabweichung zum Zeitpunkt t** definiert als

$$\delta_{\hat{s}_{os}}(t) := \sum_{r \in R} \delta_{s_r}(t) = \sum_{r \in R} \bar{s}_r(t) - s_r(t).$$

Analog zur Realisierung von Fahrplänen lässt sich die teilweise Realisierung von Einsatzplänen definieren:

Definition 4.25 (Teilweise realisierter Einsatzplan)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$ und einen Einsatzplan $os \in OS$ sei \bar{os} definiert durch

$$\bar{os}(r) := \bar{s}_r \text{ für alle } r \in R,$$

wobei \bar{s}_r der teilweise realisierte Fahrplan der Ressource r zum Zeitpunkt t ist. \bar{os} heißt **Realisierung** oder **teilweise realisierter Einsatzplan** von os zum Zeitpunkt t .

Teilweise realisierte Einsatzpläne ordnen also den Ressourcen eines VK jeweils den aktuellen und gegebenenfalls durch Ereignisse wie z.B. Anlagenausfälle beeinflussten teilweise realisierten Fahrplan zu. Damit lässt sich analog zu Definition 4.23 und unter Berücksichtigung von Definition 4.24 folgendes festhalten:

Definition 4.26 (Einsatzplanabweichung)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$ und einen Einsatzplan $os \in OS$ ist die **Einsatzplanabweichung zum Zeitpunkt t** definiert als

$$\delta_{os}(t) := \delta_{\hat{s}_{os}}(t) = \sum_{r \in R} \bar{s}_r(t) - s_r(t).$$

Ereignisbedingte Abweichungen vom initial durch die Tageseinsatzplanung erstellten Einsatzplan basieren damit auf dem Gesamtfahrplan eines VK und wirken sich in der Regel negativ auf die Güte der Koordination der dezentralen Anlagen bezogen auf die Zielfunktion t_f aus. Insofern sie nicht durch reaktive Maßnahmen durch ein VK selbst ausgeglichen werden, ziehen sie eine Inanspruchnahme von - vorrangig konventionell bereitgestellter - Regelleistung nach sich. Für die Bewertung der Wirksamkeit der reaktiven Einsatzplanung in VK ist daher eine Betrachtung dieser Abweichungen über den gesamten Planungszeitraum hinweg sinnvoll:

Definition 4.27 (Mittlere Einsatzplanabweichung)

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$, einen Einsatzplan $os \in OS$ und den zum Zeitpunkt t teilweise realisierten Einsatzplan \overline{os} von os ist die **mittlere Abweichung der Realisierung vom Einsatzplan** definiert als

$$\Delta_{(os, \overline{os})} := \sqrt{\frac{1}{|T|} \cdot \sum_{t \in T} \delta_{os}(t)^2} = \sqrt{\frac{1}{|T|} \cdot \sum_{t \in T} \left(\sum_{r \in R} \overline{s}_r(t) - s_r(t) \right)^2}$$

Durch die Verwendung der mittleren quadratischen Abweichung (engl.: *rooted mean square error*, kurz: RMSE) werden einzelne große Abweichungen stärker bestraft als mehrere kleine, da sie aufgrund ihrer stärkeren Auswirkung auf das Energiegesamtsystem ungünstiger sind [Bra03]. Zudem ist $\Delta_{(os, \overline{os})}$ umso größer (schlechter), je mehr die tatsächlich durch ein VK summarisch erbrachte Leistung von den Vorgaben des Gesamtfahrplans abweicht. Insgesamt stellt die mittlere Einsatzplanabweichung aufgrund dieser Eigenschaften eine geeignete Metrik für die Bewertung einer zuverlässigen Koordination dezentraler Anlagen dar; alternativ sind aber auch andere Metriken wie beispielsweise die 1- bzw. 2-Norm des normierten Raums $\mathbb{R}^{|T|}$ denkbar. Damit stehen alle notwendigen Definitionen und Begrifflichkeiten zur Verfügung, um das für diese Arbeit zentrale reaktive Einsatzplanungsproblem in VK zu definieren:

Definition 4.28 (Reaktives Einsatzplanungsproblem)

Das **reaktive Einsatzplanungsproblem** (engl.: *reactive scheduling problem*) in VK ist gegeben durch das 5-Tupel $RSP = (t, \overline{os}, E_t, HC, SC)$. Es besteht zum Zeitpunkt $t \in T$ darin, die Ereignisse $e \in E_t$ so in den teilweise realisierten Einsatzplan \overline{os} zu integrieren, dass ein bezüglich HC und SC konsistenter Einsatzplan gefunden wird, der die mittlere Einsatzplanabweichung $\Delta_{(os, \overline{os})}$ minimiert.

Die Integration der Ereignisse $e \in E_t$ in den teilweise realisierten Einsatzplan \overline{os} erfordert gemäß Definition 4.21 eine geeignete Anpassung von Fahrplänen einzelner Ressourcen unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen in HC und SC . In diesem Sinne wird ein Einsatzplan $\overline{os} \in OS$ durch die Verarbeitung eines Ereignisses $e \in E_t$ in einen neuen und bezüglich der durch das Ereignis betroffenen Ressource konsistenten

Einsatzplan $\overline{os}_{(e)}$ überführt. Das reaktive Einsatzplanungsproblem RSP fordert dabei zusätzlich, dass aus der Integration aller Ereignisse $e \in E_t$ ein Einsatzplan $\overline{os}_{\langle e_1, \dots, e_{|E_t|} \rangle}$ resultiert, der $\Delta_{(os, \overline{os})}$ minimiert. Dieses Optimum kann in der Regel nur durch eine vollständige Suche über den Lösungsraum gefunden werden, der durch die möglichen Belegungen der Ressourcenfahrpläne aufgespannt wird. Für VK mit einer großen Anlagenzahl kann eine solche Suche sehr zeitintensiv sein und steht damit in einem Spannungsverhältnis insbesondere zu der in Abschnitt 2.2.2 identifizierten Anforderung A_1 , d.h. der Forderung nach einer schnellen Reaktion auf Ereignisse. Wie bereits anhand der in Abschnitt 3.3 vorgestellten aktiven Ablaufplanung und dem in Abschnitt 3.1.3 erfolgten Abgleich der Anforderungen A_1 bis A_5 mit unterschiedlichen Koordinationsverfahren diskutiert wurde, sind Multiagentensysteme (kurz: MAS) in besonderem Maße für die Beherrschung inhärent verteilter und dynamischer Systeme wie VK geeignet. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird daher ein multiagentenbasierter Ansatz zur Lösung des reaktiven Einsatzplanungsproblems RSP entwickelt und diskutiert. Zuvor sei aber noch eine Metrik für die Dynamik des Planungsumfelds der dezentralen Energieversorgung eingeführt.

Definition 4.29 (Zeitpunktabhängige Dynamik)

Die **zeitpunktabhängige Dynamik** eines reaktiven Einsatzplanungsproblems RSP zum Zeitpunkt $t \in T$ ist definiert als

$$\dot{\varphi}_{RSP}(t) := |E_{(t)}|.$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Dynamik durch die Häufigkeit von Ereignissen gekennzeichnet, auf die reagiert werden muss. Neben der gezielten Betrachtung einzelner Planungszeitpunkte ist auch die Berücksichtigung des gesamten Planungszeitraums sinnvoll:

Definition 4.30 (Integrierte Ereignismenge)

Für einen Planungszeitraum T ist die über T **integrierte Menge aller Ereignisse** definiert als

$$E := \bigcup_{t \in T} E_{(t)} = \bigcup_{t \in T} \bigcup_{r \in R} E_{(t,r)}.$$

Damit lassen sich Aussagen bezüglich einer über den Ausführungs- bzw. Planungszeitraum integrierten Dynamik eines Planungsumfeldes treffen:

Definition 4.31 (Integrierte Dynamik)

Für einen Planungszeitraum T ist die über T **integrierte Dynamik** eines reaktiven Einsatzplanungsproblems definiert als

$$\varphi_{RSP} := |E|.$$

Abschließend stellt Abbildung 4.4 die wichtigsten Begrifflichkeiten und Zusammenhänge der in diesem Abschnitt erarbeiteten Formalisierung der reaktiven Einsatzplan dar.

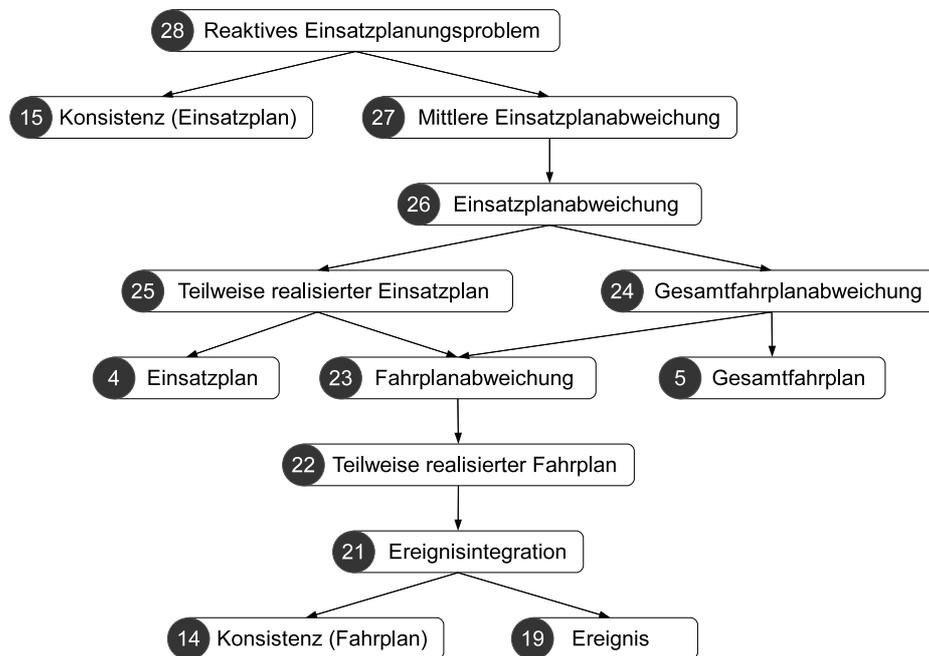


Abbildung 4.4: Vereinfachte Übersicht der Definitionen 4.19 bis 4.28.

4.2 Problemzerlegung durch Konsistenzgrade

Das Finden einer optimalen Lösung des im letzten Abschnitt formal definierten reaktiven Einsatzplanungsproblems RSP ist nur schwer mit den in Abschnitt 2.2.2 identifizierten Anforderungen A_1 bis A_5 an eine reaktiv agierende Komponente in VK in Einklang zu bringen⁴. Für eine verwandte Problemstellung im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung bietet die in Abschnitt 3.3 diskutierte aktive Ablaufplanung einen Lösungsansatz im Sinne eines Anytime-Algorithmus, der einerseits in der Lage ist, schnell auf unerwartete Ereignisse und Veränderungen im Produktionsumfeld zu reagieren, und der andererseits durch geeignete Verbesserungsmaßnahmen die Planqualität auch langfristig auf einem hohen Niveau halten kann. Das in [Hen98] eingeführte und in Abschnitt 3.3.2 zusammenfassend vorgestellte Konsistenzverständnis stellt dabei eine grundlegende Voraussetzung für die Umsetzung dieses Lösungsansatzes dar. Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 3.3.5 diskutierten domänenspezifischen Unterschiede zwischen industrieller Fertigung und dezentraler Energieversorgung ist es jedoch nicht möglich, die Konzepte Henselers unmittelbar auf die reaktive Einsatzplanung in VK zu übertragen.

⁴ Im Allgemeinen kann eine optimale Lösung nur durch eine vollständige Suche über den Lösungsraum ermittelt werden, die in der Regel aufgrund der Lösungsraumgröße nicht praktikabel ist.

Stattdessen wird das Konsistenzverständnis der aktiven Ablaufplanung im Folgenden dazu genutzt, das reaktive Einsatzplanungsproblem in aufeinander aufbauende Teilaufgaben zu zerlegen, deren Abarbeitung schließlich einen - gegebenenfalls teilweise - konsistenten, wenngleich nicht notwendigerweise optimalen Einsatzplan generiert. Aus den so identifizierten Teilproblemen lässt sich im Anschluss ein Entscheidungsprozess ableiten, der auf ein MAS abgebildet werden kann.

Nach [Hen98] ist ein Ablaufplan konsistenzfähig, wenn ausschließlich Konsistenzverletzungen bezüglich der Überschneidungsfreiheit von Operationen oder der Vorrangrelation vorliegen. Im Kern bedeutet dies, dass maschinenlokale Maßnahmen ausreichen, um einen konsistenzfähigen Ablaufplan in die (bezüglich einer Maschine definierte) lokale Zulässigkeit zu überführen. Die folgenden Definitionen spiegeln dies für die Einsatzplanung wider:

Definition 4.32 (Konsistenzfähigkeit)

Ein Einsatzplan $os \in OS$ heißt **konsistenzfähig** bezüglich einer Ressource $r \in R$ genau dann, wenn sämtliche hinsichtlich r definierten zeitinvarianten Restriktionen $HC_1^{(r)} \subseteq C_1$ erfüllt sind.

Ein konsistenzfähiger Einsatzplan weist möglicherweise noch Inkonsistenzen bezüglich der zustandsabhängigen Restriktionen der Ressourcen eines VK auf. Nach Beheben dieser lokalen Inkonsistenzen ist ein Einsatzplan lokal zulässig:

Definition 4.33 (Lokale Zulässigkeit)

Ein bezüglich einer Ressource $r \in R$ konsistenzfähiger Einsatzplan $os \in OS$ heißt **lokal zulässig** bezüglich r genau dann, wenn sämtliche hinsichtlich r definierten zustandsabhängigen Restriktionen $HC_2^{(r)} \subseteq C_2$ erfüllt sind.

Die Erfüllung lokaler Nebenbedingungen wie die Einhaltung der Maximal- oder Minimalleistung einer Ressource $r \in R$ oder die Berücksichtigung des aktuellen Ladezustands eines Energiespeichers kann durch einfache Anpassungen des betroffenen Fahrplans $s_r \in S$ garantiert werden. Die sich dadurch ergebenden Auswirkungen auf den Gesamtfahrplan müssen dann im Sinne der Minimierung der Einsatzplanabweichungen⁵ an das Gesamtsystem kommuniziert werden. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass ein Einsatzplan nach den Definitionen 4.32 und 4.33 für einen Zeitpunkt $t \in T$ bezüglich einiger Ressourcen bereits lokal zulässig sein kann, während er bezüglich anderer Ressourcen lediglich konsistenzfähig ist. Diese Gleichzeitigkeit ressourcenlokal unterschiedlicher Zustände spiegelt die individuellen, insbesondere gebäudeabhängigen Einsatzbedingungen dezentraler Anlagen wider und ist ein stützendes Argument für den Einsatz verteilter autonomer Einheiten zur Überwachung und Steuerung.

Schließlich sei noch die lokale Optimalität eines Einsatzplanes definiert:

⁵ Siehe dazu Definition 4.28.

Definition 4.34 (Lokale Optimalität)

Ein bezüglich einer Ressource $r \in R$ lokal zulässiger Einsatzplan $os \in OS$ heißt **lokal optimal** bezüglich r genau dann, wenn sämtliche hinsichtlich r definierten Präferenzen $SC^{(r)} \subseteq SC_1$ vollständig erfüllt sind.

Auf der Grundlage dieses Konsistenzverständnisses und unter Berücksichtigung des in Definition 4.28 festgehaltenen Ziels einer ressourcenübergreifenden Minimierung der mittleren Einsatzplanabweichung $\Delta_{(os, \bar{os})}$ lässt sich das reaktive Einsatzplanungsproblem RSP hinsichtlich der Ereignisintegration nach Definition 4.19 und Definition 4.21 in folgende Teilprobleme zerlegen:

Kürzel	Teilproblem	Akteure
Konsistenzfähigkeit		
T_1	Anpassung der Realisierung \bar{s}_r an die zeitinvarianten Restriktionen $hc_i^{(r)} \in HC_1^{(r)}$	$r \in R$
Lokale Zulässigkeit		
T_2	Anpassung der Realisierung \bar{s}_r an die zustandsabhängigen Restriktionen $hc_j^{(r)} \in HC_2^{(r)}$	$r \in R$
Lokale Optimalität		
T_3	Verbesserung der Realisierung \bar{s}_r bzgl. der betriebswirtschaftlichen Präferenzen $sc_k^{(r)} \in SC_1^{(r)}$	$r \in R$
Globale Optimalität		
T_4	Minimierung der mittleren Einsatzplanabweichung $\Delta_{(os, \bar{os})}$ durch Anpassung der Fahrpläne geeigneter Alternativressourcen	$r, r_{i_1}, \dots, r_{i_n} \in R$

Tabelle 4.1: Teilprobleme zur Verarbeitung eines Ereignisses.

4.3 Das Konzept der aktiven Einsatzplanung

Das Lösen der Teilprobleme T_1 bis T_4 durch Generierung eines konsistenten bzw. optimalen Einsatzplanes umfasst im Sinne von Abbildung 4.5 sowohl reaktive als auch deliberative Planungsanteile: Für eine Verarbeitung eines Ereignisses $e = (t, r, \delta^{(r)})$ muss der teilweise realisierte Fahrplan \bar{s}_r einer Ressource $r \in R$ zunächst in einen lokal zulässigen Zustand überführt werden, damit möglichst zeitnah ein anlagentechnisch ausführbarer Plan vorliegt. Dazu wird \bar{s}_r im Rahmen der *lokalen Reaktion* (1) bezüglich der Einhaltung der zeitinvarianten und zustandsabhängigen Restriktionen überprüft und gegebenenfalls so korrigiert, dass die Abweichung von der ursprünglichen Leistungsvorgabe minimal ausfällt. Damit sind die Teilprobleme T_1 und T_2 gelöst. Um darüber hinaus die Auswirkungen auf die Performanz und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems innerhalb eines energiewirtschaftlich effektiven Zeitrahmens (Anforderung A_1) zu mini-

mieren, muss die resultierende Fahrplanabweichung δ_{sr} im Rahmen der *globalen Reaktion* (2) durch anlagenübergreifende Fahrplananpassungen kompensiert werden. Damit liegt zu einem Zeitpunkt $t + t_0$ ein angepasster Einsatzplan \overline{os}' vor, der sowohl technisch ausführbar ist als auch hinsichtlich der Auswirkungen auf die Einsatzplanabweichung $\Delta_{(os, \overline{os})}$ minimiert wurde. Die zur Lösung von T_4 notwendige Zeitspanne t_0 hängt dabei insbesondere von der Gestaltung der globalen Reaktion ab. In Abhängigkeit von den anwendungsfallspezifischen zeitlichen Anforderungen an die reaktive Einsatzplanung in VK kann eine nachfolgende Verbesserung der gefundenen Lösung \overline{os}' hinsichtlich der durch die Soft Constraints definierten *Fahrplanqualität* (3) sinnvoll sein. Mittels einer deliberativen, d.h. vorausschauenden Planung können hierzu Fahrplanalternativen entwickelt, bewertet und hinsichtlich der Einhaltung des initialen Einsatzplanes mit anderen Ressourcen abgestimmt werden, was letztlich zu hinsichtlich T_3 verfeinerten Einsatzplänen führt. Im Sinne eines Anytime-Algorithmus ist dabei festzuhalten, dass die deliberative Planung innerhalb gewisser zeitlicher Schranken unterbrechbar sein sollte, um die Reaktion auf weitere Ereignisse zu ermöglichen.

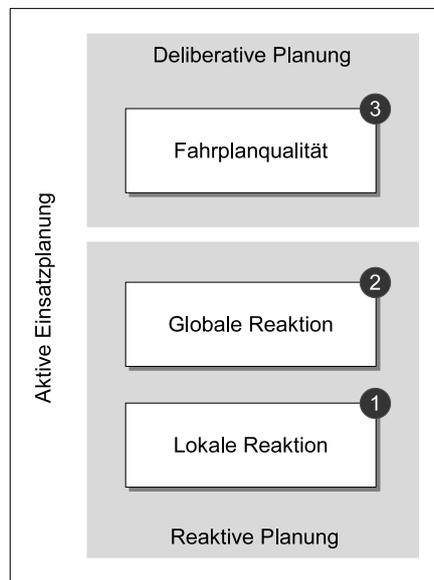


Abbildung 4.5: Das Konzept der aktiven Einsatzplanung.

Die Generierung eines konsistenten bzw. optimalen Einsatzplanes im Sinne der aufgezeigten aktiven Einsatzplanung erfordert es, Entscheidungen bezüglich der Belegung der Variablen des Optimierungsproblems RSP - d.h. der jeweiligen Fahrplaneinträge - zu treffen. Der mögliche Entscheidungsraum hängt dabei insbesondere vom Typ der dezentralen Anlagen, den anlagenlokalen technischen Gegebenheiten hinsichtlich der Integration in die Energieversorgung und den jeweils aktuellen Anlagenzuständen ab. Darüberhinaus beeinflusst die Anpassung eines Fahrplans durch die Auswirkungen auf die mittlere Einsatzplanabweichung den weiteren, hinsichtlich anderer Ressourcen möglicherweise noch nicht abgeschlossenen Entscheidungsprozess. Es stellt sich nun insbe-

sondere auch hinsichtlich der Anforderungen A_1 bis A_5 die Frage, wer - im Sinne eines Kontrollsystems - diese Entscheidungen trifft und - im Sinne eines Entscheidungsprozesses - welche Abhängigkeiten zwischen den Fahrplänen unterschiedlicher Ressourcen dabei auch hinsichtlich der langfristigen Fahrplanqualität zu beachten sind. Bevor hierauf eine Antwort gegeben werden kann, soll zunächst einmal der im Kontext eines VK zu steuernde Energiewandlungsprozess genauer untersucht werden.

Auf konzeptueller Ebene hinsichtlich der Betriebsführung eines VK steht die Überwachung und Steuerung von Energieflüssen im Vordergrund. In diesem Sinne wandelt ein dezentraler Erzeuger wie etwa eine KWK-Anlage einen Input - den Energieinhalt eines Primärenergieträgers - in einen Output - thermische und elektrische Energie - um, der weiteren Anlagen wiederum als Input dient.

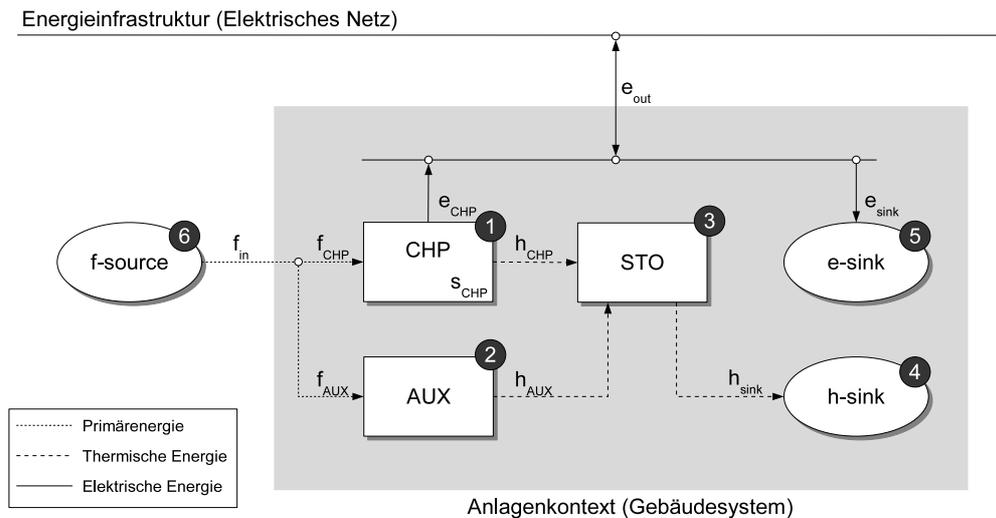


Abbildung 4.6: Energieflüsse und kontextbedingte Abhängigkeiten in der dezentralen Energieversorgung (in Anlehnung an [DHL⁺08]).

Abbildung 4.6 stellt die Energieflüsse für den Fall eines in die Hausenergieversorgung integrierten BHKW exemplarisch dar. Die KWK-Anlage *CHP* (1) bezieht Primärenergie aus einer Brennstoffquelle⁶ (6) und wandelt diese in thermische Energie, die im Wasserspeicher *STO* (3) zwischengespeichert wird, und Elektroenergie um. Letztere kann entweder den hauseigenen Bedarf - repräsentiert durch die Senke *e-sink* (5) - decken oder im Falle eines Überschusses in das elektrische Netz eingespeist werden. Der Wärmebedarf des Gebäudes - repräsentiert durch die Senke *h-sink* (4) - wird aus dem thermischen Speicher *STO* (3) bedient, der bei Bedarf durch ein Zusatzheizgerät⁷ *AUX* (2) auf Temperatur gehalten werden kann. Im Rahmen eines VK werden die abgebildeten Energieflüsse insbesondere durch den Fahrplan s_{CHP} der KWK-Anlage beeinflusst, dessen Gestaltung maßgeblich durch den thermischen Bedarf, den thermischen Speicher und die Möglichkeiten des Zusatzheizgeräts beschränkt wird. Bei einer Anpassung von

⁶ Engl. *fuel source*, abgekürzt *f-source*.

⁷ Engl. *auxiliary burner*.

s_{CHP} im Sinne der reaktiven Einsatzplanung müssen die dargestellten funktionalen Abhängigkeiten, die im Weiteren als der individuelle Anlagenkontext bezeichnet werden sollen, berücksichtigt werden.

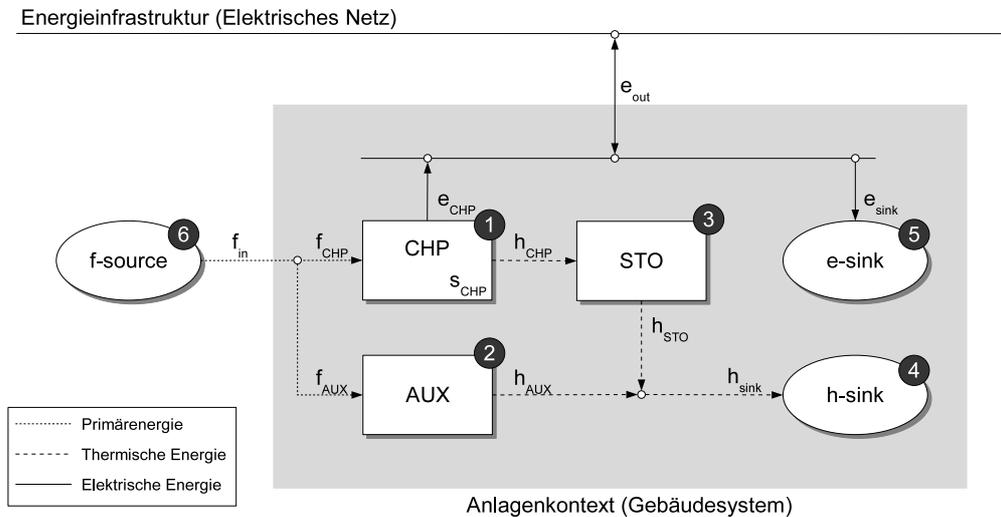


Abbildung 4.7: Alternativer Anlagenkontext durch variierte Integration eines BHKW in die Hausenergieversorgung.

Für den allgemeinen Fall eines VK mit einem heterogenen Anlagenpool ist zu beachten, dass sich der Anlagenkontext aufgrund verschiedener Integrations- bzw. Anschlusskonzepte auch hinsichtlich technisch baugleicher Anlagen unterscheiden kann. Der wesentliche Unterschied des in Abbildung 4.7 dargestellten Anlagenkontextes zu dem bisher betrachteten liegt in der variierten Integration des aus BHKW (1) und thermischem Speicher (3) bestehenden KWK-Systems in die Hausenergieversorgung. Das Zusatzheizgerät *AUX* (2) speist hier nicht mehr den thermischen Speicher, sondern kann direkt zur (teilweisen) Deckung des thermischen Bedarfs (4) genutzt werden. Damit ist alleine das BHKW für die Temperaturhaltung des Speichers verantwortlich, wodurch aus Sicht des Betriebs eines VK weniger Freiheitsgrade hinsichtlich der Einsatzplanung bestehen.

Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen stellt Abbildung 4.8 ein exemplarisches VK dar, dass sich aus einem Elektroenergiespeicher *e-STO* (1), einem konventionellen, verbrennungsmotorbasierten BHKW *CHP* (2), einer Brennstoffzelle *FC* (3) und einer PV-Anlage *PV* (4) zusammensetzt. Input des VK im Sinne eines Produktionssystems sind die Primärenergieträger Erdgas $f\text{-source}_{\text{CHP}}$ (5), Wasserstoff $f\text{-source}_{\text{FC}}$ (6) und solare Einstrahlung $f\text{-source}_{\text{PV}}$ (7). Output des Produktionsprozesses ist die insgesamt für jeden Planungszeitpunkt $t \in T$ durch die Anlagenfahrpläne $s_{e\text{-STO}}$, s_{CHP} , s_{FC} und s_{PV} festgelegte und von den Anlagen des VK bereitgestellte elektrische Energie

$$e_{\text{VK}} = e_{e\text{-STO}} + e_{\text{CHP}} + e_{\text{FC}} + e_{\text{PV}}.$$

Der individuelle Anlagenkontext ist dabei der Übersicht halber vereinfacht als farbliche

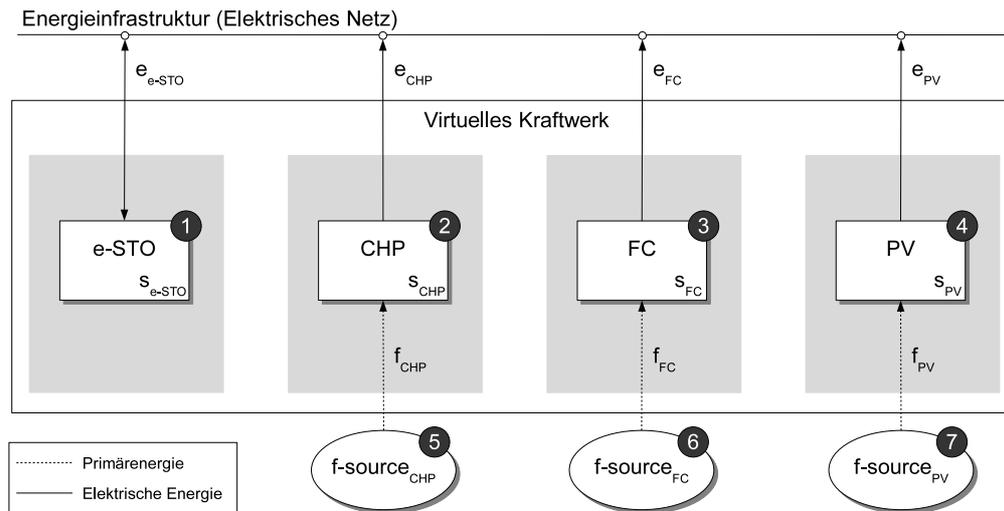


Abbildung 4.8: Konzeptuelles Modell eines VK als Produktionssystem mit Primärenergie als Input und elektrischer Energie als Output.

Hervorhebung dargestellt. Hinsichtlich der reaktiven Einsatzplanung in diesem System ist Folgendes festzuhalten:

- Die Ressourcen eines VK sind in einem individuellen Anlagenkontext angesiedelt, der einen Einfluss auf den Entscheidungsraum bzgl. der Fahrplananpassungen ausübt und in Form anlagenspezifischer Hard Constraints in *RSP* erfasst sind.
- Der ressourcenbezogene Entscheidungsraum wird insbesondere durch die aktuellen Systemzustände der dezentralen Anlagen und der Peripheriekomponenten des Anlagenkontextes (thermischer Speicher, Verbraucher etc.) eingeschränkt.
- Aufgrund der Anforderungen A_1 , A_2 und A_3 muss ein Kontrollsystem für die reaktive Koordination dezentraler Anlagen in der Lage sein, zeitlich parallel bzw. kurz aufeinanderfolgend auftretende Ereignisse innerhalb einer energiewirtschaftlich geeigneten Zeitspanne verarbeiten zu können. Dazu muss insbesondere der jeweilige Systemzustand und Anlagenkontext bekannt sein.
- Die für die Erreichung der lokalen Zulässigkeit notwendigen Fahrplananpassungen können ressourcenlokal, d.h. ohne Kenntnis des Zustands anderer Ressourcen erfolgen. Abhängigkeiten zu anderen Anlagen bestehen erst auf der Ebene der globalen bzw. lokalen Planverbesserung.

4.4 Das Multiagentensystem der aktiven Einsatzplanung

Auf der Grundlage dieser Überlegung werden im Folgenden Ressourcenagenten als eine zentrale Komponente einer verteilten reaktiven Einsatzplanung in VK eingeführt.

4.4.1 Ressourcenagenten

Ein Ressourcenagent dient - wie in Abbildung 4.9 dargestellt - der Überwachung und Steuerung einer einzelnen Ressource eines VK. Informationstechnisch lässt sich ein solcher Agent als Erweiterung der ohnehin vorhandenen Anlagenregelung auffassen und bei geeigneter Implementierung in Form eines eingebetteten Systems - etwa analog zu der in [WNA⁺09] diskutierten kommunikationstechnischen Erweiterung eines BHKW auf Basis eines Field Programmable Gate Arrays - umsetzen. Daraus ergeben sich zwei wesentliche Vorteile gegenüber nicht-verteilten Steuerungsansätzen: Zunächst entfällt eine aufwändige Kommunikation im Rahmen der Zustandsdatenerfassung, da die notwendigen Informationen bereits lokal vorliegen. Desweiteren ist ein derart verteiltes System in der Lage, zeitlich parallel auftretende, aber unterschiedliche Ressourcen betreffende Ereignisse in ebenfalls paralleler Weise zu verarbeiten, so dass die Zeitspanne vom Auftreten eines Ereignisses bis zur Erreichung der lokalen Zulässigkeit - und damit der Sicherstellung der physischen Ausführbarkeit eines Fahrplans einer Ressource - lediglich durch die technischen Parameter des eingebetteten Systems beschränkt wird.

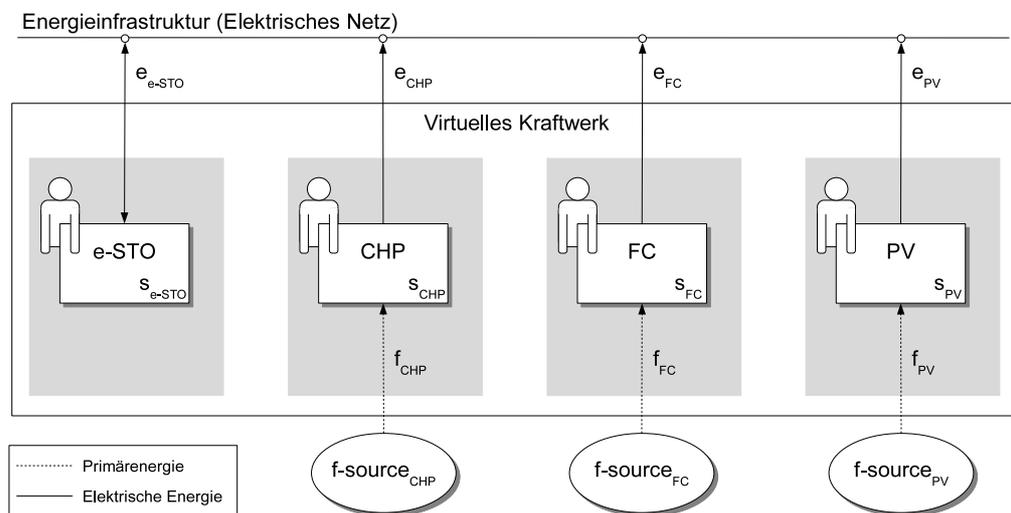


Abbildung 4.9: Konzeptuelles Modell eines VK, dessen dezentrale Anlagen durch Ressourcenagenten überwacht und gesteuert werden.

Aus Sicht eines zuverlässigen Betriebs eines VK muss ein Ressourcenagent zusätzlich zu dem rein reaktiven Verhalten in der Lage sein, einen Beitrag im Sinne des globalen Ziels der aktiven Einsatzplanung - der Minimierung der mittleren Einsatzplanabweichung - zu leisten. Dazu ist eine agentenübergreifende Kooperation notwendig, um lokale Fahrplanabweichung kommunizieren und Ausgleichskapazitäten von geeigneten Alternativressourcen erwerben zu können. In Abschnitt 4.4.3 wird ein Interaktionsprozess vorgestellt, das ein solches koordiniertes Verhalten ermöglicht. Festzuhalten ist an dieser Stelle, dass die Entscheidung, ob eine Anlage einen Beitrag zur Kompensation leistet und wie hoch dieser ausfällt, durch den entsprechenden Ressourcenagenten auf der Grundlage des aktuellen Systemzustands und unter Berücksichtigung der lokalen

Zielstellungen gefällt werden kann. Zuletzt muss ein Ressourcenagent auch einen Beitrag zur Fahrplanqualität hinsichtlich der ressourcenspezifischen Soft Constraints leisten. Eine wesentliche Aufgabe ist dabei die Berücksichtigung der Robustheit eines Fahrplans (Anforderung A₅), die sich auch im Sinne eines „ruhigen“⁸ Anlagenbetriebs niederschlägt.

Auf der Grundlage dieser Überlegungen wird ein Ressourcenagent im Sinne einer hybriden Agentenarchitektur [Woo09a] in die in Abbildung 4.10 dargestellten Entscheidungsmodulen unterteilt. Diese Komponenten kapseln sowohl die für die Lösung der Teilprobleme T₁ bis T₄ notwendigen Fähigkeiten als auch das planungsrelevante Wissen eines Ressourcenagenten und ähneln konzeptionell den Kontrollschichten von InteRRaP [Mül97] bzw. der 3T-Architektur [BFG⁺97]. Allerdings stellen die Entscheidungsmodulen keine strikte Kontrollhierarchie dar, sondern sind als miteinander interagierende Softwarekomponenten eines Ressourcenagenten zu verstehen, die auf die Bearbeitung eines bestimmten Teilaspekts der aktiven Einsatzplanung spezialisiert sind.

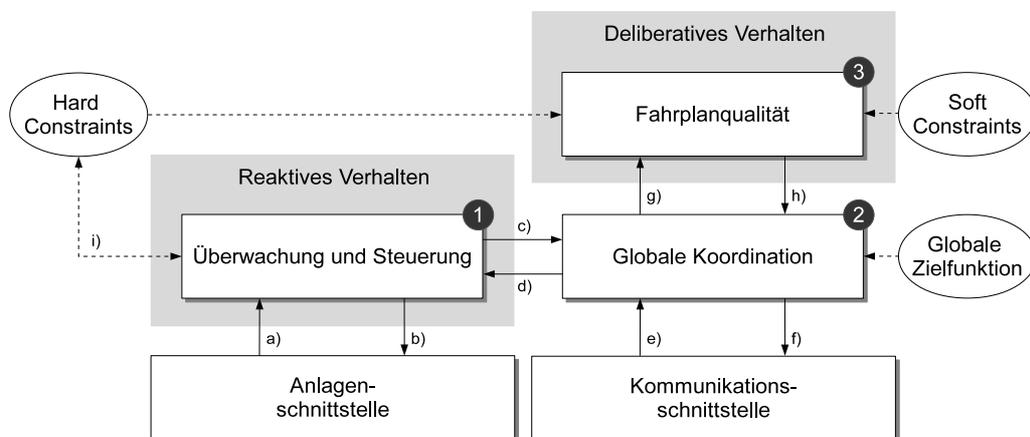


Abbildung 4.10: Interner Aufbau und Zusammenwirken der einzelnen Entscheidungsmodulen eines Ressourcenagenten.

Das Modul *Überwachung und Steuerung* (1) repräsentiert die reaktiven Fähigkeiten eines Ressourcenagenten. Über die *Anlagenschnittstelle* werden a) aktuelle Zustandsdaten des überwachten DER empfangen und ausgewertet, wodurch i) die Wissensbasis hinsichtlich der zustandsabhängigen Hard Constraints aktualisiert wird. Im Falle eines vorliegenden Ereignisses stellt das Modul unmittelbar die lokale Zulässigkeit hinsichtlich der ressourcenspezifischen Restriktionen wieder her und b) übermittelt einen entsprechend angepassten Fahrplan wiederum über die *Anlagenschnittstelle* an das Energiesystem. Die sich aus dieser Anpassung ergebende Fahrplanabweichung wird c) an das Modul *Globale Koordination* (2) übermittelt, welches daraufhin f) anhand des in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Interaktionsprozesses und unter Verwendung der *Kommunikationschnittstelle* mit anderen Ressourcenagenten um Ausgleichskapazitäten verhandelt. Dar-

⁸ Eine Metrik zur Bewertung der Laufruhe eines Anlagenfahrplans findet sich im Rahmen der Evaluation in Kapitel 6.

über hinaus nimmt es im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen e) auch Anfragen externer Agenten entgegen und leistet so einen Beitrag zur Minimierung der globalen Zielfunktion der reaktiven Einsatzplanung. Bei eingehenden Anfragen wird d) zunächst hinsichtlich des aktuellen Systemzustands geprüft, ob eine Kapazitätsbereitstellung prinzipiell möglich ist, bevor g) unter Einbeziehung des Moduls *Fahrplanqualität* (3) über deren tatsächliche Höhe entschieden wird. Dabei ist insbesondere der Erfüllungsgrad der Soft Constraints zu beachten, um etwa eine zu große Unruhe im Anlagenbetrieb zu vermeiden.

In Abschnitt 4.4.4 wird die Möglichkeit diskutiert, den Entscheidungsfindungsprozess an dieser Stelle durch unterschiedliche Gewichtungen der globalen bzw. lokalen Zielsetzung zu steuern. Neben der Bewertung von Anfragen ermöglicht es das Modul *Fahrplanqualität* daher insbesondere, die langfristige Qualität des Fahrplans hinsichtlich der ressourcenspezifischen Präferenzen aufrechtzuerhalten und realisiert damit das deliberative Verhalten eines Ressourcenagenten. Dazu kann es unter Berücksichtigung der Restriktionen Verbesserungsvorschläge in Form von Fahrplananpassungen generieren, wobei h) die potenziell resultierenden Abweichungen an das Modul *Globale Koordination* gesendet und mittels der bereits erwähnten Kapazitätsverhandlungen auf Kompensierbarkeit geprüft werden. Im Falle der Umsetzbarkeit einer Fahrplanverbesserung - d.h. insbesondere dann, wenn sich die Gesamtbewertung eines Einsatzplanes dadurch nicht verschlechtert - wird der angepasste Fahrplan an das Modul *Überwachung und Steuerung* übermittelt und über die Anlagenschnittstelle an das dezentrale Energiesystem gesendet.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Ressourcenagenten die in Abbildung 4.5 dargestellte aktive Einsatzplanung mittels der beschriebenen hybriden Architektur in paralleler Weise auf einzelne dezentrale Anlagen abbilden. Die zur Koordination des verteilten Systems notwendigen Verhandlungen zwischen verschiedenen Ressourcenagenten werden dabei mittels des Austauschs von ACL-Nachrichten [Fou03b] über eine der FIPA Abstract Architecture Specification [Fou03a] entsprechenden Kommunikationsschnittstelle realisiert und in Abschnitt 4.4.3 genauer definiert. Hinsichtlich der Anlagenschnittstelle sei vor dem Hintergrund des möglicherweise sehr heterogenen Anlagenpool eines VK noch angemerkt, dass es der von der International Electrotechnical Commission (kurz: IEC) verabschiedete internationale Standard IEC 61850 ermöglicht, dezentrale Energiesysteme unterschiedlicher Hersteller auf standardkonforme Art und Weise kommunikationstechnisch anzubinden [KTS⁺07, WNA⁺09]. Durch Verwendung der von Uslar diskutierten semantischen Abbildung des Datenmodells aus IEC 61850 auf die energiespezifische Domänenontologie CIM [Us110] ist darüber hinaus auch ein semantisch eindeutiger Nachrichtenaustausch zwischen den Agenten möglich.

4.4.2 Auftragagenten

Eine effiziente Gestaltung der im Rahmen der reaktiven Planung anfallenden Kapazitätsverhandlungen spielt eine zentrale Rolle für die Realisierung einer zeitnahen Reaktion

auf Ereignisse und hat damit auch einen entscheidenden Einfluss auf die (zeitlichen) Möglichkeiten der deliberativen Planung. Dabei sind zunächst zwei Dinge zu bemerken: Erstens hängt der kommunikative Aufwand zur Realisierung der reaktiven Einsatzplanung stark von der Anzahl der Kommunikationspartner und der Dynamik des Gesamtsystems im Sinne der Definitionen 4.29 und 4.31 ab⁹. Zweitens kapselt das Entscheidungsmodul *Globale Koordination* sämtliche zur Kommunikation mit anderen Agenten notwendigen Funktionalitäten und verbindet dadurch sowohl das reaktive als auch das deliberative Verhalten eines Ressourcenagenten. Damit hängt die für eine zeitnahe Reaktion auf Ereignisse maßgebliche Dauer der Verhandlungen wesentlich von der Leistungsfähigkeit dieses Moduls ab, das nicht nur eigene Anfragen an andere Agenten initiieren, sondern auch externe Anfragen mit möglichst geringer Verzögerung beantworten muss. Eine Möglichkeit, an dieser Stelle die softwaretechnische Komplexität zu verringern, ist die Aufteilung der Kompetenzen bezüglich der globalen Koordination in mehrere Teilmodule, die unabhängig voneinander eigene Verhandlungen und externe Kapazitätsanfragen getrennt behandeln. Dabei muss dann allerdings ein zusätzliches Steuerungsmodul auf ein konsistentes Verhalten des Ressourcenagenten achten und gegebenenfalls anhand von Kontrollregeln - vergleichbar zum Ansatz der TouringMachines [Fer92] - entscheiden, welches der Teilmodule auf den Anlagenfahrplan einwirken darf. Um diesen Overhead zu vermeiden, wird hier eine andere Lösung vorgeschlagen: die Einführung eines spezialisierten Agententyps, der von Ressourcenagenten zur Durchführung bestimmter Kapazitätsverhandlungen beauftragt werden kann. Zunächst sei ein Auftrag wie folgt definiert:

Definition 4.35 (Auftrag)

Ein durch das 7-Tupel $o = (id, t_d, p_o, t_o, \bar{p}_o, u(o), \alpha_o)$ charakterisierter **Auftrag** (engl.: *order*) setzt sich zusammen aus einem Bezeichner id für den Auftraggeber, einer Deadline $t_d \in T$, einer Zielvorgabe $p_o \in \mathbb{R}$ im Sinne einer benötigten Leistung, einem Planungszeitpunkt $t_o \in T$, an dem die benötigte Leistung geliefert werden soll, einer bereits erworbenen Leistungskapazität $\bar{p}_o \in \mathbb{Q}$, einem erhofften lokalen Nutzen $u(o) \in \mathbb{R}$ und einer Priorität $\alpha_o \in \mathbb{R}$. O sei dann die Menge aller Aufträge, und $O_{id} \subseteq O$ die Menge aller Aufträge mit Auftraggeber id .

Ein Auftrag repräsentiert damit die Aufgabe, für einen Auftraggeber - im Rahmen dieser Arbeit stets ein Ressourcenagent - bis zu einer festgesetzten Deadline t_d und für einen spezifizierten Bereitstellungszeitpunkt t_o mit $t_d \leq t_o$ eine bestimmte Kapazität p_o an elektrischer Leistung zu erwerben. Die Priorität α_o repräsentiert dabei die „Wichtigkeit“ eines Auftrags und hat einen Einfluss auf die Reihenfolge, in der Aufträge bearbeitet werden¹⁰. Der erhoffte Nutzen $u(o)$ basiert auf der möglichen Kompensation der lokal vorliegenden Fahrplanabweichung oder der möglichen Verbesserung des Fahrplans des Auftraggebers hinsichtlich der Soft Constraints. Inwieweit der bei Auftragerstellung erhoffte Nutzen realisiert werden kann, hängt insbesondere vom Erfüllungsgrad eines

⁹ Siehe dazu auch die Diskussion in Abschnitt 4.5.

¹⁰ Siehe dazu die Diskussion der Entscheidungsfindung in Abschnitt 4.4.4.

Auftrags nach dessen Bearbeitung ab:

Definition 4.36 (Erfüllungsgrad eines Auftrags)

Für einen nichttrivialen Auftrag $o \in O$ mit $p_o \neq 0$ ist der **Erfüllungsgrad eines Auftrags** definiert durch

$$\kappa(o) := \frac{\bar{p}_o}{p_o}.$$

Auftrag o ist dann **exakt erfüllt**, wenn $\kappa(o) = 1$, **übererfüllt**, falls $\kappa(o) > 1$, und **untererfüllt**, falls $\kappa(o) < 1$. Desweiteren wird ein Auftrag als **teilweise erfüllt** bezeichnet, wenn $\kappa(o) \neq 0$ gilt.

Eine exakte Erfüllung eines Auftrags in einem VK mit sehr unterschiedlichen DER ist insbesondere aufgrund der gegebenenfalls nur eingeschränkt verfügbaren Leistungskapazitäten der Anlagen gemäß Definition 4.9 nicht immer möglich. Für den stabilen Betrieb des Energieversorgungssystems ist dies allerdings unproblematisch, da übergeordnete Reservekapazitäten in Form konventioneller Kraftwerke in Anspruch genommen werden können [HDS07, WLH⁺07].

