

# **Integration der Regelenergie in die Betrieboptimierung von Erzeugungssystemen**

Vom Fachbereich Elektrotechnik, Informationstechnik, Medientechnik  
der Bergischen Universität Wuppertal  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**D o k t o r – I n g e n i e u r s**

genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Thilo Wulff**  
aus Solingen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Verstege

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Tibken

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Mai 2006

Diese Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20070545

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20070545>]

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Bergischen Universität Wuppertal.

Herr Professor Dr.-Ing. J. Verstege gab die Anregung zur Behandlung dieses Themas und war gleichermaßen durch reges Interesse und ständige Bereitschaft zur konstruktiven Diskussion maßgeblich am Gelingen beteiligt. Darüber hinaus gab er mir die Möglichkeit, im Rahmen der Zusammenarbeit mit verschiedenen Energieversorgungsunternehmen und der Arbeit an Forschungsprojekten wichtige praktische Erfahrungen zu sammeln, die in die Arbeit eingeflossen sind. Für diese wertvolle Unterstützung und die Möglichkeit, an nationalen und internationalen Konferenzen teilzunehmen, möchte ich mich herzlich bedanken.

Herrn Professor Dr.-Ing. B. Tibken danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates sowie die Umsetzung des zuweilen eng gesteckten Zeitplans.

Den ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des Lehrstuhls EEV danke ich für die angenehme und konstruktive Arbeitsatmosphäre, die immer von gegenseitiger und freundschaftlicher Unterstützung geprägt war und mir auf diese Weise vielfach bei der Entstehung der Arbeit weitergeholfen hat.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau, meiner Familie und meinen Freunden für die allgegenwärtige Hilfsbereitschaft und den Verzicht auf manche gemeinsame Stunde, gerade in der Endphase der Arbeit.

Sprockhövel, im August 2006

*Thilo Wulff*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Elektrische Energieversorgung in Deutschland.....	1
1.2 Systemdienstleistung Regelenergie .....	4
1.3 Betriebsoptimierung in Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung.....	7
1.4 Ziel und Aufbau der Arbeit .....	14
<b>2 Analyse der Betriebsoptimierungsaufgabe</b>	<b>17</b>
2.1 Einsatz von Regelenergie .....	17
2.2 Stochastische Charakteristika der Regelenergie.....	22
2.3 Markt für Regelenergie .....	24
2.4 Betriebsoptimierung unter Berücksichtigung von Regelenergie.....	29
2.4.1 Definition der Betriebsoptimierung.....	29
2.4.2 Anforderungen an das Optimierungsmodell .....	32
2.5 Optimierungsverfahren.....	43
<b>3 Mathematische Modellbildung</b>	<b>49</b>
3.1 Gemischt-Ganzzahlig-Lineare-Programmierung .....	49
3.2 Systemtechnische Modellierung.....	53

---

3.3	Modellierungskonzept zur Abbildung von Regelenergie.....	56
3.4	Knoten .....	58
3.5	Quelle .....	60
3.5.1	Energiebezüge .....	60
3.5.2	Regelenergiebilanzierung.....	62
3.6	Wandler .....	67
3.6.1	Umwandlungsfunktion .....	67
3.6.2	Leistungsänderungsgeschwindigkeit.....	70
3.6.3	Regelenergiebereitstellung durch mehrere Wandler .....	73
3.6.4	Betriebsdiagramme bei der Kraft-Wärme-Kopplung.....	75
3.7	Speicher .....	82
3.7.1	Energiespeicherung .....	82
3.7.2	Regelenergiebilanzierung .....	83
3.8	Ganglinie .....	87
3.8.1	Energielieferungen .....	87
3.8.2	Lieferung von Regelenergie .....	88
3.8.3	Monte-Carlo-Simulation .....	93
3.9	Spezielle Modellierungen.....	95
3.9.1	Lieferung und Bezug von Fahrplanenergie .....	95
3.9.2	Gebotserstellung für Regelenergie .....	97
3.9.3	Dargebotsabhängige Regelenergiebereitstellung .....	99

---

3.10	Verfahren zur Betriebsoptimierung .....	101
<b>4</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b>	<b>104</b>
4.1	Untersuchungsziele .....	104
4.2	Aufbau des Testerzeugungssystems .....	105
4.3	Ergebnisse der kurzfristigen Betriebsoptimierung .....	111
4.3.1	Ergebnisse ohne Berücksichtigung von Regelenergie .....	112
4.3.2	Ergebnisse mit Berücksichtigung von Regelenergie.....	115
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>126</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>129</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Brutto-Stromerzeugung in Deutschland (Stand 2005) [19] .....	1
1.2	UCTE-Kooperationspartner und synchronisiertes Netzgebiet [58] .....	3
1.3	UCTE-Synchronverbund, Regelblöcke und Regelzonen [58] .....	4
1.4	Definition der Zusammenhänge zur Erzeuger-Betriebsplanung .....	6
1.5	Schema eines Erzeugungssystems mit Kraft-Wärme-Kopplung .....	9
1.6	Betriebsplanungshorizonte in der Energieversorgung .....	10
1.7	Fahrplan- und Regelenergiemarkt für den Erzeugungssystembetreiber .....	12
1.8	Eingangsdaten und Aufgabe der Betriebsoptimierung.....	13
2.1	Schema der Regelung im UCTE-Synchronverbund.....	18
2.2	Ablauf des Einsatzes von Regelenergie .....	19
2.3	Änderung der Erzeugerleistung durch die Primärregelung.....	21
2.4	Beispiel für benötigte Sekundärregelleistung und Minutenreserve [23].....	23
2.5	Allgemeines Gebot für die Erbringung von Regelenergie .....	29
2.6	Betriebsoptimierung unter Berücksichtigung von Regelenergie.....	32
2.7	Einsatzbereiche verschiedener Anlagentypen zur Regelenergiebereitstellung .....	34
2.8	Brennstoffverbrauchsdiagramm einer Erzeugungsanlage mit Entnahme- Kondensations-Turbine .....	36
2.9	Regelenergiebereitstellung eines Pumpspeicherkraftwerks .....	38
2.10	Regelenergiebereitstellung eines Speicherkraftwerks.....	39
3.1	Verzweigungsbaum beim "Branch-and-Bound"-Algorithmus.....	50
3.2	Verlauf einer stückweise linearen Kennlinie.....	53
3.3	Aufbereitungsprozess der Informationen zur mathematischen Problemformulierung .....	54
3.4	Schematische Zusammenschaltung der Grundelemente .....	55