Nach Abschluss der Bearbeitung eines Auftrags kann der Anlagenfahrplan des auftraggebenden Ressourcenagenten aktualisiert werden:

Definition 4.37 (Fahrplanaktualisierung durch Aufträge)

Für einen Fahrplan s_r einer Ressource $r \in R$ und einen teilweise erfüllten Auftrag $o \in O_{id,r}$ ist die **Aktualisierung des Fahrplans s_r vermöge des Auftrags o** definiert durch

$$s_r \oplus o := s_r \oplus (t_o, \bar{p}_o).$$

Analog zu Definition 4.8 entspricht eine Fahrplanaktualisierung in obigem Sinne einer Anpassung des Fahrplaneintrags $s_r(t)$ um die durch den Auftrag o erworbene Leistungskapazität \bar{p}_o . Der lokale Nutzen $u(o)$ eines Auftrags o hängt dann von den beobachtbaren Auswirkungen der Aktualisierung eines Fahrplans s_r ab:

Definition 4.38 (Nutzen bzgl. Fahrplanabweichungen)

Durch die Aktualisierung des Fahrplans s_r einer Ressource $r \in R$ vermöge eines Auftrags $o \in O_{id,r}$ ergibt sich der wie folgt definierte **lokale Nutzen bezüglich der Fahrplanabweichungen**:

$$u_\delta(o) := 1 - \frac{\|\delta_{(s_r \oplus o)}\|}{\|\delta_{s_r}\|}.$$

Dabei ist δ_{s_r} der über T definierte Vektor der Fahrplanabweichungen **vor**, und $\delta_{(s_r \oplus o)}$ entsprechend der Vektor der Fahrplanabweichungen **nach** der Aktualisierung des Fahrplans s_r .

Aus Definition 4.38 ergeben sich bezüglich des Nutzens folgende Zusammenhänge:

Kein Nutzen: $u_\delta(o) = 0$ genau dann, wenn $\|\delta_{(s_r \oplus o)}\| = \|\delta_{s_r}\|$, d.h. Auftrag o hat keine Auswirkungen auf die über den Planungszeitraum T hinweg betrachteten Fahrplanabweichungen.

Negativer Nutzen: $u_\delta(o) < 0$ genau dann, wenn $\|\delta_{(s_r \oplus o)}\| > \|\delta_{s_r}\|$, d.h. durch Auftrag o werden die Fahrplanabweichungen vergrößert.

Positiver Nutzen: $u_\delta(o) > 0$ genau dann, wenn $\|\delta_{(s_r \oplus o)}\| < \|\delta_{s_r}\|$, d.h. durch Auftrag o werden die Fahrplanabweichungen vermindert.

Maximaler Nutzen: $u_\delta(o) = 1$ genau dann, wenn $\|\delta_{(s_r \oplus o)}\| = 0$, d.h. durch Auftrag o werden die Fahrplanabweichungen auf Null reduziert.

$u_\delta(o)$ entspricht damit der prozentualen Verbesserung eines Anlagenfahrplans hinsichtlich der Fahrplanabweichungen und ist insgesamt umso größer (besser), je stärker die lokal vorliegenden Abweichungen vermindert werden. Dadurch wirkt sich eine Fahrplanaktualisierung vermöge eines Auftrags mit positivem Nutzen nach Definition 4.27 auch positiv auf die mittlere Einsatzplanabweichung aus. Durch die Verwendung einer relativen Nutzengröße ist es darüber hinaus möglich, die Auswirkungen einer Fahrplanaktualisierung hinsichtlich der Fahrplanabweichungen mit dem Einfluss auf den Erfüllungsgrad bezüglich der anlagenspezifischen Präferenzen in Bezug zu setzen:

Definition 4.39 (Nutzen bzgl. Präferenzen)

Durch die Aktualisierung des Fahrplans s_r einer Ressource $r \in R$ vermöge eines Auftrags $o \in O_{id_r}$ ergibt sich der wie folgt definierte **lokale Nutzen bezüglich der Präferenzen**:

$$u_{SC}(o) := \sum_{sc \in SC_r} \alpha_{sc} \cdot (v_{sc}(s_r \oplus o) - v_{sc}(s_r)).$$

Dabei ist $\alpha_{sc}, sc \in SC_r$ mit $\sum_{sc \in SC_r} \alpha_{sc} = 1$ eine anwendungsfallsspezifische Gewichtung des Erfüllungsgrads v_{sc} .

Mit diesen Voraussetzungen ergibt sich der lokale Nutzen $u(o)$ eines teilweise erfüllten Auftrags wie folgt:

Definition 4.40 (Lokaler Nutzen eines Auftrags)

Für eine Ressource $r \in R$ mit Fahrplan $s_r \in S$ ist der **lokale Nutzen** eines Auftrags $o \in O$ definiert durch

$$u(o) := \gamma_\delta \cdot u_\delta(o) + \gamma_{SC} \cdot u_{SC}(o).$$

Dabei sind γ_δ und γ_{SC} mit $\gamma_\delta + \gamma_{SC} = 1$ anwendungsfallsspezifische Gewichtungen.

Bei der Erstellung eines Auftrags o wird der erhoffte Nutzen auf Grundlage einer exakten Erfüllung von o abgeschätzt. Der in Abhängigkeit von $\kappa(o)$ tatsächlich realisierte Nutzen nach Bearbeitung von o kann davon natürlich abweichen, da einerseits o nicht immer exakt erfüllt werden kann¹¹ und sich andererseits während der Auftragsbearbeitung der Zustand eines DER - und damit die Bewertungsgrundlage des Nutzens - geändert haben kann.

Die Erfüllung eines Auftrags erfordert es, dass entsprechende Mengen elektrischer Leistung durch alternative dezentrale Energiewandlungsanlagen eines VK bereitgestellt werden. Aufgrund der anlagenspezifischen Betriebsmöglichkeiten der DER eines VK ist es nicht immer möglich, einen Auftrag exakt zu erfüllen. Insbesondere bei - bezogen auf die mittlere Anlagenleistung eines VK - kleinen Zielvorgaben kann es daher sinnvoll sein, mehrere Aufträge zusammenzufassen:

Definition 4.41 (Aggregation von Aufträgen)

Für zwei Aufträge $o_1, o_2 \in O_{id}$ mit $t_{o_1} = t_{o_2}$ sei die **Aggregation von Aufträgen** definiert durch

$$o_1 \oplus o_2 := (\min(t_{d_{o_1}}, t_{d_{o_2}}), id, p_{o_1} + p_{o_2}, t_{o_1}, \bar{p}_{o_1} + \bar{p}_{o_2}, u(o_1 \oplus o_2), \max(\alpha_{o_1}, \alpha_{o_2})).$$

Die Verknüpfung von Aufträgen ist nur dann erlaubt, wenn sie sowohl vom gleichen Auftraggeber stammen als auch den gleichen Lieferungszeitpunkt vorsehen. Ergebnis einer Verknüpfung ist ein neuer Auftrag mit kombinierter Zielvorgabe und erworbener Leistungskapazität, der bis zur früheren Deadline und mit der höheren Priorität erfüllt werden und den neu zu bestimmenden lokalen Nutzen des aggregierten Auftrags erbringen soll. In Abschnitt 4.4.4 wird dabei diskutiert, wie der tatsächlich realisierte Nutzen nicht exakt erfüllter aggregierter Aufträge auf die ursprünglichen Teilaufträge verteilt werden kann.

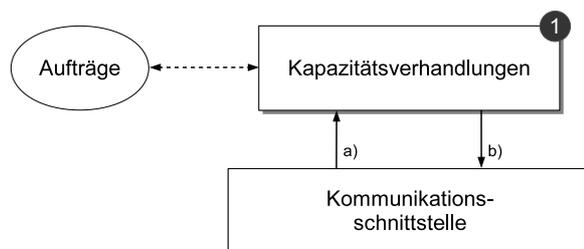


Abbildung 4.11: Interner Aufbau eines Auftragagenten.

Für die Realisierung und Koordination der zur Erfüllung von Aufträgen notwendigen, agentenübergreifenden Kapazitätsverhandlungen werden Auftragagenten als zweiter Agententyp der aktiven Einsatzplanung spezifiziert werden. Wie in Abbildung 4.11

¹¹ Siehe dazu die Diskussion der Entscheidungsfindung im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen in Abschnitt 4.4.4.

vereinfacht dargestellt, verwalten Auftragagenten dazu eine Liste von *Aufträgen* im Sinne der Definition 4.35 und sind mittels des Moduls *Kapazitätsverhandlungen* in der Lage, eigenständig Verhandlungen mit anderen Agenten zu führen. Dabei ist jedem Ressourcenagenten genau ein Auftragagent zugeordnet, der ihn hinsichtlich der Kapazitätsverhandlungen entlastet. Das prinzipielle Zusammenspiel von Ressourcen- und Auftragagent ist wie folgt gestaltet:

1. Ressourcenagenten können zu jedem Zeitpunkt einen Auftrag gemäß Definition 4.35 generieren und an den zugehörigen Auftragagenten senden. Die Ausgestaltung insbesondere der Deadline und der initialen Priorität obliegt dabei dem Ressourcenagenten und hängt davon ab, ob ein Auftrag als Folge einer Reaktion auf ein Ereignis oder im Rahmen lokaler Fahrplanverbesserungsmaßnahmen erzeugt wird.
2. Auftragagenten pflegen eine Liste der an sie gestellten Aufträge und versuchen, diese bestmöglich mittels der in Abschnitt 4.4.3 diskutierten Kapazitätsverhandlungen mit anderen Agenten zu erfüllen. Die Reihenfolge, in der Aufträge abgearbeitet werden, wird dabei maßgeblich durch die Deadlines bzw. Prioritäten gesteuert.
3. Wird die Zielvorgabe eines Auftrags erfüllt oder dessen Deadline erreicht, so meldet der Auftragagent den jeweiligen Status an den auftraggebenden Ressourcenagenten, der daraufhin den Fahrplan seines DER entsprechend anpassen kann.

Um den Aufwand zur Erfüllung von zur Laufzeit anfallenden Aufträgen zu minimieren, können einzelne Aufträge auch gemäß Definition 4.41 miteinander verknüpft werden. Die Entscheidung, ob Aufträge miteinander verknüpft oder separat behandelt werden sollen, obliegt dem Auftragagenten und wird in Abschnitt 4.4.4 vertiefend diskutiert.

4.4.3 Organisation und Koordination

Bislang wurden Ressourcen- und Auftragagenten als wesentliche Komponenten der aktiven Einsatzplanung in VK eingeführt. Dabei obliegt den Ressourcenagenten insbesondere die Überwachung und Steuerung der zugehörigen DER bzw. deren Fahrpläne, während die Auftragagenten die Funktionalität bereitstellen, Fahrplanänderungen in Form von Aufträgen nach Definition 4.35 agentenübergreifend zu koordinieren. Auf diesem Konzept aufbauend werden im Folgenden sowohl die Organisationsform des auf Ebene eines VK resultierenden MAS sowie die damit eng verknüpften Koordinationsmechanismen diskutiert.

Ausgehend von Abbildung 4.9 und der Diskussion der Agententypen im vorherigen Abschnitt ist zunächst festzuhalten, dass jede dezentrale Anlage eines VK im Sinne der aktiven Einsatzplanung durch je einen Ressourcen- und Auftragagenten repräsentiert wird. Eine geeignete Organisation bzw. Koordination dieser Agenten muss dabei folgenden Kriterien genügen:

Potenzialausnutzung: Globales Ziel der reaktiven Einsatzplanung in VK ist die zuverlässige Bereitstellung der durch die Tageseinsatzplanung festgelegten elektrischen Energie, d.h. die Minimierung der zur Laufzeit durch Ereignisse ausgelösten Abweichungen von einem initialen Einsatzplan. Organisationsform und Koordinationsmechanismen sollten deshalb darauf ausgelegt sein, das in Form von Leistungskapazitäten vorhandene Kompensationspotenzial bestmöglich auszuschöpfen.

Anytime-Algorithmus: Die Suche nach einer tatsächlich optimalen Lösung des reaktiven Einsatzplanungsproblems *RSP* steht in einem Spannungsverhältnis zu der geforderten Reaktionsfähigkeit des Systems (Anforderung A_1). Die Koordination des resultierenden MAS sollte es daher im Sinne eines Anytime-Algorithmus ermöglichen, schnell zu einer brauchbaren - und insbesondere auch anlagentechnisch ausführbaren - Lösung zu kommen, die bei ausreichend Zeit dann iterativ verbessert werden kann.

Kommunikationsaufwand: Ebenfalls aufgrund Anforderung A_1 sollte der für die Koordination von Fahrplanänderungen notwendige Kommunikationsaufwand auch bei einer großen Anzahl von DER beherrschbar bleiben. Da die Organisationsform eines MAS dabei einen wesentlichen Einfluss auf den anfallenden Kommunikationsaufwand hat [HL04], wird in Kapitel 5 ein adaptiver Ansatz zur Gestaltung holonischer Strukturen diskutiert, der auf eine Reduktion des Koordinationsoverhead - d.h. insbesondere der anfallenden Nachrichten - abzielt.

Autonomie: Aufgrund der möglichen Heterogenität des lokalen Anlagenkontextes der DER eines VK ist es nicht ohne weiteres möglich, Entscheidungskompetenzen zur Fahrplangestaltung an hierarchisch übergeordnete Planungskomponenten abzugeben. Zudem müsste eine übergeordnete Komponente kontinuierlich mit Zustandsdaten der untergeordneten Anlagen versorgt werden, was mit einem zusätzlichen Kommunikationsaufwand einher gehen würde. Eine geeignete Organisationsform sollte deshalb der notwendigen Autonomie insbesondere einzelner Ressourcenagenten Rechnung tragen.

Auf der Grundlage dieser Beobachtungen bzw. Anforderungen stellt Abbildung 4.12 die prinzipielle Organisation der Agenten der aktiven Einsatzplanung dar. Ressourcenagenten (kurz: RA) und Auftragagenten (kurz: OA) repräsentieren als duales System - im Weiteren mit R/OA abgekürzt - die in der Abbildung durch farbliche Hervorhebungen dargestellten DER eines VK. Dabei dient ein ausgezeichnete R/OA, der sogenannte *Head* (1), als zentraler Organisator der *Auftragskoordination* (3) sowie der *Kapazitätsverhandlungen* (4) mit den übrigen R/OA, die im Weiteren als *Body* (2) bezeichnet werden. Die dargestellte Struktur entspricht damit der eines in Abschnitt 2.3.3 eingeführten Holons, das zunächst das vollständige VK repräsentiert. Im Weiteren werden die Interaktionen der R/OA der Verständlichkeit halber anhand dieser statischen Struktur erläutert; eine Verfeinerung zu einer adaptiven holonischen Organisationsform wird in Kapitel 5 diskutiert. In Abgrenzung zu einer zentralen Steuerungskomponente sei zudem angemerkt, dass prinzipiell jeder R/OA als Head fungieren kann, da er - wie noch gezeigt werden wird - über keinerlei ressourcenlokale Information anderer Agenten verfügen

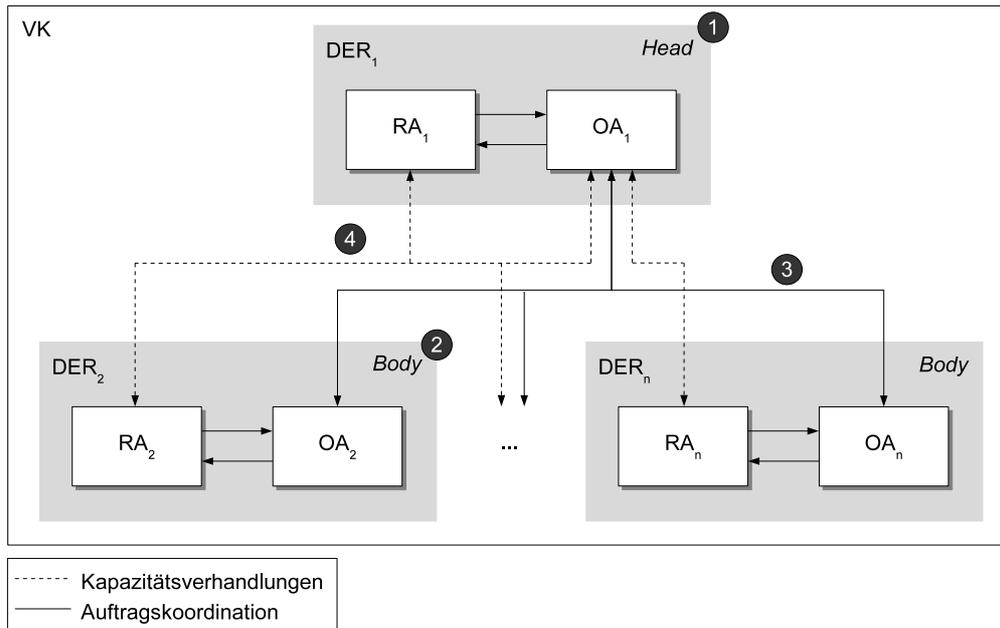


Abbildung 4.12: Prinzipielle Organisationsform des MAS der aktiven Einsatzplanung.

muss, um seiner Aufgabe gerecht zu werden. Damit kann bei einem Ausfall des entsprechenden R/OA z.B. mittels eines Wahlprotokolls [Woo09b] einer neuer Head bestimmt werden.

Die Interaktionen der Agenten der aktiven Einsatzplanung lassen sich in die aufeinander aufbauenden Konzepte der Auftragskoordination und der Kapazitätsverhandlungen unterteilen. Die Auftragskoordination umfasst dabei insbesondere das sogenannte Auftragsmatching, das es ermöglichen soll, vorzeichenverschiedene Fahrplanabweichungen, die sich hinsichtlich der Gesamtleistung eines VK physikalisch ausgleichen, zu erkennen und ohne zusätzliche - d.h. insbesondere auch im Sinne von Anforderung A₅ vermeidbare - Fahrplananpassungen zu behandeln. Wie Beispiel 4.2 illustriert, können dazu vorzeichenverschiedene Zielvorgaben von Aufträgen unterschiedlicher R/OA als gegenseitig bereitgestellte Leistungskapazität aufgefasst werden.

Beispiel 4.2: Vorzeichenverschiedene Zielvorgaben

Es seien $o_1, o_2 \in O$ zwei Aufträge mit unterschiedlichen Auftraggebern und betragsgleichen, aber vorzeichenverschiedenen Zielvorgaben, d.h. $id_{o_1} \neq id_{o_2}$ und $p_{o_1} + p_{o_2} = 0$. Dann können die Aufträge mittels der Zuweisungen $\bar{p}_{o_1} := -1 \cdot p_{o_2}$ und $\bar{p}_{o_2} := -1 \cdot p_{o_1}$ exakt erfüllt werden, ohne dass weitergehende Fahrplananpassungen notwendig sind.

Die in Abbildung 4.13 dargestellte Auftragskoordination ist damit wie folgt gestaltet: Zu einem beliebigen Planungszeitpunkt $t \in T$ kann ein Body-OA eine Anfrage (1) bzgl. der Bearbeitung eines Auftrags an den übergeordneten Head-OA stellen. Der

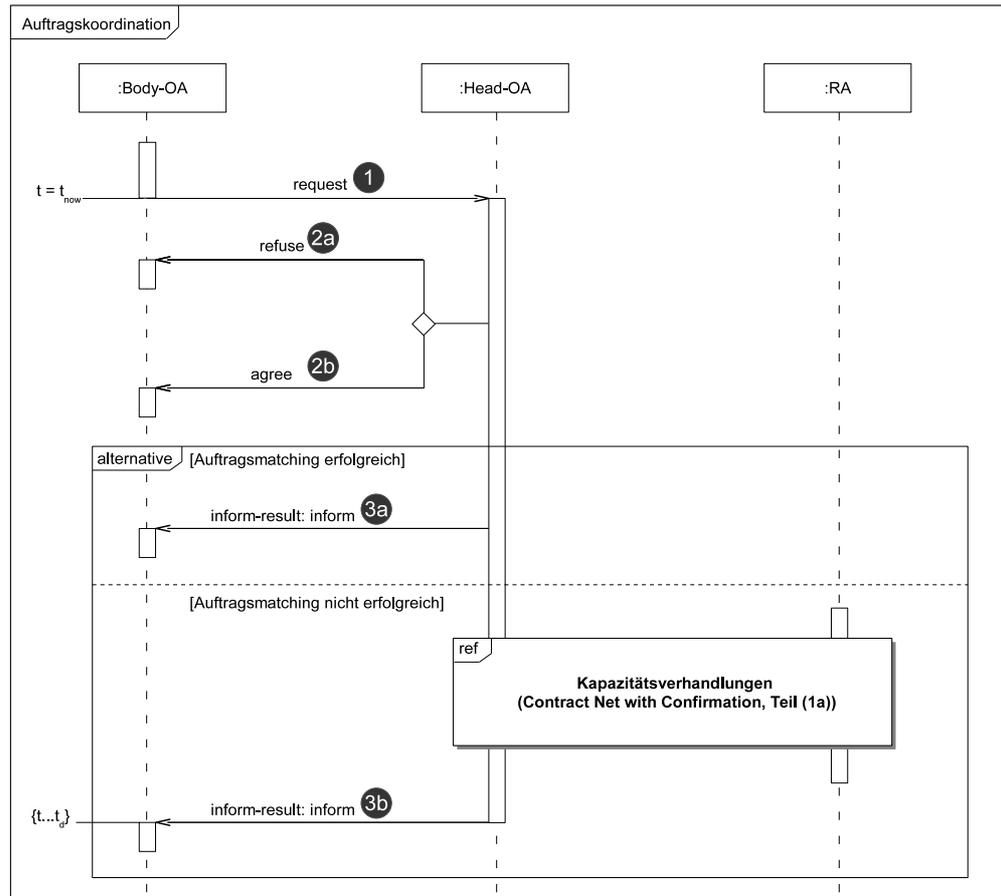


Abbildung 4.13: Die Interaktionen der Auftragskoordination.

Head-OA kann diese Anfrage annehmen (2b) oder - insofern er nicht mehr über ausreichend informationstechnische Kapazität bzw. Ressourcen verfügt - ablehnen (2a). Nach der Annahme eines Auftrags führt der Head-OA im Rahmen des Auftragsmatching einen Abgleich der Zielvorgaben aller bereits von anderen Body-OA übermittelten sowie eigenen Aufträge durch. Insofern sich dabei ein oder mehrere potenzielle Kombinationen von vorzeichenverschiedenen Zielvorgaben finden, werden die Aufträge in einer an das Merit-Order-Verfahren [CW02, Nab06] angelehnten Prozedur, die in Abschnitt 4.4.4 genauer erläutert wird, aufeinander abgebildet. Dadurch wird unter anderem sichergestellt, dass Aufträge mit großem Nutzen bevorzugt erfüllt werden, wodurch insbesondere die - lokal bekannte - Qualität des Einsatzplans eines VK maximiert wird. Anschließend werden die entsprechenden Body-OA über die Erfüllung ihrer Aufträge informiert (3a). Falls es nach dem Auftragsmatching noch ein oder mehrere Aufträge mit ganz oder teilweise unerfüllten Zielvorgaben gibt, führt der Head-OA Kapazitätsverhandlungen auf Basis des in Abbildung 4.14 dargestellten Contract Net with Confirmation Protocol (kurz: CNCP) - das eine Weiterentwicklung des in Abschnitt 3.2 diskutierten ECNP darstellt - mit allen verfügbaren RA durch. Die im Rahmen dieser Verhandlungen erworbenen

Leistungskapazitäten werden analog zum vorherigen Schritt nach einer Merit-Order-basierten Prozedur auf die bestehenden Aufträge verteilt. Danach - oder spätestens mit Erreichen der Deadline t_d eines Auftrags - werden die Body-OA über den Status ihrer Aufträge informiert (3b).

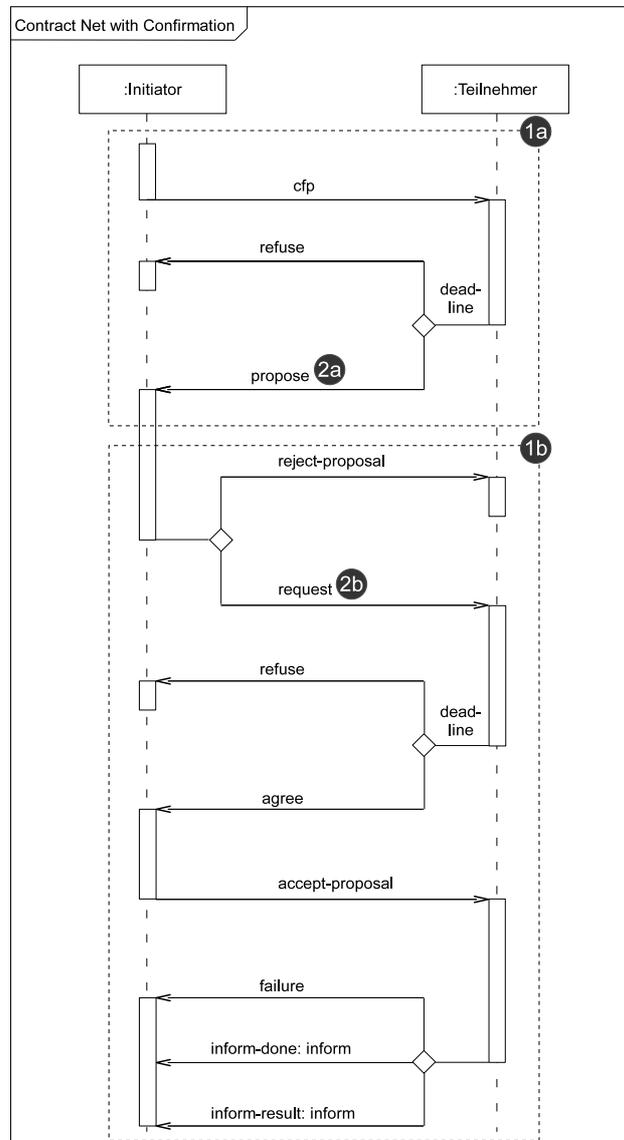


Abbildung 4.14: Das Contract Net with Confirmation Interaktionsprotokoll nach [KSF02].

Im Gegensatz zum ursprünglich von Smith und Davis [SD78] vorgeschlagenen und von der FIPA standardisierten Contract Net Protocol (kurz: CNP) [Fou03c] lässt sich das CNCP [KSF02] in die in Abbildung 4.14 dargestellten zwei Phasen unterteilen: den Abschluss vorläufiger Vereinbarungen (1a) und die tatsächliche Anforderung der vereinbarten Leistungen (1b). Hintergrund dieser Unterscheidung ist die in [KSF02] dis-

kutierte Schwierigkeit, dass der Einsatz des CNP insbesondere in Systemen mit vielen aktiv agierenden Agenten zu suboptimalen Ergebnissen führen kann, da Verpflichtungen im Rahmen der Verhandlungen zu früh eingegangen und dadurch weitere Verhandlungsmöglichkeiten nicht voll ausgeschöpft werden. Das CNCP erlaubt den Teilnehmern von Verhandlungen an dieser Stelle, mehreren Initiatoren eine vorläufige Zustimmung zu signalisieren (2a) und verpflichten sich erst dann endgültig, wenn eine Aufforderung zur Erbringung der vorläufig vereinbarten Leistungen erfolgt (2b). Im Kontext der reaktiven Einsatzplanung in VK ist der Einsatz des CNCP insbesondere aufgrund der potenziell großen Dynamik von Interesse, da das Auftreten eines ressourcenbezogenen Ereignisses einzelne Aufträge - und damit auch möglicherweise bereits abgeschlossene Kapazitätsverhandlungen - ganz oder teilweise unnötig machen kann. Aus diesem Grund werden von einem Head-OA im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen nur vorläufige Vereinbarungen zur Bereitstellung von elektrischer Leistung mit den RA des VK abgeschlossen und - unter Berücksichtigung des systemweit eindeutigen Bezeichners eines RA - auf die verwalteten Aufträge verteilt. Nach der Rückmeldung des Bearbeitungsstatus eines Auftrags an den entsprechenden Body-OA¹² informiert dieser den zugehörigen Body-RA über die von einzelnen externen RA erhaltenen Kapazitäten. Der Body-RA überprüft daraufhin zunächst die Notwendigkeit einer Inanspruchnahme der vorläufig zugesagten Kapazitäten und bestätigt bzw. verwirft diese ganz oder teilweise unter Nutzung der in Teil (1b) des CNCP definierten Interaktion. Dadurch werden unnötige Fahrplananpassungen auf Seiten der kapazitätsliefernden Ressourcen im Sinne der Anforderung A₅ weitestgehend vermieden, was sich auch positiv auf die Ausnutzung des Potenzials zur Kompensation von Einsatzplanabweichungen auswirkt.

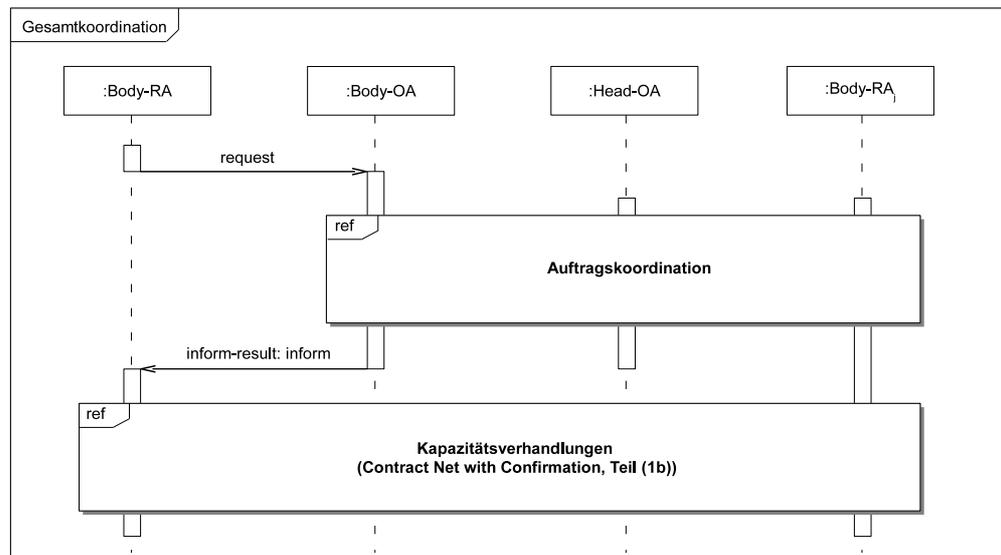


Abbildung 4.15: Übersicht der Gesamtkoordination der aktiven Einsatzplanung.

Abbildung 4.15 stellt abschließend den vollständigen Koordinationsprozess der akti-

¹² Siehe dazu (3b) in Abbildung 4.13.

ven Einsatzplanung dar, der sich aus Auftragskoordination und (zweigeteilten) Kapazitätsverhandlungen zusammensetzt. Ein Sonderfall stellt dabei der Head-RA dar, dessen Aufträge unmittelbar über den zugehörigen Head-OA in das Auftragsmatching einfließen.

4.4.4 Entscheidungsfindung und Zielverfolgung

Sowohl im Kontext der in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Möglichkeit eines RA zur deliberativen Fahrplanverbesserung als auch im Rahmen der im letzten Abschnitt diskutierten Koordination der Agenten der aktiven Einsatzplanung ist es an vielen Stellen notwendig, Entscheidungen zu treffen: Welche Fahrplanalternative optimiert die ressourcenspezifischen Soft Constraints? Wieviel Kapazität bietet ein RA bei einer Anfrage im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen an? Sollen Aufträge getrennt behandelt oder miteinander verknüpft werden? Wie werden vorläufig zugesagte Kapazitäten auf die von einem Head-OA verwalteten Aufträge aufgeteilt? Bei der Beantwortung dieser und anderer Fragen hängt die Entscheidungsfindung einzelner Agenten sowohl von der globalen Zielsetzung - Minimierung der Einsatzplanabweichung - als auch den ressourcenspezifischen Präferenzen, d.h. der lokalen Zielsetzung bezüglich der Fahrplanqualität, ab. Im Folgenden werden daher die in der deliberativen Fahrplanverbesserung, der Auftragskoordination und den Kapazitätsverhandlungen anfallenden Entscheidungen inklusive der maßgeblich beeinflussenden Ziele der R/OA diskutiert.

Deliberative Fahrplanverbesserung

Ziel der deliberativen Fahrplanverbesserung, die mittels des Moduls *Fahrplanqualität* eines RA realisiert wird, ist die langfristige Aufrechterhaltung der Qualität eines Fahrplans insbesondere hinsichtlich der anlagenspezifischen Soft Constraints. Das prinzipielle Vorgehen ist dabei wie folgt:

1. Ein RA generiert auf der Grundlage des aktuellen und für die Zukunft abgeschätzten Anlagenzustands eine Menge von Fahrplanalternativen, die hinsichtlich der Fahrplanqualität optimiert sind.
2. Durch Formulierung und Verarbeitung entsprechender Aufträge werden eine oder mehrere Fahrplanänderungen, die zur Erreichung der Alternativfahrpläne notwendig sind, auf ihre Realisierbarkeit überprüft. Wichtig dabei ist, dass der durch teilweise Erfüllung der Aufträge resultierende Nutzen gemäß Definition 4.40 positiv ausfällt, d.h. entweder die (zukünftige) Fahrplanabweichung vermindert oder der Erfüllungsgrad hinsichtlich der Soft Constraints verbessert werden kann.
3. Bei positiver Evaluation eines oder mehrerer Aufträge werden die betroffenen R/OA gemäß der Interaktionen der Kapazitätsverhandlungen über die Inanspruchnahme der jeweils zugesagten Leistung informiert.

Die deliberative Planung fügt sich mittels der Auftragserstellung in das bereits betrachtete System ein. Die wesentlichen Entscheidungen betreffen damit die Erstellung geeigneter Fahrplanalternativen, die allerdings stark vom Anwendungskontext und den anlagenspezifischen Präferenzen abhängig sind und gegebenenfalls unterschiedliche Optimierungsansätze erforderlich machen. Im Rahmen der Evaluation in Kapitel 6 wird daher exemplarisch eine Heuristik diskutiert, die auf der Grundlage einer optimierten Nutzung des thermischen Pufferspeichers einer KWK-Anlage einen konkreten deliberativen Planungsansatz darstellt. Eine allgemeine, allerdings rechenintensive Möglichkeit, Fahrplanalternativen zu generieren, stellt der im Kontext der dezentralen Energieversorgung bereits erfolgreich umgesetzte Einsatz genetischer Algorithmen dar [Hab04].

Entscheidungsfindung in der Auftragskoordination

Der im vorherigen Abschnitt diskutierte Prozess der Auftragskoordination beginnt mit der Generierung eines Auftrags $o = (id_{RA}, t_d, p_o, t_o, \bar{p}_o, u(o), \alpha_o)$ mit $\bar{p}_o = 0$ durch einen RA, um a) eine durch ein Ereignis verursachte Fahrplanabweichung zu kompensieren, oder b) die potenziellen Auswirkungen einer Fahrplanalternative im Rahmen der deliberativen Fahrplanverbesserung hinsichtlich ihrer Kompensierbarkeit zu untersuchen. Die Bezeichnung des Auftraggebers id_{RA} und der Planungszeitpunkt $t_o \in T$, an dem die geforderte elektrische Leistung erbracht werden soll, sind durch den auftraggebenden RA und den Zeitpunkt der zugrunde liegenden Fahrplanabweichung fest vorgegeben; der erwartete Nutzen ergibt sich ebenfalls direkt unter der Annahme einer exakten Erfüllung des Auftrags. Dagegen bestehen Freiheitsgrade bei der Gestaltung des Auftrages hinsichtlich

- der Deadline $t_d \in T$, bis zu der der Auftrag bearbeitet sein soll,
- der Zielvorgabe $p_o \in \mathbb{Q}$ sowie
- der initialen Priorität α_o , mit der der Auftrag bearbeitet werden soll.

Deadline t_d : Die Festlegung der Deadline t_d ist abhängig vom Grund der Auftragserstellung: Bei der Kompensation einer Abweichung im Rahmen der reaktiven Planung sollte die Deadline möglichst nahe an den Zeitpunkt t_o gelegt werden, um einen möglichst großen zeitlichen Spielraum für die Kapazitätsverhandlungen zu haben. Im Gegensatz dazu kann es bei der Untersuchung potenzieller Fahrplanverbesserungen sinnvoll sein, die Zeitspanne bis zur Erreichung der Deadline gering zu halten, um ein schnelles Feedback bezüglich der Realisierbarkeit eines alternativen Fahrplans zu erhalten und gegebenenfalls weitere Möglichkeiten untersuchen zu können.

Zielvorgabe p_o : Im Falle einer tatsächlichen Abweichung aufgrund eines Ereignisses sollte $p_o = \delta_{s_r}(t_o)$ gelten, um nicht unnötige Leistungskapazität anzufordern. Im Kontext der deliberativen Planung können aber mehrere Fahrplanalternativen dadurch auf Realisierbarkeit untersucht werden, dass die Zielvorgabe auf die für den betrachteten Planungszeitpunkt maximal benötigte Kapazität gesetzt wird. Aufgrund

der Vorläufigkeit der Zusagen im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen mittels des CNCP kann nach Bearbeitung des entsprechenden Auftrags entschieden werden, welche der Varianten mit der zugesagten Kapazität realisiert werden können, ohne dass dadurch auf globaler Ebene eine schlechtere Nutzung der vorhandenen Kapazitäten verursacht wird.

Priorität α_o : Die Priorität eines Auftrages sollte dessen „Wichtigkeit“ für die Performanz der reaktiven Einsatzplanung in VK repräsentieren. Danach ist ein Auftrag insbesondere dann von hoher Priorität, wenn der Planungszeitpunkt t_o , an dem die Abweichung auftritt, nahe am aktuellen Planungszeitpunkt t_{now} liegt und die zugrunde liegende Fahrplanabweichung einen großen Einfluss auf die Qualität des Gesamtfahrplans des VK hat. Dabei ist zu beachten, dass Letzteres vom auftraggebenden RA nicht beurteilt werden kann, da er nur den lokalen Anlagenfahrplan kennt. Die Priorität α_o wird daher initial hinsichtlich der zur Bearbeitung des Auftrags verbleibenden Zeitspanne sowie der erwarteten Auswirkung auf den lokalen Fahrplan durch den Auftraggeber festgelegt. Die an der Auftragskoordination beteiligten OA können dann die Priorität einzelner Aufträge auch vor dem Hintergrund näherrückender Deadlines neu bewerten und an die ihnen jeweils bekannte Situation anpassen.

Generierte Aufträge werden von den RA an die zugeordneten OA gesendet und in deren Liste der verwalteten Aufträge aufgenommen. Dem OA obliegt in der Folge die Entscheidung, in welcher Reihenfolge die vorliegende Aufträge abgearbeitet - d.h. an den entsprechenden Head-OA gesendet - werden und ob es etwa aus Sicht einer Aufwandsminderung sinnvoll sein kann, mehrere Aufträge zu einer gemeinsamen Anfrage zu aggregieren.

Auftragsaggregation: Eine Aggregation von zwei Aufträgen $o_1, o_2 \in O_{id_{RA}}$ im Sinne von Definition 4.41 ist dann möglich, wenn $t_{o_1} = t_{o_2}$ gilt. Ist darüber hinaus $|t_{d_1} - t_{d_2}| \leq \epsilon_d$ erfüllt, d.h. liegen die Deadlines zweier Aufträge nahe beieinander, so kann eine Aggregation den im Weiteren anfallenden Kommunikationsaufwand im Gegensatz zu einer getrennten Bearbeitung der Aufträge um bis zu 50% reduzieren. Der Faktor ϵ_d ist dabei insbesondere von der Granularität des Planungshorizonts abhängig und muss anwendungsfallabhängig festgelegt werden. Bei zeitlich weiter auseinander liegenden Deadlines kann eine Verknüpfung von Aufträgen dagegen dazu führen, zeitbezogenes Potenzial zur Auftragsbearbeitung und damit letztlich Fahrplanqualität einzubüßen und sollte deshalb vermieden werden.

Auftragsbearbeitungsreihenfolge: Die Reihenfolge, in der lokal vorliegende Aufträge von einem OA bearbeitet werden, hängt maßgeblich von deren Priorität α_{o_i} ab, die eine Ordnung \leq_α auf der Menge O der Aufträge definiert: $o_1 \leq_\alpha o_2$ gelte demnach genau dann, wenn $\alpha_{o_1} \leq \alpha_{o_2}$ gilt. Damit kann die Liste der von einem OA verwalteten Aufträge hinsichtlich der Priorität absteigend sortiert und in der entsprechenden Reihenfolge abgearbeitet werden. Um den Aufwand zur Auftragskoordination für den Head-OA beherrschbar zu halten, werden dabei nur Aufträge oberhalb einer gewissen Prioritätsuntergrenze kommuniziert, d.h. falls $\alpha_{o_i} \geq \epsilon_\alpha$. Der - zunächst als

konstant¹³ angenommene - Faktor ϵ_α sollte dabei so gewählt werden, dass einerseits nicht zu viele Aufträge gleichzeitig an den Head-OA gesendet werden, andererseits aber ausreichend Zeit für die Bearbeitung eines Auftrags zur Verfügung steht, um bestmögliche Ergebnisse im Rahmen des Auftragsmatching und der Kapazitätsverhandlungen erzielen zu können.

Der Prozess der Auftragskoordination wird maßgeblich vom Head-OA gestaltet. Bei Erhalt einer Anfrage bzgl. der Bearbeitung eines Auftrags¹⁴ muss er zunächst entscheiden, ob er die Anfrage akzeptiert oder ablehnt. Die akzeptierten Aufträge werden dann im Rahmen des Auftragsmatching zunächst untereinander auf vorzeichenverschiedene Zielvorgaben überprüft, bevor die Body-OA - gegebenenfalls nach weitergehenden Kapazitätsverhandlungen - über den Erfüllungsgrad ihrer Anfragen informiert werden.

Auftragsannahme: Hinsichtlich der Annahme von Aufträgen muss zwischen dem Bearbeitungsaufwand und der möglicherweise erreichbaren Qualität der Auftragskoordination abgewogen werden. Die für die Auftragsbearbeitung eingeführte Prioritätsuntergrenze ϵ_α sorgt bereits dafür, dass zu einem Planungszeitpunkt nur Aufträge mit vergleichbarer Priorität übermittelt werden, wodurch der Aufwand über den Planungshorizont verteilt wird. In Abhängigkeit der informationstechnischen Rahmenbedingungen - d.h. insbesondere der dem Head-R/OA zur Verfügung stehenden Speicher- bzw. CPU-Kapazität - kann darüber hinaus eine Obergrenze ϵ_o von Aufträgen, die zur gleichen Zeit bearbeitet werden können, definiert werden. Demnach nimmt ein Head-OA so lange Aufträge an, bis ϵ_o überschritten wird. Im Idealfall sollte diese Obergrenze ignoriert werden, um mögliche Einschränkungen hinsichtlich der Qualität der Auftragskoordination zu vermeiden.

Auftragsmatching: Wie bereits in Abschnitt 4.4.3 diskutiert, dient das Auftragsmatching dazu, Aufträge mit vorzeichenverschiedenen Zielvorgaben aufeinander abzubilden und so einen Teil der Zielvorgaben ohne weitere Fahrplananpassungen zu erfüllen. Dazu geht der Head-OA wie folgt vor: Zunächst werden sämtliche angenommenen Aufträge anhand ihres Vorzeichens und des jeweiligen Erfüllungszeitpunktes t_o in separate Listen unterteilt. Jedes zeitpunktabhängige Listenpaar wird dann in Anlehnung an das Merit-Order-Verfahren [CW02, Nab06] nach Priorität und Nutzen absteigend sortiert und o.B.d.A. ausgehend von den positiven Zielvorgaben sequenziell abgearbeitet, indem einem Auftrag o_i so lange Aufträge $o_{i_j}, j = 1, \dots, k$ mit negativen Zielvorgaben zugeordnet werden, bis er exakt erfüllt ist, d.h.

$$\frac{-1 \cdot \sum_{j=1..k} p_{o_{i_j}}}{p_{o_i}} = 1. \quad (4.1)$$

Dabei wird der zuletzt zugeordnete Auftrag in der Regel nur mit einem Teil seiner Zielvorgabe berücksichtigt. Als Ergebnis des Matchingprozesses gelten sowohl

¹³ In Abschnitt 7.3 wird auf die Möglichkeit zeitlich veränderlicher Parameter unter anderem im Rahmen der Entscheidungsfindung eingegangen.

¹⁴ Siehe dazu auch Abbildung 4.13 auf Seite 106.

der Auftrag o_i als auch die zugeordneten Aufträge $o_{i_j}, j = 1, \dots, k - 1$ als exakt erfüllt. Auftrag o_{i_k} ist gegebenenfalls nur teilweise erfüllt. Aufgrund der Sortierung der Aufträge nach ihrem erwarteten Nutzen wird dabei insbesondere die lokal bekannte Qualität der reaktiven Koordination maximiert.

Aufträge, deren Zielvorgaben im Rahmen des Auftragsmatching vollständig erfüllt werden können, werden als erledigt markiert und an die entsprechenden Body-OA zurückgemeldet. Um eine bestmögliche Erfüllung der verbleibenden Aufträge zu ermöglichen, führt der Head-OA in einem weiteren Schritt Kapazitätsverhandlungen mit den RA des Systems durch.

Entscheidungsfindung in den Kapazitätsverhandlungen

Die Kapazitätsverhandlungen im Rahmen der aktiven Einsatzplanung basieren wie in Abschnitt 4.4.3 diskutiert auf dem in zwei Phasen unterteilten CNCP und haben die Erfüllung der noch offenen Aufträge durch Bereitstellung von Leistungskapazitäten durch geeignete DER eines VK zum Ziel. Dabei muss insbesondere zwischen den lokalen Zielsetzungen der einzelnen RA und dem globalen Ziel minimaler Einsatzplanabweichungen abgewogen werden. Ausgangspunkt der Kapazitätsverhandlungen ist eine entsprechende Anfrage des Head-OA, der die nach dem Auftragsmatching noch nicht vollständig erfüllten Aufträge verwaltet, bei den RA des VK bzgl. der Kompensation einer bestimmten Abweichung. Für die Beantwortung dieser Anfrage müssen die RA entscheiden, wieviel der lokal verfügbaren Kapazität sie unter Berücksichtigung der ressourcenspezifischen Soft Constraints für den Ausgleich der angefragten Abweichung anbieten wollen. Mit der Übermittlung der erstellten Angebote und deren Verteilung auf die noch offenen Aufträge durch den OA endet die erste Phase des CNCP.

Anfragegestaltung: Im Sinne der Minimierung des notwendigen Kommunikationsaufwands werden die noch offenen, bereits in zeitpunktabhängige Listen unterteilten Aufträge gemäß Definition 4.41 zunächst zu mehreren zeitpunktbezogenen Aufträgen aggregiert. Die Anfragen eines Head-OA im Rahmen des CNCP umfassen dann die gemäß Definition 4.41 kombinierten Zielvorgaben und Nutzeinschätzungen der Einzelaufträge. Bei der Aggregation von Aufträgen ist aber zu beachten, dass einzelne Ressourcen gegebenenfalls nicht über ausreichend Kapazität verfügen, um die Anfrage vollständig erfüllen zu können. Dies kann - wie im nächsten Punkt noch genauer ausgeführt wird - bei einer ungünstigen Aggregation von Aufträgen mit sehr unterschiedlichem erhofften Nutzen aufgrund des aus der Aggregation resultierenden Informationsverlusts dazu führen, dass sich ein RA gegen die Erstellung eines Kapazitätsangebots entscheidet, obwohl er bei einer Anfrage bzgl. eines günstigen Einzelauftrags einer Bereitstellung von Leistung zugestimmt hätte. Aus diesem Grund aggregiert ein Head-OA ausschließlich dann Aufträge $o_1, o_2 \in O$, wenn $|u(o_1) - u(o_2)| \leq \epsilon_u$ gilt, d.h. wenn der erhoffte Nutzen der Einzelaufträge innerhalb eines festgelegten Ähnlichkeitsintervalls liegt.

Angebotserstellung: Erhält ein RA im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen eine An-

frage, so kann er sich für die Erstellung eines Angebots im Sinne einer vorläufig zugesagten Leistungsbereitstellung entscheiden. Diese Entscheidung hängt im Rahmen der aktiven Einsatzplanung von einer Abwägung des resultierenden Nutzens gegenüber den sich ergebenden Kosten eines Angebots ab und basiert auf der in [HJ01] von Hogg und Jennings diskutierten Idee der sozial intelligenten Entscheidungsfindung. Wie zuvor festgehalten, umfasst eine Anfrage bzgl. eines Auftrags $o \in O$ eine Zielvorgabe im Sinne einer elektrischen Leistung p_o , die zu einem bestimmten Zeitpunkt t_o bereitgestellt werden und dem Auftraggeber einen Nutzen $u(o)$ erbringen soll. Diesem Nutzen stehen die Auswirkungen $u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)})$, die sich aus einer Anpassung des Fahrplans s_r zum Zeitpunkt t_o um die Leistung $p_o^{(r)}$ für den RA r ergeben, entgegen:

$$u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) := \gamma_\delta^{(r)} \cdot u_\delta^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) + \gamma_{SC}^{(r)} \cdot u_{SC}^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) \quad (4.2)$$

mit

$$u_\delta^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) := 1 - \frac{\left\| \delta_{(s_r \oplus (t_o, p_o^{(r)}))} \right\|}{\|\delta_{s_r}\|} \quad (4.3)$$

und

$$u_{SC}^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) := \sum_{sc \in SC_r} \alpha_{sc} \cdot \left(v_{sc}(s_r \oplus (t_o, p_o^{(r)})) - v_{sc}(s_r) \right). \quad (4.4)$$

Analog zu Definition 4.40 gelte dabei $\gamma_\delta^{(r)}, \gamma_{SC}^{(r)} \in [0, 1]$ mit $\gamma_\delta^{(r)} + \gamma_{SC}^{(r)} = 1$. Aus Sicht eines optimalen Betriebs des Gesamtsystems ist es wünschenswert, dass ein RA dann ein Kapazitätsangebot für eine bestimmte Leistung $p_o^{(r)}$ abgibt, wenn der Nutzen (für andere RA) die Auswirkungen $u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)})$ übersteigen:

$$u(o, p_o^{(r)}) \geq u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}). \quad (4.5)$$

Dabei ist $u(o, p_o^{(r)})$ eine heuristische Abschätzung des Nutzens einer gegebenenfalls teilweisen Erfüllung des Auftrags o :

$$u(o, p_o^{(r)}) := \begin{cases} \frac{p_o^{(r)}}{p_o} \cdot u(o) & \text{falls } p_o^{(r)} < p_o, \\ \frac{p_o}{p_o^{(r)}} \cdot u(o) & \text{falls } p_o^{(r)} > p_o, \text{ und} \\ u(o) & \text{falls } p_o^{(r)} = p_o. \end{cases} \quad (4.6)$$

Eine exakte Bestimmung des Nutzen $u(o, p_o^{(r)})$ für den auftraggebenden RA ist ohne Kenntnis der konkreten Ausprägungen der zugrunde liegenden Soft Constraints bzw. Fahrplanabweichungen nicht möglich; allerdings würde ein bilateraler Austausch der

notwendigen Informationen den Kommunikationsaufwand stark erhöhen. Die Heuristik aus Gleichung 4.6 basiert dagegen auf der Annahme, dass eine exakte Erfüllung eines Auftrags mit dem größtmöglichen Nutzen verbunden ist, eine Über- oder Unterdeckung sich dagegen negativ auf $u(o, p_o^{(r)})$ auswirkt.

Um eine differenzierte Entscheidungsfindung zu ermöglichen, wird obige Entscheidungsregel im Sinne von [HJ01] um die Faktoren γ_{ind} bzw. γ_{soc} erweitert, die die individuellen bzw. sozialen Auswirkungen einer Kapazitätsbereitstellung unterschiedlich gewichten:

$$\gamma_{\text{soc}} \cdot u(o, p_o^{(r)}) - \gamma_{\text{ind}} \cdot u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) \geq 0. \quad (4.7)$$

Dabei seien $\gamma_{\text{soc}}, \gamma_{\text{ind}} \in [0, 1]$ und $\gamma_{\text{soc}} + \gamma_{\text{ind}} = 1$. Die Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungen werden in Kapitel 6 untersucht und diskutiert.

Auf Grundlage obiger Gleichung und den zustands- und anlagenabhängigen Möglichkeiten eines dezentralen Energiesystems zur Kapazitätsbereitstellung umfasst die Entscheidung über eine Kapazitätsbereitstellung bei Erhalt einer Anfrage die Lösung des folgenden Optimierungsproblems mit Entscheidungsvariable $p_o^{(r)}$:

$$\begin{aligned} \max \quad & \gamma_{\text{soc}} \cdot u(o, p_o^{(r)}) - \gamma_{\text{ind}} \cdot u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) \\ \text{s.t.} \quad & p_o^{(r)} \in c_r(t_o) \\ & \gamma_{\text{soc}} \cdot u(o, p_o^{(r)}) - \gamma_{\text{ind}} \cdot u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) \geq 0. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dabei ist $c_r(t_o)$ nach Definition 4.9 die der Ressource r zum Zeitpunkt t_o zur Verfügung stehende Leistungskapazität. Da dezentrale Energiesysteme gemäß der Diskussion in Abschnitt 4.1 in der Regel über eine endliche Anzahl m von Modulationsstufen - und damit Möglichkeiten zur Leistungsbereitstellung - verfügen, lässt sich obiges Problem mit Aufwand $O(m)$ durch Iteration über $c_r(t_o)$ lösen.

Angebotsaufteilung: Angebote, die der Head-RA als Antwort auf seine Anfragen im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen erhält, werden analog zum Auftragsmatching nach einem Merit-Order-Verfahren auf die verwalteten Aufträge verteilt. Dabei werden zunächst die Aufträge mit dem höchsten Nutzen bzw. der höchsten Priorität berücksichtigt.

Die zweiten Phase der mittels des CNCP realisierten Kapazitätsverhandlungen beginnt mit der Rückmeldung der Body-OA bei ihren zugeordneten RA über den Status der erteilten Aufträge. Dabei müssen die RA prüfen, ob sie die angeforderte - und gegebenenfalls teilweise erhaltene - Kapazität in Anspruch nehmen wollen oder - etwa im Falle der durch die deliberative Planung generierten Aufträge - welche der angebotenen Alternativen aus lokaler Sicht am nutzbringendsten ist.

Kapazitätsinanspruchnahme: Die Inanspruchnahme einer verhandelten Kapazität ist unter dem Einfluss in der Zwischenzeit aufgetretener Ereignisse unter Umständen

nicht mehr notwendig. In diesem Fall sendet der RA dem Kapazitätsbereitsteller eine Absage zu; andernfalls bestätigt er die Kapazitätsinanspruchnahme. Dabei kann es gemäß des CNCP vorkommen, dass eine vorläufig zugesagte Leistungskapazität nicht mehr erbracht werden kann, da sie bereits einem anderen RA bestätigt wurde¹⁵ oder aufgrund von Ereignissen auf Seiten des „Lieferanten“ nicht mehr verfügbar ist.

Alternativenauswahl: Insofern sich einem RA mehrere Alternativen zur Deckung einer Abweichung durch vorläufig zugesagte Kapazitäten $\bar{p}_{o_i}, i = 1, \dots, n$ bieten, wählt er entsprechend denjenigen Auftrag aus, dessen Realisierung seinen lokalen Nutzen maximiert: o_j so, dass $\forall i \neq j : u(o_j) \geq u(o_i)$. Das entsprechende Angebot wird dann bestätigt, alle anderen verworfen.

4.5 Zusammenfassung und Diskussion

Mit dem Problem *RSP* wurde in diesem Kapitel ein formales Verständnis der reaktiven Einsatzplanung in VK erarbeitet, welches - zunächst unabhängig von konkreten Lösungsansätzen - die aus Sicht des Energiemanagements wichtigsten Begrifflichkeiten klärt. Das vor diesem Hintergrund entwickelte Konzept der aktiven Einsatzplanung umfasst sowohl reaktive als auch deliberative Planungsanteile und basiert auf einer Zerlegung des reaktiven Einsatzplanungsproblems *RSP* durch abgestufte Konsistenzgrade in Anlehnung an Henseler [Hen98].

Die zuletzt diskutierte, multiagentenbasierte Umsetzung der aktiven Einsatzplanung hat insbesondere eine Verteilung des Planungswissens und -aufwands auf die dezentralen Anlagen eines VK selbst zum Ziel. Die Koordination des Verhaltens des verteilten Systems erfolgt dabei durch eine gezielte Erstellung und Bearbeitung von Aufträgen, für deren Umsetzung geeignete Interaktionsprotokolle und Entscheidungsfindungsprozesse definiert wurden. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte der aktiven Einsatzplanung sowie deren agentenbasierten Umsetzung abschließend zusammengefasst und diskutiert.

Aktive Einsatzplanung

Grundlegende Idee der aktiven Einsatzplanung ist es, das Problem *RSP* durch aufeinander aufbauende Teilschritte zu lösen. Dazu wird eine initial inkonsistente Lösung durch lokale und globale Reaktion zunächst in eine zulässige Lösung überführt und diese gegebenenfalls durch weitergehende Umplanungsmaßnahmen, die auch die langfristige Qualität der Anlagenfahrpläne berücksichtigen, verbessert. Dadurch lassen sich - eine geeignete Implementierung vorausgesetzt - prinzipiell folgende Effekte erzielen:

- Schnelle Reaktion auf Ereignisse, die auf den Anlagenfahrplan einwirken.
- Langfristige Aufrechterhaltung der Fahrplanqualität.

¹⁵ Vergleiche dazu Abbildung 4.14 auf Seite 107.

- Verteilung des Planungswissens und -aufwands auf die DER eines VK.

Letzteres ist insbesondere der Einsicht geschuldet, dass dezentrale Anlagen in einen individuellen Kontext eingebettet sind, der etwa im Fall von KWK- bzw. PV-Anlagen durch die konkrete Einbindung eines DER in ein lokales Gebäudesystem bzw. die Abhängigkeit von erneuerbaren Energieträgern gestaltet ist.

Ressourcen- und Auftragagenten

Das in Abschnitt 4.4 diskutierte MAS, das das Konzept der aktiven Einsatzplanung in Form einer verteilten Systemarchitektur realisiert, basiert auf zwei unterschiedlichen Agententypen. Ressourcenagenten überwachen den ihnen jeweils zugeordneten DER und stellen im Falle eines Ereignisses unmittelbar die lokale Zulässigkeit des Anlagenfahrplans sicher. Darüber hinaus generieren RA in Zeiten relativer Ruhe - d.h. falls aktuell kein dringendes Ereignis behandelt werden muss - insbesondere hinsichtlich der spezifischen Soft Constraints der überwachten Anlage optimierte Alternativen zum lokal vorliegenden Fahrplan und realisieren damit den deliberativen Anteil der aktiven Einsatzplanung. Fahrplanabweichungen, die sich aus Reaktionen auf Ereignisse oder durch mögliche Alternativfahrpläne ergeben, werden von den RA in Form von Aufträgen an den entsprechenden Auftragagenten weitergeleitet. Diese verwalten, aggregieren und bearbeiten die generierten Aufträge mit dem Ziel, die angeforderte Leistungskapazität mit möglichst geringem Kommunikationsaufwand von anderen RA zu beziehen¹⁶. Die Body-OA stellen dazu entsprechende Anfragen an den ihnen zugeordneten Head-OA, der letztlich für die Koordination der einzelnen Aufträge und die gegebenenfalls notwendigen Kapazitätsverhandlungen verantwortlich ist.

Auftragskoordination und Kapazitätsverhandlungen

Im Rahmen der Auftragskoordination führt der Head-OA zunächst ein Auftragsmatching durch. Dazu werden sämtliche eingehenden Aufträge anhand ihres Erfüllungszeitpunktes - d.h. dem Planungszeitpunkt $t_o \in T$, an dem die in Auftrag o angeforderte Leistung bereitgestellt werden soll - sortiert und hinsichtlich vorzeichenverschiedener Zielvorgaben überprüft. Dadurch können Aufträge gegebenenfalls ohne weitere Fahrplananpassungen als erfüllt behandelt werden. Für den dann noch unerfüllten oder nur teilweise erfüllten Kapazitätsbedarf werden im Anschluss Kapazitätsverhandlungen auf Grundlage des CNCP durchgeführt. Wesentliches Merkmal dieses Interaktionsprotokolls ist die Möglichkeit vorläufiger Zusagen, die es den RA erlaubt, verhandelte Kapazitäten, die aufgrund in der Zwischenzeit eingetretener Ereignisse nicht mehr in Anspruch genommen werden müssen, beim jeweiligen „Lieferanten“ wieder frei zu geben und somit unnötige Fahrplananpassungen zu vermeiden.

¹⁶ Eine Untersuchung eines konkreten Anwendungsfalls unter anderem hinsichtlich der Auswirkungen unterschiedlicher Belegungen der Entscheidungsparameter auf den Kommunikationsaufwand erfolgt im Rahmen der Evaluation in Kapitel 6.

Entscheidungsfindung

Sowohl die Auftragskoordination als auch die Kapazitätsverhandlung werden durch individuelle Entscheidungen von R/OA beeinflusst bzw. gesteuert. Obwohl diese Entscheidungen autonom und in der Regel zustandsabhängig gefällt werden, wurden in Abschnitt 4.4.4 mehrere Parameter und Gewichtungen definiert, die Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung der R/OA und damit auch auf das Verhalten und die Performanz des Gesamtsystems haben.

Parameter	Wertebereich	Beschreibung
ϵ_d	$[0, \infty)$	Untere Schranke bzgl. zeitlicher Nähe von Deadlines für Auftragsaggregation. Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Aufträge bei identischer Deadline aggregieren. • ∞ - Beliebige Aufträge aggregieren.
ϵ_α	$[0, \infty)$	Prioritätsuntergrenze für das Versenden von Aufträgen. Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Aufträge unabhängig von Priorität versenden. • ∞ - Keine Aufträge versenden.
ϵ_o	$[0, \infty)$	Obergrenze von Aufträgen, die durch Head-R/OA gleichzeitig bearbeitet werden können. Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Auftragsbearbeitung nicht möglich. • ∞ - Beliebige viele Aufträge bearbeitbar.
ϵ_u	$[0, \infty)$	Schranke für Ähnlichkeitsintervall des Nutzens im Rahmen der Anfragegestaltung. Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Aufträge mit identischem Nutzen aggregieren. • ∞ - Beliebige Aufträge aggregieren.

Tabelle 4.2: Heuristische Parameter der aktiven Einsatzplanung.

Tabelle 4.2 listet dabei die heuristischen Parameter auf, die insbesondere im Kontext der Auftragserstellung und -bearbeitung eine Rolle spielen und darauf abzielen, den Kommunikationsaufwand durch Aggregieren von Einzelaufträgen zu vermindern. Darüber hinaus kann eine Prioritätsschranke definiert werden, die das Versenden bzw. Bearbeiten von Aufträgen über einen längeren Zeitraum hinweg verteilt und dadurch auch eine effiziente Verarbeitung „dringender“ Aufträge, die zur Kompensation kurzfristig aufgetretener Fahrplanabweichungen generiert wurden, ermöglicht.

Ergänzend dazu stellt Tabelle 4.3 die im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen zum Einsatz kommenden Gewichte dar, die einen wesentlichen Einfluss insbesondere auf die Angebotserstellung haben. Letztere kann als zentraler Entscheidungsprozess der aktiven Einsatzplanung angesehen und durch unterschiedliche Gewichtung des individuel-

Gewicht	Wertebereich	Beschreibung
γ_{δ}	[0, 1]	Gewichtung des Nutzens von Fahrplanverbesserungen hinsichtlich der Fahrplanabweichungen; in Kombination mit: γ_{SC} . Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Fahrplanabweichungen nicht einbeziehen. • 1 - Nur Fahrplanabweichungen einbeziehen.
γ_{SC}	[0, 1]	Gewichtung des Nutzens von Fahrplanverbesserungen hinsichtlich der Soft Constraints; in Kombination mit: γ_{δ} . Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Soft Constraints nicht einbeziehen. • 1 - Nur Soft Constraints einbeziehen.
γ_{soc}	[0, 1]	Gewichtung der sozialen Auswirkung einer Kapazitätsbereitstellung; in Kombination mit: γ_{ind} . Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Sozialen Nutzen nicht berücksichtigen. • 1 - Nur sozialen Nutzen berücksichtigen.
γ_{ind}	[0, 1]	Gewichtung der individuellen Auswirkung einer Kapazitätsbereitstellung; in Kombination mit: γ_{soc} . Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Individuellen Nutzen nicht berücksichtigen. • 1 - Nur individuellen Nutzen berücksichtigen.

Tabelle 4.3: Gewichte der aktiven Einsatzplanung.

len bzw. sozialen Nutzens beeinflusst werden. Unterschiedliche Ausprägung der aufgeführten Gewichtungen und deren Auswirkungen insbesondere auf die Fahrplanqualität werden im Rahmen der Evaluation in Kapitel 6 diskutiert. Eine besonders interessante Fragestellung im Sinne von Hogg und Jennings [HJ01] ist dabei, ob eine sozial intelligente Entscheidungsfindung - d.h. insbesondere eine Vermeidung von Extremen im Sinne einer allzu „egoistischen“ ($\gamma_{ind} = 1$) bzw. „altruistischen“ ($\gamma_{ind} = 0$) Einstellung - positive Auswirkungen auf die lokale bzw. globale Qualität der reaktiven Koordination in VK hat.

Never worry about theory as long as the machinery does what it's supposed to do.

– Robert A. Heinlein

5 Holonische Virtuelle Kraftwerke

Im letzten Kapitel wurde mit der aktiven Einsatzplanung ein multiagentenbasierter Ansatz zur reaktiven Koordination von dezentralen Energiewandlungsanlagen (kurz: DER) im Kontext Virtueller Kraftwerke (kurz: VK) diskutiert. Einzelne DER werden dabei durch Ressourcen- und Auftragagenten (kurz: R/OA) repräsentiert, die durch agentenübergreifende Auftragskoordination und Kapazitätsverhandlungen versuchen, Abweichungen von einem initial erstellten Einsatzplan im laufenden Betrieb zu minimieren und die langfristige Qualität der Anlagenfahrpläne zu verbessern.

In der bisherigen Betrachtung obliegt die Koordination einem einzelnen Head-R/OA, der die Aufträge der untergeordneten Agenten entgegennimmt, gegebenenfalls aggregiert und durch ein Auftragsmatching bzw. Verhandlungen auf Grundlage des Contract Net with Confirmation Protocol (kurz: CNCP) bestmöglich zu erfüllen versucht. Der Koordinationsaufwand des Head-R/OA wächst dabei bei steigender Anlagenzahl innerhalb eines VK mindestens linear an. Daraus resultieren bei großen VK mit mehreren hundert Anlagen vergleichbare Probleme wie bei einer zentralen Steuerung: Um eine geeignete Reaktionsfähigkeit aufzuweisen, muss die Hardware des Head entsprechend großzügig ausgelegt werden, wodurch eine einfache Ersetzbarkeit durch alternative R/OA verloren geht¹. Eine „klassische“ Lösung dieses Skalierbarkeitsproblems ist die Einführung einer statischen hierarchischen Struktur etwa in Anlehnung an PowerMatcher [KKH⁺07] und DEZENT [WLH⁺07] mit dem Ziel, den Koordinationsaufwand auf mehrere Hierarchie- bzw. Aggregationsstufen zu verteilen. Dies gelingt im Kontext von VK insbesondere dann gut, wenn durch Ereignisse verursachte Fahrplanabweichungen möglichst lokal behandelt und nicht über mehrere Ebenen hinweg kommuniziert werden müssen. Problematisch dabei ist allerdings, dass eine diesem Kriterium genügende Zusammenfassung von DER bzw. deren Agenten nur unzureichend a priori festgelegt werden kann, da die zum Ausgleich von Abweichungen benötigte Kapazität insbesondere abhängig vom Zustand der dezentralen Anlagen ist, der bestenfalls tagesweise prognostiziert werden kann. Eine mögliche Alternative zu einer statisch festgelegten Hierarchie ist daher eine dynamische, sich an den jeweils aktuellen Gesamtzustand eines VK anpassende Organisation des Multiagentensystems (kurz: MAS) der aktiven Einsatzplanung.

Ausgehend von dieser Überlegung wird im Weiteren zunächst die Idee eines holonischen VK diskutiert, das sich aus selbstähnlichen „Virtuellen Ressourcen“ zusammensetzt, die DER in aggregierter Form repräsentieren und für eine adaptive Hierarchisierung des Informationssystems eines VK genutzt werden können. Darauf aufbauend werden die Koordinations- und Entscheidungsfindungskonzepte der aktiven Einsatzplanung

¹ Siehe dazu auch die Diskussion in Abschnitt 4.4.1.

auf das holonische VK übertragen und um ein Konzept zur adaptiven und insbesondere vom Zustand der DER eines VK abhängigen Reorganisation der holonischen Struktur ergänzt. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine kritische Diskussion der resultierenden aktiven Einsatzplanung in holonischen VK.

5.1 Das holonische Virtuelle Kraftwerk

Die einem VK zugrunde liegende Idee ist es, unterschiedliche DER informationstechnisch zu einem „steuerbaren Ganzen“ zu verknüpfen. In diesem Sinne stellt ein VK auf einem gewissen Abstraktionsniveau - etwa aus Sicht des Bilanzkreismanagements - eine einzelne „Virtuelle Ressource“ dar, die einem durch die Tageseinsatzplanung vorgegebenen Gesamtfahrplan bestmöglich folgt.

Begriffsklärung 2 (Virtuelle Ressource)

Für eine Menge von Ressourcen R ist eine **Virtuelle Ressource** vr eine informationstechnische Aggregation einer nichtleeren Teilmenge $R_{vr} \subseteq R$ mit $R_{vr} \neq \emptyset$. Für eine Ressource $r \in R$ sei Folgendes vereinbart: vr **repräsentiert** r genau dann, wenn $r \in R_{vr}$ gilt. Zudem heißt vr **atomar**, falls $|R_{vr}| = 1$ gilt, d.h. falls vr nur eine einzelne Ressource repräsentiert.

Virtuelle Ressourcen stellen nach diesem Verständnis eine Verallgemeinerung eines VK dar, das stets die Gesamtheit aller betrachteten Ressourcen repräsentiert, d.h. es gilt $R_{VK} = R$. Aus informationstechnischer Sicht ist eine Virtuelle Ressource als ein (teil-)autonomes Informationssystem zu verstehen, welches die repräsentierten Ressourcen analog zu einem VK „im Kleinen“ steuert und überwacht. In Anlehnung an Definition 4.5 verfolgt eine Virtuelle Ressource dann einen aggregierten Fahrplan:

Definition 5.1 (Aggregierter Fahrplan)

Der Fahrplan s_{vr} einer Virtuellen Ressource vr ergibt sich durch Summation der Einzelfahrpläne der Ressourcen, die vr repräsentiert, d.h.

$$s_{vr}(t) := \sum_{r \in R_{vr}} s_r(t) \text{ für alle } t \in T.$$

s_{vr} heißt dann auch **aggregierter Fahrplan** oder **Aggregation** der Einzelfahrpläne der Ressourcen $r \in R_{vr}$.

Das Konzept der Virtuellen Ressourcen kann dazu genutzt werden, das Informationssystem eines VK hierarchisch zu organisieren und so den insbesondere hinsichtlich der reaktiven Einsatzplanung anfallenden Koordinationsaufwand auf mehrere IT-Komponenten zu verteilen und so zu reduzieren. Dies setzt eine Bereitstellung geeigneter Schnittstellen für den Informationsaustausch voraus, so dass eine Virtuelle Ressource

in der Lage ist, sowohl physikalische Ressourcen - d.h. einzelne DER - als auch weitere Virtuelle Ressourcen zu koordinieren. Abbildung 5.1 stellt exemplarisch ein dieserart hierarchisch organisiertes VK dar. Dabei repräsentiert die Virtuelle Ressource vr_2 die dezentralen Anlagen DER_1 und DER_2 , vr_3 repräsentiert DER_3 und vr_4 repräsentiert DER_4 , DER_5 und DER_6 . Die Virtuelle Ressource vr_1 koordiniert die Virtuellen Ressourcen vr_2 bis vr_4 und repräsentiert damit sämtliche dezentralen Anlagen des VK, d.h.

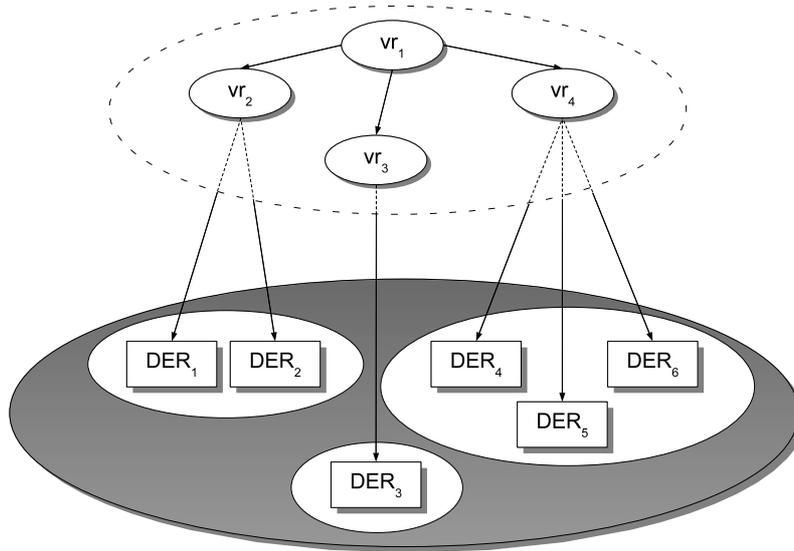
$$R_{VK} = R_{vr_1} = \bigcup_{i=2,\dots,4} R_{vr_i}.$$


Abbildung 5.1: Ein mittels Virtueller Ressourcen hierarchisch organisiertes VK.

Gelingt es darüber hinaus, die Schnittstellen und Koordinationsmechanismen unabhängig von der Tatsache zu gestalten, ob eine physikalische oder eine untergeordnete Virtuelle Ressource koordiniert wird, so kann man von einem holonischen VK sprechen.

Begriffsklärung 3 (Holonisches Virtuelles Kraftwerk)

Ein *holonisches VK* ist eine informationstechnische Aggregation einer Menge R von DER mittels selbständlicher, hierarchisch organisierter Virtueller Ressourcen vr_1, \dots, vr_k , so dass sämtliche Ressourcen durch wenigstens eine Virtuelle Ressource repräsentiert werden: $R = \bigcup_{i=1,\dots,k} R_{vr_i}$.

Der Begriff der Selbstständigkeit bezieht sich dabei auf die folgenden, in Anlehnung an [VWV⁺98] formulierten Anforderungen an die Gestaltung einer Virtuellen Ressource:

- *Horizontale* Selbstständigkeit bedeutet, dass Virtuelle Ressourcen auf der gleichen Hierarchie- bzw. Aggregationsstufe identische Schnittstellen für den Informations-

und Kommunikationsfluss bereitstellen und so in vergleichbarer Art und Weise durch die übergeordnete Virtuelle Ressource koordiniert werden können.

- Ergänzend dazu erfordert die *vertikale* Selbstähnlichkeit, dass Virtuelle Ressourcen auch über unterschiedliche Hierarchie- bzw. Aggregationsstufen hinweg identische Schnittstellen für den Informations- und Kommunikationsfluss bereitstellen.

Die Koordinationsmechanismen innerhalb eines holonischen VK sind damit unabhängig davon, auf welcher Hierarchiestufe die Koordination stattfindet und ob atomare oder aggregierte Virtuelle Ressourcen gesteuert und überwacht werden. Dadurch können aufwendige Aggregations- bzw. Disaggregationsmechanismen und spezialisierte, von der Hierarchiestufe einer IT-Komponente abhängige Funktionalitäten zur Koordination dezentraler Energiewandlungsanlagen, wie sie etwa in [BFA02] bzw. [Sch09] diskutiert werden, vermieden werden. Zudem erhöht sich in einem solchen System die Ausfallsicherheit, da bei einem Versagen eines Teilsystems - d.h. einer Virtuellen Ressource - eine beliebige andere Virtuelle Ressource als Ersatz dienen kann.

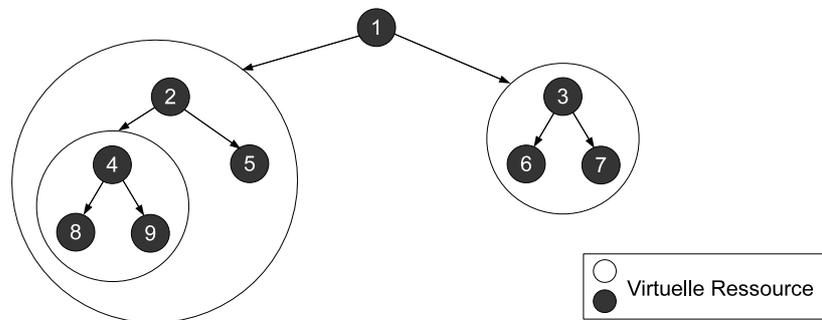


Abbildung 5.2: Exemplarische Organisation eines holonischen VK.

Abbildung 5.2 stellt die Struktur eines holonisch organisierten Informationssystems eines VK dar. Der Einflussbereich einer Virtuellen Ressource vr_i - d.h. insbesondere diejenigen dezentralen Anlagen, die vr_i direkt oder mittelbar repräsentiert - ergibt sich durch die Vereinigung der Einflussbereiche der jeweils untergeordneten Virtuellen Ressourcen. vr_1 repräsentiert dabei analog zu Abbildung 5.1 alle Ressourcen des entsprechenden VK. Die Selbstähnlichkeit deutet sich hier in der strukturellen Analogie der einzelnen, über mehrere Hierarchiestufen verteilten Virtuellen Ressourcen an.

5.2 Aktive Einsatzplanung in holonischen VK

Das bislang noch auf abstrakter Ebene diskutierte Konzept holonischer VK bietet - eine geeignete Implementierung vorausgesetzt - insbesondere das Potenzial, den Aufwand hinsichtlich der Steuerung und Überwachung der DER auf mehrere (teil-)autonome Komponenten zu verteilen. Bereits in Abschnitt 2.3.3 wurden auf Grundlage der Arbeiten von Fischer et al. [FSS03] unterschiedliche Möglichkeiten zur Implementierung

holonischer Strukturen mittels intelligenter Agenten diskutiert: Zusammenschlüsse autonomer Agenten, Vereinigungen von Agenten und moderierte Gruppen. Vor dem Hintergrund der bisherigen Diskussion der aktiven Einsatzplanung ist das Verständnis eines Holons als moderierte Gruppe besonders interessant, da es eine graduelle Abstufung der Autonomie einzelner Agenten ermöglicht. Im Kontext der reaktiven Einsatzplanung kann dies dazu verwendet werden, einerseits eine schnelle Reaktion auf Ereignisse zu ermöglichen und andererseits einen Teil der anlagenübergreifenden Koordination im Sinne einer Effizienzsteigerung an eine übergeordnete Komponente auszulagern. Im Weiteren wird daher das MAS der aktiven Einsatzplanung dahingehend erweitert, dass es die Bildung holonischer Strukturen ermöglicht. Dazu ist insbesondere auch eine Anpassung der Interaktionsprotokolle für Auftragskoordination und Kapazitätsverhandlungen im Sinne einer kaskadierenden Kooperation notwendig.

5.2.1 Virtuelle Ressourcen als moderierte Gruppen von Agenten

Ausgangspunkt der im Weiteren diskutierten Erweiterung der aktiven Einsatzplanung sind die Virtuellen Ressourcen, die als elementare Bausteine eines holonischen VK aufgefasst werden können. Im Sinne einer moderierten Gruppe lässt sich eine Virtuelle Ressource durch einen Head, der die Gruppe bei externen Verhandlungen repräsentiert, und einen Body, der sich aus einer Menge untergeordneter Virtueller Ressourcen zusammensetzt, darstellen.

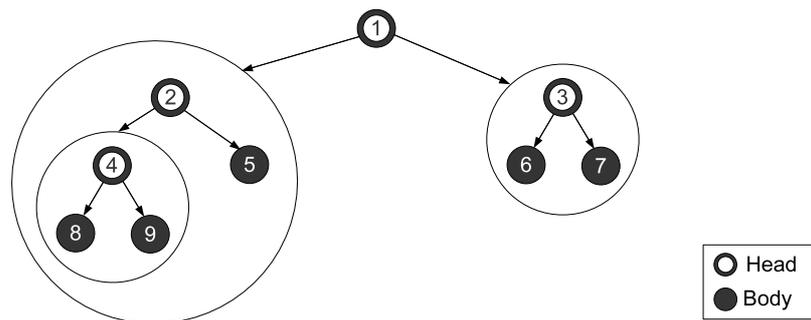


Abbildung 5.3: Holonische Organisation auf Basis moderierter Gruppen.

Abbildung 5.3 verdeutlicht dieses grundlegende Konzept anhand einer exemplarischen Holarchie: Holon 1 repräsentiert als Head die gesamte Holarchie und verwaltet die zwei Body-Holone 2 und 3, die wiederum als Head ihrer jeweiligen Gruppe agieren. Der Argumentation in [FSS03] folgend wird der Head eines Holons bzw. einer Virtuellen Ressource im Rahmen dieser Arbeit stets durch einen einzelnen informationstechnische Komponente repräsentiert, um zusätzlichen Koordinationsaufwand zwischen mehreren Head-Agenten zu vermeiden. Im Kontext holonischer VK wird dies durch atomare Virtuelle Ressourcen realisiert, die den konkreten Anknüpfungspunkt zu den Ressourcen- und Auftragagenten der aktiven Einsatzplanung darstellen: Eine atomare Virtuelle Ressource umfasst - wie Abbildung 5.4 dargestellt - lediglich einen Head, der durch einen

spezifischen R/OA abgebildet wird. Damit wird jede physikalische Anlage nach wie vor durch einen spezifischen R/OA repräsentiert, der den jeweiligen Fahrplan auf Einhaltung überwacht und im Falle eines Ereignisses eine zeitnahe Erreichung der lokalen Zulässigkeit ermöglicht.

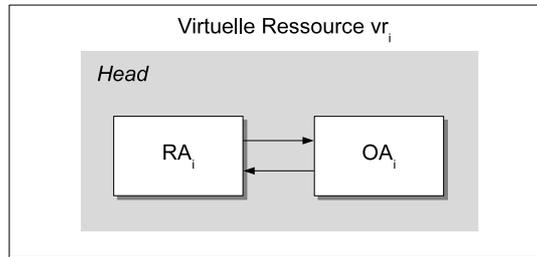


Abbildung 5.4: Eine atomare Virtuelle Ressource.

Abbildung 5.5 stellt den prinzipiellen Aufbau einer Virtuellen Ressource in Form einer moderierten Gruppe dar. Dem Head (1) sind dabei mehrere Body-Holone vr_2, \dots, vr_k (2) zugeordnet, deren Interessen er bei Verhandlungen mit externen Virtuellen Ressourcen berücksichtigt. Im Unterschied zur bislang diskutierten Umsetzung der aktiven Einsatzplanung kann der Aufwand zur Verarbeitung von Ereignissen durch die Generierung und Bearbeitung von Aufträgen nun auf mehrere Virtuelle Ressourcen - und damit auch auf unterschiedliche Head-R/OA - verteilt werden.

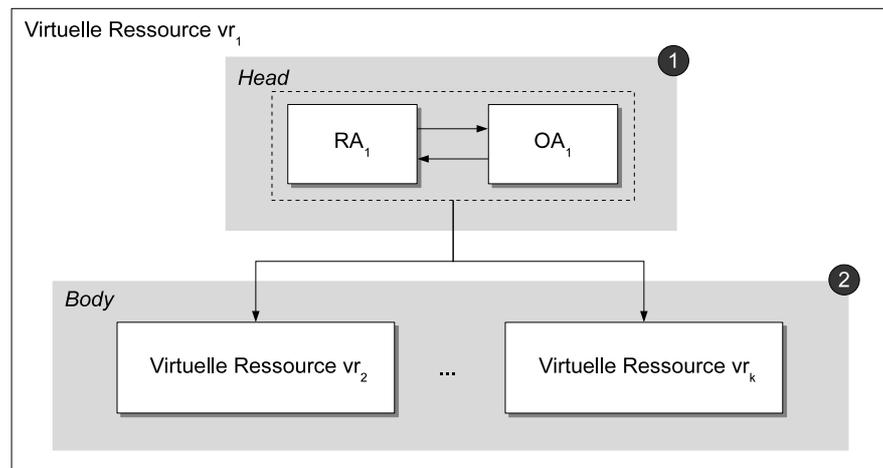


Abbildung 5.5: Eine Virtuelle Ressource in Form einer moderierten Gruppe.

Der folgende Spezialfall verdeutlicht die intendierte Erweiterung der aktiven Einsatzplanung: Ersetzt man die Virtuellen Ressourcen in Abbildung 5.5 jeweils durch eine atomare, so ergibt sich das in Abbildung 4.12 exemplarisch dargestellte Informationssystem eines VK. Die Koordination der Virtuellen Ressourcen innerhalb eines holonischen VK kann damit analog mittels Auftragskoordination und Kapazitätsverhandlungen durch den Head erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass eine Virtuelle Ressource nicht

mehr nur eine einzelne physikalische Anlage, sondern gemäß Begriffsklärung 2 auch eine Aggregation von Energiewandlungssystemen repräsentieren kann. Aus diesem Grund müssen sowohl das Konzept der Auftragskoordination als auch die im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen anfallenden Interaktionen hinsichtlich einer kaskadierenden Anwendung erweitert werden.

5.2.2 Kaskadierende Auftragskoordination

Die wesentliche Idee der Auftragskoordination ist es, vorzeichenverschiedene Abweichungen, die sich auf Gesamtsystemebene ganz oder teilweise ausgleichen können, zu erkennen und so Fahrplananpassungen zu vermeiden. Im Falle eines holonischen VK ist dabei zu beachten, dass unerfüllte Aufträge kaskadierend an die jeweils übergeordnete Virtuelle Ressource weitergeleitet werden können.

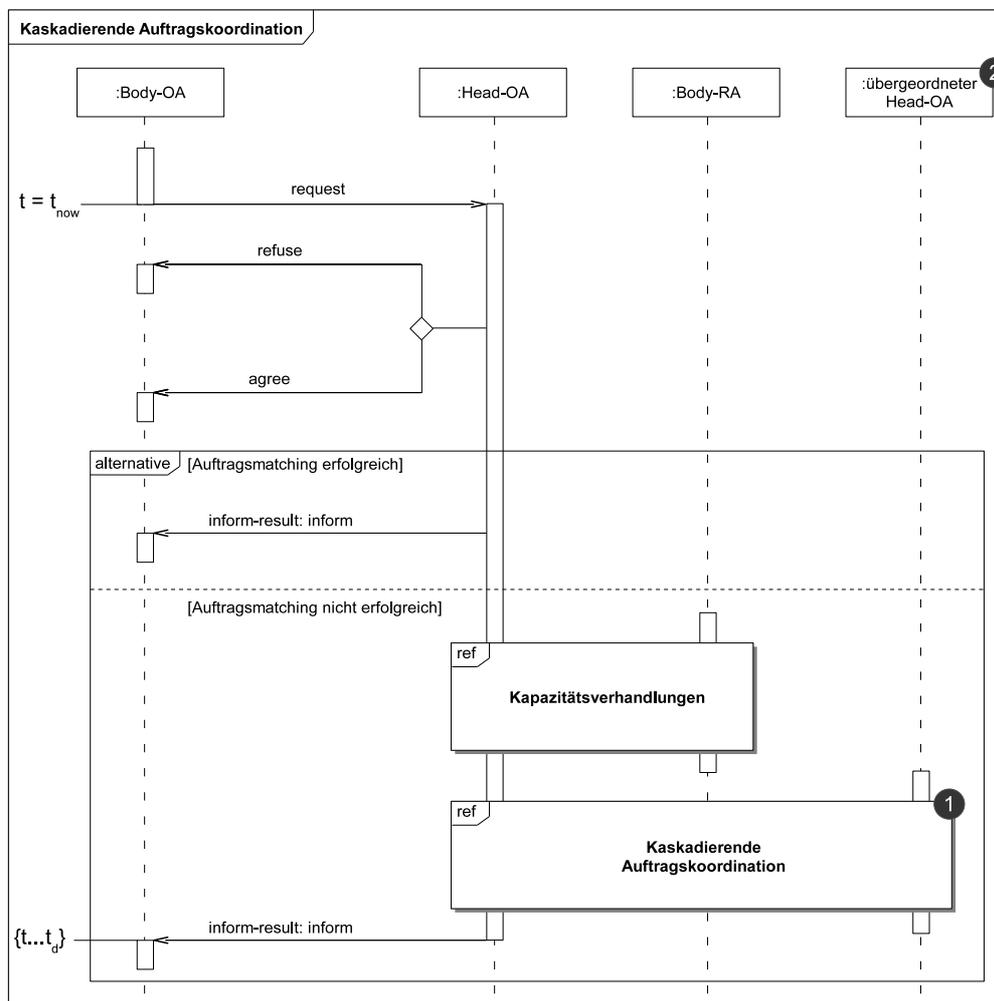


Abbildung 5.6: Die Interaktionen der kaskadierenden Auftragskoordination.

Abbildung 5.6 stellt eine Ergänzung der Auftragskoordination um eine kaskadierende Weiterleitung teilweise erfüllter Aufträge (1) an den jeweils übergeordneten Head einer Virtuellen Ressource (2) dar. Eine Kaskadierung von Aufträgen erfolgt erst nach lokal durchgeführten Kapazitätsverhandlungen². Eine Virtuelle Ressource strebt damit das Ziel an, Abweichungen möglichst lokal zu behandeln, bevor die jeweils übergeordnete Instanz informiert wird. Dadurch wird unter anderem auch der Koordinationsaufwand über die verschiedenen Virtuellen Ressourcen eines holonischen VK verteilt.

5.2.3 Kaskadierende Kapazitätsverhandlungen

Das bislang im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen eingesetzte CNCP zeigt bei einem kaskadierenden Einsatz im holonischen Kontext konzeptionelle Schwächen bezüglich der optimalen Nutzung vorhandener Kapazitäten. So kann es vorkommen, dass ein Holon eine Anfrage hinsichtlich einer zu einem früheren Zeitpunkt vorläufig abgeschlossenen Kapazitätszusage ablehnt, obwohl alternative Subholone noch über nutzbare Kapazitäten verfügen.

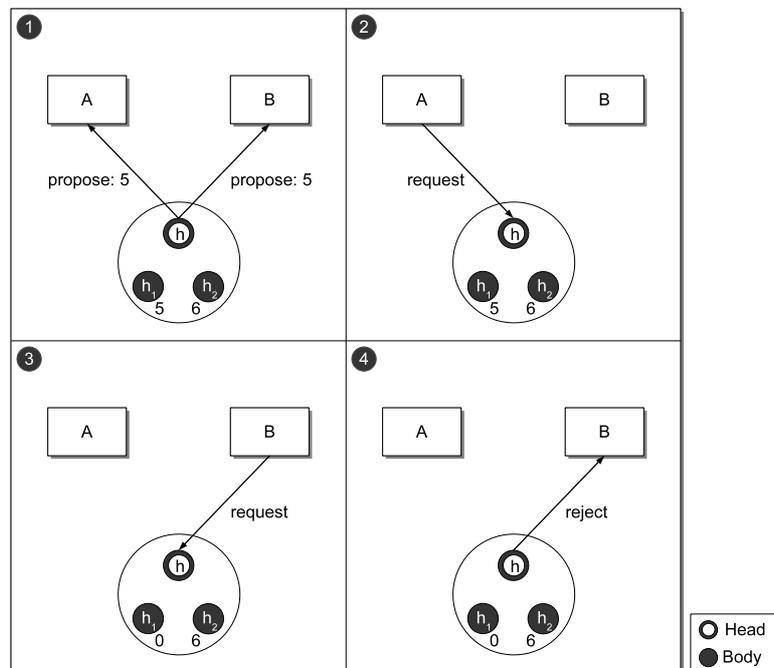


Abbildung 5.7: Suboptimale Ausnutzung von holonischen Kapazitäten durch das CNCP. In Anlehnung an [KSF02].

Abbildung 5.7 stellt exemplarisch einen solchen Fall dar. Im Rahmen einer parallel geführten Verhandlung mittels des CNCP sendet der Head eines Holons jeweils eine

² Das für die Kapazitätsverhandlungen in holonischen VK eingesetzte Holonic Contract Net with Confirmation Protocol wird in Abschnitt 5.2.3 diskutiert.

vorläufige Zusage über die Kapazität des Subholons h_1 an die Initiatoren A und B (1). Initiator A fordert im nächsten Schritt die entsprechende Leistung an, wodurch die Restkapazität des Subholons h_1 auf Null sinkt (2). Schließlich fordert auch Initiator B die vorläufig zugesagte Leistung an (3). Da diese inzwischen nicht mehr verfügbar ist, lehnt der Head h die Bereitstellung ab (4), obwohl Subholon h_2 noch über eine entsprechende Kapazität zur Deckung der Anfrage verfügt. Um die Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten zu optimieren und Situationen wie in Abbildung 5.7 zu vermeiden, werden die Kapazitätsverhandlungen in holonischen VK mittels des von Knabe et al. [KSF02] eingeführten Holonic Contract Net with Confirmation Protokoll (kurz: HCNCNP) gestaltet.

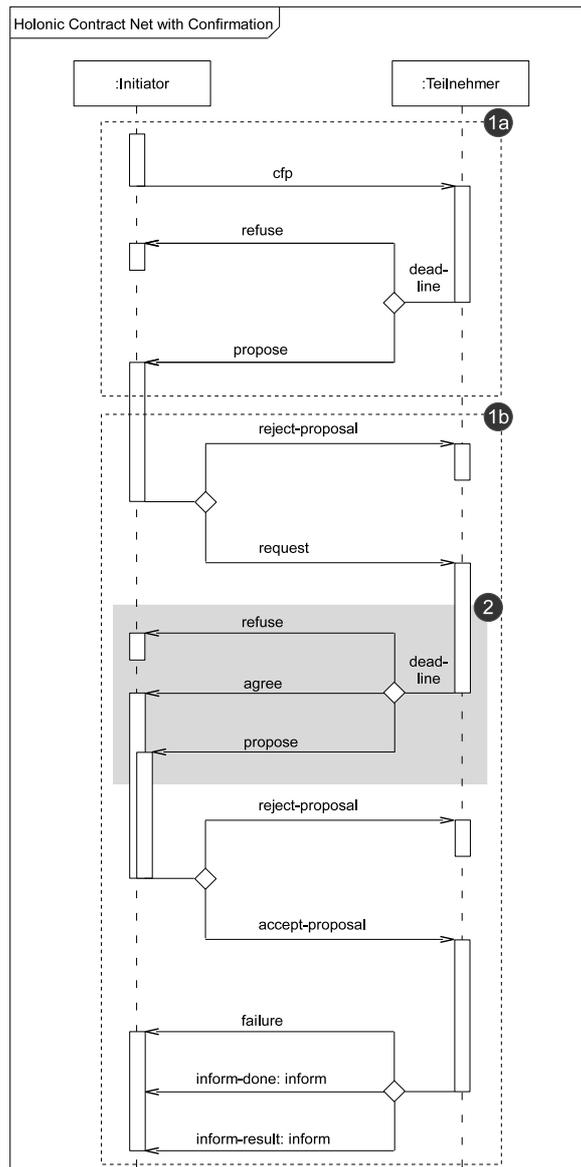


Abbildung 5.8: Das Holonic Contract Net with Confirmation Protokoll nach [KSF02].

Abbildung 5.8 stellt den Interaktionsverlauf des HCNCP dar. Analog zum CNCP lassen sich zwei Phasen unterscheiden: vorläufige Zusage (1a) und Inanspruchnahme von Leistungen (1b). Im Sinne einer Erweiterung³ des CNCP für Anwendungen im holonischen Kontext ermöglicht das HCNCP im Rahmen der Leistungsanspruchnahme eine Abgabe alternative Angebote (2), falls die vorläufig vereinbarte Leistung nicht mehr erbracht werden kann. Damit kann die diskutierte suboptimale Ausnutzung von Kapazitäten vermieden werden. Darüber hinaus ist auch im Rahmen der Kapazitätsverhandlung mittels des HCNCP ein kaskadierendes Auftreten von Interaktionen zu beachten. Dies betrifft insbesondere den Entscheidungsprozess im Rahmen der Angebotserstellung.

Angebotserstellung (Virtuelle Ressourcen): Für die Erstellung eines Kapazitätsangebots als Antwort auf eine Anfrage im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen wurde bislang der erwartete Nutzen einer gegebenenfalls teilweisen Erfüllung der nachgefragten Leistung gemäß Ungleichung 4.7 gegen die zu erwartenden Mehrkosten durch eine entsprechende Änderung des Fahrplans einer Ressource $r \in R$ abgewogen:

$$\gamma_{\text{soc}} \cdot u(o, p_o^{(r)}) - \gamma_{\text{ind}} \cdot u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) \geq 0. \quad (5.1)$$

Im Falle einer nicht-atomaren Virtuellen Ressource vr stellt sich dabei die Frage nach einem hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses optimalen Kapazitätsangebots unter Einbeziehung aller repräsentierten physikalischen Anlagen $r \in R_{vr}$. Zur Lösung dieses Problems initiiert der Head der Virtuellen Ressource vr selbst Kapazitätsverhandlungen mit den Virtuellen Ressourcen seines Body. Dabei kann es sinnvoll sein, die ursprünglich erhaltene Anfrage auf mehrere Teilanfragen zu verteilen oder mit anderen Anfragen zu kombinieren⁴. Als Ergebnis der kaskadierten Verhandlungen wird ein aggregiertes Angebot bzgl. der Bereitstellung einer Kapazität

$$p_o^{(vr)} := \sum_{r \in R_{vr}} p_o^{(r)} \quad (5.2)$$

erstellt, das den - gegebenenfalls negativen - aggregierten Nutzen

$$u^{(vr)}(t_o, p_o^{(vr)}) := \sum_{r \in R_{vr}} u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) \quad (5.3)$$

mit sich bringt. Insgesamt ergibt sich aus Gleichungen 5.1 bis 5.3 das folgende, in aggregierter Form dargestellte Entscheidungskriterium für die Angebotserstellung einer Virtuellen Ressource:

$$\sum_{r \in R_{vr}} \gamma_{\text{soc}}^{(r)} \cdot u(o, p_o^{(r)}) - \sum_{r \in R_{vr}} \gamma_{\text{ind}}^{(r)} \cdot u^{(r)}(t_o, p_o^{(r)}) \geq 0. \quad (5.4)$$

³ Vergleiche dazu Abbildung 4.14 auf Seite 107.

⁴ Siehe dazu auch die Diskussion bzgl. der Anfragegestaltung auf Seite 113.

5.3 Adaptive Virtualisierung von DER

Mit der Idee der Virtuellen Ressourcen und der im letzten Abschnitt diskutierten Erweiterung der aktiven Einsatzplanung um kaskadierende Interaktionen ist es möglich, ein holonisches VK gemäß Begriffsklärung 3 zu realisieren. Bislang ungeklärt ist allerdings noch die konkrete Ausgestaltung des holonischen Systems, d.h. die Frage, nach welchen Kriterien die dezentralen Anlagen eines VK zu Virtuellen Ressourcen aggregiert werden sollten. Dabei sind aus Sicht des Gesamtsystems folgende Auswirkungen einer Zusammenfassung von R/OA in einer holonischen Organisation zu berücksichtigen:

- Die Qualität des Einsatzplans kann sich insbesondere hinsichtlich der Soft Constraints einzelner Anlagen verschlechtern, da Ereignisse bzw. Aufträge gemäß der in Abbildung 5.6 dargestellten Auftragskoordination zunächst innerhalb einer Virtuellen Ressource behandelt werden. Somit werden potenziell bessere Kapazitätsangebote von anderen Virtuellen Ressourcen gegebenenfalls nicht ausgenutzt.
- Falls Aufträge nicht oder nur teilweise lokal erfüllt werden können, werden sie im nachfolgenden Schritt an die jeweils übergeordnete Virtuelle Ressource weitergeleitet. Dadurch kann der Kommunikationsaufwand bzw. das Nachrichtenaufkommen im Vergleich zu einer zentralisierten Lösung deutlich größer ausfallen.
- Mit einem steigenden Nachrichtenaufkommen wächst auch der Entscheidungsaufwand, da tendenziell mehr Anfragen beantwortet bzw. Angebote erstellt werden müssen als bei einer zentralen Verwaltung von Aufträgen. Insbesondere die für die Erstellung von Kapazitätsangeboten von nicht-atomaren Virtuellen Ressourcen notwendige Kaskadierung der Kapazitätsverhandlungen trägt zu diesem Effekt bei.

Aufgrund dieser Beobachtungen lassen sich im Wesentlichen zwei unerwünschte Effekte einer Virtualisierung von DER festhalten: Eine tendenziell negative Beeinträchtigung der Einsatzplanqualität sowie ein gegebenenfalls steigendes Nachrichtenaufkommen. Dem gegenüber steht die Verteilung des notwendigen Entscheidungsaufwands auf mehrere Agenten, die mittels voneinander unabhängiger Informationssysteme realisiert werden können und damit im besten Fall eine aufgrund der multiplen Redundanzmöglichkeiten wesentlich gestiegene Ausfallsicherheit des Gesamtsystems bieten. Holonische VK sollten demnach im Idealfall so organisiert sein, dass im Vergleich zu einer zentralisierten Lösung die Einsatzplanqualität bei praktisch gleichbleibendem Kommunikationsaufwand erhalten werden kann.

5.3.1 Virtualisierungskriterien

Hinsichtlich der Einsatzplanqualität sei angemerkt, dass durch die kaskadierende Auftragskoordination grundsätzlich sichergestellt ist, dass die Kapazität einzelner Ressourcen zur Kompensation von Fahrplanabweichungen auch ausgeschöpft werden kann. Im Unterschied zum nicht-kaskadierenden bzw. zentralisierten Fall kann die Koordination

der Aufträge allerdings einen längeren zeitlichen Rahmen erfordern, so dass Fahrplananpassungen unter Umständen nicht rechtzeitig vor Erreichung der jeweiligen Deadline eines Auftrags zwischen den unterschiedlichen R/OA abgestimmt werden können. Eine konkrete Untersuchung dieser Einschränkung ist im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Abhängigkeit der zeitlichen Effekte von der anwendungsfallabhängig eingesetzten Technologie allerdings nicht möglich⁵, weshalb die Laufzeiten von Nachrichten bzw. die Zeitspanne zur Erfüllung eines Auftrags als mögliches Virtualisierungskriterium hier ausscheidet. Auch eine Beurteilung der Auswirkungen einer bestimmten Aggregation auf die Einsatzplanqualität ist nur schwer möglich. Dabei spielen neben den kaum abschätzbaren Effekten durch zeitliche Verzögerungen in der Koordination insbesondere die stochastischen Einflüsse des Anlagenkontextes auf den Zustand eines DER eine wesentliche Rolle, da Ereignisse - und damit auch Fahrplanabweichungen inklusive ihrer optimalen Kompensation - nur prognostizierbar, aber nicht exakt vorhersehbar sind. Eine auf dieser Grundlage als optimal prognostizierte holonische Struktur kann sich in der Retrospektive im schlimmsten Fall sogar als maximal ungünstig herausstellen. Aus diesem Grund wird die Einsatzplanqualität im Weiteren nicht als Kriterium für die Bildung Virtueller Ressourcen herangezogen. Gleichwohl werden die Auswirkungen der holonischen Organisation auf die Qualität sowohl der einzelnen Anlagenfahrpläne als auch des Gesamtfahrplans eines VK im Rahmen der Evaluation in Abschnitt 6.3 kritisch untersucht. Als wesentliches Organisationskriterium bleibt damit der - am Nachrichtenaufkommen gemessene - Kommunikationsaufwand. Wie bereits einleitend festgestellt, steigt der Kommunikationsaufwand dann stark an, wenn Aufträge nicht mehr lokal erfüllt werden können und an die übergeordnete Virtuelle Ressource kaskadiert werden müssen. Eine hinsichtlich dieses Kriteriums optimale Gestaltung eines holonischen VK liegt demnach dann vor, wenn

- sämtliche zur Laufzeit auftretenden Ereignisse ohne kaskadierende Koordination innerhalb einer Virtuellen Ressource behandelt werden können, und
- die Anzahl Virtueller Ressourcen möglichst groß ist.

Letzteres stellt dabei sicher, dass der anfallende Entscheidungsaufwand auf möglichst viele Head-R/OA verteilt wird. Ziel einer holonischen Organisation von R/OA sollte in diesem Sinne sein, die dezentralen Anlagen eines VK derart zu Virtuellen Ressourcen zusammenzufassen, dass die aggregierten Kapazitäten dazu genutzt werden können, die jeweils lokal auftretenden Fahrplanabweichungen zu kompensieren. Die folgenden Definitionen formalisieren dieses Kriterium.

Definition 5.2 (Aggregierte Kapazität)

Für eine Virtuelle Ressource vr ist die **aggregierte Kapazität** c_{vr} wie folgt definiert:

$$c_{vr}(t) := \left\{ p^{(r_1)} + \dots + p^{(r_n)} \mid (p^{(r_1)}, \dots, p^{(r_n)}) \in c_{r_1}(t) \times \dots \times c_{r_n}(t) \right\}$$

⁵ Siehe dazu auch die Diskussion möglicher Folgearbeiten in Kapitel 7.

Die aggregierte Kapazität einer Virtuellen Ressource vr umfasst also alle denkbaren Leistungsabgaben, die sich durch kombinatorische Verknüpfung der Modulationsstufen der untergeordneten Ressourcen r_1, \dots, r_n ergeben. Dabei können ein oder mehrere r_i natürlich selbst wiederum Virtuelle Ressourcen sein. Analog zur Kapazität können auch die Fahrplanabweichungen aggregiert aufgefasst werden:

Definition 5.3 (Aggregierte Fahrplanabweichung)

Für eine Virtuelle Ressource vr ist die aggregierte Fahrplanabweichung $\delta_{s_{vr}}$ definiert als

$$\forall t \in T : \delta_{s_{vr}}(t) := \sum_{r \in R_{vr}} \delta_{s_r}(t).$$

Darauf aufbauend sei die Nutzung einer Kapazität c zur Kompensation einer Abweichung δ wie folgt definiert:

Definition 5.4 (Kapazitätsnutzung)

Die optimale Nutzung einer Kapazität c zur Kompensation einer Abweichung δ ist denotiert durch $c \triangleright \delta$. Dabei entspricht $c \triangleright \delta$ dem Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} \min \quad & \|\delta + s\| \\ \text{s.t.} \quad & \forall t \in T : s(t) \in c(t). \end{aligned}$$

Das Ergebnis einer Kapazitätsnutzung ist eine Fahrplananpassung s' , die eine optimale Lösung dieses Problems darstellt, d.h. $c \triangleright \delta = s'$ mit $\forall s \in S_C : \|\delta + s'\| \leq \|\delta + s\|$.

Ziel der Kapazitätsnutzung ist eine vollständige Kompensation von Fahrplanabweichungen innerhalb eines VK. Das MAS der aktiven Einsatzplanung löst obiges Optimierungsproblem in verteilter Art und Weise durch die Generierung und Verarbeitung von Aufträgen. Im Idealfall kann die vorhandene Kapazität dazu genutzt werden, die lokal vorliegenden Abweichungen vollständig zu kompensieren, d.h. $\exists s' \in S : \|\delta + s'\| = 0$. Gelingt dies innerhalb einer Virtuellen Ressource, so kann man sie als *ausgeglichen* bezeichnen, da sie nicht von der Bereitstellung von Leistungskapazitäten anderer Virtueller Ressourcen abhängig ist.

Definition 5.5 (Ausgeglichene Virtuelle Ressource)

Eine Virtuelle Ressource vr heißt **ausgeglichen**, wenn die aggregierte Kapazität c_{vr} der Ressourcen $r \in R_{vr}$ dazu genutzt werden kann, die aggregierte Fahrplanabweichung $\delta_{s_{vr}}$ vollständig zu kompensieren:

$$\exists s' \in S : s' = c_{vr} \triangleright \delta_{s_{vr}} \text{ mit } \|\delta_{s_{vr}} + s'\| = 0.$$

5.3.2 Adaptive Virtualisierung

Einer ausgeglichenen Virtuellen Ressource vr gelingt es im Idealfall längerfristig, die von Ereignissen ausgelösten Fahrplanabweichungen der durch vr repräsentierten dezentralen Anlagen durch eine entsprechende Nutzung ihrer Kapazitäten auszugleichen. Damit ist also zumindest hinsichtlich des reaktiven Anteils der aktiven Einsatzplanung keine Weiterleitung unerfüllter Aufträge an das übergeordnete Holon notwendig. Analog zur Diskussion hinsichtlich der Fahrplanqualität ist allerdings auch hier zu beachten, dass eine Festlegung der holonischen Struktur a priori - z.B. Day-Ahead im Rahmen der prädiktiven Einsatzplanung - aufgrund der Zustandsabhängigkeit des Ausgeglichenheitsbegriffs zur Laufzeit nicht zu einer optimalen Organisation eines holonischen VK führen muss. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit eine dynamische, sich an den jeweils aktuellen Anlagenzustand anpassende - d.h. adaptive - Virtualisierung von dezentralen Energiesystemen eines VK vorgeschlagen. Zunächst sei jedoch die grundlegende Idee einer adaptiven Virtualisierung mittels eines Beispiels illustriert.

Beispiel 5.1: Adaptive Virtualisierung

Gegeben sei das in Abbildung 5.9 exemplarisch dargestellte VK mit den Virtuellen Ressourcen vr_1 bis vr_5 . Das VK wird von vr_1 repräsentiert; vr_2 bis vr_5 sind jeweils untergeordnete Holone. Zur Laufzeit verfügen die Virtuellen Ressourcen vr_i einerseits über die Kapazität c_{vr_i} und kennen andererseits die aktuellen, aggregierten Fahrplanabweichungen $\delta_{s_{vr_i}}$ der repräsentierten Ressourcen $r \in R_{vr_i}$ gemäß Definition 5.3. Zusätzlich können - wie etwa für KWK-Anlagen in Abschnitt 6.1.2 diskutiert - auch zukünftig zu erwartende Fahrplanabweichungen aus dem aktuellen Systemzustand abgeleitet werden. Für vr_2 und vr_3 gelte darüber hinaus folgendes:

$$\|\delta_{s_{vr_2}} + (c_{vr_3} \triangleright \delta_{s_{vr_2}})\| = 0 \wedge \|\delta_{s_{vr_3}} + (c_{vr_2} \triangleright \delta_{s_{vr_3}})\| = 0.$$

Dann können vr_2 und vr_3 mit $s' = (c_{vr_3} \triangleright \delta_{s_{vr_2}}) + (c_{vr_2} \triangleright \delta_{s_{vr_3}})$ zu einer ausgeglichenen Virtuellen Ressource im Sinne von Definition 5.5 zusammengefasst werden.

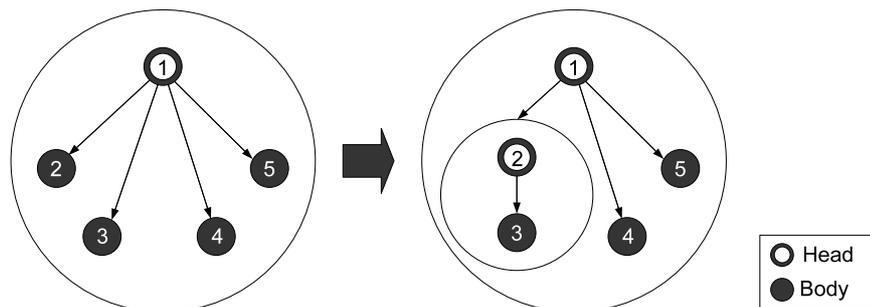


Abbildung 5.9: Adaptive Reorganisation von Virtuellen Ressourcen.

Beispiel 5.1 verdeutlicht den intendierten Effekt einer Zusammenfassung Virtueller Ressourcen: Der Entscheidungsaufwand bezüglich der Koordination der dezentralen An-

lagen des VK wird auf mehrere Head-R/OA verteilt, ohne dass - im besten Fall - der Kommunikationsaufwand steigt, da Fahrplanabweichung lokal behandelt werden können und nicht an die übergeordnete Virtuelle Ressource kaskadiert werden müssen. Im Weiteren stellt sich nun die Frage, auf welche Weise ausgeglichene Virtuelle Ressourcen im laufenden Betrieb gebildet werden können. Dazu wird im Folgenden eine Erweiterung der bislang im Rahmen der aktiven Einsatzplanung betrachteten Interaktionen als Grundlage eines interaktiven Reorganisationsprozesses eingeführt, der auf dem diskutierten Kriterium der Ausgeglichenheit basiert.

Zunächst sei der Zusammenschluss von Virtuellen Ressourcen definiert:

Begriffsklärung 4 (Zusammenschluss von Virtuellen Ressourcen)

Für zwei Virtuelle Ressourcen vr_1 und vr_2 ist der **Zusammenschluss** $vr_1 \oplus vr_2$ eine informationstechnische Aggregation der Vereinigung der durch vr_1 und vr_2 repräsentierten Ressourcen, d.h.

$$R_{vr_1 \oplus vr_2} := R_{vr_1} \cup R_{vr_2}.$$

Hinsichtlich Begriffsklärung 4 ist Folgendes zu bemerken: Ein Zusammenschluss von mehr als zwei Virtuellen Ressourcen kann als Verkettung bilateraler Zusammenschlüsse dargestellt werden, so dass

$$R_{vr_1 \oplus \dots \oplus vr_k} := \bigcup_{i=1, \dots, k} R_{vr_i} \quad (5.5)$$

erfüllt ist. Darüber hinaus werden keine Aussagen über die aus einem Zusammenschluss resultierende informationstechnische Organisation getroffen. Dabei sind grundsätzlich mehrere Möglichkeiten vorstellbar:

Strukturerhaltende Reorganisation: Bei einem strukturerhaltenden Zusammenschluss wird eine der beiden Virtuellen Ressourcen zu einem Body-Element der jeweils anderen⁶, ohne dabei die eigene Organisation aufzugeben. Dabei bleiben die hierarchischen Beziehungen innerhalb eines holonischen VK weitestgehend erhalten; zudem entsteht durch die Reorganisation kein weiterer Organisations- oder Kommunikationsaufwand.

Vollständige Reorganisation: Im Gegensatz zum strukturerhaltenden Ansatz werden die Virtuellen Ressourcen im Rahmen einer vollständigen Reorganisation bis auf die - gemäß Begriffsklärung 2 zu verstehende - atomare Ebene aufgelöst und hinsichtlich des Ausgeglichenheitskriteriums vollständig rekombiniert. Die Reorganisation kann darüber hinaus durch weitere Kriterien - etwa die Realisierung einer möglichst flachen oder möglichst ausbalancierten Hierarchie bzw. Baumstruktur - beeinflusst bzw. gesteuert werden. Das Finden einer - bezüglich der gewählten Kriterien - optimalen neuen Organisation ist allerdings mit einem erheblichen Aufwand verbunden, da

⁶ Siehe dazu die Diskussion in Abschnitt 5.3.3 bezüglich der Auswahl eines neuen Head.

prinzipiell sämtliche Kombinationsmöglichkeiten der R/OA zu nicht-atomaren Holonen bewertet werden müssten.

Teilweise strukturerhaltende Reorganisation: Als Verallgemeinerung der obigen Reorganisationsansätze wird bei einem teilweise strukturerhaltenden Zusammenschluss die interne Organisation der beteiligten Virtuellen Ressourcen - aufgefasst als Baumstruktur - nur bis zu einer festgelegten Tiefe aufgelöst. Die resultierenden Holone können dann in unterschiedlicher Weise zu neuen Virtuellen Ressourcen zusammengesetzt werden, wobei wiederum unterschiedliche Kriterien in die Reorganisation miteinbezogen werden können. Aufgrund der im Vergleich zur vollständigen Reorganisation in der Regel geringeren Anzahl an „Bausteinen“ fällt der Aufwand zur Strukturbildung allerdings geringer aus.

Die weitere Diskussion der adaptionen Reorganisation ist aus Gründen des Umfangs dieser Arbeit auf strukturerhaltende Zusammenschlüsse beschränkt; mögliche Anknüpfungspunkte zu graphentheoretischen Optimierungsansätzen im Rahmen der teilweise strukturerhaltenden bzw. vollständigen Reorganisation werden aber in Abschnitt 7.3 aufgezeigt.

Um über einen Zusammenschluss zweier Virtueller Ressourcen vr_1, vr_2 entscheiden zu können, ist es im Sinne der Ausgeglichenheit nach Definition 5.5 notwendig zu wissen, ob die jeweils verfügbaren Kapazitäten c_{vr_1} bzw. c_{vr_2} dazu genutzt werden können, die aggregierte Fahrplanabweichung $\delta = \delta_{s_{vr_1}} + \delta_{s_{vr_2}}$ zu vermindern. Dazu müssen die lokal vorliegenden, entscheidungsrelevanten Informationen geeignet ausgetauscht werden, um $c_{vr_1} \triangleright \delta_{s_{vr_2}}$ bzw. $c_{vr_2} \triangleright \delta_{s_{vr_1}}$ berechnen und zu einer gemeinsamen Entscheidung über einen möglichen Zusammenschluss kommen zu können. Eine Möglichkeit, an dieser Stelle eine adaptive Reorganisation des MAS zu ermöglichen, ist - etwa im Sinne des MetaMorph-Ansatzes von Maturana et al. [MSN99] - eine Einführung von Mediatoragenten, die zwischen unterschiedlichen Interessen vermitteln und entsprechende Lösungsvorschläge in Form von Organisationsanpassungen unterbreiten können. Vor dem Hintergrund des Ausgeglichenheitskriteriums ist allerdings festzuhalten, dass eine Lösung des Optimierungsproblems aus Definition 5.4 - d.h. der Bestimmung einer optimalen Kapazitätsnutzung - durch einen externen Agenten nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren ist, da dazu das Wissen über den Zustand aller durch die Virtuellen Ressourcen repräsentierten DER notwendig ist. Im Folgenden wird daher ein bilateral gestalteter Interaktionsprozess vorgestellt, der sich durch eine einfache Integrierbarkeit in den Prozess der aktiven Einsatzplanung auszeichnet und ohne eine globale Sicht auf den Systemzustand eines VK auskommt.

Abbildung 5.10 stellt ein einfaches Interaktionsprotokoll dar, das im Weiteren als *Virtualisierungsverhandlungen* bezeichnet werden soll und als Grundlage für den avisierten Selbstorganisationsprozess dient. Wesentliches Ziel der Interaktionen ist der Austausch von Informationen, die für eine Entscheidung über einen möglichen Zusammenschluss zweier Virtueller Ressourcen notwendig sind. Dazu initiiert Virtuelle Ressource vr_1 die Virtualisierungsverhandlungen durch Senden einer Anfrage (1) an eine beliebige andere Virtuelle Ressource vr_2 eines holonischen VK. Die Anfrage umfasst

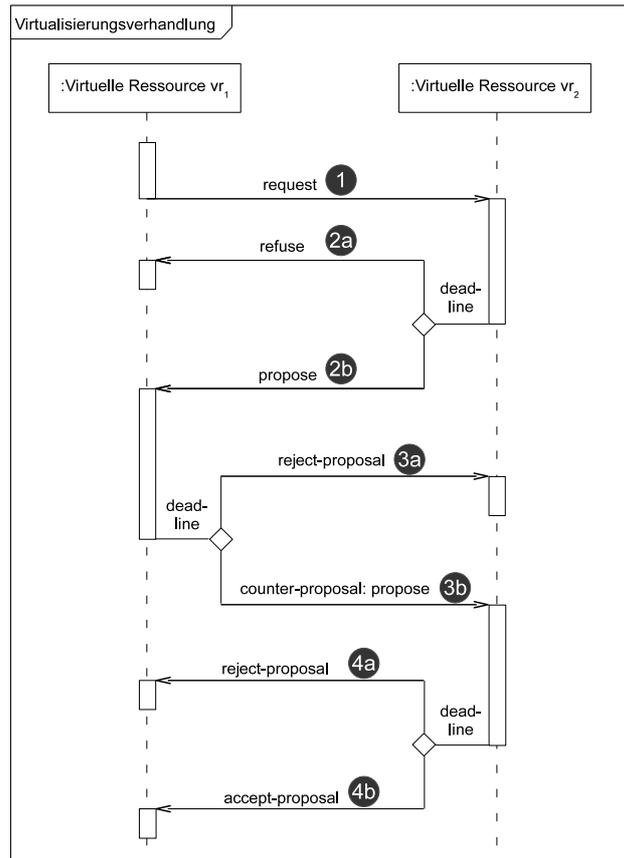


Abbildung 5.10: Interaktionsprotokoll für Virtualisierungsverhandlungen.

dabei die aktuellen und erwarteten Fahrplanabweichungen $\delta_{s_{vr_1}}$ sowie eine Deadline, bis zu der spätestens geantwortet werden soll. Auf der Grundlage dieser Anfrage kann vr_2 die optimale Kapazitätsnutzung $c_{vr_2} \triangleright \delta_{s_{vr_1}}$ errechnen und daraufhin einen Zusammenschluss ablehnen (2a) oder ein Kapazitätsangebot inklusive der eigenen Fahrplanabweichungen δ_{vr_2} übermitteln (2b). Damit ist vr_1 in der Lage, einerseits selbst das Kapazitätsangebot $c_{vr_1} \triangleright \delta_{s_{vr_2}}$ zu errechnen, und andererseits die zu erwartenden Effekte eines Zusammenschlusses hinsichtlich der resultierenden Fahrplanabweichungen abzuschätzen. Anhand dieser Abschätzung lehnt vr_1 entweder einen Zusammenschluss ab (3a) oder schlägt einen solchen unter Übermittlung des eigenen Kapazitätsangebot an vr_2 vor (3b). Damit verfügen beide Virtuelle Ressourcen über die selbe Entscheidungsgrundlage in Form einer übergreifenden Fahrplananpassung $s' = (c_{vr_2} \triangleright \delta_{s_{vr_1}}) + (c_{vr_1} \triangleright \delta_{s_{vr_2}})$. Dennoch kann vr_2 aufgrund unterschiedlicher Einschätzung der zu erwartenden Auswirkungen zu dem Schluss gelangen, dass eine Reorganisation nicht sinnvoll ist. In diesem Fall lehnt er das Angebot von vr_1 ab (4a); andernfalls stimmt er zu und schließt sich mit vr_1 zusammen (4b). Aus organisatorischer Sicht besteht ein solcher Zusammenschluss aus der Abmeldung einer Virtuellen Ressourcen bei seinem bisherigen übergeordneten Holon und der Registrierung beim jeweils neuen Head. Die

Entscheidung, welche der beiden Virtuellen Ressourcen dabei zum Head wird, wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

5.3.3 Entscheidungsfindung

Virtualisierungsverhandlungen können prinzipiell zu jedem beliebigen Zeitpunkt von einer Virtuellen Ressource initiiert werden. Eine wesentliche Frage dabei ist, mit *wem* über einen Zusammenschluss verhandelt wird. Dazu sei Definition 4.35 wie folgt erweitert:

Definition 5.6 (Erweiterter Auftrag)

Ein **erweiterter Auftrag** sei durch das 7-Tupel $o = (id, t_d, p_o, t_o, \overline{ps}_o, u(o), \alpha_o)$ charakterisiert. Dabei sei der **Bearbeitungsstand** (engl: processing state) \overline{ps}_o des Auftrags definiert durch

$$\overline{ps}_o := \left\{ (id_o^{(i)}, \overline{p}_o^{(i)}) \mid i \in I_o \right\}.$$

Die bereits erworbene Leistungskapazität \overline{p}_o ergibt sich dann durch

$$\overline{p}_o := \sum_{i \in I_o} \overline{p}_o^{(i)}.$$

I_o ist dabei eine auftragsspezifische Indexmenge, die sich als Ergebnis der Auftragskoordination und der Kapazitätsverhandlungen ergibt.

Der Bearbeitungsstand \overline{ps}_o eines erweiterten Auftrags o liegt damit in Form einer Menge von Paaren $(id_o^{(i)}, \overline{p}_o^{(i)})$ vor, die jeweils aus dem Bezeichner $id_o^{(i)}$ eines RA und der zugesagten Leistungskapazität $\overline{p}_o^{(i)}$ der zugehörigen Ressource bestehen. Anhand der im Laufe der Zeit erworbenen Leistungskapazitäten und deren Zuordnung zu spezifischen „Lieferanten“ kann ein R/OA eine individuelle Liste von Verhandlungspartnern pflegen, die nach einem bestimmten Kriterium - etwa absteigend nach den aufsummierten Leistungszusagen - sortiert ist. Ausgehend von dieser Liste kann sich ein R/OA etwa im Anschluss an die Bestätigung einer vorläufig zugesagten Kapazität⁷ mit den entsprechenden Verhandlungspartnern über einen Zusammenschluss austauschen, der beiden Seite von Nutzen sein kann.

Verhandlungsinittierung: Übergeordnetes Ziel der Virtualisierungsverhandlungen ist es, ausgeglichene Virtuelle Ressourcen zu schaffen. Dabei sollte der langfristige Nutzen einer Reorganisation den dazu notwendigen Kommunikations- und Koordinationsaufwand aufwiegen. Insbesondere sollte vor dem Hintergrund der Dynamik der dezentralen Energieversorgung ein Systemzustand mit instabilen bzw. häufig wechselnden holonischen Strukturen vermieden werden, um weiterhin eine reaktionsfähige und qualitativ hochwertige Koordination der DER gewährleisten zu können. Aus

⁷ Siehe dazu Abbildung 4.15 auf Seite 108.

diesem Grund initiieren Virtuelle Ressourcen - bzw. deren Head-R/OA - nur dann Virtualisierungsverhandlungen, wenn die lokalen Aufträge langfristig nicht zufriedenstellend erfüllt werden können. Als Indikator dient dabei die Abweichung des durchschnittlichen Erfüllungsgrads $\kappa(o_i)$ der von einem Head verwalteten Aufträge o_1, \dots, o_n von der exakten Erfüllung gemäß Definition 4.36:

$$\left| 1 - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1, \dots, n} |\kappa(o_i)| \right| > \epsilon_\kappa. \quad (5.6)$$

Der Faktor ϵ_κ ist dabei ein Schwellenwert, der eine tolerierbare „Unzufriedenheit“ einer Virtuellen Ressource mit ihrer aktuellen strukturellen Integration ausdrückt⁸. Durch die Nutzung der ohnehin durch den Head verwalteten Aufträge ist keine direkte Information über den Zustand der untergeordneten Virtuellen Ressourcen bzw. deren jeweils repräsentierten DER notwendig. Um eine zu frühzeitige Entscheidung hinsichtlich einer Reorganisation zu vermeiden, kann darüber hinaus festgelegt werden, dass eine Überschreitung des Schwellenwerts ϵ_κ mindestens einen Zeitraum von n_κ Planungszeitpunkten andauern muss.

Anfragegestaltung: Die initiale Anfrage einer Virtualisierungsverhandlung dient dazu, die aktuellen und aufgrund des lokalen Systemzustands zukünftig erwarteten Abweichungen vom aggregierten Fahrplan $\delta_{s_{vr}}$ einer Virtuellen Ressource an den Verhandlungspartner, der mittels der bereits diskutierten Liste von Agentenbezeichnern ausgewählt werden kann, zu kommunizieren. Analog zur Verhandlungsinitiierung dienen die lokal durch den Head verwalteten Aufträge o_1, \dots, o_n als Indikator für den aktuellen und zukünftigen Kapazitätsbedarf. Dazu sei für jeden individuellen Planungszeitpunkt t , für den mindestens ein Auftrag vorliegt, I_t die Indexmenge aller von einem Head verwalteten Aufträge o_i mit $t_{o_i} = t$. Durch Aufsummieren der jeweils noch zur exakten Erfüllung der Aufträge o_i , $i \in I_t$ benötigten Leistungskapazitäten wird der zum Zeitpunkt t bestehende Bedarf an Ausgleichskapazität $p_o^{(t)}$ ermittelt:

$$p_o^{(t)} := \sum_{i \in I_t} (p_{o_i} - \bar{p}_{o_i}). \quad (5.7)$$

Eine Anfrage im Rahmen der Virtualisierungsverhandlungen umfasst für jeden Planungszeitpunkt t mit $I_t \neq \emptyset$ einen neu erstellten Auftrag mit Zielvorgabe $p_o^{(t)}$.

Angebotserstellung: Die Entscheidung über die Erstellung eines Angebots bzw. die Absage der Virtualisierungsverhandlungen erfolgt unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 5.2.2 diskutierten kaskadierenden Auftragskoordination. Das durch die Anfrage erhaltene „Auftragsbündel“ wird dazu - mit Ausnahme der Kaskadierung an die übergeordnete Virtuelle Ressource - in den laufenden Koordinationsprozess einbezogen. Die planungszeitpunktabhängigen Kapazitätsangebote können dann als Angebot

⁸ Eine Übersicht der Parameter, die einen Einfluss auf die Entscheidungsfindung der adaptiven Reorganisation haben, findet sich am Ende dieses Kapitels.

an den Initiator der Virtualisierungsverhandlungen gesendet werden. Eine Absage erfolgt genau dann, wenn keiner der Aufträge teilweise erfüllt werden konnte; im Falle einer Zusage wird die Antwort analog zur Anfragegestaltung des Initiators um die eigenen Aufträge mit den entsprechenden Zielvorgaben $p_o^{(t)}$ ergänzt.

Zusammenschluss: Nach Erhalt des Kapazitätsangebots in Form der teilweise erfüllten Aufträge o_{t_1}, \dots, o_{t_k} prüft der Initiator der Virtualisierungsverhandlungen den sich dadurch neu ergebenden durchschnittlichen Erfüllungsgrad. Falls

$$\left| 1 - \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1, \dots, k} |\kappa(o_{t_i})| \right| \leq \epsilon_\kappa \quad (5.8)$$

erfüllt ist, nimmt er das Angebot durch Übermittlung eines Gegenangebots an. Letzters wird dabei analog zu obiger Diskussion durch Einbindung der erhaltenen Aufträge in den entsprechenden Koordinationsprozess erstellt. Falls der Verhandlungspartner das Gegenangebot annimmt, reorganisieren sich die Beteiligten im Sinne eines strukturerhaltenden Zusammenschlusses durch Bestimmung eines gemeinsamen Head zu einer neuen Virtuellen Ressource. Um eine - im Sinne eines Graphen bzw. informationstechnischen Baums - möglichst ausbalancierte holonische Struktur zu erhalten, die den Koordinationsaufwand prinzipiell gleichmäßig verteilt, werden folgende Regeln für den Zusammenschluss angewandt:

- Falls einer der beiden Verhandlungspartner bereits eine - beispielsweise in Abhängigkeit der informationstechnischen Rechner- oder Speicherkapazität des zugrunde liegenden Informationssystems festgelegte - Obergrenze $n_{vr} \in \mathbb{N}$ von Body-Holonen verwaltet, schließt sie sich der jeweils anderen Virtuellen Ressource an.
- Falls beide Virtuellen Ressourcen die Obergrenze n_{vr} noch nicht erreicht haben, wird diejenige mit der kleineren Anzahl an Body-Holonen zum neuen Head, um den Koordinationsaufwand zu verteilen.
- Falls beide Verhandlungspartner gleich viele Body-Holone umfassen, so wird der Initiator der Virtualisierungsverhandlungen zum neuen Head.

Abschließend sei angemerkt, dass eine Virtuelle Ressource vr_i mit $n_{vr_i} = n_{vr}$ keine Virtualisierungsverhandlungen starten darf. Da das Kriterium der Ausgeglichenheit allerdings auch für die Virtuellen Ressourcen des Body gilt, wird eine dieserart eingeschränkte Struktur nicht dauerhaft von Bestand sein, da entsprechende Body-Holone aufgrund eigener Virtualisierungsverhandlungen „abwandern“.

5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Mit dem Konzept holonischer VK wurde in diesem Kapitel ein Ansatz vorgestellt, der eine informationstechnische Aggregation dezentraler Anlagen zu selbstähnlichen, hierarchisch organisierten Virtuellen Ressourcen ermöglicht. Letztere stellen konzeptionell

ein VK „im Kleinen“ dar, das sich selbstverantwortlich um die Einhaltung des durch die Tageseinsatzplanung vorgegebenen Einsatzplan bemüht. Aufgrund der holonischen Selbstähnlichkeit kann der Betrieb der repräsentierten DER dabei durch Koordinationsmechanismen und -schnittstellen realisiert werden, die unabhängig von der konkreten Hierarchie- bzw. Aggregationsstufe einer Virtuellen Ressource sind. Unter anderem diese Eigenschaft ermöglicht die Erweiterung der in Kapitel 4 diskutierten aktiven Einsatzplanung zu einem adaptiven holonischen System, das mittels kaskadierender Auftragskoordination und Kapazitätsverhandlungen koordiniert wird. Abschließend wurde mit dem Kriterium der Ausgeglichenheit Virtueller Ressourcen und den darauf aufbauenden Virtualisierungsverhandlungen eine adaptive, d.h. sich an den jeweils aktuellen Systemzustand anpassende Reorganisation holonischer VK diskutiert. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte des holonischen Gesamtsystems zusammengefasst und diskutiert.

Erweiterung der aktiven Einsatzplanung

Die von Fischer et al. in [FSS03] diskutierte Umsetzung holonisch organisierter MAS mittels moderierter Gruppen ist unmittelbar durch die R/OA der aktiven Einsatzplanung realisierbar. Ein einzelner R/OA verwaltet dabei als Head eine Menge untergeordneter Virtueller Ressourcen, den sogenannten Body. Die reaktive Koordination der dezentralen Anlagen mit dem Ziel, den initial vorgegebenen Einsatzplan bestmöglich einzuhalten, basiert insbesondere auf der Generierung und Verarbeitung von Aufträgen, die im holonischen Kontext eine Erweiterung von Auftragskoordination und Kapazitätsverhandlungen zu kaskadierenden Interaktionsprotokollen erforderlich machten. Im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen wurde dabei das in „einfachen“ MAS ausreichende CNCP durch das ebenfalls von Knabe et al. [KSF02] entwickelte HCNCNCP ersetzt, um die suboptimale Ausnutzung holonischer Kapazitäten durch die Möglichkeit nachträglicher Angebotsabgaben zu vermeiden. Die grundlegenden Entscheidungsprozesse einzelner R/OA werden dadurch allerdings nicht beeinflusst.

Adaptive Virtualisierung

Das Konzept der Virtuellen Ressource ermöglicht eine adaptive Virtualisierung dezentraler Anlagen im Sinne einer zur Laufzeit stattfindenden, dynamischen Reorganisation der holonischen Organisation des MAS der aktiven Einsatzplanung. Ziel ist dabei insbesondere eine Verringerung des Kommunikationsaufwands bzw. Nachrichtenaufkommens bei gleichzeitiger Verteilung der Koordinationsaufgaben auf möglichst viele Head-R/OA. Als wesentliches Kriterium für eine Aufteilung dezentraler Anlagen auf unterschiedliche Virtuelle Ressourcen wurde dabei die Ausgeglichenheit, d.h. die Fähigkeit einer Virtuellen Ressource, auftretende Fahrplanabweichungen durch Nutzung der „eigenen“ Leistungskapazitäten kompensieren zu können, identifiziert. Aufträge müssen damit im Idealfall nicht an die übergeordneten Holone kaskadiert werden, sondern können lokal erfüllt werden. Für die Reorganisation Virtueller Ressourcen wurden Virtualisierungsverhandlungen eingeführt, die sich aufgrund der Nutzung des Auftragskonstrukts problemlos in den bestehenden Koordinationsansatz integrieren lassen.

Entscheidungsfindung

Die Virtualisierungsverhandlungen werden - ebenso wie Auftragskoordination und Kapazitätsverhandlungen - durch die individuellen Entscheidungen der beteiligten R/OA beeinflusst bzw. gesteuert. In Abschnitt 5.3.3 wurden mehrere Parameter definiert, die einen Einfluss auf den im Wesentlichen heuristisch gestalteten Reorganisationsprozess und damit auch auf das Verhalten und die Struktur des holonischen Gesamtsystems haben. Tabelle 5.1 stellt diese Parameter zusammenfassend dar.

Parameter	Wertebereich	Beschreibung
ϵ_{κ}	$[0, \infty)$	Schwellenwert für die tolerierbare Abweichung vom mittleren Erfüllungsgrad der Aufträge eines Head-R/OA. Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Keine Abweichung tolerieren. • ∞ - Abweichung ignorieren.
n_{κ}	$[0, \infty)$	Anzahl an Planungszeitpunkten, an denen eine sukzessive Verletzung des Schwellenwerts ϵ_{κ} vorliegen muss, um Virtualisierungsverhandlungen auszulösen. Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 0 - Verhandlungen unmittelbar initiieren. • ∞ - Nie Virtualisierungsverhandlungen initiieren.
n_{vr}	$[1, \infty)$	Für Virtuelle Ressourcen maximal zulässige Anzahl an Body-Holonen. Interpretation: <ul style="list-style-type: none"> • 1 - Zu Liste degenerierte holonische Struktur. • ∞ - Beliebig viele Body-Holone zulässig.

Tabelle 5.1: Heuristische Parameter in holonischen VK.

Eine zentrale Herausforderung bei der Gestaltung einer zeitlich veränderlichen Holarchie ist dabei die Abwägung zwischen bedarfsgerechter Anpassung und ausreichender Stabilität der Organisation. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Schwierigkeit durch die Kombination eines Schwellenwertes mit einer zeitlichen Verzögerung zur Aufnahme von Virtualisierungsverhandlungen Rechnung getragen. Durch die Einführung einer oberen Schranke für die Anzahl der einem einzelnen Head zugeordneten Virtuellen Ressourcen kann zudem Einfluss auf den Verteiltheitsgrad - d.h. die Anzahl von R/OA, die als Head Koordinierungsaufgaben übernehmen - genommen werden.

Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig: Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuerwerfen.

– Albert Einstein

6 Evaluation

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept der aktiven Einsatzplanung in holonischen Virtuellen Kraftwerken (kurz: VK) zielt darauf ab, dezentrale Energiewandlungsanlagen (kurz: DER) mit lokaler Intelligenz und einem gewissen Grad an Autonomie auszustatten, um den in Abschnitt 2.2.2 identifizierten Anforderungen an reaktive Einsatzplanung in VK gerecht zu werden. Zentrales Konzept zur Koordination des Anlagenverhaltens sind Aufträge, mittels derer fehlende oder überschüssige Elektroenergie an die jeweils übergeordneten Komponenten des holonisch organisierten Multiagentensystems (kurz: MAS) gemeldet werden kann. Die Entscheidungsfindungsprozesse hinsichtlich der Erstellung und Verarbeitung von Aufträgen sowie der adaptiven Reorganisation des holonischen Systems können dabei mittels einer Reihe heuristischer Parameter an die Erfordnisse konkreter Anwendungsfälle angepasst werden. Im Weiteren werden mittels einer Simulationsstudie am Beispiel eines VK auf Basis von Blockheizkraftwerken (kurz: BHKW) die Auswirkungen unterschiedlicher Parameterbelegungen insbesondere hinsichtlich der lokalen bzw. globalen Qualität der Anlagenfahrpläne und des anfallenden Nachrichtenaufkommens untersucht. Auf der Grundlage einer für diesen Anwendungsfall als „günstig“ identifizierten Parametrisierung folgt in einem weiteren Schritt eine Gegenüberstellung der Performanz holonischer VK mit einem zentralen Planungssystem im Sinne der Hypothesen 1 bis 4. Eine vollständige Exploration des Parameter-raums zur Identifikation einer optimalen Parametrisierung ist im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des rechentechnischen Aufwands nicht möglich.

6.1 Prototypische Implementierung

Für die Evaluation wurde das in Kapitel 4 eingeführte und in Kapitel 5 erweiterte Konzept der aktiven Einsatzplanung auf Basis des *Java Agent Development Framework* (kurz: JADE) [BPR99, BCG07] prototypisch implementiert. JADE erfüllt die Anforderungen der FIPA Abstract Architecture Specification [Fou03a] und ermöglicht es damit, FIPA-konforme MAS zu entwickeln. Darüber hinaus zeichnet sich JADE durch eine effiziente Verwaltung auch „großer“ MAS mit mehreren hundert bzw. tausend Agenten aus [CGK⁺05]. Auf eine Diskussion der Implementierungsdetails wird an dieser Stelle verzichtet, da sie für den weiteren Evaluationsprozess nicht relevant sind. Nachfolgend wird stattdessen zunächst kurz das Simulationswerkzeug *Modular Framework for the Simulation of Integrated Power Systems* (kurz: MIPS) vorgestellt, dessen Kernkomponenten in Arbeiten des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen (kurz: FEN) entwickelt wurden und das insbesondere die für die Simulation notwendigen Anlagenmodelle bereitstellt. Daran schließt sich die Diskussion einer BHKW-spezifischen Heuristik für

die deliberative Verbesserung von Anlagenfahrplänen an, die im Rahmen der Simulationsstudie eingesetzt wird.

6.1.1 Das Simulationswerkzeug MIPS

Im Rahmen eines Teilprojekts des vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten Forschungsverbundes FEN [FEN09] wurde ein Simulationsmodell für die differenzierte Untersuchung dezentraler Energieversorgungsstrukturen entwickelt [NTA08, PTK⁺08]. Der Fokus liegt dabei auf erdgasbetriebenen Mikro-BHKW, d.h. KWK-Anlagen mit einer elektrischen Maximalleistung $P_{el,max} \leq 15 \text{ kW}^1$, und deren Integration in die Netzstrukturen der Niederspannungsebene. Das Simulationsmodell ist in MATLAB/SIMULINK implementiert und umfasst unter anderem folgende Komponenten bzw. Modelle, die in Kooperation mit den Projektpartnern des FEN erstellt wurden:

- Mathematisch-technisches Modell eines Mikro-BHKW inklusive Anlagenregelung. Das simulierte BHKW unterstützt unterschiedliche Betriebsmodi, darunter „wärmegeführt“, „stromgeführt“ und „fahrplanorientiert“.
- Mathematisch-technisches Modell eines thermischen Puffer- bzw. Warmwasserspeichers mit konfigurierbarer Anzahl von Temperaturschichten und Einspeise- bzw. Entnahmepunkten.
- Mathematisch-technisches Modell eines thermo-hydraulischen Gebäudesystems inklusive Heizkreise, jedoch ohne explizite Berücksichtigung von Wärmeverlusten im Leitungssystem.
- Softwarekomponente „Lastganggenerator“, die auf Grundlage statisch hinterlegter Referenzlastprofile nach VDI 4655 [Ver08] mittels einer stochastischen Verfälschung thermische und elektrische Lastgänge mit einer diskreten zeitlichen Auflösung von 15 Minuten für individuelle Gebäude generiert.

Um die Interaktion mit den simulierten DER - etwa das Abfragen aktueller Statuswerte oder das Setzen eines neuen Fahrplans - zu vereinfachen und unabhängig von der konkreten Implementierung zu gestalten, wurde das FEN-Simulationsmodell in das Werkzeug MIPS eingebettet. Zentrale Idee dieses Ansatzes ist es, die simulierten Anlagen durch Instanzen eines einheitlichen Datenmodells nach IEC 61850 [Int03] abzubilden, welches die wesentlichen technischen Eigenschaften und Zustandsdaten umfasst.

Abbildung 6.1 stellt die Komponenten des Frameworks dar: Das Simulationsmodell (1) ist in eine erweiterbare Simulationsumgebung eingebunden, die eine Schnittstelle zur MATLAB/SIMULINK-Engine beinhaltet. Auf Datenebene „übersetzt“ der sogenannte Controller (2) die MATLAB-spezifischen Variablen, die insbesondere den Anlagenzustand repräsentieren, auf eine JAVA-basierte Implementierung des standardkonformen

¹ Siehe dazu auch Abschnitt 2.1.3 auf Seite 14ff.

Datenmodells (3). Mittels einer Kommunikationsschnittstelle (4) können externe Planungssysteme - etwa die Ressourcenagenten der aktiven Einsatzplanung - auf die technischen Eigenschaften und die zustandsabhängigen Datenpunkte der zugehörigen DER zugreifen und entsprechende Anlagenfahrpläne hinterlegen. Die Steuerung der Simulation, d.h. insbesondere Parametrisierung und Ausführungskontrolle, erfolgt mittels der Simulationsschnittstelle (5).

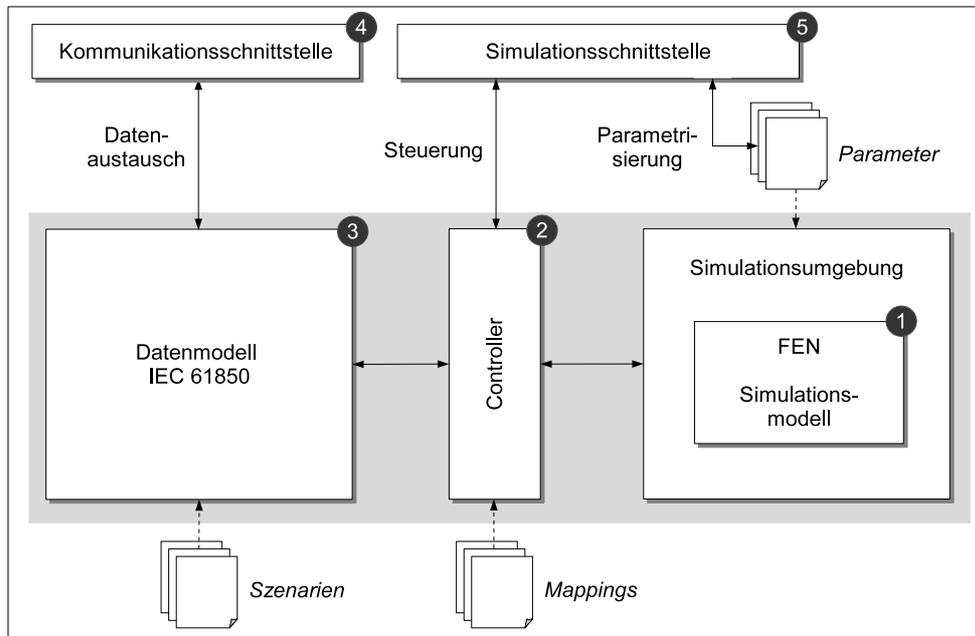


Abbildung 6.1: Architektur des Simulationswerkzeugs MIPS.

Im Rahmen der Evaluation dieser Arbeit werden unterschiedlich konfigurierte Szenarien jeweils über einen mehrere Tage umfassenden Zeitraum simuliert. Die Simulation eines VK über einen einzelnen virtuellen Tag gestaltet sich in MIPS dabei grundsätzlich wie folgt:

1. Nach erfolgter Initialisierung des Datenmodells und der Simulationsumgebung generiert eine externe - d.h. nicht zum Simulationsframework gehörende - Tageseinsatzplanung den initialen Einsatzplan des simulierten VK. Als Input dienen dabei einerseits die technischen Anlageneigenschaften der jeweils für ein Simulationsszenario festgelegten DER, und andererseits die hinterlegten thermischen und elektrischen Lastprofile nach VDI 4655. Durch eine entsprechende Konfiguration des Lastganggenerators werden aus diesen „Prognosedaten“ die tatsächlichen Lastprofile der einzelnen Gebäude durch eine normalverteilte Verfälschung erzeugt, um Prognosefehlern in der Realität Rechnung zu tragen.
2. Auf Grundlage der einzelnen Fahrpläne berechnet das Simulationsmodell für jeden Planungszeitpunkt des Zeitraums $T = [1, 96]$ zunächst den individuellen Anlagenzustand der simulierten DER, der durch den Controller auf das standardkonforme

Datenmodell abgebildet wird. Mittels der Kommunikationsschnittstelle kann eine externe reaktive Einsatzplanungskomponente auf die entsprechenden Daten zugreifen und angepasste Fahrpläne übermitteln, welche wiederum als Input für die Berechnung des endgültigen Systemzustands dienen.

3. Nachdem alle 96 Planungszeitpunkte eines Tages durchlaufen sind, werden die aufgezeichneten Zustandsdaten für eine spätere Auswertung persistiert und gegebenenfalls der Simulationslauf für den nächsten Tag angestoßen.

6.1.2 Deliberative Fahrplanverbesserung für BHKW

Der Diskussion in Abschnitt 4.4.4 folgend, ist der deliberative Anteil der aktiven Einsatzplanung durch die Erstellung und Verarbeitung von Aufträgen in den Koordinations- und Entscheidungsfindungsprozess des Gesamtsystems integriert. Dazu generiert ein Ressourcenagent (kurz: RA) mittels eines beliebigen Planungsalgorithmus unter Berücksichtigung des aktuellen Anlagenzustandes einen oder mehrere Alternativfahrpläne, die beispielsweise hinsichtlich der anlagenlokalen Soft Constraints optimiert sein können. Voraussetzung für eine tatsächliche Anpassung des Anlagenfahrplans im Sinne dieser Alternativen ist dabei die Einhaltung des Gesamtfahrplans, die durch Ableitung geeigneter Aufträge zur Kompensation der sich potenziell ergebenden Abweichungen sicher gestellt werden kann. Im Rahmen der Evaluation dieser Arbeit liegt der Fokus hinsichtlich der Zusammensetzung eines VK auf BHKW. Dies ist zum Einen mit den Freiheitsgraden in der Steuerung dieses Anlagentyps zu begründen, die ihn für die reaktive Planung interessant machen; zum Anderen stehen mit dem Simulationsmodell des FEN evaluierte Modelle für BHKW inklusive der notwendigen Peripherie - thermischer Wasserspeicher und Integration in das thermische Gebäudesystem - zur Verfügung, wodurch realitätsnahe Simulationsergebnisse ermöglicht werden. Die im Folgenden diskutierte Planungsheuristik ergänzt die prototypische Implementierung daher um einen auf BHKW zugeschnittenen Algorithmus, der den deliberativen Anteil der aktiven Einsatzplanung für diesen speziellen Anwendungsfall realisiert.

Neben der realisierbaren Maximalleistung ist der temperatur- und zeitabhängige Energieinhalt Q_{STO} des Wasserspeichers, der den thermischen Output der Anlage aufnimmt, wesentliche Restriktion beim Betrieb eines BHKW [Yan08]. In Abhängigkeit des individuellen Anlagenkontextes² ergeben sich Fahrplanabweichungen insbesondere in zwei Situationen:

1. Zu einem Zeitpunkt $t \in T$ kann der thermische Speicher den geplanten thermischen Output nicht mehr aufnehmen, da der maximal zulässige Energieinhalt $Q_{\text{STO,max}}$ erreicht ist:

$$Q_{\text{STO}}(t) = Q_{\text{STO,max}} \wedge s_{\text{CHP}}(t) \neq 0. \quad (6.1)$$

2. Zu einem Zeitpunkt $t \in T$ ist der Füllstand des thermischen Speichers auf Null

² Siehe dazu die Diskussion in Abschnitt 4.3.

gesunken, der Fahrplan des BHKW sieht aber keine Einspeisung vor:

$$Q_{\text{STO}}(t) = 0 \wedge s_{\text{CHP}}(t) = 0. \quad (6.2)$$

Ziel der deliberativen Fahrplanverbesserung für BHKW ist es daher, oben genannte Situationen - und dadurch auch Fahrplanabweichungen - zu vermeiden. Dazu schätzt der zugehörige RA wie in Abbildung 6.2 skizziert für $n_{\text{st}} \in \mathbb{N}$ in der nahen Zukunft liegende Planungszeitpunkte den Energieinhalt des thermischen Speichers ab und ermittelt für jeden Zeitpunkt die Energiemengendifferenz $Q_{\text{diff}}(t_i)$ zwischen 50% des maximalen Energieinhalts und dem jeweils abgeschätzten Energieinhalt:

$$\forall t_i \in \{t_{\text{now}+1}, \dots, t_{\text{now}+n_{\text{st}}}\} : Q_{\text{diff}}(t_i) := 0.5 \cdot Q_{\text{STO,max}} - Q_{\text{STO}}(t_i). \quad (6.3)$$

Die aus $Q_{\text{diff}}(t_i)$ ableitbare Fahrplananpassung $s'_{\text{diff}}(t_i)$ zielt dann darauf ab, den Energieinhalt des thermischen Speichers auf ein mittleres Niveau anzupassen und damit eine möglichst große Flexibilität für den Ausgleich unerwartet auftretender Ereignisse im laufenden Betrieb zu erzielen:

$$s'_{\text{diff}}(t_i) := \begin{cases} \min(p_{\text{CHP,max}} - s_{\text{CHP}}(t_i), \dot{Q}_{\text{diff}}(t_i)) & \text{falls } Q_{\text{diff}}(t_i) \geq 0 \\ \max(-1 \cdot s_{\text{CHP}}(t_i), \dot{Q}_{\text{diff}}(t_i)) & \text{sonst.} \end{cases} \quad (6.4)$$

Dabei ist $\dot{Q}_{\text{diff}}(t_i)$ die notwendige Leistung, um die Energiemenge $Q_{\text{diff}}(t_i)$ innerhalb des Planungszeitpunkts t_i bereitzustellen, und $p_{\text{CHP,max}}$ ist die thermische Maximalleistung des BHKW.

Beispiel 6.1: Deliberative Fahrplanoptimierung

Für einen Planungszeitpunkt $t \in T$ und ein BHKW $r \in R$ mit thermischer Maximalleistung $p_{r,\text{max}} = 12\text{kW}$ seien $Q_{\text{diff}}(t) = 2\text{kWh}$ und $s_r(t) = 2\text{kW}$. Für eine zeitliche Auflösung des Fahrplans in 15-Minuten-Intervallen ist dann $\dot{Q}_{\text{diff}}(t) = 8\text{kW}$ und $s'_{\text{diff}}(t) = \min(p_{r,\text{max}} - s_r(t), \dot{Q}_{\text{diff}}(t)) = 8\text{kW}$.

Eine Fahrplananpassung gemäß $s'_{\text{diff}}(t_i)$ erfordert es, dass die entstehende Abweichung vom Gesamtfahrplan durch Alternativkapazitäten kompensiert wird. Dazu generiert der zugehörige RA wie in Abbildung 6.2 dargestellt für jeden betrachteten Planungszeitpunkt $t_i \in \{t_{\text{now}+1}, \dots, t_{\text{now}+n_{\text{st}}}\}$ einen Auftrag o_{t_i} mit $p_{o_{t_i}} = -1 \cdot s'_{\text{diff}}(t_i)$. Um den Auftrag mit einem möglichst hohen erwarteten Nutzen $u_{\text{SC}}(o_{t_i})$ hinsichtlich der anlagenlokalen Soft Constraints versehen zu können, kann $s'_{\text{diff}}(t_i)$ etwa auf anlagentechnisch vorteilhafte Leistungsänderungen bzw. Modulationsstufen begrenzt werden.

Dieser kurzfristig orientierte, d.h. auf Planungszeitpunkte in naher Zukunft fokussierte Optimierungsansatz wird durch eine langfristig orientierte Vermeidung von Fahrplanabweichungen ergänzt. Das prinzipielle Vorgehen ist dabei analog zur bereits betrachteten kurzfristigen Optimierung: Auf Grundlage einer Abschätzung des Energieinhalts des thermischen Speichers für den Zeitraum $\{t_{\text{now}+n_{\text{st}}+1}, \dots, t_{|T|}\}$ bestimmt der RA eines

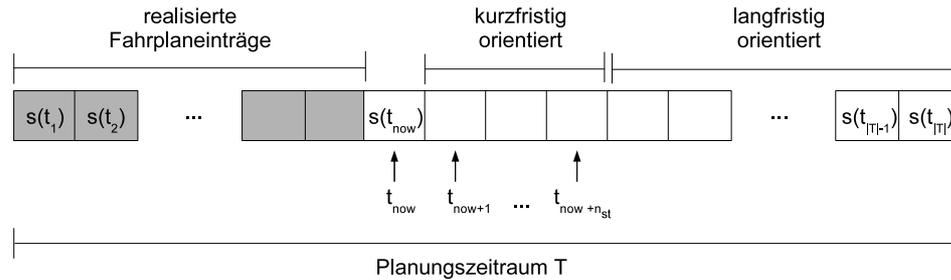


Abbildung 6.2: Kurzfristig und langfristig orientierte Fahrplanoptimierung.

BHKW $n_{it} \in \mathbb{N}$ Zeitpunkte, in denen der Fahrplan voraussichtlich nicht eingehalten werden kann. Entscheidungskriterien sind dabei die Prädikate 6.1 und 6.2. Für jede dieserart prognostizierte Fahrplanabweichung generiert der RA einen entsprechenden Auftrag zur Kompensation, der in den regulären Prozess der Auftragsverarbeitung eingepflegt werden kann.

6.2 Einfluss unterschiedlicher Parameterbelegungen

Mit Hilfe des Simulationswerkzeugs MIPS und unter Einsatz der im letzten Abschnitt vorgestellten deliberativen Planungsheuristik für BHKW werden im Folgenden die Auswirkungen unterschiedlicher Belegungen der für die Entscheidungsprozesse der aktiven Einsatzplanung relevanten Parameter untersucht. Neben den Gewichtungen des Nutzens von Aufträgen bzw. Kapazitätsbereitstellungen und der sozial intelligenten Abwägung im Sinne von Hogg und Jennings [HJ01] werden dabei insbesondere die Parameter der adaptiven Reorganisation der holonischen Struktur betrachtet. Zunächst werden jedoch die für die Simulation getroffenen Annahmen kurz diskutiert.

6.2.1 Annahmen der Simulation

Das FEN-Simulationsmodell ist - wie bereits ausgeführt - auf erdgasbetriebene Mikro-BHKW fokussiert. Das mathematisch-technische Modell der KWK-Anlage und des zugehörigen Pufferspeichers wurden im Rahmen des FEN anhand von Messdaten evaluiert und bereits in mehreren Simulationsstudien erfolgreich eingesetzt [PTK⁺08, BT09, TA09]. Die Freiheitsgrade in der Steuerung dieser Anlagen - und damit auch die Möglichkeiten der prädiktiven und reaktiven Einsatzplanung - hängen wesentlich von den technischen Eigenschaften und der energietechnischen Einbindung in das thermische Gebäudesystem ab. Für die Evaluation dieser Arbeit werden daher folgende Annahmen hinsichtlich der Simulation getroffen:

- Die untersuchten VK setzen sich jeweils aus einer festen Anzahl simulierter Mikro-BHKW mit einer Maximalleistung von 8,75 kW elektrisch bzw. 25,0 kW thermisch

zusammen, die in virtuelle Mehrfamilienhäuser eingebunden sind. Die Auslegung der KWK-Anlagen - d.h. die Festlegung der thermischen bzw. elektrischen Maximalleistung - entspricht dabei den Vorgaben in VDI 3985 hinsichtlich einer Jahresbetriebsdauer von ca. 5.000 Stunden, die als Wirtschaftlichkeitsgrenze angesehen wird [Ver00]. Die thermischen Jahresenergiebedarfe der simulierten Mehrfamilienhäuser sind den Messdaten der bereits in [PK08b], [PTK⁺08] und [BT09] betrachteten „Referenzsiedlung Braunschweig“ des FEN entnommen.

- Jede KWK-Anlage ist mit einem thermischen Pufferspeicher ausgestattet, dessen maximaler Energieinhalt dem thermischen Output von ca. 2,5 Volllaststunden des zugehörigen BHKW (≈ 68 kWh) entspricht. Wichtigste Restriktion beim Betrieb der Anlagen ist dabei die Einhaltung der Ober- bzw. Untergrenzen der Speichertemperatur.
- Unter Zuhilfenahme der Referenzlastprofile aus VDI 4655 [Ver08] für die Klimazone 3 „Nordwestdeutsches Tiefland“ und den Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus“ werden durch Skalierung mit dem jeweiligen Jahresenergiebedarf individuelle Gebäude-lastprofile in einer zeitlichen Auflösung in 15-Minuten-Intervallen gewonnen. Dabei ergeben sich differenzierte Profile für die in Tabelle 6.2.1 dargestellten zehn Typtage, die der Softwarekomponente „Lastganggenerator“ des FEN-Simulationsmodells als Input dienen.

Nr.	Abkürzung	Bezeichnung	Mittlere Tages-temperatur [°C]
1	ÜWH	Übergangswerktag, heiter	11,7
2	ÜWB	Übergangswerktag, bedeckt	9,9
3	ÜSH	Übergangssonntag / -feiertag, heiter	10,9
4	ÜSB	Übergangssonntag / -feiertag, bedeckt	10,5
5	SWX	Sommerwerktag	16,4
6	SSX	Sommersonntag / -feiertag	17,0
7	WWH	Winterwerktag, heiter	-0,3
8	WWB	Winterwerktag, bedeckt	3,0
9	WSH	Wintersonntag / -feiertag, heiter	0,6
10	WSB	Wintersonntag / -feiertag, bedeckt	3,9

Tabelle 6.1: Typtage der Klimazone 3 nach VDI 4655 [Ver08].

- In der Simulationsstudie kommen die in Tabelle 6.2.1 aufgelisteten, jahreszeitspezifischen Typtagfolgen zum Einsatz, die jeweils einen Zeitraum von acht Tagen umfassen und sämtliche Typtage beinhalten. Innerhalb einer Typtagfolge ist die Häufigkeit einzelner Typtage dabei an die Verteilung derselben hinsichtlich des Referenzjahres der Klimazone 3 aus VDI 4655 angelehnt. Im Weiteren beziehen sich jahreszeitabhängige Simulationsergebnisse stets auf diese Referenzzeiträume³.

³ Längere Referenzzeiträume - idealerweise ein vollständiges Jahr - wären wünschenswert, sind aber aufgrund des Simulationsaufwandes im Rahmen dieser Arbeit nicht zu realisieren.

Bezeichnung	Typtagfolge
Übergangszeit	[1, 2, 1, 2, 2, 2, 3, 4]
Sommer	[5, 5, 5, 5, 5, 5, 6, 6]
Winter	[7, 8, 7, 8, 8, 8, 9, 10]

Tabelle 6.2: Jahreszeitabhängige Typtagfolgen.

- Sämtliche Effekte auf die elektrische Infrastruktur des Niederspannungsnetzes - etwa Spannungs- oder Frequenzänderungen an einzelnen Netzknoten - werden vernachlässigt. Insbesondere wird keine explizite Netztopologie betrachtet.
- Für die Tageseinsatzplanung kommt eine Variante des von der TU Braunschweig entwickelten netzorientierten Betriebs für Mikro-BHKW [PK08a, PK08b, PTK⁺08] zum Einsatz, deren Ziel eine möglichst genaue Abdeckung einer vorgegebenen elektrischen Lastkurve ist.
- Für die Beurteilung der globalen Qualität eines Einsatzplans wird - der Diskussion in Abschnitt 4.1 folgend - die mittlere Einsatzplanabweichung $\Delta_{(os, \bar{os})}$ gemäß Definition 4.27 herangezogen.
- Im Sinne der Anforderung A₅ aus Abschnitt 2.2.2 basiert die Beurteilung der lokalen Qualität eines Einsatzplans im Rahmen der Evaluation dieser Arbeit auf der Anzahl der Zustandsänderungen einer KWK-Anlage. Eine Zustandsänderung liegt dann vor, wenn sich die bereitgestellte elektrische Leistung einer Anlage $r \in R$ von einem Zeitpunkt t_i auf einen direkt anschließenden Zeitpunkt t_{i+1} um mehr als einen festgelegten Schwellenwert $\epsilon_{r,sc}$ verändert:

$$\chi_r(t_{i+1}, t_i) := \begin{cases} 1 & \text{falls } |\bar{s}_r(t_{i+1}) - \bar{s}_r(t_i)| \geq \epsilon_{r,sc}, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (6.5)$$

Damit ergebe sich die lokale Qualität des Fahrplans einer Ressource r zu

$$\lambda(\bar{s}_r) := 1 - \frac{\sum_{i=1, \dots, |T|-1} \chi_r(t_{i+1}, t_i)}{|T| - 1}, \quad (6.6)$$

mit $\lambda(\bar{s}_r) \in [0, 1]$ und schließlich die lokale Qualität des Einsatzplans eines VK als arithmetisches Mittel der lokalen Qualität der einzelnen Anlagenfahrpläne:

$$\Lambda_{\bar{os}} := \frac{\sum_{r \in R} \lambda(\bar{s}_r)}{|R|}. \quad (6.7)$$

Damit stellt $\Lambda_{\bar{os}}$ ein Maß für die „Unruhe“ der Leistungsbereitstellung durch eine KWK-Anlage dar, das umso kleiner (schlechter) wird, je häufiger die Anlage eine Zustandsänderung durchläuft. Im Weiteren wird für $r \in R$ stets $\epsilon_{sc} = 0,25 \cdot p_{r,max}$ angenommen, d.h. eine Zustandsänderung liegt dann vor, wenn sich die Leistung

eines BHKW um mehr als 25% der elektrischen Maximalleistung ändert. Leistungsschwankungen - etwa das abrupte Ein- oder Ausschalten der Anlage - und häufige Leistungsanpassungen wirken sich somit negativ auf die lokale Qualität des Einsatzplanes aus. Abschließend sei angemerkt, dass sowohl der Schwellenwert $\epsilon_{r,sc}$ als auch die Definition von Λ_{os} anwendungsfallabhängig angepasst bzw. um weitere Qualitätskriterien, die in dieser Arbeit keine Berücksichtigung gefunden haben, erweitert werden kann.

- Als initiale Organisationsform eines holonischen VK wurde in Anlehnung an Power-Matcher [KKW⁺06, KKH⁺07] bzw. DEZENT [WLH⁺07] eine Hierarchie mit den folgenden Eigenschaften gewählt:
 - Ein VK mit $|R| = n$ wird durch einen einzelnen Head repräsentiert, dem $\lceil \sqrt{n} \rceil$ Body-Holone zugeordnet werden.
 - Die restlichen $n - 1 - \lceil \sqrt{n} \rceil$ R/OA werden gleichmäßig auf die Body-Holone aufgeteilt, so dass sich eine Baumstruktur der Tiefe 2 ergibt.

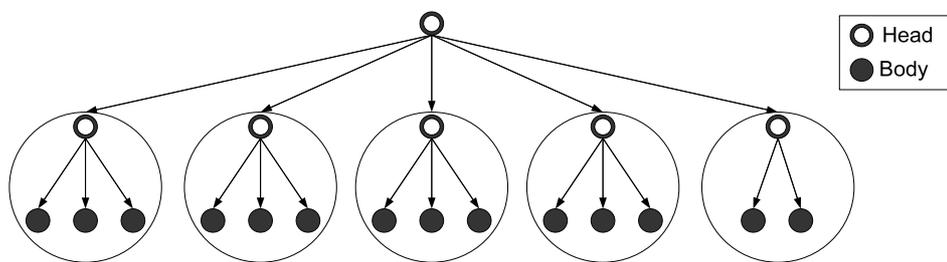


Abbildung 6.3: Initiale Organisation eines holonischen VK mit $|R| = 20$.

Abbildung 6.3 stellt exemplarisch die initiale Organisation eines holonischen VK mit $|R| = 20$ dar. Intention der beschriebenen Anordnung der R/OA ist es insbesondere, eine Hierarchie zu erhalten, die extreme Ausprägungen - etwa ein zentralisiertes System oder eine sequenzielle Verkettung von Holonen - vermeidet und daher in den Untersuchungen zum Kommunikationsverhalten holonischer VK in Abschnitt 6.2.4 als Referenzorganisation dienen kann.

6.2.2 Nutzen von Fahrplananpassungen

Im Entscheidungsprozess der Kapazitätsverhandlungen dienen die Faktoren γ_δ bzw. γ_{sc} dazu, den Nutzen einer Fahrplananpassung bzw. eines Auftrags hinsichtlich der Reduktion von Fahrplanabweichungen bzw. der Verbesserung des Fahrplans bezüglich der anlagen-spezifischen Soft Constraints zu gewichten⁴. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungen auf die globale bzw. lokale Einsatzplanqualität abschätzen zu können, wurden die in Tabelle 6.3 aufgeführten Experimente - im Sinne variierender Parameter-

⁴ Siehe dazu Definition 4.40 auf Seite 101 bzw. Gleichung 4.2 auf Seite 114.

belegungen - definiert. Die Belegungen umfassen dabei eine ausschließliche Fokussierung des Nutzens bezüglich der Soft Constraints (Experiment Nutzen₁) bzw. bezüglich der Fahrplanabweichungen (Experiment Nutzen₅), eine gleichwertige Gewichtung (Experiment Nutzen₃) sowie die jeweils tendenziell stärkere Gewichtung einer der beiden Faktoren (Experiment Nutzen₂ und Nutzen₄).

Nutzen ₁	Nutzen ₂	Nutzen ₃	Nutzen ₄	Nutzen ₅
$\gamma_\delta = 0.0,$ $\gamma_{SC} = 1.0$	$\gamma_\delta = 0.25,$ $\gamma_{SC} = 0.75$	$\gamma_\delta = 0.50,$ $\gamma_{SC} = 0.50$	$\gamma_\delta = 0.75,$ $\gamma_{SC} = 0.25$	$\gamma_\delta = 1.0,$ $\gamma_{SC} = 0.0$
0.0	0.25	0.50	0.75	1.0
γ_δ				

Tabelle 6.3: Experimente für Parameterstudie „Gewichtung des Nutzens“.

Tabelle 6.4 listet ergänzend die für eine Durchführung der Simulationsexperimente noch fehlenden Parameter der aktiven Einsatzplanung sowie der konfigurierbaren Anteile des FEN-Simulationsmodells auf. Diese wurden für die Experimente Nutzen₁ bis Nutzen₅ auf einen festen Wert gesetzt, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Gewichtungen von γ_δ bzw. γ_{SC} unabhängig vom Einfluss der ergänzenden Parameterbelegungen untersuchen zu können.

Parameter	Belegung	Interpretation
Auftragsverarbeitung		
ϵ_d	0	Aufträge nur bei identischer Deadline aggregieren
ϵ_α	0	Aufträge sofort versenden
ϵ_o	∞	Beliebig viele Aufträge verarbeitbar
ϵ_u	∞	Aufträge nur bei identischem Nutzen aggregieren
Kapazitätsverhandlungen		
γ_{ind}	0,5	Individuellen Nutzen und sozialen Nutzen
γ_{soc}	0,5	gleichwertig behandeln
Adaptive Reorganisation		
ϵ_κ	1,0	Beliebige Abweichungen tolerieren
n_κ	0	wird ignoriert
n_{vr}	∞	wird ignoriert
Deliberative Fahrplanoptimierung		
n_{st}	4	Kurzfristig orientierte Optimierung für die jeweils nächsten vier Planungszeitpunkte in der „nahen“ Zukunft
Softwarekomponente „Lastganggenerator“		
μ_{fc}	1,0	Erwartungswert der normalverteilten Prognoseverfälschung
σ_{fc}^2	0,05	Varianz der normalverteilten Prognoseverfälschung

Tabelle 6.4: Feste Belegungen für Parameterstudie „Gewichtung des Nutzens“.

Im Rahmen der Auftragsverarbeitung wurden Aufträge nur bei identischer Deadline und identischem Nutzen - d.h. ohne Qualitätsverlust - aggregiert. Zudem gab es keinerlei Restriktionen bzgl. der Anzahl der durch einen Head verwaltbaren Aufträge oder einer zeitlichen Verzögerung der Auftragsversendung. Dadurch bleiben insbesondere auch Beschränkungen bezüglich einer Umsetzung auf einer konkreten Hardwareplattform - etwa den in [WNA⁺09] für eine standardkonforme Kommunikation mit BHKW diskutierten Field Programmable Gate Arrays - im Weiteren unberücksichtigt. Hinsichtlich der Kapazitätsverhandlungen wurden der individuelle und der soziale Nutzen von Aufträgen gleichwertig behandelt; eine differenzierte Untersuchung verschiedener Belegungen von γ_{ind} und γ_{soc} erfolgt separat im nächsten Abschnitt. Gleiches gilt für die adaptive Reorganisation, die in Abschnitt 6.2.4 genauer untersucht und zunächst vernachlässigt wird. Für den kurzfristigen Optimierungszeitraum der deliberativen Fahrplanverbesserung wurde im Rahmen einer Vorstudie die Belegung $n_{\text{st}} = 4$ als Kompromiss zwischen Kommunikationsaufwand und Einsatzplanqualität identifiziert. Auf eine vertiefte Diskussion der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet, da die in Abschnitt 6.1.2 exemplarisch entwickelte Heuristik nicht im Fokus dieser Arbeit steht; die aufbereiteten Ergebnisse finden sich in Tabelle A.1 im Anhang.

Die Experimente Nutzen₁ bis Nutzen₅ wurden gemäß der Parameterbelegungen aus den Tabellen 6.3 und 6.4 für die Typtagfolgen *Übergangszeit*, *Sommer* und *Winter* sowie für je ein VK mit 20 bzw. 50 KWK-Anlagen simuliert. Die Anlagenzahl der VK entspricht damit in etwa den Szenarien der in Abschnitt 3.1 diskutierten Arbeiten zur Koordination von DER. Abbildung 6.4 stellt entsprechend die relative globale bzw. lokale Einsatzplanqualität für die unterschiedlichen Typtagfolgen dar⁵; als Vergleichswert dienen die Ergebnisse des Experiments Nutzen₃. Es ergeben sich folgende Beobachtungen:

- Die gleichwertige Gewichtung aus Experiment Nutzen₃ erzielt insgesamt die höchste globale Einsatzplanqualität. Mit durchschnittlich ca. 56% (20 BHKW) bzw. 46% (50 BHKW) sowie 55% (20 BHKW) bzw. 41% (50 BHKW) fällt der Performanzunterschied in der *Übergangszeit* und im *Winter* besonders deutlich aus; im *Sommer* liegt er noch bei durchschnittlich 13% (20 BHKW) bzw. 19% (50 BHKW).
- Die Auswirkungen auf die lokale Einsatzplanqualität fallen dagegen vergleichsweise gering aus. Der Performanzunterschied liegt bei durchschnittlich ca. -2% (20 BHKW) bzw. -6% (50 BHKW) in der *Übergangszeit*, 1% (20 BHKW) bzw. 2% (50 BHKW) im *Sommer* sowie 2% (20 BHKW) bzw. -3% (50 BHKW) im *Winter*.

Zunächst ist festzuhalten, dass die Ähnlichkeit der Ergebnisse für die Typtagfolgen *Übergangszeit* bzw. *Winter* insbesondere auch auf die Auslegung der Anlagen zurückzuführen ist: Im Tagesmittel beträgt die Laufzeit der simulierten KWK-Anlagen in der *Übergangszeit* 16 bis 18 Stunden, im *Winter* 20 bis 22 Stunden sowie im *Sommer* 3 bis 4 Stunden. Die längeren Laufzeiten kommen dabei einer Einschränkung der Umplanungsmöglichkeiten gleich, da der hohe thermische Bedarf den Energieinhalt des thermischen

⁵ Eine vollständige Auflistung der jeweiligen Simulationsergebnisse findet sich im Anhang dieser Arbeit.

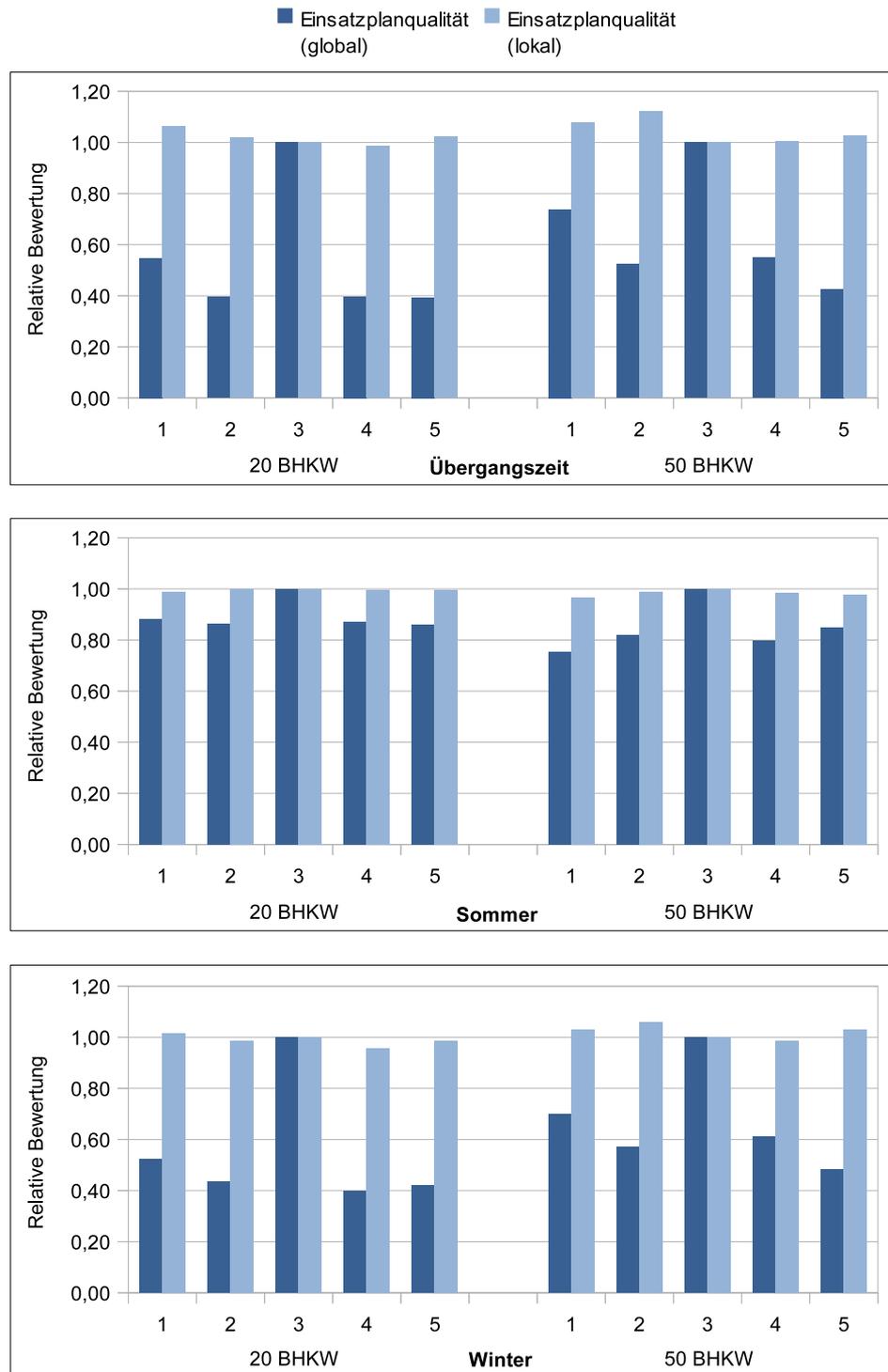


Abbildung 6.4: Relative globale und lokale Einsatzplanqualität für Parameterstudie „Gewichtung des Nutzens“; Referenzexperiment: Nutzen₃.

Pufferspeichers schnell auf ein niedriges Niveau absenkt und dadurch eine Energiebereitstellung durch das entsprechende BHKW notwendig macht. Im *Sommer* kann die Kapazität der Anlagen mit einem größeren Freiheitsgrad eingesetzt werden, wie der deutlich niedrigere Wert der absoluten globalen Einsatzplanqualität aus Tabelle A.2 verdeutlicht. Die Ergebnisse des *Sommers* zeigen zudem, dass die Beurteilung der Auswirkungen einer Fahrplananpassung nach Gleichung 4.2 gleichermaßen von den gegebenenfalls verursachten zukünftigen Fahrplanabweichungen und den zusätzlichen bzw. vermiedenen Zustandsänderungen abhängt, da eine Fokussierung auf eines der beiden Qualitätsmerkmale im Rahmen der Experimente Nutzen₁ bzw. Nutzen₅ keine Verbesserung der globalen Einsatzplanqualität zur Folge hat. Letzteres wäre aber zu erwarten gewesen, da dann deutlich mehr Anfragen im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen positiv beurteilt werden müssten als im jeweils komplementären Fall. Damit erweist sich für den hier betrachteten Anwendungsfall BHKW-basierter VK eine gleichwertige Gewichtung des Nutzens hinsichtlich der Soft Constraints bzw. der Einsatzplanabweichungen als am günstigsten. Eine verallgemeinerte Aussage - etwa hinsichtlich eines VK mit einem deutlich heterogeneren Anlagenpool - kann aus der vorliegenden Datenbasis allerdings nicht abgeleitet werden.

6.2.3 Sozial intelligente Entscheidungsfindung

Hogg und Jennings haben in [HJ01] die Auswirkungen unterschiedlicher sozialer Einstellungen einzelner Entscheidungsträger bzw. Agenten am Beispiel der Nutzung von Ressourcen zur Feuerbekämpfung in Nationalparks untersucht und dabei festgestellt, dass eine ausgewogene, sozial intelligente Entscheidungsfindung zu deutlich besseren Ergebnissen führt als ausgeprägter Egoismus oder Altruismus. In der aktiven Einsatzplanung haben die Gewichte γ_{ind} und γ_{soc} einen vergleichbaren Einfluss auf die Entscheidungsfindung der R/OA eines holonischen VK: Eine Anfrage im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen wird gemäß Gleichung 4.7 genau dann positiv beantwortet, wenn der globale bzw. soziale Nutzen eines teilweise erfüllten Auftrags die gegebenenfalls negativen lokalen Auswirkungen einer Fahrplananpassung mindestens aufwiegt. Um den Einfluss unterschiedlicher Belegungen dieser Parameter auf die globale bzw. lokale Einsatzplanqualität zu untersuchen, wurden die folgenden Simulationsexperimente definiert:

Sozial ₁	Sozial ₂	Sozial ₃	Sozial ₄	Sozial ₅
$\gamma_{\text{soc}} = 0.0,$ $\gamma_{\text{ind}} = 1.0$	$\gamma_{\text{soc}} = 0.25,$ $\gamma_{\text{ind}} = 0.75$	$\gamma_{\text{soc}} = 0.50,$ $\gamma_{\text{ind}} = 0.50$	$\gamma_{\text{soc}} = 0.75,$ $\gamma_{\text{ind}} = 0.25$	$\gamma_{\text{soc}} = 1.0,$ $\gamma_{\text{ind}} = 0.0$
0.0	0.25	0.50	0.75	1.0
γ_{soc}				

Tabelle 6.5: Experimente für Parameterstudie „Sozial intelligente Entscheidungsfindung“.

Experiment Sozial₁ entspricht dabei einer rein „egoistischen“ Verhaltensweise der R/OA, d.h. Kapazitätsanfragen werden nur dann positiv beantwortet, wenn sich der ei-

gene Anlagenfahrplan dabei nicht verschlechtert. Komplementär dazu stellt Experiment Sozial₅ eine „altruistische“ Grundhaltung der R/OA dar, bei der stets eine Kapazitätsbereitstellung erfolgt. Experiment Sozial₃ entspricht einer ausgewogenen Grundhaltung, und Experimente Sozial₂ und Sozial₄ stehen für eine „eher egoistische“ bzw. „eher altruistische“ Einstellung. Die weiteren Parameter wurden analog zu den Experimenten der Parameterstudie „Nutzen von Fahrplananpassungen“ gemäß Tabelle 6.4 belegt; zudem wurden die Gewichte γ_δ und γ_{SC} aufgrund der Ergebnisse des letzten Abschnittes gleichwertig behandelt, d.h. $\gamma_\delta = \gamma_{SC} = 0,5$. Ebenfalls analog zur vorherigen Parameterstudie wurden die Experimente Sozial₁ bis Sozial₅ jeweils für die Typtagfolgen *Übergangszeit*, *Sommer* und *Winter* sowie für je ein VK mit 20 bzw. 50 BHKW simuliert.

Abbildung 6.5 stellt die relative Einsatzplanqualität für die unterschiedlichen Szenarien dar; die vollständigen Simulationsergebnisse finden sich in der Tabelle A.3 in Anhang A. Festzuhalten ist dabei folgendes:

- Das ausgewogene Verhalten aus Experiment Sozial₃ erzielt mit einem durchschnittlichen Performanzunterschied von ca. 43% (20 BHKW) bzw. 51% (50 BHKW) in der *Übergangszeit*, 44% (20 BHKW) bzw. 51% (50 BHKW) im *Winter* sowie 12% (20 BHKW) bzw. 14% (50 BHKW) im *Sommer* insgesamt die höchste globale Einsatzplanqualität.
- Das „altruistische“ Verhalten aus Experiment Sozial₅ erzielt mit einem durchschnittlichen Performanzunterschied von ca. 46% (20 BHKW) bzw. 39% (50 BHKW) in der *Übergangszeit*, 29% (20 BHKW) bzw. 25% (50 BHKW) im *Winter* sowie 10% (20 BHKW) bzw. 7% (50 BHKW) im *Sommer* die zweitbeste globale Einsatzplanqualität.
- Das „egoistische“ Verhalten aus Experiment Sozial₁, d.h. eine Bereitstellung von Leistungskapazität nur dann, wenn sich dadurch keine anlagenlokalen Nachteile ergeben, schneidet mit deutlichem Abstand am schlechtesten ab. Dieser Effekt betrifft zudem auch die lokale Einsatzplanqualität, die in den anderen Experimenten nicht wesentlich voneinander abweicht.

Das schlechte Abschneiden der „egoistischen“ R/OA aus Experiment Sozial₁ ist nicht überraschend: Durch eine Anpassung des Fahrplans eines BHKW und der damit verbundenen Änderung des thermischen (und elektrischen) Outputs wird insbesondere auch der Zustand bzw. Energieinhalt des thermischen Pufferspeichers beeinflusst. Bei gleichbleibender thermischer Last ist damit in vielen Fällen eine - in der Zukunft liegende - Fahrplanabweichung verbunden, die einer Verschlechterung der anlagenlokalen Fahrplanqualität gleichkommt und daher zur Ablehnung einer entsprechenden Anfrage im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen führt. Dadurch werden Fahrplanabweichungen seltener kompensiert, wodurch die mittlere Einsatzplanabweichung größer bzw. die globale Einsatzplanqualität schlechter wird. Interessant ist das sehr gute Abschneiden der „altruistischen“ R/OA aus Experiment Sozial₅ sowohl hinsichtlich der globalen als auch

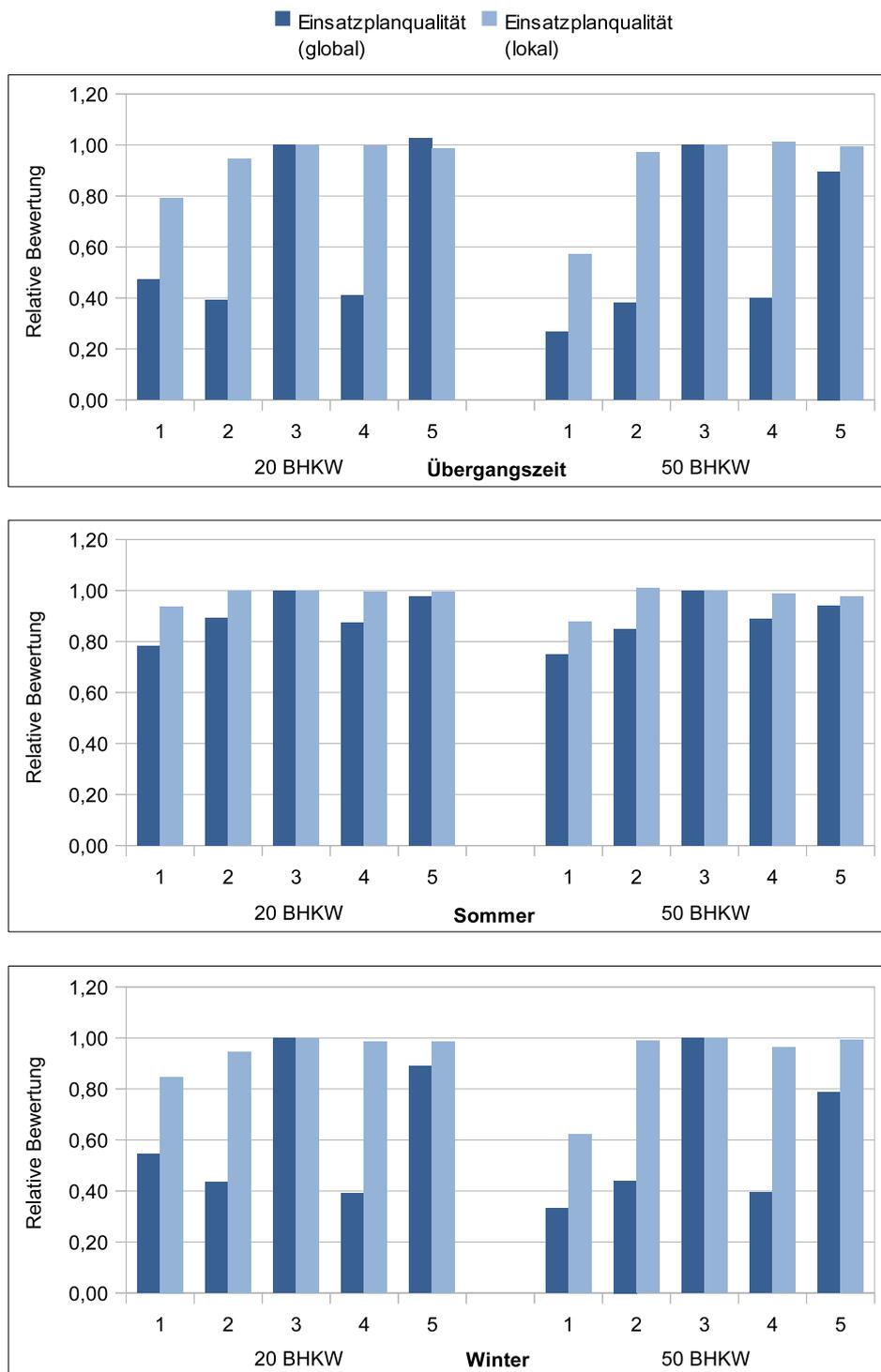


Abbildung 6.5: Relative globale und lokale Einsatzplanqualität für Parameterstudie „Sozial intelligente Entscheidungsfindung“; Referenzexperiment: Sozial₃.

der lokalen Einsatzplanqualität: Durch die bei Anfragen stets erfolgenden Kapazitätssagen wäre zunächst zu erwarten, dass die lokale Einsatzplanqualität sinkt, da Fahrplananpassungen in der Regel einen Zustandswechsel des BHKW erfordern. Zudem könnten sich die in der Folge - durch den häufig geänderten Pufferspeicherzustand - verursachten Fahrplanabweichungen negativ auf die globale Qualität auswirken. Das dies so nicht eintritt, ist vor allem zwei Eigenschaften des Systems zuzuschreiben: Erstens wirkt der thermische Pufferspeicher in dem Sinne dämpfend auf das Verhalten des BHKW, dass nicht jede Fahrplananpassung zwangsläufig zu einer zukünftigen Abweichung führt. Dieser Effekt wird noch unterstützt durch die Tatsache, dass sich zeitlich aufeinander folgende Fahrplananpassungen hinsichtlich der thermischen Energiebilanz kompensieren können. Zweitens erzielt die deliberative Fahrplanoptimierung im Falle „altruistischer“ R/OA besonders gute Ergebnisse, da jeder generierte Auftrag - sofern der Systemzustand erlaubt - erfüllt wird. Dadurch kann der thermische Speicher im Idealfall auf einem mittleren Energieniveau gehalten werden, wodurch der dämpfende Effekt zusätzlich verstärkt wird und sich abzeichnende Fahrplanabweichungen frühzeitig vermieden werden können. Abschließend muss auch für diese Parameterstudie angemerkt werden, dass die erzielten Ergebnisse nicht auf beliebige VK übertragen werden können; ein „egoistisches“ Verhalten der R/OA scheint für das kooperative Umfeld eines VK allerdings wenig geeignet.

6.2.4 Adaptive Reorganisation

In den bislang durchgeführten Experimenten wurden Belegungen für die heuristischen Parameter der aktiven Einsatzplanung ermittelt, die für den betrachteten Anwendungsfall BHKW-basierter VK eine hohe Performanz des Gesamtsystems ermöglichen. Noch unberücksichtigt sind dabei die Auswirkungen der adaptiven Reorganisation, d.h. der kontinuierlichen Anpassung der holonischen Kontrollstruktur an den jeweils aktuellen Systemzustand des VK. Für die Untersuchung des Einflusses der Reorganisation auf die Performanz des Gesamtsystems wurden daher die in Tabelle 6.6 aufgeführten Experimente definiert.

n_{κ}	4	Adaptiv₉ $\epsilon_{\kappa} = 0.0$ $n_{\kappa} = 4$	Adaptiv₁₀ $\epsilon_{\kappa} = 0.25$ $n_{\kappa} = 4$	Adaptiv₁₁ $\epsilon_{\kappa} = 0.50$ $n_{\kappa} = 4$	Adaptiv₁₂ $\epsilon_{\kappa} = 0.75$ $n_{\kappa} = 4$	-
	2	Adaptiv₅ $\epsilon_{\kappa} = 0.0$ $n_{\kappa} = 2$	Adaptiv₆ $\epsilon_{\kappa} = 0.25$ $n_{\kappa} = 2$	Adaptiv₇ $\epsilon_{\kappa} = 0.50$ $n_{\kappa} = 2$	Adaptiv₈ $\epsilon_{\kappa} = 0.75$ $n_{\kappa} = 2$	-
	0	Adaptiv₁ $\epsilon_{\kappa} = 0.0$ $n_{\kappa} = 0$	Adaptiv₂ $\epsilon_{\kappa} = 0.25$ $n_{\kappa} = 0$	Adaptiv₃ $\epsilon_{\kappa} = 0.50$ $n_{\kappa} = 0$	Adaptiv₄ $\epsilon_{\kappa} = 0.75$ $n_{\kappa} = 0$	Adaptiv₁₃ $\epsilon_{\kappa} = 1.0$ $n_{\kappa} = 0$
		0.0	0.25	0.50	0.75	1.0
		ϵ_{κ}				

Tabelle 6.6: Experimente für Parameterstudie „Adaptive Reorganisation“.

Der Schwellenwert ϵ_κ hat dabei einen Einfluss darauf, welche Abweichungen von der exakten Erfüllung von Aufträgen ein R/OA als akzeptabel empfindet; und der Faktor n_κ gibt an, nach wie vielen Planungszeitpunkten, an denen ein R/OA mit dem Erfüllungsgang seiner Aufträge unzufrieden war, Reorganisationsverhandlungen mit einer alternativen Virtuellen Ressource des holonischen VK gestartet werden. Entsprechend variiert das Verhalten der R/OA für die unterschiedlichen Belegungen: In Experiment *Adaptiv₁* werden keinerlei Abweichung von der exakten Erfüllung von Aufträgen toleriert und sofort Reorganisationsverhandlungen gestartet, während die Virtuelle Ressourcen in Experiment *Adaptiv₁₂* eher „träge“ agieren und erst nach einiger Zeit und bei einem geringen Erfüllungsgrad der Aufträge aktiv werden. Experiment *Adaptiv₁₃* entspricht einer statischen Organisation eines holonischen VK und dient als Referenz für den Vergleich des Kommunikationsaufwandes und der globalen bzw. lokalen Einsatzplanqualität im Sinne der in Kapitel 1 postulierten Hypothese 3.

Für die Obergrenze an Body-R/OA eines Head wurde im Weiteren $n_{vr} = \infty$ angenommen, d.h. ein Head ist in der Lage, beliebig viele Body-Holone zu verwalten. Dies entspricht - in Ermangelung konkreter technischer Einschränkungen - einem Idealfall, bei dem der adaptiven Reorganisation keine grundsätzlichen Grenzen bezüglich der Struktur des holonischen Systems gesetzt werden, die sich negativ auf die Qualität der Koordination auswirken könnten. Als ergänzende Parameter wurden wiederum die Belegungen aus Tabelle 6.4 bzw. die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten Gewichtungen verwendet. Ebenfalls analog zu den vorherigen Parameterstudien wurden jeweils die Typtagfolgen *Übergangszeit*, *Sommer* und *Winter* für je ein VK mit 20 bzw. 50 BHKW simuliert.

Abbildung 6.6 stellt zunächst die kumulierte Anzahl der jeweils beobachteten Reorganisationsoperationen dar. Unter einer Reorganisationsoperation ist dabei eine erfolgreich abgeschlossene Restrukturierung der holonischen Organisation zu verstehen, bei der genau eine Virtuelle Ressourcen einem neuen Head zugeordnet wurde. Betrachtet man ein holonisches VK analog zu Abbildung 6.3 als Baumstruktur, so entspricht dies dem Anhängen des durch den Head der Virtuellen Ressource bestimmten Teilbaums an einen neuen Elternknoten. Hinsichtlich des Systemverhaltens ist folgendes zu beobachten:

- Die Anzahl der Reorganisationsoperationen in der *Übergangszeit* und im *Winter* unterscheidet sich nur geringfügig. Hier kann wiederum auf die vergleichbare durchschnittliche Laufzeit der KWK-Anlagen und den damit einhergehenden geringen bzw. ähnlichen Freiheitsgraden in der reaktiven Planung bzw. Reorganisation verwiesen werden, die zu einem ähnlichen Verhalten des Gesamtsystems führen.
- Im *Sommer* ist die Anzahl der Reorganisationsoperationen deutlich geringer als in den anderen Typtagfolgen. Wie das in Tabelle A.4 aufgeführte reorganisationsbedingte Nachrichtenaufkommen belegt, kann dies nicht auf einen gleichmaßen gesunkenen Reorganisationsbedarf zurückgeführt werden, sondern ist der Tatsache zuzuschreiben, dass wesentlich weniger Reorganisationsanfragen positiv beantwortet werden. Angesichts der prinzipiell größeren Planungsfreiheit aufgrund des verhältnismäßig geringen thermischen Bedarfs im *Sommer* erscheint dies zunächst paradox.

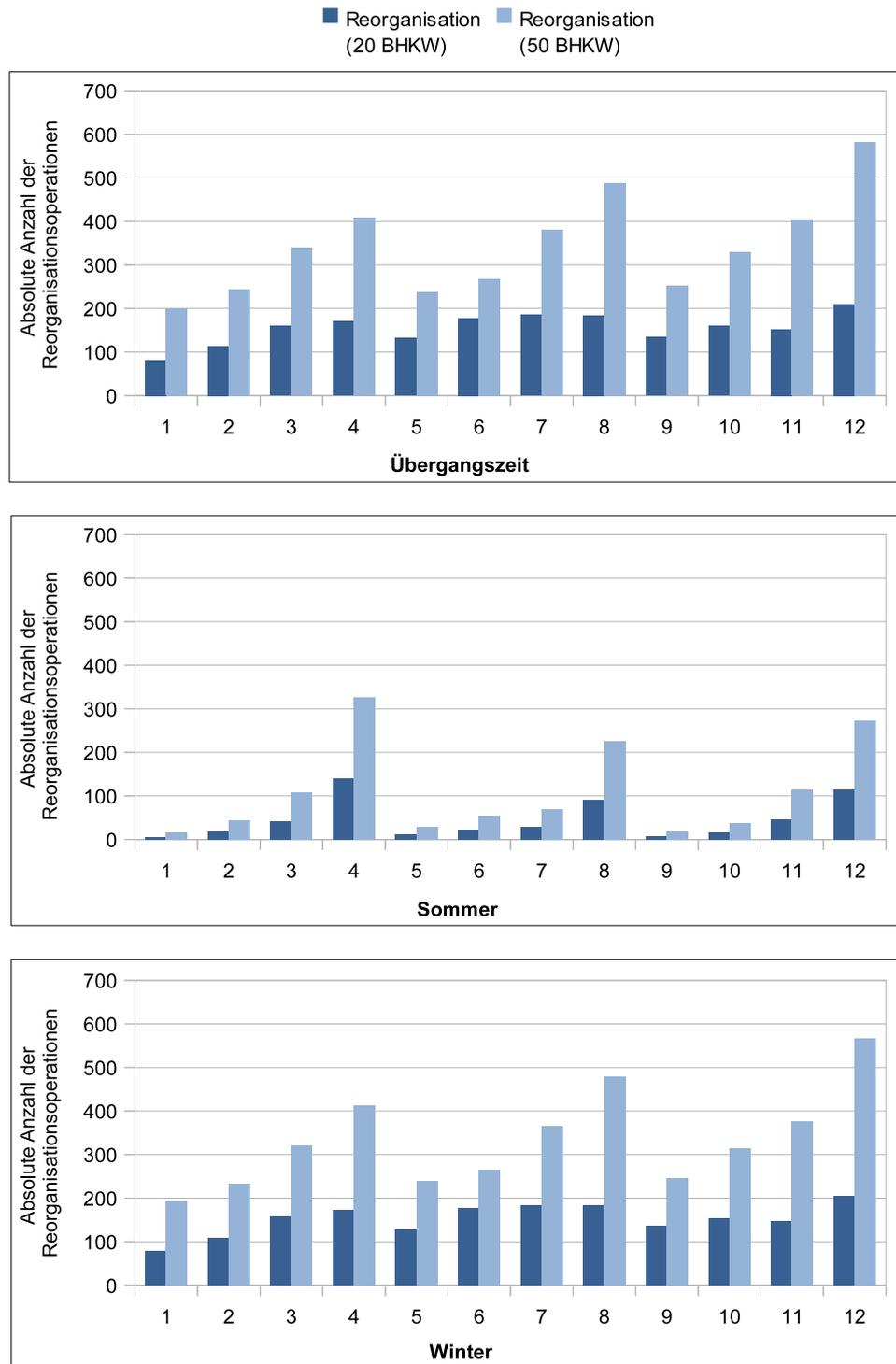


Abbildung 6.6: Anzahl der insgesamt in den simulierten Zeiträumen beobachteten Reorganisationsoperationen.

Der Grund für dieses Verhalten des System findet sich aber in der gegenüber der *Übergangszeit* und dem *Winter* deutlich höheren Fahrplanqualität (vergleiche Tabellen A.4 sowie A.5): Bei einer hohen Fahrplanqualität fällt der Nutzen eines Auftrags zur Kompensation von Abweichungen oder zur Fahrplanverbesserung niedriger aus als bei einer geringen Qualität des lokalen Anlagenfahrplans. Entsprechend wird es im Rahmen der Reorganisationsverhandlungen unwahrscheinlicher, dass eine Virtuelle Ressource ein positives Angebot abgibt.

- Mit zunehmendem Schwellenwert ϵ_κ steigt auch die Anzahl der Reorganisationsoperationen an. Dies ist insbesondere auf Gleichung 5.8 zurückzuführen, da eine Virtuelle Ressource mit einem hohen ϵ_κ zwar weniger schnell unzufrieden wird, bei Reorganisationsverhandlungen dafür aber auch einen geringeren Erfüllungsgrad der verhandelten Aufträge akzeptiert. Der Faktor n_κ - d.h. die Anzahl an Planungszeitpunkten, an denen eine Verletzung des Schwellenwerts ϵ_κ vorliegen muss, bevor Virtualisierungsverhandlungen gestartet werden - hat dagegen für die untersuchten Belegungen nur einen geringen Einfluss auf das Systemverhalten.

Ergänzend zur Betrachtung des Systemverhaltens hinsichtlich der Reorganisation stellen Abbildungen 6.7 und 6.8 die Auswirkungen der unterschiedlichen Parameterbelegungen auf das Nachrichtenaufkommen und die Anzahl der systemweit verarbeiteten Aufträge dar. Als Referenzwert dienen dabei die im Falle einer statischen Organisation des holo-nischen VK erhaltenen Simulationsergebnisse.

- Im Vergleich zu Experiment *Adaptiv₁₃* nimmt die Anzahl der Aufträge für alle Parameterbelegungen deutlich ab. Dies verdeutlicht den intendierten Effekt des Ausgeglichenheitskriteriums nach Definition 5.5: In einer ausgeglichenen Virtuellen Ressource können Fahrplanabweichungen vermehrt lokal kompensiert werden, ohne dass eine Weiterleitung von Aufträgen an den jeweils übergeordneten Head notwendig ist.
- Auch die Anzahl der systemweit gesendeten Nachrichten nimmt im Vergleich zu Experiment *Adaptiv₁₃* deutlich ab. Dieser Effekt ist auf die sinkende Anzahl von Aufträgen zurückzuführen, die insbesondere einen entsprechend verringerten Kommunikationsaufwand im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen zur Folge haben. Dem gegenüber steht der durch Reorganisationsverhandlungen verursachte Kommunikationsoverhead, der gemäß der Tabellen A.4 sowie A.5 im Anhang einen jahreszeitlich schwankenden Anteil zwischen 6% und 25% am gesamten Nachrichtenaufkommen hat und - entsprechend der bereits hinsichtlich der Reorganisationsoperationen getroffenen Beobachtungen - insbesondere im *Sommer* sehr hoch ist.
- Hinsichtlich der Auswirkungen auf die globale bzw. lokale Einsatzplanqualität zeigen die Simulationsexperimente keine signifikanten Unterschiede zu der statischen Organisation. Auf eine explizite Darstellung der Ergebnisse wird daher an dieser Stelle verzichtet; die aufbereiteten Daten können aber in den Tabellen A.4 sowie A.5 im Anhang eingesehen werden.

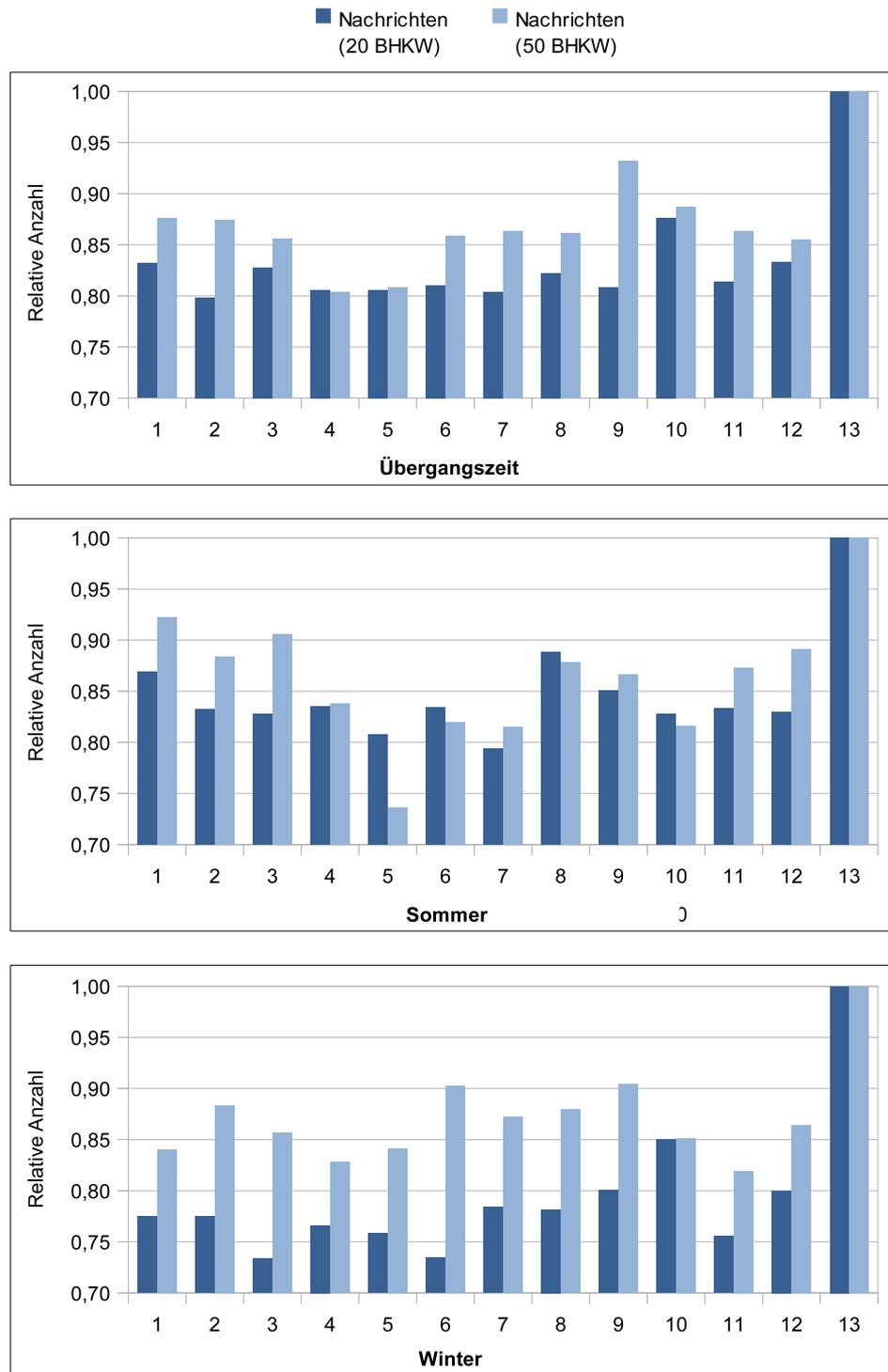


Abbildung 6.7: Relatives Nachrichtenaufkommen in Bezug auf eine statische Organisation (Experiment $Adaptiv_{13}$).

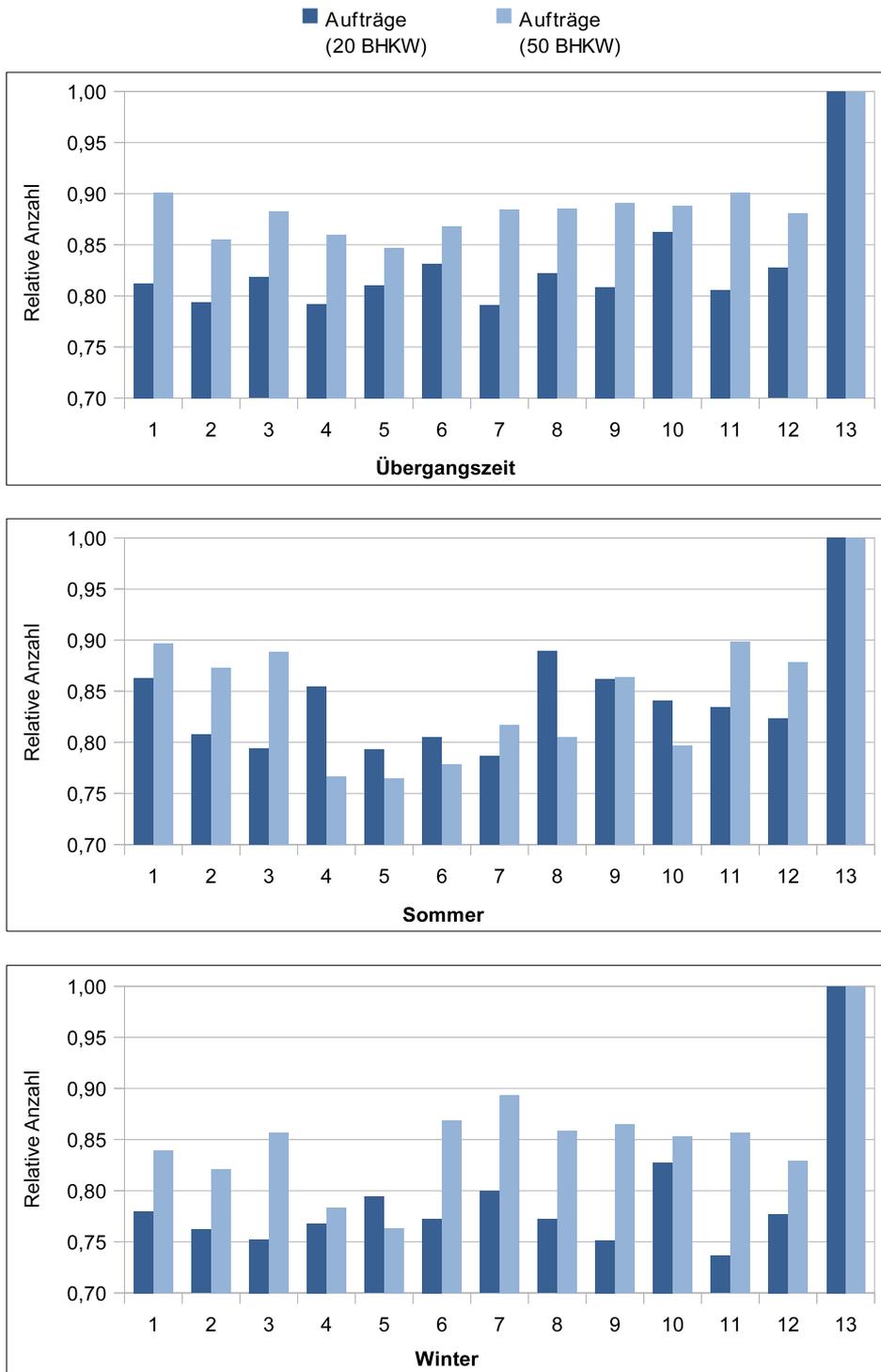


Abbildung 6.8: Relative Anzahl verarbeiteter Aufträge in Bezug auf eine statische Organisation (Experiment $Adaptiv_{13}$).

Insgesamt ist festzuhalten, dass die unterschiedlichen Parameterbelegungen deutliche Auswirkungen auf das beobachtete Reorganisationsverhalten des holonischen VK - gemessen an der Anzahl der Reorganisationsoperationen - ausüben, die Unterschiede hinsichtlich der Skalierbarkeit - gemessen an gesendeten Nachrichten und verarbeiteten Aufträgen - allerdings gering ausfallen. Ein Grund dafür ist in Gleichung 5.8 zu vermuten: Für kleine ϵ_κ werden nur qualitativ hochwertige Angebote im Rahmen der Reorganisationsverhandlungen akzeptiert, während für große ϵ_κ auch bei einem verhältnismäßig niedrigen Mehrwert einer Reorganisation zugestimmt wird. Vereinfacht folgen daraus wenige, aber gute Strukturänderungen für niedrige ϵ_κ , und viele, aber weniger gute Strukturänderungen für große ϵ_κ . Eine Überprüfung dieser Vermutung erfordert eine vertiefte Untersuchung der Auswirkungen einzelner Reorganisationsoperationen in einem holonischen VK, das insbesondere unterschiedliche Anlagentypen - und damit differenzierte Restriktionen, Präferenzen und Nutzenbewertungen - umfassen sollte, und überschreitet die Möglichkeiten dieser Arbeit⁶. Für den im nächsten Abschnitt diskutierten Performanzvergleich mit einer zentralen Planungskomponente wurde die Belegung aus Experiment Adaptiv₅ verwendet, die in allen untersuchten Typtagfolgen mit verhältnismäßig wenigen Reorganisationsoperationen gute Ergebnisse erzielt hat. Abschließend sei angemerkt, dass Hypothese 3 zumindest für den hier untersuchten Anwendungsfall BHKW-basierter VK unter Voraussetzung der verwendeten Parameterbelegungen bestätigt ist; eine verallgemeinerte Aussage kann aus den Beobachtungen dieser Evaluation allerdings nicht abgeleitet werden.

6.3 Empirischer Performanzvergleich mit zentraler Planung

Nachdem im Rahmen der verschiedenen Parameterstudien im vorherigen Abschnitt eine vielversprechende Belegung der heuristischen Parameter der aktiven Einsatzplanung und der adaptiven Reorganisation gefunden wurde, wird das holonische System im Folgenden hinsichtlich der Qualität der reaktiven Einsatzplanung mit einer zentralen Steuerungskomponente verglichen. Ziel ist dabei insbesondere die Überprüfung der zu Beginn dieser Arbeit postulierten Hypothesen 1 und 2, die sich auf die globale bzw. lokale Einsatzplanqualität der reaktiven Einsatzplanung in VK beziehen. Dazu wird zunächst die für den simulativen Performanzvergleich eingesetzte zentrale Planungskomponente kurz vorgestellt.

6.3.1 Die zentrale Planungskomponente CDisp

Der zentrale Dispatcher - im Weiteren mit CDisp abgekürzt - ist eine eigens für die Evaluation dieser Arbeit in JAVA implementierte Softwarekomponente, die über die Kommunikationsschnittstelle des Simulationswerkzeugs MIPS auf die technischen Eigenschaften und die Zustandsdaten der simulierten BHKW zugreifen und gegebenenfalls angepasste Fahrpläne an die Anlagen übermitteln kann. CDisp überwacht im Sinne ei-

⁶ Siehe dazu auch die Diskussion in Kapitel 7.

ner zentralen Steuerung sämtliche DER eines VK und verfügt über zwei unterschiedliche reaktive Planungsmodi:

Neuaufwurf: Liegen zu einem Planungszeitpunkt Ereignisse bzw. Fahrplanabweichungen vor, so führt CDisp im Sinne eines Neuaufwurfs des Tageseinsatzplanungsproblems den prädiktiven Einsatzplanungsalgorithmus⁷ erneut unter Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands aus, um die im Gesamtfahrplan vorgesehene Leistungsbereitstellung auf sämtliche verfügbaren Anlagen neu zu verteilen. Als Prognosedaten insbesondere für den thermischen Gebäudebedarf kommen dabei die gleichen Daten zum Einsatz wie bei der initialen Ausführung des Algorithmus.

Heuristik: Wird eine Fahrplanabweichung bei einem DER festgestellt, so werden die verbleibenden dezentralen Anlagen absteigend nach ihrer jeweils maximal verfügbaren Leistungskapazität in eine Liste einsortiert. Diese Liste wird im Anschluss sequenziell so lange abgearbeitet, bis die festgestellte Fahrplanabweichung durch ausreichende Leistungsbereitstellung kompensiert ist. Die entsprechend angepassten Fahrpläne werden abschließend an die betroffenen DER übermittelt.

Analog zu den in Abschnitt 3.1 diskutierten zentralen Ansätzen zur Koordination von DER realisiert CDisp keine vorausschauende Planung, die gegebenenfalls unnötige Zustandsänderungen oder zukünftige Fahrplanabweichungen vermeiden könnte.

6.3.2 Empirischer Performanzvergleich

Für den Performanzvergleich der unterschiedlichen reaktiven Einsatzplanungsansätze hinsichtlich der globalen bzw. lokalen Qualität wurden die folgenden Szenarien simulativ untersucht:

σ_{fc}^2	0.10	Szenario₆ $n_{DER} = 20$ $\sigma_{fc}^2 = 0.10$	Szenario₇ $n_{DER} = 50$ $\sigma_{fc}^2 = 0.10$	Szenario₈ $n_{DER} = 100$ $\sigma_{fc}^2 = 0.10$	Szenario₉ $n_{DER} = 200$ $\sigma_{fc}^2 = 0.10$	Szenario₁₀ $n_{DER} = 500$ $\sigma_{fc}^2 = 0.10$
	0.05	Szenario₁ $n_{DER} = 20$ $\sigma_{fc}^2 = 0.05$	Szenario₂ $n_{DER} = 50$ $\sigma_{fc}^2 = 0.05$	Szenario₃ $n_{DER} = 100$ $\sigma_{fc}^2 = 0.05$	Szenario₄ $n_{DER} = 200$ $\sigma_{fc}^2 = 0.05$	Szenario₅ $n_{DER} = 500$ $\sigma_{fc}^2 = 0.05$
		20	50	100	200	500
		n_{DER}				

Tabelle 6.7: Szenarien für empirischen Performanzvergleich.

Der Faktor σ_{fc}^2 dient dem „Lastganggenerator“ des Simulationswerkzeugs MIPS als Varianz der normalverteilten Prognosedatenverfälschung und spiegelt damit eine gewisse Unsicherheit bei der Erstellung gebäudeindividueller Lastprognosen wider. In der Li-

⁷ Siehe dazu die Simulationsannahmen in Abschnitt 6.2.1.

teratur wurden diesbezüglich keine realweltlichen Erfahrungswerte gefunden, die gegebenenfalls eine exaktere Parametrisierung erlaubt hätten. Die Größe der untersuchten VK deckt sowohl Anwendungsfälle, die mit den Arbeiten in Abschnitt 3.1 vergleichbar sind ($n_{\text{DER}} = 20$ bzw. $n_{\text{DER}} = 50$), als auch erst in Zukunft zu erwartende Anlagenzahlen ($n_{\text{DER}} = 200$ bzw. $n_{\text{DER}} = 500$) ab. Tabelle 6.8 listet ergänzend die als fest angenommenen Parameter auf. Für die Kapazitätsverhandlungen und die adaptive Reorganisation wurden die im letzten Abschnitt als performant identifizierten Belegungen verwendet; die weiteren Parameter entsprechen den Annahmen der vorherigen Experimente.

Parameter	Belegung	Interpretation
Auftragsverarbeitung		
ϵ_d	0	Aufträge nur bei identischer Deadline aggregieren
ϵ_α	0	Aufträge sofort versenden
ϵ_o	∞	Beliebig viele Aufträge verarbeitbar
ϵ_u	∞	Aufträge nur bei identischem Nutzen aggregieren
Kapazitätsverhandlungen		
γ_{SC}	0,5	Nutzen bezüglich Fahrplanabweichungen und Soft Constraints gleichwertig behandeln
γ_δ	0,5	
γ_{ind}	0,5	Individuellen Nutzen und sozialen Nutzen gleichwertig behandeln
γ_{soc}	0,5	
Adaptive Reorganisation		
ϵ_κ	0,0	Keine Abweichungen von exakter Erfüllung tolerieren
n_κ	2	Reorganisation nach zwei Schwellwertverletzungen
n_{vr}	∞	Keine Obergrenze für die Anzahl an Body-R/OA
Deliberative Fahrplanoptimierung		
n_{st}	4	Kurzfristig orientierte Optimierung für die jeweils nächsten vier Planungszeitpunkte in der „nahen“ Zukunft
Softwarekomponente „Lastganggenerator“		
μ_{fc}	1,0	Erwartungswert der normalverteilten Prognosedatenverfälschung

Tabelle 6.8: Feste Belegungen für den Performanzvergleich.

Die Szenarien aus Tabelle 6.7 wurden jeweils für die Typtagfolgen *Übergangszeit*, *Sommer* und *Winter* sowie für die folgenden reaktiven Einsatzplanungsansätze simuliert:

- CDisp (Neuaufwurf): Zentrale Überwachung der DER; Umplanung durch Neuaufwurf des Tageseinsatzplanungsproblems mit angepasster Lastkurve.
- CDisp (Heuristik): Zentrale Überwachung der DER; Umplanung durch Abarbeitung einer nach verfügbarer Kapazität sortierten Anlagenliste.
- Holonisches VK: Dezentrale Überwachung der DER; Umplanung durch Erstellung und Verarbeitung von Aufträgen.

- Lokale Anlagenregelung: Dezentrale Überwachung der DER; keine Umplanung, nur Überwachung der kritischen Speichertemperaturen gemäß der Prädikate 6.1 und 6.2.

Die Ergebnisse der lokalen Anlagenregelung dienen dabei als Referenzwerte für die Gegenüberstellung der anderen Ansätze. Abbildungen 6.9 und 6.10 stellen die Simulationsergebnisse für $\sigma_{fc}^2 = 0.05$ in Form der prozentualen Verbesserung der globalen bzw. lokalen Einsatzplanqualität bezüglich der Referenzwerte dar; die absoluten Werte können in Tabelle A.6 im Anhang eingesehen werden. Ebenfalls im Anhang einsehbar sind die Simulationsergebnisse für $\sigma_{fc}^2 = 0.10$, die sich qualitativ nur geringfügig von den bereits dargestellten Ergebnissen unterscheiden. Hinsichtlich der globalen Einsatzplanqualität ist Folgendes festzuhalten:

- Der holonische Ansatz erzielt im *Sommer* mit einer durchschnittlichen prozentualen Verbesserung von 40% das mit Abstand beste Ergebnis, gefolgt vom Einsatz der Heuristik mit 16% und dem Neuaufwurf mit 9%. Dies deutet darauf hin, dass die Agenten des holonischen VK die Freiheitsgrade in der Einsatzplanung effizienter ausnutzen können als die - vergleichsweise einfach gestaltete - zentrale Überwachung.
- In der *Übergangszeit* schneiden das holonische VK mit durchschnittlich 44% und die Heuristik mit durchschnittlich 41% vergleichbar gut ab. Gleiches gilt für den *Winter*, wenn auch die relativen Ergebnisse mit durchschnittlich 16% (holonisches VK) und 13% (Heuristik) deutlich geringer ausfallen. Dieser Unterschied erklärt sich vor allem durch die Referenzwerte der lokalen Anlagenregelung, die in der *Übergangszeit* und im *Winter* für alle betrachteten Szenarien nahe beieinander liegen und damit insbesondere für die *Übergangszeit* - aufgrund der etwas geringeren durchschnittlichen Tageslaufzeiten der KWK-Anlagen als im *Winter* - Potenzial für Verbesserungen bieten. Die absolute globale Einsatzplanqualität fällt in der *Übergangszeit* dennoch deutlich geringer aus als im *Sommer*.

Insgesamt erzielt das holonische VK damit eine bessere globale Performanz im Sinne der Hypothese 1, die für den betrachteten Anwendungsfall als bestätigt angesehen werden kann. Hinsichtlich Hypothese 2 können aus den in Abbildung 6.10 dargestellten Ergebnissen die folgenden Beobachtungen abgeleitet werden:

- In der *Übergangszeit* erzielt das holonische VK eine prozentuale Verbesserung der lokalen Einsatzplanqualität von durchschnittlich 9% und schneidet damit nur geringfügig besser ab als die Heuristik und der Neuaufwurf mit jeweils 7%.
- Gleiches gilt für den *Sommer*, wobei die Unterschiede mit durchschnittlich 4% (holonisches VK), 2% (Heuristik) sowie 3% (Neuaufwurf) sehr gering ausfallen. Dies deutet auf die bereits sehr hohe Qualität der Anlagenfahrpläne im Sommer hin, die trotz großer Freiheitsgrade in der Einsatzplanung kaum verbessert werden können.
- Im *Winter* liegen die Ergebnisse mit durchschnittlich 3% (holonisches VK), 2% (Heuristik) sowie 5% (Neuaufwurf) ebenfalls nahe beieinander, was aufgrund der hohen Tageslaufzeiten der KWK-Anlagen zu erwarten war.

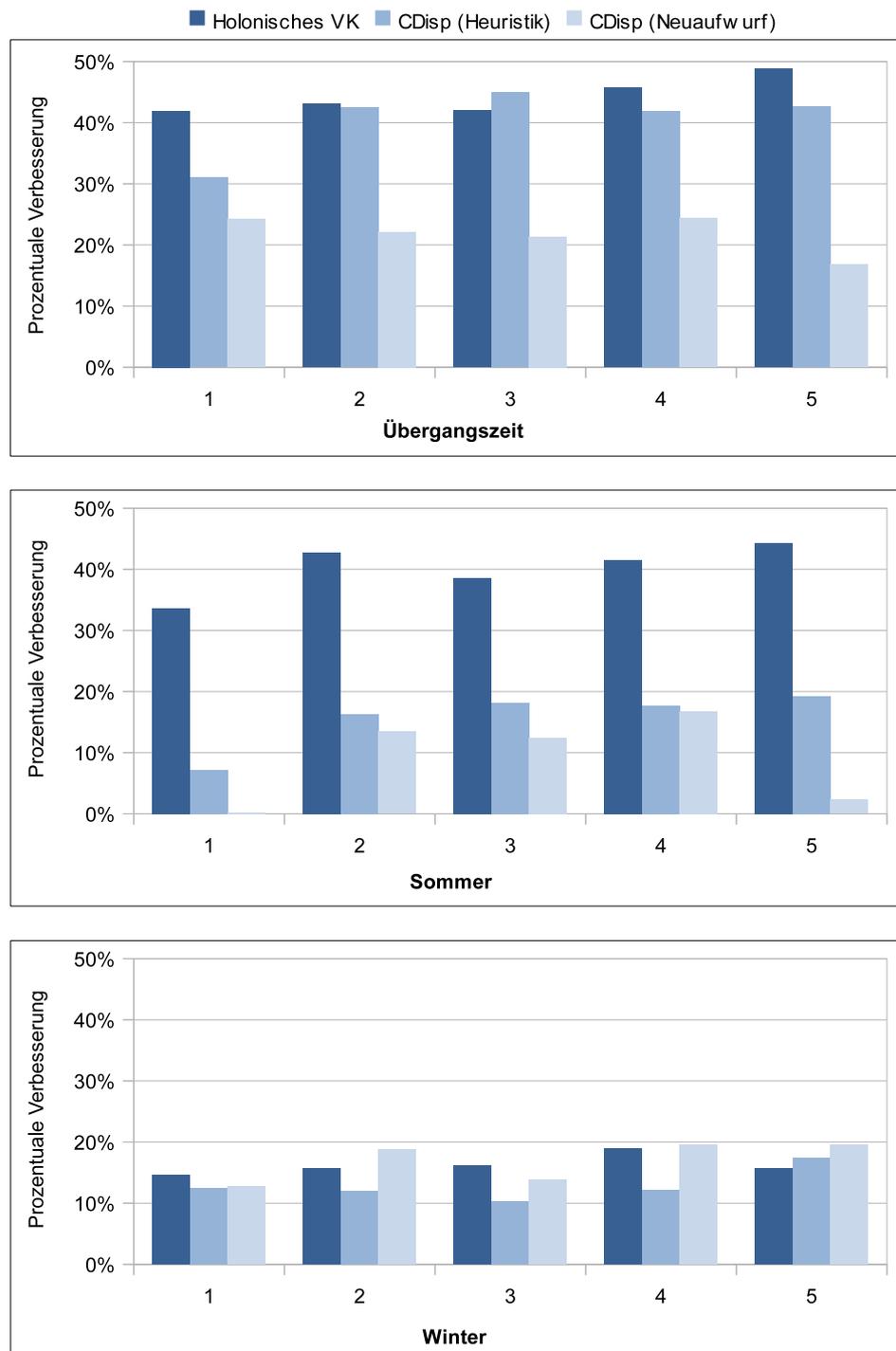


Abbildung 6.9: Prozentuale Verbesserung der globalen Einsatzplanqualität; Referenzwerte: lokale Anlagenregelung.

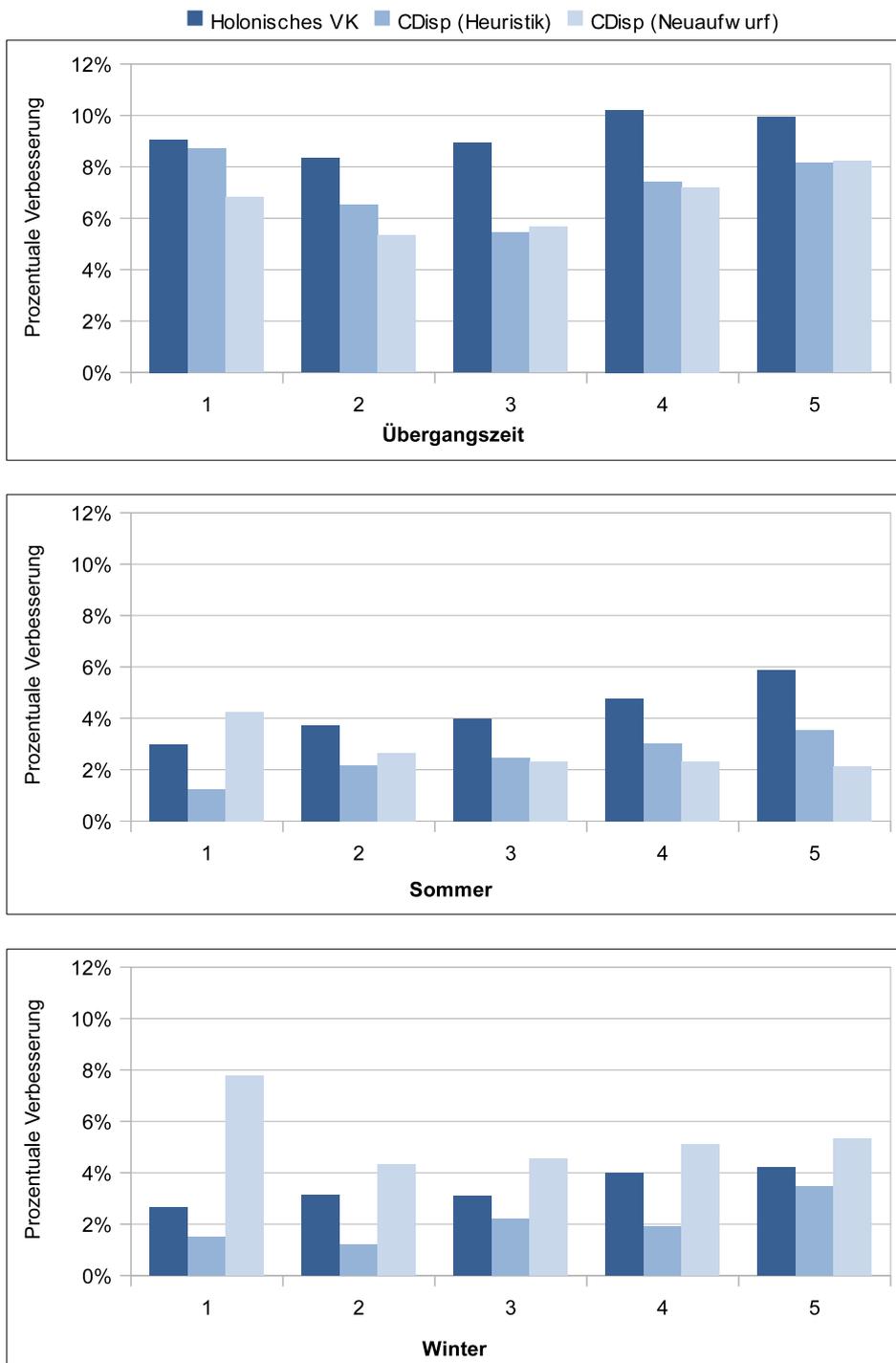


Abbildung 6.10: Prozentuale Verbesserung der lokalen Einsatzplanqualität; Referenzwerte: lokale Anlagenregelung.

Die lokale Performanz der untersuchten reaktiven Einsatzplanungsansätze im Sinne der Hypothese 2 fällt insbesondere im Vergleich mit den Ergebnissen der globalen Performanz gering aus. Die beobachteten Performanzunterschiede zwischen dem holonischen VK und der zentralen Überwachung und Steuerung der dezentralen Anlagen lassen keinen Rückschluss auf den zu Beginn dieser Arbeit vermuteten Vorteil einer besseren Berücksichtigung der anlagenlokalen Randbedingungen zu; Hypothese 2 kann damit für den betrachteten Anwendungsfall nicht als bestätigt angesehen werden. Um in dieser Hinsicht eine fundierte Aussage treffen zu können, ist - analog zur Diskussion der adaptiven Reorganisation in Abschnitt 6.2.4 - eine vertiefte Untersuchung eines VK mit unterschiedlichen Anlagentypen, die jeweils differenzierte Randbedingungen an die reaktive Koordination stellen, notwendig; dies liegt allerdings außerhalb der Möglichkeiten dieser Arbeit.

Dennoch ist festzuhalten, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept der aktiven Einsatzplanung in holonischen VK insgesamt keine schlechteren, hinsichtlich der globalen Performanz sogar bessere Ergebnisse generiert als die zentrale Planungskomponente CDisp. Eine abschließende Betrachtung der Eigenschaften des holonischen Systems und insbesondere eine zusammenfassende Gegenüberstellung zu den in Abschnitt 3.1 diskutierten verwandten Koordinationsansätzen erfolgt im nächsten Kapitel.

It would have been nice to have some cosmic explanation at this point, but the universe never gave you explanations, it only gave you more questions.

– Terry Pratchett

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Kontext Virtueller Kraftwerke (kurz: VK) ist eine effiziente reaktive Einsatzplanung ein wichtiger Bestandteil einer zuverlässigen Koordination von dezentralen Erzeugungswandlungsanlagen (kurz: DER). Zentrale Aufgabe ist dabei die kontinuierliche Anpassung der initial durch eine Tageseinsatzplanung generierten Anlagenfahrpläne an einen dynamisch veränderlichen Systemzustand so, dass die im Gesamtfahrplan vorgesehene Bereitstellung von Elektroenergie bestmöglich realisiert wird. Im Folgenden wird der in dieser Arbeit entwickelte Beitrag zur Bewältigung dieser Problemstellung zusammengefasst und hinsichtlich der in Abschnitt 3.1 vorgestellten bestehenden Koordinationsansätze vergleichend diskutiert. Anhand der aufgezeigten Stärken und Schwächen werden abschließend mögliche Erweiterungen des Ansatzes und noch bestehender Forschungsbedarf aufgezeigt.

7.1 Zusammenfassung der Arbeit

In Abschnitt 2.2.2 wurden zunächst mehrere Anforderungen an eine Realisierung der reaktiven Einsatzplanung in VK identifiziert:

- In Abhängigkeit der durch ein VK realisierten energiewirtschaftlichen Dienstleistung - etwa dem Anbieten elektrischer Leistung an einem lokalen Energiemarktplatz oder der Bereitstellung von Regelenergie - können unterschiedliche zeitliche Anforderungen hinsichtlich der *Reaktionsfähigkeit* (Anforderung A_1), d.h. der Fähigkeit einer reaktiven Steuerungskomponente, innerhalb einer zeitlichen Obergrenze auf Einsatzplanabweichungen zu reagieren, bestehen.
- VK können sich - etwa um bestimmte Markteintrittsschranken zu überwinden - aus einer großen *Anzahl dezentraler Anlagen* (Anforderung A_2) zusammensetzen, die dennoch zuverlässig überwacht und gesteuert werden müssen.
- Um die inhärente *Systemdynamik* eines VK (Anforderung A_3) beherrschen zu können, ist neben einer guten Reaktionsfähigkeit auch eine frühzeitige Erkennung bzw. Vermeidung von Fahrplanabweichungen, die sich insbesondere auch als Folge der reaktiven Planung ergeben können, notwendig.
- Die DER eines VK sind in der Regel räumlich weit verteilt und können unterschiedliche Anlagentypen wie beispielsweise Photovoltaikanlagen (kurz: PV), Blockheizkraftwerke (kurz: BHKW) oder Speichersysteme für Elektroenergie umfassen. Dieser *Individualität* (Anforderung A_4), die sich auch in anlagenlokalen Nebenbedingungen und Präferenzen ausdrückt, muss Rechnung getragen werden.

- Häufige Zustandsänderungen können sich negativ auf die Lebensdauer einer dezentralen Anlage auswirken und damit unter anderem die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs beeinträchtigen. Daher sollten im Rahmen der reaktiven Einsatzplanung möglichst *robuste Anlagenfahrpläne* (Anforderung A₅) generiert werden, die sich auch nach einer zusätzlichen Leistungsbereitstellung zur Kompensation von Einsatzplanabweichungen nahe an den ursprünglichen Leistungsvorgaben orientieren.

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen wurde im Rahmen dieser Arbeit die sogenannte aktive Einsatzplanung entwickelt, die auf der technologischen Grundlage eines Multiagentensystems (kurz: MAS) reaktive Planung und deliberative Fahrplanoptimierung miteinander vereint. Ausgangspunkt war dabei die Formalisierung *RSP* der reaktiven Einsatzplanung in VK (Abschnitt 4.1), die die wichtigsten Begrifflichkeiten und Zusammenhänge systematisch aufbereitet und aufgrund ihrer Unabhängigkeit von konkreten Lösungsansätzen als Diskussionsgrundlage für alternative Realisierungen reaktiver Einsatzplanungssysteme in den wissenschaftlichen Diskurs einfließen kann.

In Anlehnung an die von Henseler entwickelte aktive Ablaufplanung [Hen98], einem reaktiven Planungsansatz für die Produktionsplanung und -steuerung, wurde unter Berücksichtigung der domänenspezifischen Gegebenheiten ein differenziertes Verständnis der Konsistenz von Einsatzplänen diskutiert (Abschnitt 4.2):

- Ein bezüglich einer Ressource eines VK *konsistenzfähiger* Einsatzplan erfüllt alle zeitinvarianten Restriktionen, d.h. er berücksichtigt insbesondere die technischen Anlageigenschaften wie beispielsweise die elektrische Maximalleistung eines DER.
- Ein bezüglich einer Ressource *lokal zulässiger* Einsatzplan ist konsistenzfähig und erfüllt darüber hinaus alle zustandsabhängigen Restriktionen; für den im Rahmen der Evaluation betrachteten Anwendungsfall BHKW-basierter VK darf etwa die jeweils aktuelle Speichertemperatur eine gewisse Obergrenze nicht überschreiten. Da insbesondere keine Verletzungen anlagentechnischer Restriktionen vorliegen, ist ein lokal zulässiger Einsatzplan damit auf den DER eines VK ausführbar.
- Ein Einsatzplan heißt schließlich bezüglich einer Ressource *lokal optimal*, wenn alle hinsichtlich des Einsatzes der Ressource definierten Präferenzen bzw. Soft Constraints vollständig erfüllt sind.

Dieses Konsistenzverständnis wurde anschließend dazu genutzt, *RSP* in mehrere aufeinander aufbauende Teilprobleme zu zerlegen, so dass sich eine Lösung des reaktiven Einsatzplanungsproblems letztlich durch eine schrittweise Anpassung bzw. Steigerung des Konsistenzgrads eines Einsatzplans ergibt. Für die Lösung der identifizierten Teilprobleme wurde mit den Ressourcen- und Auftragagenten der aktiven Einsatzplanung ein verteiltes Informationssystem eingeführt, welches unter anderem den Umstand ausnutzt, dass die zur Erreichung der lokalen Zulässigkeit notwendigen Fahrplananpassungen für jeden DER eines VK unabhängig vom Systemzustand der jeweils anderen Anlagen erfolgen kann (Abschnitt 4.3, Abschnitt 4.4). Die anlagenübergreifende Koordination erfolgt dabei durch die Generierung und Verarbeitung von Aufträgen, die einen

Kompensationsbedarf einer überschüssigen oder mangelnden elektrischen Leistung repräsentieren. Durch Kapazitätsverhandlungen auf der Grundlage einer Erweiterung des Contract Net-Interaktionsprotokoll von Knabe et al. [KSF02] werden unter anderem vorläufige Kapazitätszusagen ermöglicht, wodurch die Leistungskapazität der DER im Rahmen der Auftragsbearbeitung effizient genutzt und unnötige Fahrplananpassungen vermieden werden können. Darüber hinaus wurden mehrere heuristische Parameter definiert, mit deren Hilfe insbesondere der Entscheidungsfindungsprozess im Rahmen der Kapazitätsverhandlungen beeinflusst werden kann.

Aufbauend auf dem MAS der aktiven Einsatzplanung wurde schließlich das Konzept der Virtuellen Ressourcen entwickelt (Abschnitt 5.1), die als VK „im Kleinen“ aufgefasst werden können und auf konzeptioneller Ebene den DER-Clustern von Bitsch et al. [BFA02] ähneln, allerdings auch anlagentypübergreifende Aggregationen von DER ermöglichen. Eine Virtuelle Ressource wird dabei im Sinne einer moderierten Gruppe nach Fischer et al. [FSS03] durch einen einzelnen Head repräsentiert und kann eine Anzahl untergeordneter Body-Elemente umfassen, die selbst wiederum Virtuelle Ressourcen sind. Auf der Grundlage dieser selbstähnlichen Struktur können die Ressourcen- und Auftragagenten in Form eines holonischen VK organisiert werden (Abschnitt 5.2), was zunächst einer Hierarchisierung des MAS der aktiven Einsatzplanung gleichkommt. Die auf diesem Konzept aufbauende adaptive Virtualisierung von DER (Abschnitt 5.3) erweitert diesen Ansatz allerdings um die Fähigkeit, sich zur Laufzeit eigenständig an den Systemzustand anzupassen, indem die holonische Struktur gemäß des eingeführten Kriteriums der Ausgeglichenheit von Virtuellen Ressourcen auf der Grundlage bilateraler Virtualisierungsverhandlungen reorganisiert wird. Dadurch können - eine günstige Reorganisation vorausgesetzt - Aufträge vermehrt lokal behandelt und der systemweite Kommunikationsaufwand gesenkt werden.

7.2 Abschließende Bewertung des Lösungsansatzes

Die empirischen Untersuchungen aus Kapitel 6 haben für VK auf der Basis von BHKW gezeigt, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte verteilte reaktive Einsatzplanung hinsichtlich der globalen bzw. lokalen Performanz im Sinne der Hypothesen 1 und 2 aus Abschnitt 1.3 insgesamt keine schlechteren, hinsichtlich der globalen Qualität der Koordination sogar bessere Ergebnisse erzielt als eine zentrale Steuerungskomponente, die einen Neuaufwurf der Tageseinsatzplanung durchführt oder eine einfache Umplanungsheuristik verwendet. Darüber hinaus hat die aktive Einsatzplanung in holonischen VK auch bezüglich der Anforderungen A_1 bis A_5 insbesondere gegenüber zentralisierten Informationssystemen eine Reihe von Vorteilen, die nachfolgend diskutiert und in Tabelle 7.1 zusammenfassend dargestellt werden. Für die dunkel eingefärbten Einträge war dabei analog zu Abschnitt 3.1 keine Bewertung des jeweiligen Ansatzes hinsichtlich des entsprechenden Kriteriums möglich.

Reaktionsfähigkeit (A_1): Das abgestufte Konsistenzverständnis ermöglicht beim Auftreten eines Ereignisses zunächst eine unmittelbare Wiederstellung der lokalen Zuläs-

Bewertung + : positiv - : negativ ○ : neutral	Reaktionsfähigkeit	Anlagenzahl	Systemdynamik	Individualität	Robustheit
	A₁	A₂	A₃	A₄	A₅
Ansatz	A₁	A₂	A₃	A₄	A₅
Online-Optimierung	○	○	■	-	■
Zentrale Intelligenz (ZI)	-	-	○	○	-
PoMS (festes Szenario)	+	-	○	-	○
PowerMatcher	○	+	○	+	■
DEZENT	+	+	○	+	-
Aktive Einsatzplanung in holonischen VK	○	+	+	+	○

Table 7.1: Abschließende Gegenüberstellung der in dieser Arbeit betrachteten Koordinationsansätze.

sigkeit, indem der Fahrplan des betroffenen DER entsprechend der aktuellen Restriktionen korrigiert und ein kompensierender Auftrag generiert wird. Die Zeitspanne bis zum Erhalt der Rückmeldung über eine gegebenenfalls teilweise Erfüllung des Auftrags wird - ein fehlerfreies Funktionieren der beteiligten Systemkomponenten vorausgesetzt - durch die Deadline des Auftrags nach oben begrenzt, da eine Terminierung der Kapazitätsverhandlungen aufgrund der inhärenten Deadlines des eingesetzten Interaktionsprotokoll HCNCNP gewährleistet ist. Damit ist grundsätzlich eine sehr schnelle Reaktionsfähigkeit gegeben, die sich gegebenenfalls aber negativ auf die Qualität der reaktiven Einsatzplanung auswirken kann. Die tatsächlich in einer realweltlichen Systemumgebung beobachtbaren Reaktionszeiten hängen dabei insbesondere von der verfügbaren Kommunikationsbandbreite und den Eigenschaften der Hardware, auf der die einzelnen Agenten aktiv sind, ab. Die abschließende Beurteilung fällt damit insbesondere im Vergleich zu DEZENT neutral aus, da im Rahmen dieser Arbeit keine Aussagen über garantierte Reaktionszeiten gegeben werden können.

Anlagenzahl (A₂): Da es grundsätzlich möglich ist, die Ressourcen- und Auftragagenten für jede dezentrale Anlage auf einem eigenen eingebetteten System zu installieren, sind der Anzahl der reaktiv koordinierbaren DER prinzipiell keine Grenzen gesetzt. Die adaptive Reorganisation des holonischen VK kann außerdem dazu beitragen, das zur Koordination notwendige Nachrichtenaufkommen zu reduzieren. Damit fällt die Beurteilung hinsichtlich dieses Aspekts analog zu den untersuchten agentenbasierten Koordinationsansätzen positiv aus. Der Umgang mit möglicherweise nega-

tiven Auswirkungen einer sehr großen Anlagenzahl auf die Reaktionsfähigkeit des Systems wird im nächsten Abschnitt angesprochen.

Systemdynamik (A₃): Durch eine gegebenenfalls anlagenspezifisch gestaltete deliberative Planung ist es - wie am Beispiel der Optimierungsheuristik für BHKW gezeigt - möglich, Anlagenfahrpläne vorausschauend so zu optimieren, dass zukünftige Fahrplanabweichungen, die insbesondere auch durch Fahrplananpassungen im Rahmen der reaktiven Einsatzplanung verursacht werden können, vermieden werden. Zudem können zeitlich parallel auftretende Ereignisse durch die unabhängig agierenden Agenten ebenfalls in paralleler Weise verarbeitet werden; und mittels der heuristischen Parameter bezüglich der Auftragsaggregation kann der anfallende Koordinationsaufwand bei Bedarf - und gegebenenfalls auf Kosten der Einsatzplanqualität - an die Systemdynamik angepasst werden. Insgesamt bietet der entwickelte Ansatz damit mehrere Ansatzpunkte, um auch eine große Anzahl gleichzeitig eintretender Ereignisse einschließlich der möglichen Folgeauswirkungen beherrschen zu können, was ihn von den verwandten Koordinationsansätzen abhebt.

Individualität (A₄): Die Ressourcenagenten der aktiven Einsatzplanung können spezifische Präferenzen hinsichtlich des Anlagenbetriebs berücksichtigen und mittels der Nutzenbewertung in die reaktive Einsatzplanung miteinbeziehen. Für die Überwachung und Steuerung unterschiedlicher Energiesysteme kann gegebenenfalls eine herstellerspezifische Anpassung der Anlagenschnittstelle erforderlich sein, insofern die DER keine standardisierten Schnittstellen etwa gemäß IEC 61850 besitzen. Die Auftragagenten sowie die Koordinationsmechanismen können aufgrund dieser Kapselung der Anlagentechnik unverändert auch in technisch heterogenen VK eingesetzt werden. Analog zu PowerMatcher und DEZENT fällt die Bewertung der Individualität damit positiv aus.

Robustheit (A₅): Im Entscheidungsprozess der Kapazitätsverhandlungen erfolgt vor einer möglichen Kapazitätsbereitstellung eine Abwägung zwischen dem Nutzen einer Erfüllung der Anfrage und den gegebenenfalls negativen Auswirkungen auf die anlagenlokale Fahrplanqualität. Dadurch können die Ressourcenagenten - eine entsprechende Gewichtung der heuristischen Parameter der Kapazitätsverhandlungen vorausgesetzt - die Änderungen des lokalen Fahrplans prinzipiell auf ein aus ihrer Sicht akzeptables Maß beschränken. Die empirische Untersuchung aus Kapitel 6 hat allerdings gezeigt, dass der Effekt dieser Entscheidungsfreiheit auf die Anzahl der Zustandsänderungen zumindest für den betrachteten Anwendungsfall eher gering ausfällt¹. Auch die deliberative Optimierung des Energieinhalts des thermischen Pufferspeichers zeigt in dieser Hinsicht nur geringe Auswirkungen; dabei ist allerdings - wie im nächsten Abschnitt noch angesprochen wird - der Einfluss der Tageseinsatzplanung auf die initiale Einsatzplanqualität und die Freiheitsgrade der reaktiven Einsatzplanung unberücksichtigt. Insgesamt kann der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz damit nur neutral bewertet werden, da er zumindest keine negativen Effekte hinsichtlich der Robustheit der Anlagenfahrpläne aufweist.

¹ Vergleiche dazu Abbildung 6.10.

7.3 Forschungsbedarf und Erweiterungsmöglichkeiten

Sowohl die empirischen Untersuchungen als auch die abschließende Bewertung der aktiven Einsatzplanung in holonischen VK haben in einigen Punkten noch Forschungsbedarf hinsichtlich der Stärken und Schwächen des Ansatzes aufgezeigt. Im Folgenden werden diese Aspekte nochmals aufgegriffen und um mögliche Erweiterungen des verteilten reaktiven Einsatzplanungssystems ergänzt.

Untersuchung der Abhängigkeiten zur Tageseinsatzplanung

Nach dem Verständnis dieser Arbeit geht die reaktive Einsatzplanung stets von initial durch die Tageseinsatzplanung generierten Anlagenfahrplänen aus. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen in Kapitel 6 wurde dabei mit einer Variante der netzorientierten Betriebsweise für Mikro-BHKW ein ausgewählter, bereits in anderen Simulationsstudien eingesetzter Algorithmus verwendet. Dabei ist allerdings festzuhalten, dass die Tageseinsatzplanung einen deutlichen Einfluss auf die die Performanz der reaktiven Einsatzplanung haben kann, wie das folgende Beispiel verdeutlicht:

Beispiel 7.1: Einfluss der Tageseinsatzplanung

Gegeben sei der folgende Tageseinsatzplanungsalgorithmus: Setze für jeden Planungszeitpunkt $t \in T$ und jede Ressource $r \in R$ eines VK den Fahrplaneintrag $s_r(t)$ auf die elektrische Maximalleistung $p_{r,\max}$, d.h.

$$\forall t \in T \forall r \in R : s_r(t) := p_{r,\max}.$$

Der resultierende Einsatzplan ist im laufenden Betrieb kaum einzuhalten, lässt aber gleichzeitig keinen Spielraum für Kapazitätsverhandlungen oder Reorganisationsmaßnahmen: Für alle $r \in R$ und alle $t \in T$ liegen einerseits ausschließlich nichtpositive Fahrplanabweichungen $\delta_{s_r}(t) \leq 0$ vor, und andererseits gilt für die Leistungskapazitäten $p_r \in c_r(t)$ gemäß Definition 4.9 stets $p_r \leq 0$, da die Leistungsabgabe der Ressourcen nicht über die bereits eingeplante Maximalleistung erhöht werden kann. Damit können insgesamt nur positive Fahrplanabweichungen kompensiert bzw. Aufträge mit negativen Zielvorgaben beantwortet werden.

Für obiges Extrembeispiel folgt für den in dieser Arbeit entwickelten Reorganisationsansatz unter anderem ein hinsichtlich des Nachrichtenaufkommens sehr ungünstiges Kommunikationsverhalten, da die Unzufriedenheit der Virtuellen Ressourcen aufgrund der nicht erfüllbaren Aufträge sehr hoch ist, zugleich aber alle in der Folge initiierten Verhandlungen an der mangelnden Leistungskapazität scheitern. Eine vertiefte Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen prädiktiver und reaktiver Einsatzplanung könnte deshalb dazu beitragen, das Zusammenspiel der unterschiedlichen Planungsansätze - und damit letztlich auch die Ausnutzung des dezentralen Energiewandlungspotenzials - zu optimieren.

Untersuchung anlagentechnisch heterogener VK

Für die Evaluation dieser Arbeit wurden durchgängig VK auf der Grundlage von Mikro-BHKW betrachtet. Um verallgemeinerte Aussagen über die Performanz des entwickelten Ansatzes und die Auswirkungen unterschiedlicher Parameterbelegungen treffen zu können, sind weitergehende Untersuchungen auch anlagentechnisch heterogener VK notwendig. Eine Einbeziehung verschiedener Anlagentypen mit jeweils individuellen Restriktionen und Präferenzen - etwa nur prognostizierbare DER wie PV-Anlagen einerseits und sehr schnell regelbare Speichersysteme für Elektroenergie andererseits - könnte diesbezüglich differenzierte Rückschlüsse ermöglichen.

Individuelle Parametrisierung der Entscheidungsprozesse

Die im Rahmen der empirischen Untersuchungen in Kapitel 6 hinsichtlich der Entscheidungsprozesse der aktiven Einsatzplanung angenommenen Parameterbelegung wurden stets auf alle Agenten des Systems einheitlich angewendet. Es ist aber durchaus vorstellbar, dass eine individuelle, d.h. von Agent zu Agent unterschiedliche Parametrisierung insbesondere in heterogenen VK zu einer besseren Performanz des Gesamtsystems führt. Darüber hinaus könnten Belegungen der heuristischen Parameter auch im laufenden Betrieb von den Agenten erlernt bzw. angepasst werden, um sich flexibel etwa an die Systemdynamik anzupassen oder ungünstige Verhaltensweisen wie in Beispiel 7.1 erkennen und vermeiden zu können.

Differenzierte Entscheidungsfindung in der adaptiven Reorganisation

Die adaptive Reorganisation kann einen wesentlichen Einfluss auf den systemweiten Kommunikationsaufwand eines holonischen VK haben. Eine differenzierte Entscheidungsfindung, die neben dem Erfüllungsgrad von Aufträgen weitere Informationen - etwa die langfristigen Auswirkungen auf die anlagenlokale Fahrplanqualität - als Entscheidungskriterien über einen möglichen Zusammenschluss von Virtuellen Ressourcen miteinbezieht, könnte zu verbesserten Reorganisationsergebnissen führen und sich damit auch positiv auf das Nachrichtenaufkommen auswirken. Ergänzend dazu könnten auch graphentheoretische Verfahren angewendet werden, um die baumartig strukturierte Organisation hinsichtlich der Auswirkungen auf die Einsatzplanqualität und das Kommunikationsverhalten zu optimieren. So und Durfee haben etwa in [SD96] am Beispiel der Überwachung eines Computernetzwerks die Auswirkungen unterschiedlicher Organisationsformen auf die Performanz eines verteilten Systems zur Informationsbeschaffung analysiert und daraus auch Möglichkeiten zur Erstellung von organisationsformabhängigen Performanzprognosen abgeleitet. Ein vergleichbarer Ansatz ist prinzipiell auch für holonische VK denkbar und könnte beispielsweise zur Generierung von Restrukturierungsvorschlägen innerhalb einer Virtuellen Ressource oder im Rahmen einer teilweise strukturhaltenden bzw. vollständigen Reorganisation gemäß der Diskussion in Abschnitt 5.3.2 genutzt werden.

A Simulationsergebnisse

A.1 Vorstudie „Deliberative Fahrplanverbesserung“

Anzahl BHKW	n_{st}	Nachrichten gesamt	Aufträge gesamt	Globale Einsatzplanqualität		Lokale Einsatzplanqualität	
				absolut [kW]	relativ	absolut	relativ
Übergangszeit							
20	0	53.592	2.486	12,32	0,00%	0,65	0,00%
	2	422.196	75.272	10,21	20,67%	0,67	3,08%
	4	839.358	150.270	8,49	45,18%	0,70	8,35%
	6	947.724	218.454	8,58	43,59%	0,72	10,77%
50	0	176.180	4.868	17,32	0,00%	0,80	0,00%
	2	1.114.526	198.196	13,21	31,11%	0,79	-1,36%
	4	1.867.348	398.136	12,02	44,09%	0,82	2,34%
	6	2.546.620	587.990	11,98	44,57%	0,82	2,09%
Sommer							
20	0	31.124	1.512	6,24	0,00%	0,84	0,00%
	2	324.070	75.584	5,84	6,87%	0,86	2,82%
	4	594.084	151.730	4,17	49,67%	0,91	8,50%
	6	864.346	225.342	4,25	46,85%	0,91	8,33%
50	0	114.382	2.874	7,14	0,00%	0,90	0,00%
	2	906.462	201.004	6,21	14,90%	0,89	-1,57%
	4	2.081.332	410.890	5,11	39,63%	0,92	2,22%
	6	2.370.366	599.440	5,65	26,29%	0,92	1,81%
Winter							
20	0	58.382	3.524	11,16	0,00%	0,62	0,00%
	2	430.190	76.330	10,32	8,11%	0,65	5,35%
	4	788.997	150.270	8,32	34,16%	0,72	16,13%
	6	927.022	219.718	8,46	31,94%	0,73	17,74%
50	0	205.900	8.954	18,72	0,00%	0,63	0,00%
	2	1.343.012	201.976	16,42	14,01%	0,70	11,11%
	4	1.956.467	401.530	14,21	31,74%	0,69	9,52%
	6	2.789.056	584.266	14,01	33,62%	0,71	12,70%

Tabelle A.1: Simulationsergebnisse für Parameterstudie „Deliberative Fahrplanverbesserung“: gesendete Nachrichten, verarbeitete Aufträge, globale und lokale Einsatzplanqualität inklusive relativer Veränderung gegenüber Referenzergebnissen für $n_{st} = 0$.

A.2 Parameterstudie „Gewichtung des Nutzens“

Anzahl BHKW	Experiment	Nachrichten gesamt	Aufträge	Globale Einsatzplanqualität		Lokale Einsatzplanqualität	
				absolut [kW]	relativ	absolut	relativ
Übergangszeit							
20	1	880.038	151.349	15,47	0,55	0,72	1,06
	2	880.910	150.538	21,40	0,40	0,69	1,02
	3	866.938	149.696	8,46	1,00	0,68	1,00
	4	889.798	150.526	21,36	0,40	0,67	0,99
	5	882.510	148.188	21,51	0,39	0,69	1,02
50	1	3.043.040	400.521	18,68	0,74	0,72	1,08
	2	3.046.054	401.656	26,31	0,52	0,75	1,12
	3	3.110.716	405.586	13,78	1,00	0,67	1,00
	4	3.192.740	397.572	25,10	0,55	0,67	1,00
	5	3.051.588	397.848	32,26	0,43	0,68	1,03
Sommer							
20	1	588.508	150.170	4,82	0,88	0,90	0,99
	2	592.142	151.660	4,92	0,86	0,91	1,00
	3	592.972	151.620	4,25	1,00	0,91	1,00
	4	597.166	151.622	4,87	0,87	0,91	0,99
	5	593.868	151.500	4,95	0,86	0,91	1,00
50	1	2.036.238	391.944	6,77	0,75	0,89	0,97
	2	2.054.733	409.482	6,24	0,82	0,91	0,99
	3	2.081.332	410.890	5,11	1,00	0,92	1,00
	4	2.137.854	401.798	6,41	0,80	0,91	0,98
	5	2.042.906	402.990	6,02	0,85	0,90	0,98
Winter							
20	1	832.412	142.268	16,48	0,52	0,71	1,01
	2	836.865	145.879	19,78	0,43	0,69	0,99
	3	858.269	148.264	8,59	1,00	0,70	1,00
	4	863.104	146.010	21,52	0,40	0,67	0,95
	5	803.084	145.078	20,38	0,42	0,69	0,99
50	1	2.910.534	376.490	20,34	0,70	0,71	1,03
	2	2.893.751	381.573	24,85	0,57	0,73	1,06
	3	3.079.609	401.530	14,21	1,00	0,69	1,00
	4	3.096.958	385.645	23,29	0,61	0,68	0,99
	5	2.877.652	362.042	29,48	0,48	0,71	1,03

Tabelle A.2: Simulationsergebnisse für Parameterstudie „Gewichtung des Nutzens“: gesendete Nachrichten, verarbeitete Aufträge, globale und lokale Einsatzplanqualität inklusive relativer Veränderung gegenüber Referenzergebnissen aus Experiment 3.

A.3 Parameterstudie „Sozial intelligente Entscheidungsfindung“

Anzahl BHKW	Experiment	Nachrichten gesamt	Aufträge	Globale Einsatzplanqualität		Lokale Einsatzplanqualität	
				absolut [kW]	relativ	absolut	relativ
Übergangszeit							
20	1	916.626	154.700	17,95	0,47	0,56	0,79
	2	874.564	150.264	21,72	0,39	0,67	0,95
	3	839.358	150.270	8,49	1,00	0,70	1,00
	4	836.314	149.264	20,69	0,41	0,70	1,00
	5	891.080	149.528	8,28	1,03	0,70	0,99
50	1	3.541.446	407.888	39,71	0,27	0,47	0,57
	2	3.212.510	399.304	27,73	0,38	0,79	0,97
	3	3.167.384	398.136	10,56	1,00	0,82	1,00
	4	3.187.860	397.808	26,45	0,40	0,83	1,01
	5	3.192.198	399.160	11,79	0,90	0,81	0,99
Sommer							
20	1	588.284	152.990	5,31	0,78	0,85	0,94
	2	593.598	151.686	4,64	0,89	0,91	1,00
	3	594.084	151.730	4,15	1,00	0,91	1,00
	4	588.930	151.486	4,75	0,87	0,91	0,99
	5	594.636	151.918	4,25	0,98	0,91	1,00
50	1	2.024.159	399.487	6,94	0,75	0,80	0,88
	2	2.046.371	410.458	6,12	0,85	0,92	1,01
	3	2.077.498	405.987	5,20	1,00	0,91	1,00
	4	2.150.774	406.947	5,84	0,89	0,90	0,99
	5	2.032.598	403.756	5,53	0,94	0,89	0,98
Winter							
20	1	898.293	154.700	15,24	0,55	0,61	0,85
	2	865.818	150.264	19,17	0,43	0,68	0,94
	3	788.997	150.270	8,32	1,00	0,72	1,00
	4	802.861	149.264	21,24	0,39	0,71	0,99
	5	864.348	149.528	9,35	0,89	0,71	0,99
50	1	3.328.959	407.888	33,62	0,33	0,51	0,62
	2	3.051.885	399.304	25,47	0,44	0,81	0,99
	3	3.072.362	398.136	11,21	1,00	0,82	1,00
	4	3.060.346	397.808	28,41	0,39	0,79	0,96
	5	3.032.588	399.160	14,25	0,79	0,81	0,99

Tabelle A.3: Simulationsergebnisse für Parameterstudie „Sozial intelligente Entscheidungsfindung“: gesendete Nachrichten, verarbeitete Aufträge, globale und lokale Einsatzplanqualität inklusive relativer Veränderung gegenüber Referenzergebnissen aus Experiment 3.

A.4 Parameterstudie „Adaptive Reorganisation“

Anzahl BHKW	Experiment	Nachrichten		Aufträge	Globale Einsatzplanqualität		Lokale Einsatzplanqualität	
		gesamt	Reorganisation		absolut [kW]	relativ	absolut	relativ
Übergangszeit								
20	1	705.700	95.588	122.696	8,97	0,93	0,68	1,00
	2	677.141	76.648	119.936	8,79	0,95	0,65	0,97
	3	702.354	71.024	123.547	8,23	1,01	0,68	1,01
	4	683.504	63.192	119.605	8,27	1,00	0,66	0,98
	5	683.371	82.364	122.360	8,20	1,01	0,67	0,99
	6	687.456	94.024	125.498	8,54	0,97	0,68	1,01
	7	682.169	91.276	119.499	8,13	1,02	0,67	0,99
	8	697.405	54.364	124.143	8,49	0,98	0,66	0,97
	9	685.962	89.728	122.107	8,22	1,01	0,69	1,01
	10	743.253	74.272	130.208	8,62	0,96	0,67	0,99
	11	690.128	74.044	121.684	8,10	1,03	0,68	1,01
	12	706.468	87.992	124.920	8,37	0,99	0,65	0,96
	13	848.368	-	150.995	8,31	1,00	0,68	1,00
50	1	2.809.871	257.704	365.380	12,29	0,97	0,81	0,98
	2	2.805.518	200.692	346.523	12,14	0,98	0,80	0,98
	3	2.746.255	205.276	357.836	11,71	1,01	0,84	1,02
	4	2.577.794	177.332	348.519	11,75	1,01	0,82	0,99
	5	2.592.888	229.448	343.395	11,69	1,02	0,83	1,01
	6	2.753.928	263.624	351.964	11,96	0,99	0,81	0,99
	7	2.768.149	173.236	358.694	11,64	1,02	0,80	0,97
	8	2.764.308	169.040	358.752	11,92	1,00	0,81	0,98
	9	2.990.568	380.672	361.116	11,71	1,02	0,84	1,02
	10	2.846.689	293.148	359.948	12,02	0,99	0,80	0,97
	11	2.769.242	189.188	365.139	11,62	1,02	0,82	0,99
	12	2.743.931	241.044	357.105	11,82	1,01	0,80	0,98
	13	3.207.455	-	405.313	11,88	1,00	0,82	1,00
Sommer								
20	1	523.487	99.120	130.330	4,98	1,08	0,91	1,03
	2	501.354	84.378	122.036	5,11	1,05	0,91	1,04
	3	498.654	64.810	119.984	5,21	1,03	0,91	1,04
	4	503.029	123.824	129.094	5,13	1,05	0,91	1,03
	5	486.544	96.970	119.847	5,10	1,06	0,91	1,04
	6	502.354	93.524	121.564	5,41	1,00	0,91	1,03
	7	477.945	81.590	118.798	5,80	0,93	0,91	1,03
	8	535.039	118.214	134.344	4,99	1,08	0,91	1,03
	9	512.457	89.100	130.116	5,31	1,02	0,91	1,03
	10	498.465	90.898	127.052	5,27	1,02	0,91	1,03
	11	502.147	102.192	126.004	5,64	0,96	0,91	1,03
	12	499.875	78.086	124.308	5,69	0,95	0,92	1,04
	13	602.320	-	151.056	5,39	1,00	0,88	1,00
50	1	1.910.230	287.448	362.884	7,12	1,02	0,84	0,99
	2	1.831.465	234.571	353.440	7,21	1,00	0,83	0,98
	3	1.876.453	353.184	359.572	6,89	1,05	0,86	1,01
	4	1.735.449	386.331	310.371	6,82	1,06	0,89	1,05
	5	1.524.354	250.183	309.435	7,14	1,01	0,86	1,01
	6	1.697.865	259.997	315.235	7,16	1,01	0,82	0,97
	7	1.687.956	245.586	330.591	7,30	0,99	0,88	1,03
	8	1.819.134	323.906	325.744	6,82	1,06	0,88	1,04
	9	1.795.214	256.608	349.546	7,34	0,99	0,85	1,00
	10	1.690.229	235.426	322.469	7,23	1,00	0,86	1,01
	11	1.808.356	305.554	363.549	7,69	0,94	0,84	0,99
	12	1.846.531	250.656	355.404	7,45	0,97	0,82	0,97
	13	2.071.981	-	404.830	7,23	1,00	0,85	1,00

Tabelle A.4: Simulationsergebnisse für Parameterstudie „Adaptive Reorganisation“, Typfolgen Übergangszeit und Sommer: gesendete Nachrichten, verarbeitete Aufträge, globale und lokale Einsatzplanqualität inklusive relativer Veränderung gegenüber Referenzergebnissen aus Experiment 13.

Anzahl BHKW	Experi- ment	Nachrichten		Aufträge	Globale Einsatzplanqualität		Lokale Einsatzplanqualität	
		gesamt	Reorganisation		absolut [kW]	relativ	absolut	relativ
Winter								
20	1	670.415	87.941	116.561	9,06	0,91	0,67	1,04
	2	670.369	78.181	113.939	8,96	0,92	0,62	0,97
	3	634.926	70.314	112.498	8,64	0,95	0,66	1,02
	4	662.999	61.296	114.820	8,27	0,99	0,66	1,02
	5	656.036	79.069	118.689	8,12	1,01	0,68	1,06
	6	635.553	94.964	115.499	8,29	0,99	0,69	1,07
	7	678.541	94.014	119.499	7,97	1,03	0,65	1,01
	8	676.483	57.082	115.453	8,57	0,96	0,61	0,95
	9	692.821	88.831	112.338	8,38	0,98	0,66	1,03
	10	735.821	72.787	123.697	8,28	0,99	0,66	1,02
	11	653.572	71.082	110.050	7,70	1,07	0,70	1,09
	12	692.338	80.953	116.176	8,12	1,01	0,68	1,07
	13	865.335	-	149.485	8,23	1,00	0,64	1,00
50	1	2.641.279	255.127	343.457	11,30	1,02	0,77	0,96
	2	2.777.463	190.657	336.127	12,02	0,96	0,78	0,98
	3	2.691.330	199.118	350.680	11,48	1,01	0,82	1,03
	4	2.603.572	175.559	320.637	11,63	0,99	0,81	1,01
	5	2.644.745	224.859	312.489	11,34	1,02	0,85	1,06
	6	2.836.546	255.715	355.484	12,08	0,96	0,84	1,05
	7	2.740.468	176.701	365.868	11,06	1,05	0,78	0,98
	8	2.764.308	170.730	351.577	10,84	1,07	0,78	0,97
	9	2.841.039	392.092	353.894	11,59	1,00	0,79	1,00
	10	2.675.888	293.148	349.149	11,78	0,98	0,75	0,94
	11	2.575.395	185.404	350.533	11,27	1,03	0,81	1,01
	12	2.716.491	233.813	339.250	11,71	0,99	0,80	1,00
	13	3.143.306	-	409.366	11,56	1,00	0,80	1,00

Tabelle A.5: Simulationsergebnisse für Parameterstudie „Adaptive Reorganisation“, Typfolge Winter: gesendete Nachrichten, verarbeitete Aufträge, globale und lokale Einsatzplanqualität inklusive relativer Veränderung gegenüber Referenzergebnissen aus Experiment 13.

A.5 Empirischer Performanzvergleich

Anzahl BHKW	Varianz	Typ- tag- folge	Absolutwerte						Prozentuale Veränderung							
			Referenzwert		CDisp (Neuaufwurf)		CDisp (Heuristik)		Holonisches VK		CDisp (Neuaufwurf)		CDisp (Heuristik)		Holonisches VK	
			global	lokal	global	lokal	global	lokal	global	lokal	global	lokal	global	lokal	global	lokal
20	0,05	Ü	10,82	0,76	8,20	0,81	7,46	0,83	6,28	0,83	24,22%	6,83%	31,06%	8,70%	41,94%	9,06%
		S	7,32	0,88	7,31	0,92	6,80	0,89	4,86	0,91	0,27%	4,25%	7,15%	1,24%	33,67%	2,98%
		W	11,18	0,74	9,75	0,80	9,79	0,75	9,54	0,76	12,82%	7,76%	12,47%	1,50%	14,66%	2,64%
	0,10	Ü	10,38	0,78	7,79	0,83	7,55	0,83	6,64	0,83	24,97%	6,25%	27,28%	6,81%	36,02%	7,18%
		S	7,45	0,87	6,23	0,89	6,91	0,89	4,89	0,90	16,33%	2,31%	7,20%	1,91%	34,36%	3,19%
		W	10,86	0,76	8,18	0,83	7,69	0,78	8,16	0,80	24,72%	8,35%	29,23%	2,15%	24,88%	4,41%
50	0,05	Ü	16,97	0,76	13,22	0,80	9,76	0,81	9,66	0,82	22,13%	5,32%	42,47%	6,54%	43,06%	8,34%
		S	11,44	0,88	9,90	0,91	9,57	0,90	6,55	0,92	13,45%	2,66%	16,36%	2,17%	42,76%	3,74%
		W	18,36	0,72	14,92	0,75	16,17	0,73	15,48	0,74	18,76%	4,31%	11,96%	1,19%	15,73%	3,14%
	0,10	Ü	17,15	0,76	13,83	0,81	10,22	0,81	10,22	0,83	19,35%	6,21%	40,43%	5,50%	40,38%	8,12%
		S	11,66	0,88	10,88	0,91	9,57	0,90	7,69	0,91	6,76%	3,31%	18,00%	2,63%	34,05%	3,85%
		W	17,88	0,74	14,28	0,79	14,18	0,76	13,61	0,77	20,12%	6,78%	20,67%	2,67%	23,84%	4,61%
100	0,05	Ü	24,82	0,75	19,52	0,80	13,67	0,79	14,40	0,82	21,34%	5,66%	44,91%	5,45%	41,98%	8,92%
		S	16,76	0,88	14,67	0,90	13,71	0,90	10,29	0,92	12,45%	2,31%	18,18%	2,46%	38,61%	3,98%
		W	26,76	0,71	23,04	0,75	24,03	0,73	22,44	0,74	13,91%	4,56%	10,22%	2,21%	16,14%	3,10%
	0,10	Ü	24,58	0,76	20,56	0,81	16,31	0,82	15,29	0,82	16,34%	6,57%	33,62%	6,89%	37,78%	7,71%
		S	17,01	0,88	16,29	0,91	13,73	0,90	10,64	0,92	4,21%	3,45%	19,24%	2,70%	37,44%	4,06%
		W	24,58	0,76	21,58	0,79	21,89	0,78	21,30	0,77	12,21%	3,12%	10,93%	2,13%	13,33%	0,93%
200	0,05	Ü	38,71	0,77	29,29	0,83	22,53	0,83	20,99	0,85	24,35%	7,21%	41,80%	7,43%	45,78%	10,21%
		S	25,14	0,86	20,92	0,88	20,70	0,89	14,72	0,90	16,78%	2,31%	17,67%	3,01%	41,46%	4,78%
		W	43,09	0,78	34,66	0,82	37,85	0,79	34,91	0,81	19,56%	5,12%	12,19%	1,90%	18,98%	3,98%
	0,10	Ü	36,37	0,76	28,26	0,82	23,60	0,82	20,64	0,83	22,31%	7,53%	35,12%	8,21%	43,25%	9,21%
		S	25,00	0,89	20,20	0,90	19,41	0,92	14,89	0,94	19,21%	1,23%	22,35%	3,05%	40,45%	5,12%
		W	38,09	0,80	33,02	0,83	34,15	0,82	32,60	0,82	13,31%	4,35%	10,34%	2,07%	14,43%	2,34%
500	0,05	Ü	65,81	0,75	54,78	0,81	37,80	0,81	33,72	0,82	16,76%	8,23%	42,56%	8,14%	48,76%	9,94%
		S	40,22	0,86	39,30	0,88	32,50	0,89	22,40	0,91	2,31%	2,12%	19,20%	3,55%	44,32%	5,87%
		W	70,66	0,79	56,84	0,83	56,41	0,82	59,59	0,82	19,56%	5,32%	17,34%	3,46%	15,67%	4,21%
	0,10	Ü	59,83	0,76	46,68	0,83	41,16	0,83	35,13	0,84	21,98%	8,67%	31,20%	9,67%	41,28%	10,10%
		S	41,25	0,85	36,85	0,89	32,49	0,88	25,26	0,90	10,67%	4,32%	21,22%	3,67%	38,76%	5,43%
		W	67,71	0,77	54,03	0,81	61,39	0,79	55,79	0,80	20,21%	5,38%	9,34%	2,48%	17,60%	3,43%

Tabelle A.6: Simulationsergebnisse des empirischen Performanzvergleichs: Globale bzw. lokale Performanz unterschiedlicher reaktiver Einsatzplanungsansätze.

Glossar

Nachfolgend sind wesentliche Begriffe dieser Arbeit zusammengefasst und erläutert. Eine ausführliche Erklärung findet sich in der Regel jeweils beim erstmaligen Auftreten des Begriffs (siehe dazu den Index am Ende dieser Arbeit) und in der jeweils angegebenen Literatur. Explizit ausgenommen sind Begriffe, die im Rahmen dieser Arbeit formal definiert wurden und hier nur unzureichend wiedergegeben werden könnten. Das im Folgenden verwendete Symbol \sim bezieht sich jeweils auf den im Einzelnen vorgestellten Begriff, das Symbol \uparrow verweist auf einen ebenfalls innerhalb dieses Glossars erklärten Begriff.

Agent Ein \sim ist ein autonomes, zu flexiblem Verhalten fähiges und rational agierendes System, das sich in einer Umgebung befindet, die es über Sensoren wahrnehmen und auf die es mittels Aktoren einwirken kann.

Agent Communication Language Eine \sim legt das Format der Nachrichten sowie die möglichen Übertragungswege die das Format der Nachrichten sowie die möglichen Übertragungswege - etwa Netzwerkprotokolle wie SMTP, TCP/IP oder HTTP - eines Kommunikationsprotokolls fest.

Anlage Als \sim werden alle dezentralen Energiewandlungsanlagen (Erzeuger, Verbraucher und Speicher) in einem Energie- \uparrow Netz bezeichnet. Eine \sim besitzt dabei einen gewissen Grad an \uparrow Steuerbarkeit, d.h. auf das Verhalten der \sim kann durch eine externe Steuerungskomponente unterschiedlich stark eingewirkt werden.

Anlagenebene Die \sim dient zur Übermittlung von Steuersignalen und zur Erfassung von Messwerten von \uparrow Anlagen. Dazu ist insbesondere eine Anbindung der Anlagen an eine Kommunikationsinfrastruktur - etwa auf Basis des \uparrow IEC 61850 - notwendig.

Anlagenkontext Der \sim umfasst die jeweils für eine \uparrow Anlage spezifischen technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen, die im Rahmen der \uparrow Einsatzplanung innerhalb eines \uparrow Virtuellen Kraftwerks beachtet werden müssen.

Biogasanlage Eine \sim produziert mit Hilfe von Biomasse elektrische und thermische \uparrow Energie. Hierzu wird in einem Fermenter durch anaerobe Gär- oder Fäulnisprozesse Biogas erzeugt, dass in einem \uparrow Blockheizkraftwerk in Strom und Wärme umgewandelt wird.

Blindleistung \sim ist die \uparrow elektrische Leistung, die zum Aufbau von magnetischen oder elektrischen Feldern benötigt wird und nicht zur nutzbaren Arbeit beiträgt. Bei überwiegend magnetischem Feld ist die \sim induktiv, bei überwiegend elektrischem Feld kapazitiv.

Blockheizkraftwerk Ein \sim ist eine \uparrow KWK-Anlage, die einen Primärenergieträger wie etwa Erdgas mit Hilfe eines Verbrennungsmotors in mechanische Energie wandelt.

Die dabei entstehende Wärme kann für die Wärmeversorgung (Heizung, Warmwasserbereitung usw.) genutzt werden. Die elektrische ↑Energie wird aus der mechanischen Energie durch die Kopplung eines Verbrennungsmotors mit einem Generator erzeugt. Durch die Verwendung der Wärme am Entstehungsort liegt der primärenergetische Wirkungsgrad solcher BHKW bei etwa 90 % und damit deutlich höher als bei konventionellen ↑Kraftwerken. BHKW eignen sich besonders für die Wärme- und Stromversorgung von größeren Gebäudekomplexen, werden aber auch für die Prozesswärmeerzeugung (Dampf, Heißluft, Thermoöl) oder in Kombination z.B. mit Absorptionskältemaschinen für die Kälteerzeugung genutzt.

Brennstoffzelle Eine ~ ist eine batterieähnlich aufgebaute ↑Energiewandlungsanlage, die einen zugeführten Brennstoff und ein Oxidationsmittel auf der Grundlage einer chemischen Reaktion in elektrische Energie wandelt. Eine typische ~ ist etwa die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle, die als „Abfallprodukt“ der Energiewandlung reines Wasser freisetzt.

Common Information Model Das ~ (kurz: CIM) ist eine internationale Norm der ↑International Electrotechnical Commission, die inzwischen weltweit anerkannt und verbreitet ist. Im CIM (Part 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 umfangreiches System zur informationstechnischen Überwachung und Steuerung von dezentralen ↑Energiewandlungsanlagen. Das ↑Informationssystem eines ~ kann auf einer zentralisierten, hierarchischen oder auch heterarchischen Struktur aufsetzen, wobei die Komponenten des Systems in der Regel geographisch verteilt sind.

Einsatzplan Ein ~ ordnet den - meist dezentralen - ↑Energiewandlungsanlagen eines ↑Virtuellen Kraftwerks einen jeweils für einen bestimmten Zeitraum gültigen ↑Fahrplan zu.

Energie Als ~ bezeichnet man die in einem System oder Körper gespeicherte Arbeit sowie das Vermögen, Arbeit zu verrichten oder Wärme abzugeben. Arbeit, ~ und Wärmemenge können vereinfacht als physikalische Größen gleicher Art angesehen und auch in den gleichwertigen Einheiten Joule, Newtonmeter, Wattsekunde ausgedrückt werden.

Energiemanagement Das ~ bezeichnet die vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von ↑Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen. Das ~ beinhaltet damit alle Aktivitäten, die für die Ermittlung und Prognose der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie im betrachteten System als auch für den Austausch von ↑Fahrplänen relevant sind.

Energiemanagementsystem Ein \sim wird zur zielgerichteten Planung, Steuerung und Lenkung von Energieflüssen in elektrischen \uparrow Netzen eingesetzt. Sie ermöglichen es, technische, juristische und ökonomische Kriterien wie beispielsweise Versorgungssicherheit, Vertragseinhaltung oder Gewinnverbesserung bei der Netzsteuerung zu berücksichtigen. Ein \sim setzt in der Regel auf \uparrow SCADA auf.

Energiewandlung \sim ist ein technisches Verfahren zur Wandlung einer Energieform in eine andere. Ein typisches Verfahren zur \sim ist die Verbrennung, bei der chemische \uparrow Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Das Medium, mit dem die Ausgangsform der Energie übertragen wird, wird als \uparrow Primärenergieträger bezeichnet.

Energiewandlungsanlage \uparrow Anlage

Erneuerbare Energien Unter \sim werden \uparrow Energieträger verstanden, die - zumindest aus menschlicher Sicht - nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehen. Dazu gehören beispielsweise solare Einstrahlung, Wind, Biomasse und Erdwärme.

Erneuerbare-Energien-Gesetz Das \sim (EEG) regelt den Anschluss, den Vorrang und die Vergütungssätze von elektrischer Energie aus \uparrow erneuerbaren Energien und Grubengas. Zweck des Gesetzes ist es, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung deutlich zu erhöhen. Erneuerbare Energien im Sinne des \sim sind Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Geothermie, Energie aus \uparrow Biomasse einschließlich Biogas, Deponiegas- und Klärgas sowie aus dem biologisch abbaubaren Anteil von Abfällen aus Haushalten und Industrie. Das \sim ist im Jahr 2000 in Kraft getreten und wurde 2004 sowie 2009 aktualisiert.

Fahrplan Ein \sim legt für einen in Intervalle unterteilten Zeitraum die Leistungsabgabe oder -aufnahme einer \uparrow Energiewandlungsanlage eines \uparrow Virtuellen Kraftwerks fest.

Feldebene \uparrow Anlagenebene

Höchstspannungsnetz Das \sim ist für weiträumige Verbindungen zuständig. Es gehört zum Europäischen Verbundnetz und übernimmt sowohl den Energieaustausch mit dem Ausland als auch den Transport zu nachgelagerten \uparrow Verteilnetzen. In Deutschland gehören hierzu die Netzebenen 380 kV und 220 kV.

Hochspannungsnetz Das \sim wird heute in Deutschland in der Regel mit einer Spannung von 110 kV betrieben. Die Leitungen dieses Netzes übertragen elektrische \uparrow Energie zu den Umspannwerken der Verteilnetzebene, aber auch zu großen Industriebetrieben.

Holarchie Eine \sim ist aus informationstechnischer Sicht eine hierarchische Strukturierung bzw. Organisation selbständlicher Entitäten, die \uparrow Holone genannt werden.

Holon Ein \sim ist aus informationstechnischer Sicht ein selbständliches Hardware- oder Softwaresystem, das aus mehreren untergeordneten Systemen zusammengesetzt sein kann. Unabhängig von der Einordnung in eine hierarchische Struktur bietet ein \sim

identische Schnittstellen für die Interaktion - Steuerung, Überwachung, Datenaustausch etc. - mit den repräsentierten funktionalen Komponenten an.

IEC 61850 ~ ist ein internationaler und weltweit akzeptierter Standard für die durchgängige Kommunikation in elektrischen Schaltanlagen. ~ definiert ein Informationsmodell, das sich aus den vier Teilen genormte Informationen, genormte Dienste, genormte Kommunikation und genormte Konfiguration zusammensetzt. 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 ↑Energiewandlungsanlagen. Die Norm baut auf den Vorgaben des IEC 61850 auf und definiert eigenständige Erweiterung des Objektmodells, der Dienste und der Mappings.

IEC 61970 ↑Common Information Model.

Informationssystem Ein ~ besteht im Allgemeinen aus Menschen und Maschinen, die Informationen erzeugen und/oder benutzen und die durch Kommunikationsbeziehungen miteinander verbunden sind. Im Rahmen dieser Arbeit bezeichnet ein ~ insbesondere die IKT-Komponenten eines ↑Virtuellen Kraftwerks, die zur Steuerung und Überwachung der dezentralen ↑Energiewandlungsanlagen eingesetzt werden.

Interaktionsprotokoll Im Kontext der Verteilten Künstlichen Intelligenz legt ein ~ unter anderem Art und Reihenfolge der Nachrichten fest, die zur Realisierung einer bestimmten Interaktion autonomer ↑Agenten notwendig sind.

International Electrotechnical Commission Die ~ mit Sitz in Genf 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 insbesondere den (semantisch korrekten) Austausch von Informationen mittels Kommunikation.

Kraft-Wärme-Kopplung Mit ~ wird eine Methode bezeichnet, bei der ein ↑Primärenergieträger gleichzeitig in elektrische und thermische ↑Energie gewandelt wird. Typische ↑Energiewandlungsanlagen auf Grundlage der ~ sind ↑Blockheizkraftwerke oder ↑Brennstoffzellen.

Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz Das \sim (kurz: KWKG) ist ein deutsches Gesetz, das die Netzbetreiber verpflichtet, \uparrow KWK-Anlagen in ihr \uparrow Netz zu integrieren. Der von diesen Anlagen erzeugte Strom muss zu festgelegten Preisen vergütet werden. Das KWKG ist in 2000 in Kraft getreten und wurde 2002 sowie 2008 überarbeitet.

Kraftwerk Ein \sim dient der Wandlung eines Primärenergieträgers in elektrische \uparrow Energie. Zu den konventionellen Kraftwerken mit einer Maximalleistung im Bereich mehrerer hundert Megawatt gehören insbesondere Kohle- und Kernkraftwerke.

KWK-Anlage Eine \sim ist eine \uparrow Energiewandlungsanlage, die die jeweils eingesetzte Primärenergie mit hohem \uparrow Wirkungsgrad in Strom und Wärme wandelt. Durch den gekoppelten Prozess werden im Vergleich zu der getrennten Erzeugung von Elektrizität und Wärme \uparrow Primärenergieträger und Kohlendioxidemissionen eingespart. Anhand der Bauweise bzw. des technischen Wirkprinzips der Energiewandlung können unterschiedliche Anlagentypen wie etwa \uparrow Blockheizkraftwerke, \uparrow Gasturbinen, Stirling-Motoren sowie \uparrow Brennstoffzellen unterschieden werden.

Lastprofil Ein \sim ist eine gemittelte und in der Regel von einem bestimmten Gebäude- oder Anlagentyp abhängige Referenzzeitreihe, die für jeden Zeitpunkt eines gegebenen Intervalls die elektrische oder thermische \uparrow Leistung des zugehörigen Objekts beschreibt.

Leistung Die \sim ist das zeitliche Differenzial der Arbeit bzw. der Energie.

Marktplatz Ein (elektronischer) \sim ist eine informationstechnische Organisationsform, die im Allgemeinen einen Handel zwischen mehreren autonomen Akteuren ermöglicht und gegebenenfalls durch Interaktionsprotokolle regelt. In Abhängigkeit der konkreten Ausgestaltung des \sim kann etwa ein Koordinator eingesetzt werden, um Angebote und Nachfragen preisoptimal aufeinander abzubilden.

MicroGrid Unter einem \sim versteht man einen Netzabschnitt, in dem dezentrale \uparrow Energiewandlungsanlagen zur kontinuierlichen Deckung des netzlokalen elektrischen Bedarfs betrieben werden. Ein \sim kann an ein größeres Stromnetz angebunden oder im Sinne eines Inselnetzes unabhängig von diesem sein.

Minutenreserve \sim ist \uparrow Regelenergie, die spätestens 15 Minuten nach der Anforderung für mehrere Stunden bereitstehen muss.

Mittelspannung Die \sim dient zur Energieübertragung im regionalen Bereich und auch zur Einspeisung größerer Sondervertragskunden. Der Spannungsbereich liegt zwischen 1 kV und 60 kV.

Multiagentensystem Ein \sim ist ein System, in dem mehrere \uparrow Agenten unter Einhaltung definierter Protokolle effektiv funktionieren und produktiv miteinander arbeiten können.

Netz Das \sim ist Gesamtheit der miteinander verbundenen Anlagenteile zur Übertragung und Verteilung von \uparrow Energie. Das \sim kann u.a. nach Spannungsebene, Betriebsweisen, Energiearten oder Besitzverhältnissen benannt werden.

- Netzbetreiber** Ein ~ ist für den sicheren und zuverlässigen Betrieb des jeweiligen elektrischen ↑Netzes in einem bestimmten Gebiet und für die Verbindungen mit anderen Netzen verantwortlich. Übertragungsnetzbetreiber sorgen darüber hinaus für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen und stellt so die Versorgungszuverlässigkeit sicher.
- Neuaufwurf** Unter einem ~ wird der Ansatz verstanden, ein Planungsproblem in Reaktion auf Ereignisse bzw. bei Veränderungen des Umfelds vollständig neu zu lösen, ohne auf Teile einer alten Lösung zurückzugreifen.
- Niederspannung** Die ~ ist definiert als niedrigste Spannungsebene (bis 1 kV) des elektrischen ↑Netzes.
- Niederspannungsnetz** Abnehmer mit nur einer kleinen Leistungsabnahme bzw. Einspeiser mit einer geringen Leistung sind an das ~ angeschlossen.
- Ortsnetzstation** Eine ~ ist ein Teil eines elektrischen ↑Netzes, der zur Versorgung eines Abschnitts des ↑Niederspannungsnetzes mit elektrischer ↑Energie eingesetzt wird. Wesentliche Aufgabe einer ~ ist dabei die Transformation der Mittel- auf die Niederspannung.
- Photovoltaik** ~ bezeichnet die direkte Umwandlung von solarer Strahlungsenergie in elektrische ↑Energie mittels Solarzellen.
- Primärenergieträger** Ein ~ ist ein in der Regel natürlich vorkommendes Medium, mit dem gespeicherte Energie zur ↑Energiewandlung transportiert wird. Typische fossile ~ in der Energiewirtschaft sind Kohle, Gas oder Uran; typische erneuerbare ~ sind solare Strahlung oder Wind.
- Primärregelenergie** ~ ist ↑Regelenergie, die auf Abruf unmittelbar bereit stehen und bis zu 15 Sekunden verfügbar sein muss.
- PV-Anlage** Eine ~ ist eine dezentrale ↑Energiewandlungsanlage, die auf dem Prinzip der ↑Photovoltaik beruht.
- Regelenergie** Die für den kurzfristigen Ausgleich nicht vorhersehbarer Schwankungen in Erzeugung und Verbrauch von elektrischer Energie vorgehaltenen Kapazitäten werden als ~ bezeichnet. Es wird nach ↑Primärregelenergie, ↑Sekundärregelenergie und ↑Minutenreserve unterschieden. ↑Primärregelenergie muss zur Hälfte innerhalb von fünf Sekunden und insgesamt innerhalb von 30 Sekunden aktivierbar sein, ↑Sekundärregelenergie in fünf Minuten und ↑Minutenreserve innerhalb von 15 Minuten. ~ wird in der Regel von speziellen ↑Regelkraftwerken bereitgestellt, die vor allem auf der Wandlung konventioneller ↑Primärenergieträger basieren.
- Regelkraftwerke** ~ sind ↑Kraftwerke, die speziell zur Bereitstellung von ↑Regelenergie konstruiert und gebaut wurden. Üblicherweise werden Dampfturbinen-, Speicherwasser-, Pumpspeicherwasser- und Gasturbinenkraftwerke als ~ eingesetzt.

Schattenkraftwerk Ein \sim ist ein \uparrow Kraftwerk, das mit verminderter Leistung betrieben werden, um Reservekapazitäten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung elektrischer Energie durch dezentrale \uparrow Energiewandlungsanlagen vorzuhalten.

Sekundärregelenergie Die \sim ist \uparrow Regelenergie, die spätestens 15 Sekunden nach der Anforderung verfügbar sein und für bis zu 15 Minuten bereitstehen muss.

Solarzellen \sim sind Zellen, die solare Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandeln. Als Grundmaterial für \sim dient hauptsächlich Silizium. Solarmodule, die für den Bau von \uparrow PV-Anlagen benötigt werden, bestehen aus miteinander verschalteten \sim . Je nach Anwendungszweck werden einzelne Module parallel oder in Reihe geschaltet.

Spitzenlast Der Begriff \sim bezeichnet eine kurzzeitig auftretende hohe Leistungsnachfrage im Stromnetz. Bedarfsspitzen zeichnen sich oft durch einen starken Leistungsgradienten aus, zu deren Ausgleich schnell regelbare \uparrow Spitzenlastkraftwerke eingesetzt werden müssen.

Spitzenlastkraftwerke \sim können innerhalb von Sekunden oder Minuten hohe Leistungen zur Verfügung stellen. Hierzu zählen unter anderem Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicherkraftwerke, aber auch moderne Gasturbinenkraftwerke.

Supervisory Control and Data Acquisition \sim wird zur Steuerung und Überwachung von technischen Prozessen etwa in der Energie- und Wasserversorgung eingesetzt. In der Energieversorgung stellen \sim -Systeme grundlegende technische Funktionen zur Steuerung von und Datenerhebung in elektrischen \uparrow Netzen bereit.

Supply-Demand-Matching \sim ist ein energiewirtschaftlicher Ansatz zur Koordination dezentraler \uparrow Energiewandlungsanlagen, der auf einen optimalen Abgleich von Bereitstellung und Bedarf von elektrischer Energie abzielt.

Virtuelles Kraftwerk Ein \sim ist eine informationstechnische Aggregation vornehmlich kleiner, dezentraler \uparrow Energiewandlungsanlagen. Auf der IKT-Ebene dient dabei ein \uparrow Energiemanagementsystem zur Planung, Steuerung und Überwachung des Anlagenverhaltens.

Windkraftanlage Eine \sim ist eine \uparrow Energiewandlungsanlage, die die mechanische Kraft bzw. kinetische \uparrow Energie des Windes in elektrische Energie wandelt.

Wirkleistung Mit \sim wird - im Gegensatz zur \uparrow Blindleistung - der von Verbrauchern nutzbare Anteil der an einem Knotenpunkt des elektrischen \uparrow Netzes eingespeisten bzw. verfügbaren elektrischen \uparrow Leistung bezeichnet.

Wirkungsgrad Der \sim einer \uparrow Energiewandlungsanlage ist der Quotient aus aufgenommener und abgegebener Leistung bzw. Energie.

Abkürzungen

ACL	Agent Communication Language
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ	Brennstoffzelle
CA	Communicative Act
CIM	Common Information Model
CNCP	Contract Net with Confirmation Protocol
CNP	Contract Net Protocol
DEMS	Dezentrales Energiemanagementsystem
DER	Dezentrale Energiewandlungsanlage
DEZENT	Dezentral vernetzte Energiebewirtschaftung
DSM	Demand Side Management
ECNP	Extended Contract Net Protocol
EEX	European Energy Exchange
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
FEN	Forschungsverbund Energie Niedersachsen
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
HCNCP	Holonic Contract Net with Confirmation Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JADE	Java Agent Development Framework
KI	Künstliche Intelligenz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language
MAS	Multiagentensystem
OA	Auftragagent
PCU	PoMS Central Unit
PIB	PoMS Interface Box
PoMS	Power Flow and Power Quality Management System
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PV	Photovoltaik
RA	Ressourcenagent
RDF	Resource Description Framework
SDM	Supply-Demand-Matching
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VK	Virtuelles Kraftwerk
VKI	Verteilte Künstliche Intelligenz
VNB	Verteilnetzbetreiber
ZI	Zentrale Intelligenz

Literatur

- [AC07] APPELRATH, H.-Jürgen ; CHAMONI, Peter: Veränderungen in der Energiewirtschaft - Herausforderungen für die IT. In: *Wirtschaftsinformatik 5* (2007), S. 329–330
- [AML08] APPELRATH, H.-Jürgen ; MAYER, Christoph ; LUHMANN, Till: Plug-&-Play für das dezentrale Energiemanagement. In: *Energy 2.0 7* (2008), S. 19–21
- [ASS97] APPELRATH, H.-Jürgen ; SAUER, J. ; SUELMANN, G.: Globale Ablaufplanung mit Fuzzy-Konzepten. In: BIETHAHN, J. (Hrsg.) ; HÖHNERLOH, A. (Hrsg.) ; J.KUHL (Hrsg.) ; NISSEN, V. (Hrsg.): *Fuzzy Set-Theorie in betriebswirtschaftlichen Anwendungen*. München : Verlag Vahlen, 1997
- [Bar07] BARTH, R.: Stochastische Optimierung des Kraftwerks- und Netzbetriebs der verteilten Erzeugung. In: *Optimierung in der Energiewirtschaft. VDI-Berichte Band 2018*, 2007, S. 27-42
- [BBB⁺07] BARKER, T. ; BASHMAKOV, I. ; BERNSTEIN, L. u. a.: 2007: Technical Summary. In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. R. (Hrsg.) ; BOSCH, P. R. (Hrsg.) u. a.: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007
- [BBF⁺08] BUCHHOLZ, Bernd ; BÜHNER, Volker ; FREY, Hellmuth u. a.: VDE-Studie Smart Distribution 2020 - Virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen / Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE). 2008. – Forschungsbericht
- [BBP⁺09] BEER, Sebastian ; BISCHOF, Ludger ; PRIES, Christine u. a.: Die eTelligence-Referenzarchitektur - Eine standardbasierte Architektur für regionale Strommärkte. In: *Tagungsband des Internationalen ETG-Kongress 2009*. Düsseldorf, 2009
- [BCG07] BELLIFEMINE, F. ; CAIRE, G. ; GREENWOOD, D.: *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. Wiley, 2007. Wiley, 2007
- [Bec07] BECK, H.-P. (Hrsg.) ; Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN) (Veranst.): *Dezentrale Energiesysteme I - Tagungsband zum 1. Statusseminar des FEN*. 2007
- [BEP⁺07] BLAZEWCZ, J. ; ECKER, K. ; PESCH, E. u. a.: *Handbook on Scheduling: From Theory to Applications*. Springer Verlag, 2007
- [BFA02] BITSCH, Rainer ; FELDMANN, W. ; AUMAYR, G.: Virtuelle Kraftwerke - Einbindung dezentraler Energieerzeugungsanlagen. In: *etz 9* (2002), S. 16–23

- [BFG⁺97] BONASSO, R. P. ; FIRBY, R. J. ; GAT, E. u. a.: Experiences with an Architecture for Intelligent, Reactive Agents. In: *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence* 9 (3/4) (1997), S. 237–256
- [BGP⁺03] BERNON, Carole ; GLEIZES, Marie-Pierre ; PEYRUQUEOU, Sylvain u. a.: ADELFE: A Methodology for Adaptive Multi-agent Systems Engineering. In: AL., P. P. (Hrsg.): *Engineering Societies in the Agents World III*. Springer Verlag, 2003 (LNAI 2577), S. 156–169
- [BHM93] BACHEM, A. ; HOCHSTÄTTLER, W. ; MALICH, M.: The Simulated Trading Heuristic for Solving Vehicle Routing Problems / Mathematisches Institut der Universität zu Köln. 1993 (93.139). – Forschungsbericht
- [Bit00] BITSCH, Rainer: Perspektiven im Energiemanagement bei Stromversorgungsnetzen mit dezentraler Erzeugung. In: *Tagungsband des Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*, 2000, S. 178–189
- [Bit06] BITSCH, Rainer: Integration von erneuerbaren Energiequellen und dezentralen Erzeugungen in bestehende Elektro-Energiesysteme / Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e.V. 2006. – Forschungsbericht
- [BKK⁺04] BAE, In-Su ; KIM, Jin-O ; KIM, Jae-Chul u. a.: Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 19 (2004), S. 287–292
- [BM99] BUSSMANN, Stefan ; MCFARLANE, D. C.: Rationales for Holonic Manufacturing Control. In: *Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*. Leuven, Belgium, September 1999
- [BNR⁺07] BENDEL, Christian ; NESTLE, David ; RINGELSTEIN, Jan u. a.: Marktmodell für ein dezentral organisiertes Energiemanagement im elektrischen Verteilnetz - Grundlage für ein internetbasiertes Managementsystem. In: ENERGIETECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE (ETG) (Hrsg.): *Internationaler ETG-Kongress 2007 - Vorträge des Internationalen ETG-Kongresses vom 23. bis 24. Oktober 2007 in Karlsruhe*, VDE Verlag GmbH Berlin, 2007, S. 191–200
- [Bon98] BONGAERTS, Luc: *Integration of Scheduling and Control in Holonic Manufacturing Systems*, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, Diss., 1998
- [BP06] BUCHHOLZ, Bernd ; PALENSKY, Peter: Kommunikation als Schlüssel für künftige Effizienz der Netzführung. In: *Tagungsband des Elften Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*, 2006, S. S. 52–64
- [BPR99] BELLIFEMINE, F. ; POGGI, A. ; RIMASSA, G.: JADE, A FIPA-compliant Agent Framework. In: *Inproceedings of the 4th International Conference on Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology*, 1999

-
- [Bra03] BRAUNER OVE, G.: Dezentrale Erzeugungsanlagen und deren Netzintegration. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Volume 120, Number 11 / November 2003* 120 (11) (2003), S. 371–373
- [BRS⁺06] BARTH, R. ; RUDION, K. ; SWIDER, D.J. u. a.: Optimisation of the unit commitment of distributed generation with fluctuating power sources. In: *3rd International Conference "The European Electricity Market EEM06 - Challenge of the Unification"*, 2006, S. 101-108
- [BT09] BEER, Sebastian ; TRÖSCHEL, Martin: MACE - Multiagent Control for Energy Infrastructures. In: *Proceedings of the 4th International ICSC Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (ITEE)*, 2009
- [Bun05a] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (Hrsg.): *Kleine Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz - Jeder kann Energie doppelt nutzen*. BMU, Berlin, 2005
- [Bun05b] BUNDESWIRTSCHAFTSMINISTERIUM: *Stromnetzzugangsverordnung BGBL Bd. I Bundesanzeiger*. 2005
- [Bun08] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2007*. 2008
- [BVB⁺95] BONGAERTS, Luc ; VALCKENAERS, P. ; BRUSSEL, H. V. u. a.: Schedule Execution for a Holonic Shop Floor Control System. In: *Proceedings of the Advanced Summer Institute (ASI) 95 of the N.O.E. on Intelligent Control of Integrated Manufacturing Systems, Lisboa, Portugal*, 1995
- [BVB⁺97] BONGAERTS, Luc ; VALCKENAERS, P. ; BRUSSEL, H. V. u. a.: Schedule Execution in Holonic Manufacturing Systems. In: *Proceedings of the 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Osaka, Japan*. Osaka University, Japan, May 1997
- [CG99] CARLEY, K. M. ; GASSER, L.: Computational organization theory. In: WEISS, G. (Hrsg.): *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT-Press, 1999, S. 299–330
- [CGK⁺05] CHMIEL, Krzysztof ; GAWINECKI, Maciej ; KACZMAREK, Pawel u. a.: Efficiency of JADE agent platform. In: *Scientific Programming* 13 (2005), Nr. 2, S. 159–172
- [Chr94] CHRISTENSEN, J.: Holonic manufacturing systems: initial architecture and standards directions. In: *Proceedings of the First European Conference on Holonic Manufacturing Systems, Hannover*, 1994
- [CL95] COHEN, Philip R. ; LEVESQUE, Hector J.: Communicative Actions for Artificial Agents. In: *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS '95)*, The AAAI Press, 1995

- [CL98] CORKILL, D. D. ; LANDER, S. E.: Diversity in Agent Organizations. In: *Object Magazine* 8(4) (1998), S. 41–47
- [Cra03] CRAMTON, P.: Electricity market design: The good, the bad, and the ugly. In: *36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-36 2003)*, Big Island, HI, USA., 2003
- [Cra08] CRASTAN, Valentin: *Elektrische Energieversorgung, Teil 2*. Springer Verlag, 2008
- [CW02] CHAO, Hung-po ; WILSON, Robert: Multi-Dimensional Procurement Auctions for Power Reserves: Incentive-Compatible Evaluation and Settlement Rules. In: *Journal of Regulatory Economics* 22 (2) (2002), S. 161–183
- [DB88] DEAN, T. L. ; BODDY, M.: An analysis of time-dependent planning. In: *Proceedings of the AAAI-88*, 1988
- [DBLA98] DOUGLAS, A. P. ; BREIPOHL, A. M. ; LEE, F. N. ; ADAPA, R.: Risk due to load forecast uncertainty in short term power system planning. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 13 (1998), Nr. 4, S. 1493–1499
- [DFP93] DUBOIS, D. ; FARGIER, H. ; PRADE, H.: The calculus of fuzzy restrictions as a basis for flexible constraint satisfaction. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Fuzzy Sets*. San Francisco, 1993, S. 1131–1136
- [DHL⁺06] DAM, Koen H. ; HOUWING, Michiel ; LUKSZO, Zofia u. a.: Modelling an Electricity Infrastructure as a Multi-Agent System - Lessons Learnt from Manufacturing Control. In: MARQUARDT, W. (Hrsg.) ; PANTELIDES, C. (Hrsg.): *16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering*, 2006, S. 1741–1746
- [DHL⁺08] DAM, Koen H. ; HOUWING, Michiel ; LUKSZO, Zofia u. a.: Agent-Based Control of Distributed Electricity Generation with Micro Combined Heat and Power - Cross-Sectoral Learning for Process and Infrastructure Engineers. In: *Journal of Computers and Chemical Engineering* 32 (2008), S. 205–217
- [DL89] DURFEE, E. H. ; LESSER, V.: Negotiating Task Decomposition and Allocation Using Partial Global Planning. In: *Distributed Artificial Intelligence* 2 (1989), S. 229–244
- [DLC87] DURFEE, Edmund H. ; LESSER, Victor R. ; CORKILL, Daniel D.: Coherent Cooperation Among Communicating Problem Solvers. In: *IEEE Transactions on Computers* C-36 (11) (1987), S. 1275–1291
- [DSV97] DOMSCHKE, W. ; SCHOLL, A. ; VOSS, S.: *Produktionsplanung*. Springer Verlag, 1997

-
- [Dub86] DUBOIS, R.: *Optimale Tageseinsatzplanung von Kraft-Wärme-Kopplungssystem unter Berücksichtigung von Kurzzeitwärmespeichern*, RWTH Aachen, Diss., 1986
- [EEG04] *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2004 (BGBl. I S. 1918)*, zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. November 2006 (BGBl. I S. 2550). Juli 2004
- [EEG08] *Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften vom 6. Juni 2008*. Juni 2008
- [ER02] ERNST, B. ; ROHRIG, K.: Online-Monitoring and Predication of Wind Power in German Transmission System Operation Centres. In: *Proceedings of the First IEA Joint Action Symposium on Wind Forecasting Techniques*. Norrköping, Sweden, 2002, S. 125–145
- [Eur04] EUROPEAN NETWORK OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATORS FOR ELECTRICITY (ENTSO-E): *Operation Handbook, Appendix 1: Load Frequency Control and Performance*. 2004
- [EWD06] ERLICH, I. ; WINTER, W. ; DITTRICH, A.: Advanced Grid Requirements for the Integration of Wind Turbines into the German Transmission System. In: *IEEE-PES General Meeting Montreal 2006, panel paper*, 2006
- [Ext93] EXTERNAL INTERFACES WORKING GROUP: *Specification of the KQML Agent-Communication Language*. 1993
- [FBK⁺05] FISCH, Norbert ; BODMANN, Michael ; KÜH, Lars ; SASSE, Christian u. a.: *Wärmespeicher*. TÜV-Verlag, 2005
- [FEN09] *Internetauftritt des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen (FEN)*. <http://www.fven.de> (Zuletzt besucht am: 29.12.2009), 2009
- [Fer92] FERGUSON, I. A.: *TouringMachines: An Architecture for Dynamic, Rational, Mobile Agents*, University of Cambridge, UK, Diss., 1992
- [FFM⁺94] FININ, Tim ; FRITZON, Richard ; MCKAY, Don u. a.: KQML as an Agent Communication Language. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM '94)*, ACM Press, 1994
- [Fis99] FISCHER, Klaus: Agent-based design of holonic manufacturing systems. In: *Journal of Robotics and Autonomous Systems* 27 (1-2) (1999), S. 3–13
- [FMP96] FISCHER, Klaus ; MÜLLER, Jörg P. ; PISCHEL, Markus: Cooperative Transportation Scheduling: an Application Domain for DAI. In: *Applied AI Journal* 10 (1) (1996), S. 1–31

- [Fou03a] FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS: *FIPA Abstract Architecture Specification*. 2003
- [Fou03b] FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS: *FIPA ACL Message Structure Specification*. 2003
- [Fou03c] FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS: *FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification*. 2003
- [Fou03d] FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS: *FIPA SL Content Language Specification*. 2003
- [Fou03e] FOUNDATION FOR PHYSICAL INTELLIGENT AGENTS: *FIPA Communicative Act Library Specification*. 2003
- [FSS03] FISCHER, Klaus ; SCHILLO, Michael ; SIEKMANN, Jörg: Holonic Multiagent Systems: A Foundation for the Organisation of Multiagent Systems. In: *Proceedings of the First International Conference on Applications of Holonic and Multiagent Systems (HoloMAS'03)*, 2003, S. 71–80
- [FW92] FREUDER, E.C. ; WALLACE, R.J.: Partial constraint satisfaction. In: *Artificial Intelligence* 58 (1992), S. 21–70
- [FWB⁺06] FRANZ, Oliver ; WISSNER, Matthias ; BÜLLINGEN, Franz u. a.: Potenziale der Informations- und Kommunikations-Technologien zur Optimierung der Energieversorgung und des Energieverbrauchs (eEnergy) / wik-Consult | FhG Verbund Energie im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). 2006. – Forschungsbericht
- [GA05a] GEIDL, Martin ; ANDERSSON, Göran: A Modeling and Optimization Approach for Multiple Energy Carrier Power Flow. In: *Proceedings of IEEE PES PowerTech*, 2005
- [GA05b] GEIDL, Martin ; ANDERSSON, Göran: Optimal power dispatch and conversion in systems with multiple energy carriers. In: *Proceedings of 15th Power System Computation Conference (PSCC)*, Liege, 2005
- [Gon09] GONZÁLEZ, José M.: Gestaltung nachhaltiger IT-Landschaften in der Energiewirtschaft mit Hilfe von Referenzmodellen. In: EYMANN, Torsten (Hrsg.): *Tagungsband zum Doctoral Consortium der WI 2009* Bd. 40, Februar 2009 (Bayreuther Arbeitspapiere zur Wirtschaftsinformatik), S. 35–44
- [GSV99] GERBER, Christian ; SIEKMANN, Jörg H. ; VIERKE, Gero: Flexible Autonomy in Holonic Agents. In: *AAAI Technical Report SS-99-06* (1999), S. 52–58
- [Hab04] HABLE, Matthias: *Beitrag zur Energieeinsatzoptimierung mit evolutionären Algorithmen in lokalen Energiesystemen mit kombinierter Nutzung von Wärme- und Elektroenergie*, Technische Universität Dresden, Diss., 2004

-
- [Hah07] HAHN, Giso: Neue Materialien der Photovoltaik: Solarzellen aus Folien-Silizium. In: BÜHRKE, Thomas (Hrsg.) ; WENGENMAYR, Roland (Hrsg.): *Erneuerbare Energien: Alternative Energiekonzepte für die Zukunft*. Wiley-VCH, 2007
- [Hau85] HAUGELAND, J. (Hrsg.): *Artificial Intelligence: The Very Idea*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985
- [HC06] HORSTMANN, Karl-Peter ; CIESLARCZYK, Michael: *Energiehandel*. Carl Heymanns Verlage, 2006
- [HDS07] HEUCK, Klaus ; DETTMANN, Klaus-Dieter ; SCHULZ, Detlef: *Elektrische Energieversorgung*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2007
- [Hen98] HENSELER, Herwig: *Aktive Ablaufplanung mit Multi-Agenten*, Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg, Diss., 1998
- [HHH⁺04] HANDSCHIN, Edmun ; HAUPTMEIER, Erik ; HORENKAMP, Willi u. a.: Inselnetzerkennung bei Eigenerzeugungsanlagen. In: *etz* 12 (2004), S. 48–50
- [HHJ⁺07] HORENKAMP, Willi ; HUBE, Wilfried ; JÄGER, Johann u. a.: VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung 2020 / Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG). 2007. – Forschungsbericht
- [HJ01] HOGG, Lisa M. J. ; JENNINGS, Nicholas R.: Socially Intelligent Reasoning for Autonomous Agents. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 31 (5) (2001), S. 381–393
- [HL04] HORLING, Bryan ; LESSER, Victor: A survey of multi-agent organizational paradigms. In: *The Knowledge Engineering Review* 19 (4) (2004), S. 281–316
- [HS99] HUHN, Michael N. ; STEPHENS, Larry M.: Multiagent Systems and Societies of Agents. In: WEISS, Gerhard (Hrsg.): *Multiagent Systems - A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, 1999, S. 79–120
- [HVW⁺08] HOMMELBERG, M.P.F. ; VELDE, B.J. van d. ; WARMER, C.J. u. a.: A novel architecture for real-time operation of multi-agent based coordination of demand and supply Date: 20-24 July 2008, Pages: 1 - 5. In: *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* IEEE, 2008, S. 1–5
- [Int03] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *IEC TR 61850-1 1st Ed.: Communication networks and systems in substations - Part 1: Introduction and overview*. 2003

- [IPC07] IPCC: 2007: Summary for Policymakers. In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. R. (Hrsg.) ; BOSCH, P. R. (Hrsg.) u. a.: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007
- [Jen00] JENNINGS, Nicholas R.: On agent-based software engineering. In: *Artificial Intelligence* 117 (2) (2000), S. 277–296
- [KA06] KOEPEL, Gaudenz ; ANDERSSON, Göran: The influence of combined power, gas and thermal networks on the reliability of supply. In: *Proceedings of the Sixth World Energy System Conference, Torino, 2006*
- [Kal02] KALENDA, N.: *Dynamische Leistungsregelung von Kleinst-Stirling-BHKW's im Inselbetrieb*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2002
- [KBK⁺97] KANCHANASEVEE, P. ; BISWAS, G. ; KAWAMURA, K. u. a.: Contract-Net Based Scheduling for Holonic Manufacturing Systems. In: *Tagungsband der SPIE "Architectures, Networks, and Intelligent Systems for Manufacturing Integration"*. Pittsburgh, Pennsylvania, October 1997, S. 108–115
- [KKH⁺07] KAMPHUIS, R. ; KOK, K. ; HOMMELBERG, M. u. a.: Massive coordination of dispersed generation using Powermatcher based software agents. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007*
- [KKW⁺06] KAMPHUIS, I.G. ; KOK, J.K. ; WARMER, C.J. u. a.: Massive coordination of residential embedded electricity generation and demand response using the PowerMatcher approach. In: *Proceedings of the 4th International Conference On Energy Efficiency In Domestic Appliances And Lighting (EEDAL)*, 2006
- [Koe67] KOESTLER, Arthur: *The Ghost In The Machine*. Hutchinson Publishing Group, Arkana, London, 1967
- [Kon06] KONSTANTIN, Panos: *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -Transport Und -Beschaffung Im Liberalisierten Markt*. Springer Verlag, 2006
- [Kra09] *Kapitel 6 - eTelligence - Modellregion Cuxhaven*. In: KRAUSE, Wolfram: *Intelligenz für Energie, Märkte und Netze*. Springer Verlag, 2009, S. 43–50
- [KSB⁺05] KURRAT, Jürgen ; SCHMIDT, Christoph ; BIRK, Stefan u. a.: *Richtlinie Datenaustausch und Mengenzuweisung (DuM) - Kapitel 3: Bilanzkreismanagement*. Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW, 2005
- [KSF02] KNABE, Tore ; SCHILLO, Michael ; FISCHER, Klaus: Improvements to the FIPA Contract Net Protocol for Performance Increase and Cascading Applications. In: *Tagungsband des International Workshop for Multi-Agent Interoperability im Rahmen der German Conference on AI (KI-2002)*, 2002

-
- [KSF03] KNABE, Tore ; SCHILLO, Michael ; FISCHER, Klaus: Inter-organizational networks as patterns for self-organizing multiagent systems. In: *Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, 2003, S. 1036–1037
- [KSW06] KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; STREICHER, W. (Hrsg.) ; WIESE, A. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer Verlag, 2006
- [KTS⁺07] KORTE, Mario ; TRÖSCHEL, Martin ; SCHULZ, Christian u. a.: Koordination dezentraler Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen für die Verwendung einer netzorientierten Betriebsweise im Verbund. In: *Tagungsband des Internationalen ETG-Kongress '07*. Karlsruhe, 2007
- [Kur08] KURRAT, Michael (Hrsg.) ; Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN) (Veranst.): *Dezentrale Energiesysteme II - Tagungsband zum 2. Statusseminar des FEN*. 2008
- [KW94] KALL, P. ; WALLACE, S.W.: *Stochastic Programming*. Wiley, 1994
- [KWK02] *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung vom 19. März 2002 (BGBl. I S. 1092), zuletzt geändert von Art. 5 G vom 21. August 2009 (BGBl. I S. 2870, 2875)*. März 2002
- [Lan06] LANDABURU, Yoseba K. n.: *Optimal Allocation and Scheduling of Demand in Deregulated Energy Markets*, Vienna University of Technology, Diss., March 2006
- [LBC⁺08] LEONHARD, W. ; BUENGER, U. ; CROTOGINO, F. u. a.: VDE-Studie Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger / Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE). 2008. – Forschungsbericht
- [LF97] LABROU, Yannis ; FININ, Tim: Semantics and Conversations for an Agent Communication Language. In: HUHNS, Michael N. (Hrsg.) ; SINGH, Munindar P. (Hrsg.): *Readings in Agents*. Morgan Kaufmann, 1997
- [LF98] LABROU, Yannis ; FININ, Tim: Semantics for an Agent Communication Language. In: SINGH, Munindar P. (Hrsg.) ; RAO, Anand (Hrsg.) ; WOOLDRIDGE, Michael J. (Hrsg.): *Intelligent Agents IV: Agent Theories, Architectures and Languages*. Springer Verlag, 1998
- [LFP99] LABROU, Yannis ; FINN, Tim ; PENG, Yun: Agent Communication Languages: The Current Landscape. In: *IEEE Intelligent Systems* 14 (2) (1999), S. 45–52
- [Lun05] LUND, Henrik: Large-scale integration of wind power into different energy systems. In: *Energy* 30 (13) (2005), S. 2402–2412

- [LVB⁺07] LEVINE, M. ; VORSATZ, D. Üрге ; BLOK, K. u. a.: 2007: Residential and commercial buildings. In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. R. (Hrsg.) ; BOSCH, P. R. (Hrsg.) u. a.: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007
- [Mas43] MASLOW, Abraham H.: A Theory of Human Motivation. In: *Psychological Review* 50 (1943), S. 370–396
- [MBP05] MAŘÍK, Vladimír (Hrsg.) ; BRENNAN, Robert W. (Hrsg.) ; PĚCHOUČEK, Michal (Hrsg.): *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing - Second International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2005, Copenhagen, Denmark, August 2005, Proceedings*. Springer Verlag Berlin, 2005
- [Mes07] MESSER, Markus: Verschleißmechanismen an Ventiltriebsteilen von Verbrennungsmotoren. In: *Tagungsband zum 1. Statusseminar des FEN*, 2007
- [MFHK06] MASON, J.M. ; FTHENAKIS, V.M. ; HANSEN, T. ; KIM, H.C.: Energy Pay-Back and Life Cycle CO₂ Emissions of the BOS in an Optimized 3.5 MW PV Installation. In: *Progress in Photovoltaics Research and Applications* 14 (2006), S. 179–190
- [MKAP03] METAXIOTIS, K. ; KAGIANNAS, A. ; ASKOUNIS, D. ; PSARRAS, J.: Artificial intelligence in short term electric load forecasting: a state-of-the-art survey for the researcher. In: *Energy Conversion and Management* 44 (2003), June, Nr. 9, S. 1525–1534
- [Mül97] MÜLLER, Jörg P.: *The Design of Intelligent Agents (LNAI Volume 1177)*. Springer Verlag, Berlin, 1997
- [MMV03] MAŘÍK, Vladimír (Hrsg.) ; MCFARLANE, Duncan (Hrsg.) ; VALCKENAERS, Paul (Hrsg.): *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing - First International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2003, Prague, Czech Republic, September 2003, Proceedings*. Springer Verlag Berlin, 2003
- [MP93] MÜLLER, Jörg P. ; PISCHEL, Markus: The Agent Architecture InteRRaP: Concept and Application / DFKI Saarbrücken. 1993. – Forschungsbericht
- [MS83] MERLIN, A. ; SANRDIN, P.: A new method for unit commitment at Electricite de France. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS)* 102 (1983), S. 1218–1225
- [MSN99] MATURANA, F. ; SHEN, W. ; NORRIE, D. H.: MetaMorph: An adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing. In: *International journal of Production Research* 37 (10) (1999), S. 2159–2173

-
- [MVC07] MAŘÍK, Vladimír (Hrsg.) ; VYATKIN, Valeriy (Hrsg.) ; COLOMBO, Armando W. (Hrsg.): *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing - Third International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2007, Regensburg, Germany, September 2007, Proceedings*. Springer Verlag Berlin, 2007
- [Nab06] NABE, Christian: *Effiziente Integration erneuerbarer Energien in den deutschen Elektrizitätsmarkt*, Technische Universität Berlin, Diss., 2006
- [Nat09] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST): *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards Release 1.0 (Draft)*. 2009
- [NBR07] NESTLE, David ; BENDEL, Christian ; RINGELSTEIN, Jan: Bidirectional Energy Management Interface (BEMI) Integration of the Low Voltage Level into Grid Communication and Control. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Electricity Distribution*, 2007
- [NLJ96] NWANA, H. S. ; LEE, L. ; JENNINGS, N. R.: Co-ordination in software agent systems. In: *BT Technology Journal* 14 (4) (1996), S. 79–89
- [NTA08] NIESSE, Astrid ; TRÖSCHEL, Martin ; APPELRATH, Hans-Jürgen: Dynamische Konfiguration Virtueller Kraftwerke. In: KURRAT, Michael (Hrsg.): *Tagungsband zum 2. Statusseminar des FEN: Dezentrale Energiesysteme II*, 2008, S. 107–118
- [OPC03a] OPC FOUNDATION: *OPC DA 3.00 Specification*. 2003
- [OPC03b] OPC FOUNDATION: *OPC DX 1.00 Specification*. 2003
- [Par91] PARUNAK, H. Van D.: Characterizing the Manufacturing Scheduling Problem. In: *Journal of Manufacturing Systems* 10(3) (1991), S. 241–259
- [PFM⁺02] PANDIARAJ, K. ; FOX, B. ; MORROW, D.J. u. a.: Centralised control of diesel gen-sets for peak shaving and system support. In: *IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution* 149 (2) (2002), S. 126–132
- [PK08a] PIELKE, Magnus ; KURRAT, Michael: Integration of Combined Heat and Power Micro Units into the Low Voltage Network by using a Grid Oriented Operation Mode. In: *Tagungsband des CIRED Seminar 2008: SmartGrids for Distribution*, 2008
- [PK08b] PIELKE, Magnus ; KURRAT, Michael: Potentials for asset optimizations in low and medium voltage networks through grid oriented feeding of distributed generation. In: *Tagungsband der Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES*, 2008, S. 1–7

- [PTK⁺08] PIELKE, Magnus ; TRÖSCHEL, Martin ; KURRAT, Michael u. a.: Betriebsstrategien zur Integration von Mikro-KWK-Anlagen der Hausenergieversorgung in das elektrische Versorgungsnetz. In: *Tagungsband des Internationalen ETG-Kongress 2008*, 2008
- [Qua07] QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Simulation*. Carl Hanser Verlag, 2007
- [RCS⁺00] REEKERS, J. ; CRAMER, G. ; STRAUSS, P. u. a.: Inselnetze mit hohem Anteil erneuerbarer Energien auf der griechischen Insel Kythnos. In: *Tagungsband des Kassler Symposium Energie- Systemtechnik 2000*, 2000, S. 81–96
- [Reh03] REHTANZ, Christian: *Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation*. Springer Verlag, 2003
- [RN03] RUSSELL, Stuart ; NORVIG, Peter: *Artificial Intelligence - A Modern Approach*. Pearson Education, Inc., 2003
- [RS02] RAHEJA, A. S. ; SUBRAMANIAM, V.: Reactive Recovery of Job Shop Schedules - A Review. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 19 (2002), S. 756–763
- [SAB⁺02] STEGER, U. ; ACHTERBERG, W. ; BLOK, K. u. a.: *Nachhaltige Entwicklung und Innovation im Energiebereich*. Springer Verlag, 2002
- [Sch90] SCHEER, A.-W.: *CIM - Der computergesteuerte Industriebetrieb*. Springer Verlag, Berlin, 1990
- [Sch92] SCHIEX, T.: Possibilistic constraint satisfaction problems or how to handle soft constraints. In: *Proceedings of the 8th Conference on Uncertainty in AI*. Stanford, 1992, S. 268–275
- [Sch02] SCHILLO, Michael: Self-organization and adjustable autonomy: two sides of the same coin? In: *Connection Science* 14 (4) (2002), S. 345–359
- [Sch07] SCHMEDES, Tanja: Modellierung service-orientierter Architekturen in der Energieversorgung. In: *Tagungsband der Software Engineering '07*, 2007
- [Sch09] SCHMEDES, Tanja: *Serviceorientierte Architekturen für dezentrales Energiemanagement*, Universität Oldenburg, Diss., 2009
- [SD78] SMITH, R. G. ; DAVIS, R.: Applications of the contract net framework: Distributed sensing. In: *Proceedings of the ARPA Distributed Sensor Net Symposium, Pittsburgh, PA*, 1978, S. 12–20
- [SD93] SO, Young-pa ; DURFEE, Edmund H.: An Organizational Self-Design Model for Organizational Change. In: *AAAI Technical Report 3* (1993), S. 8–15

-
- [SD96] SO, Young-pa ; DURFEE, Edmund H.: Designing tree-structured organizations for computational agents. In: *Computational & Mathematical Organization Theory* 2 (3) (1996), S. 219–245
- [SF03] SCHILLO, Michael ; FISCHER, Klaus: Holonic Multiagent Systems. In: *KI - Künstliche Intelligenz* 3 (2003), S. 54–55
- [SFF⁺02] SCHILLO, Michael ; FLEY, Bettina ; FLORIAN, Michael u. a.: Self-Organisation in Multiagent Systems: From Agent Interaction to Agent Organisation. In: *Proceedings of the Third International Workshop on Modelling Artificial Societies and Hybrid Organisations (MASHO)*, 2002, S. 37–46
- [Sie07] SIEDERSLEBEN, J.: SOA revisited: Komponentenorientierung bei Systemlandschaften. In: *Wirtschaftsinformatik* 49 (2007), S. 110–117
- [SLZ07] STAISS, Frithjof ; LINKOHR, Christel ; ZIMMER, Ulrike: *Erneuerbare Energie in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007
- [SNC⁺] SATHAYE, J. ; NAJAM, A. ; COCKLIN, C. u. a.: In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. R. (Hrsg.) ; BOSCH, P. R. (Hrsg.) u. a.: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- [SNVW06] SCHNIZLER, B. ; NEUMANN, D. ; VEIT, D. ; WEINHARDT, C.: Trading Grid Services - A Multi-attribute Combinatorial Approach. In: *European Journal of Operational Research*, 2006
- [SO10] SPECHT, Michael ; OSTERLOH, Andre: Erweiterung des Common Information Model zur Modellierung von dezentralen Energieprodukten an einem regionalen Marktplatz. In: *Informatik 2010*. Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), 2010
- [Spr03] SPRING, Eckhard: *Elektrische Energienetze – Energieübertragung und -verteilung*. VDE Verlag, 2003
- [SRB⁺06] SCHLÖGL, F. ; ROHRIG, K. ; BIERMANN, K. u. a.: Die Rolle der Informationssysteme in virtuellen Kraftwerken. In: *Tagungsband des Elften Symposium Energie-Systemtechnik*, 2006, S. 176–194
- [SSA⁺07] SIMS, R. E. H. ; SCHOCK, R. N. ; ADEGBULULGBE, A. u. a.: 2007: Energy Supply. In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. R. (Hrsg.) ; BOSCH, P. R. (Hrsg.) u. a.: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007
- [Ste77] STEVENSON, Robert H.: *Computerized peak-shaving system for alleviating electric utility peak loads*. United States Patent 4023043, 1977

- [Str03] STRESE, J.: Das virtuelle Regelkraftwerk. In: *elmlw Zeitschrift für Energie, Markt, Wettbewerb* 6 (2003), S. 2–4
- [Str06] STRESE, J.: Neue Chancen in Regelenergiemärkten mit virtuellen Kraftwerken. In: *Tagungsband der VWEW Fachtagung SSmart Grids - der Beitrag virtueller Kraftwerke zur nachhaltigen Energieversorgung*. Fulda, 2006
- [SW03] SHAHIDEHPOUR, Mohammad ; WANG, Yaoyu: *Communication and Control in Electric Power Systems*. John Wiley & Sons Inc, 2003
- [SWN⁺06] SCHLEBUSCH, V. ; WOLFF, M. ; NESLTE, D. u. a.: Energiemanagement in Verteilnetzen mit hohem Anteil an dezentralen Erzeugungsanlagen. In: *Tagungsband des Elften Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik* Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V. (ISET), 2006, S. 98–114
- [Syc98] SYCARA, Katia P.: Multiagent Systems. In: *AI Magazin* 19 (2) (1998), S. 79–82
- [TA09] TRÖSCHEL, Martin ; APPELRATH, H.-Jürgen: Towards Reactive Scheduling for Large-Scale Virtual Power Plants. In: *Tagungsband der MATES '09*, 2009
- [Tho07] THOMA, Malte C.: *Optimierte Betriebsführung von Niederspannungsnetzen mit einem hohen Anteil an dezentraler Erzeugung*, ETH Zürich, Diss., 2007
- [TKW00] TAKRITI, Samer ; KRASENBRINK, Benedikt ; WU, Lilian: Incorporating fuel constraints and electricity spot prices into the stochastic unit commitment problem. In: *Operations Research* 45 (2000), S. 268–280
- [Uli02] ULIERU, Michaela: Emergence of holonic enterprises from multiagent systems: A fuzzy-evolutionary approach. In: LOIA, V. (Hrsg.): *Soft Computing Agents: A New Perspective on Dynamic Information Systems*. IOS Press, 2002, S. 187–215
- [Usl10] USLAR, Mathias: *Ontologiebasierte Integration heterogener Standards in der Energiewirtschaft*, Universität Oldenburg, Diss., 2010
- [VB05] VALCKENAERS, P. ; BRUSSEL, H. V.: Holonic Manufacturing Execution Systems. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* Volume 54 (2005), S. 427–432
- [Ver00] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Von den Grundsätzen für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen. VDI 3985 / VDI. 2000. – Forschungsbericht
- [Ver08] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen / VDI. 2008. – Forschungsbericht

-
- [VWV⁺98] VAN BRUSSEL, H. ; WYNS, J. ; VALCKENAERS, P. u. a.: Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. In: *Computers in Industry* 37 (3) (1998), S. 255–274
- [Wei99] WEISS, Gerhard (Hrsg.): *Multiagent Systems - A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, 1999
- [Win09] WINKELS, Ludger: *Referenzmodell für die Tageseinsatzplanung dezentraler heterogener Energieerzeugungsanlagen*, Universität Oldenburg, Diss., 2009
- [WJ95] WOOLDRIDGE, Michael ; JENNINGS, Nicholas R.: Intelligent Agents: Theory and Practice. In: *The Knowledge Engineering Review* 10 (2) (1995), S. 115–152
- [WJB04] WOOLDRIDGE, Michael ; JENNINGS, Nicholas R. ; BUSSMANN, Stefan: *Multiagent Systems for Manufacturing Control - A Design Methodology*. Springer Verlag, 2004
- [WLH⁺07] WEDDE, Horst F. ; LEHNHOFF, Sebastian ; HANDSCHIN, Edmund u. a.: Dezentral vernetzte Energiebewirtschaftung (DEZENT) im Netz der Zukunft. In: *Wirtschaftsinformatik* 49 (2007), S. 361–369
- [WNA⁺09] WEIDELT, Tobias ; NIESSE, Astrid ; APPELRATH, H.-Jürgen u. a.: Design and Implementation of a Standard-Compliant CHP Control Unit. In: *Proceedings of the International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*, 2009
- [Wol07] WOLDT, T.: *Beitrag zur Energiesystemintegration dezentraler Energiewandlungsanlagen mit besonderer Berücksichtigung kleiner Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in kommunalen Versorgungsstrukturen*, BTU Cottbus, Diss., 2007
- [Woo99] WOOLDRIDGE, Michael J.: Intelligent Agents. In: WEISS, Gerhard (Hrsg.): *Multiagent Systems - A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, 1999, S. 27–77
- [Woo09a] Kapitel 5 - Reactive and Hybrid Agents. In: WOOLDRIDGE, Michael J.: *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley & Sons, 2009, S. 85–103
- [Woo09b] WOOLDRIDGE, Michael J.: *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley & Sons, 2009
- [WSK05] WACKER, J. ; SCHULZ, C. ; KURRAT, M.: Virtuelle Regelkraftwerke mit Mini-Blockheizkraftwerken - eine wirtschaftliche Utopie? In: *ew Magazin für die Energiewirtschaft* 17-18 (2005), S. 20–23
- [Yan08] YANG, Fang: Optimierung der Wärmeauskopplung bei dezentraler Stromversorgung. In: *Tagungsband zum 2. Statusseminar des FEN*, 2008

- [ZN99] ZHANG, X. ; NORRIE, D.: Holonic control at the production and controller levels. In: *Tagungsband der Intelligent Manufacturing Systems '99 (IMS)*, 1999, S. 215–224
- [ZS09] ZENKE, Ines ; SCHÄFER, Rolf: *Energiehandel in Europa: Öl, Gas, Strom, Derivate, Zertifikate*. Beck Juristischer Verlag, 2009
- [ZWXX08] ZHOU, Qiang ; WANG, Shengwei ; XU, Xinhua ; XIAO, Fu: A grey-box model of next-day building thermal load prediction for energy-efficient control. In: *International Journal of Energy Research* 32 (2008), S. 1418–1431

Index

- A**
- Ablaufplanung 43, **58**
 aktiv **58**, 75, 89, 172
 prädiktiv **58**
 reaktiv 7, **58**, **61**
 Agent 7, **29**, 52, 55, 62, 75, 96–115
 Agent Communication Language **32**
 Anlagenbetrieb
 koordiniert **2**
 netzorientiert **16**
 stromgeführt **15**, 16
 wärmegeführt **15**, 16
 Anlagenkontext
 individuell **94**
 Anlagenzahl **27**, 45–58, 104, 121, 174
 Auftrag **99**, 102, 110, 116
 erweitert **138**
 Auftragagent **102**, 103, 111, 117
 Auftragsaggregation **102**, 111
 Auftragskoordination .. **105**, 110–112, 127
- B**
- Biogasanlage **10**
 Blindleistung **2**, **11**
 Blockheizkraftwerk **26**, 94, 146
 Brennstoffzelle **14**, 94
- C**
- Common Information Model **33**, 98
- D**
- Dieselmotor **20**
- E**
- Einsatzplan 24, **77**, 77–87
 initial **3**, 23, 84, 104
 konsistent **82**, 83, 87, 90
 konsistenzfähig **90**
 lokal optimal **91**
 lokal zulässig **90**, 97
 optimal **82**, 83, 90
 teilweise realisiert **86**, 87
 zulässig **81**
 Einsatzplanabweichung 23, **86**
 mittlere **87**, 91, 150
 Einsatzplanqualität 4
 global **150**, 151
 lokal 106, **150**, 151
 Einsatzplanung **2**, **22**
 aktiv **92**, 116, 125
 prädiktiv 3, **23**, 46–53, 83–87
 reaktiv 3, **25**, 45, 52, 71, 75–95, 171
 Einsatzplanungsproblem
 prädiktiv 24, 25, **83**
 reaktiv **87**, 90, 104, 116
 Energiemanagementsystem 72
 dezentral 26, **44**
 intelligent **3**
 Energiewandlungsanlage
 dargebotsabhängig **23**
 dezentral 1, **14**, 17, 75–143
 Entscheidungsfindung
 sozial intelligent 114, 148, **155**
- F**
- Fahrplan **77**, 77–118
 initial **86**
 konsistent **82**, 85–86
 teilweise realisiert **85**, 85–86
 zulässig **81**
 Fahrplanabweichung 25, **85**, 118
 Fahrplanaktualisierung **79**
 Frequenzregelung **11**
- G**
- Gasturbine **14**
 Gesamtfahrplan **77**, 86–87
- H**
- Höchstspannungsnetz **9**
 Hard Constraint *siehe* Restriktion
 Hochspannungsnetz **9**
 Holararchie **125**, 125–142
 Holon 7, 37, **39**, 42, 104, 121–142

- I**
- IEC 61850 **98**, 144
 Individualität **28**, 47–53, 171, 175
 Informationssystem **19**, 19–27, 43, 52
 dezentral **5**
 hierarchisch **21**, 43, 48–52
 monolithisch **32**
 verteilt **6**, 72, 172
 zentral **3**, 20–26, 31, 43–53, 104
 Inselbetrieb **21**
 Integrationsbedarf **2**, **17**
 Interaktionsprotokoll **36**, 62, 116
- K**
- Künstliche Intelligenz **8**, **28**, 39
 Kapazitätsverhandlungen **108**, 105–117, 130
 Knowledge Query and Manipulation Language **32**
 Kommunikationsaufwand **4**, 39, 52, 71, 104, 111, 131, 138
 Kraft-Wärme-Kopplung **1**, **14**
 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz **15**
 Kraftwerk
 konventionell **1**, 11–19, 51–53, 100
 KWK-Anlage **14**, 15, 42, 110, 144
- L**
- Leistungskapazität **80**, 100, 115, 138
- M**
- Marktplatz **37**
 elektronisch **2**, **22**, **38**, 48
 MicroGrid **21**
 Minutenreserve **11**, 27, 42
 Mittelspannungsnetz **1**, **9**, 10–17, 48–52
 Multiagentensystem **7**, **28**, **31**, 42, 48–50, 62, 88, 103
- N**
- Netzfrequenz **11**
 Netztopologie **12**
 Neuaufwurf **4**, 5, 47, 165
 Niederspannungsnetz **1**, **10**, 14, 26, 46–52
- Nutzen
 bezüglich Fahrplanabweichungen **100**
 bezüglich Präferenzen **101**
 lokal **101**, 114
- O**
- Online-Optimierung **3**, 26, **45**, 53
 Ortsnetzstation **10**
- P**
- Peak Load Shaving **20**, 48
 Performanz 143–170
 global **5**, 6, 143–170
 lokal **5**, 6, 143–170
 Photovoltaik 14, **16**
 Planungszeitpunkt **76**, 79
 Planungszeitraum **76**, 83, 87
 Präferenz **80**, 91, 131
 Primärenergieträger
 erneuerbar **1**, 14, 17
 konventionell **14**
 Primärregelung **11**
 PV-Anlage **17**, 28, 44–48, 78, 94
- R**
- Reaktionsfähigkeit **4**, **27**, 45–52, 58, 61, 71, 88, 104, 121, 171, 173
 Regelenergie **2**, **11**, 12, 13, 21–27, 71, 87
 Regelleistung *siehe* Regelenergie
 Ressourcenagent **96**, 97, 103, 111, 117
 Restriktion **78**, 79, 80
 zeitinvariant **78**, 79, 90
 zustandsabhängig **78**, 79, 85, 90
 Robustheit **28**, 45–53, 58, 97, 175
- S**
- Schattenkraftwerk **2**
 Sekundärregelung **11**, 12, 42
 Skalierbarkeit **4**, 45–50, 121, 164
 Soft Constraint *siehe* Präferenz
 Spitzenlast **16**, 20, 26, 48
 Supply-Demand-Matching **2**, 21, 50, 73
 Systemdienst **2**, **18**, 21

Systemdynamik . . . **27**, 45–53, 58, 108, 171,
175

T

Transportplanung 43, **54**, 55–57

U

Unit Commitment Problem **24**, 25

V

Versorgungssicherheit **1**

Virtualisierung 131

 adaptiv 6–8, **134**, 141

Virtualisierungsverhandlungen . . **136**, 173

Virtuelle Ressource . . . **122**, 123–140, 173

 atomar **122**, 125

 ausgeglichen **133**, 138

Virtuelles Kraftwerk 2, **19**, 42, 44–52,
75–116, 171

 holonisch 8, **123**, 121–140, 173

W

Windkraftanlage **10**, 14, 44, 46

Wirkleistung 3, **11**, 22

Z

Zentraler Dispatcher 5, 6, 8, **164**

Zielfunktion **82**, 98

Zustandsänderung 5, 28, 48–53, **150**