---

3.5	Prinzip der Integration von Regelenergie in die Betriebsoptimierung.....	57
3.6	Neue durch ein Grundelement zu ermittelnde Leistungen .....	58
3.7	Modellierung einer Maximalleistungsnebenbedingung .....	59
3.8	Vereinfachte Modellierung einer Maximalleistungsnebenbedingung .....	60
3.9	Typische Beispiele für Energiebezugsverträge .....	61
3.10	Übergang von bisheriger zu neuer Quellenmodellierung.....	63
3.11	Problematik der Regelenergiebereitstellung durch eine Quelle .....	64
3.12	Vorhaltbare Regelenergie einer Quelle mit Energiemengenbeschränkung.....	66
3.13	Variablendefinition für die Quellenmodellbildung .....	67
3.14	Systemtechnische Darstellung eines allgemeinen Wandlers.....	70
3.15	Deckung eines Regelenergiegebots durch mehrere Erzeugungsanlagen .....	74
3.16	Modellierung der Bereitstellung durch mehrere Erzeugungsanlagen .....	75
3.17	Aufbereitung eines Betriebsdiagramms .....	76
3.18	Modellbildung des Betriebsdiagramms einer KWK-Anlage .....	78
3.19	Ermittlung von Grenzkennlinien aus dem Betriebsdiagramm .....	80
3.20	Bestimmung der Maximal- bzw. Minimalleistung mehrerer Wandler .....	81
3.21	Allgemeine Modellierung eines Energiespeichers .....	82
3.22	Beispiel für notwendige Füllstandsreserve durch Regelenergiegebote.....	84
3.23	Beispiel für die Regelenergiebilanzierung .....	86
3.24	Ziel der Gangliniensimulation.....	89
3.25	Beispiel zur Charakterisierung einer Regelleistungsganglinie.....	90
3.26	Verfahren zur Ermittlung einer zufälligen Regelleistungsganglinie .....	90
3.27	Beispiel für das Resultat einer Zeitintervallzusammenfassung.....	93
3.28	Monte-Carlo-Simulation zur Ermittlung einer Regelleistungsganglinie.....	94
3.29	Modellierung des kurzfristigen Energiehandels.....	96
3.30	Modellierung eines Regelenergiegebotes.....	98

---

3.31	Auswirkungen einer Regelenergievorhaltung auf dargebotsabhängige Erzeugungsanlagen.....	100
3.32	Modellierung einer Regelenergiebereitstellung durch dargebotsabhängige Erzeugungsanlagen.....	101
3.33	Aufbau des vorgestellten Programmsystems .....	102
4.1	Aufbau des betrachteten Testerzeugungssystems .....	105
4.2	Brennstoffverbrauchsdiagramm des modellierten Kohlekraftwerks.....	106
4.3	Betriebsdiagramm des GuD-Heizkraftwerks .....	107
4.4	Betrachtetes Testsystem zur Verifikation des Verfahrens.....	111
4.5	Bilanz der elektrischen Erzeugung, Basisszenario.....	113
4.6	Bilanz der thermischen Erzeugung, Basisszenario.....	114
4.7	Bewirtschaftung des Pumpspeichers, Basisszenario.....	114
4.8	Einspeiseprognose für Windenergie.....	115
4.9	Gebotsleistungen und Werte der zufälligen Regelleistungsganglinie.....	116
4.10	Bilanz für positive Regelenergie .....	117
4.11	Bilanz für negative Regelenergie .....	118
4.12	Bilanz der elektrischen Erzeugung, Szenario mit Regelenergie .....	119
4.13	Bewirtschaftung des Pumpspeichers bei Bereitstellung von Regelenergie.....	120
4.14	Bilanzierung der Regelenergievorhaltung für den Pumpspeicher.....	121
4.15	Vorhaltung von Erzeugungskapazität zum Ausgleich der Vorhaltebilanz.....	122
4.16	Einhalten der Betriebsdiagrammgrenzen durch die GuD-Anlage.....	122
4.17	Einhalten der Bezugsvertragsgrenzen für Kohle.....	123
4.18	Einhalten der Bezugsvertragsgrenzen für Erdgas.....	124

## Verzeichnis der Formelzeichen

In Anlehnung an die allgemein übliche Konvention werden Matrizen mit fetten Großbuchstaben, Vektoren mit einem darüber angeordneten Pfeil und Mittelwerte mit einem Überstrich gekennzeichnet. Laufindizes werden zur Verbesserung der Übersichtlichkeit tiefgestellt geschrieben, alle anderen Indizes werden hochgestellt. Formelzeichen zur Beschreibung von Stützstellen werden mit einer Tilde gekennzeichnet.

### Lateinische Formelzeichen

a	Steigung einer Grenzgraden
<b>A</b>	Nebenbedingungsmatrix
b	Achsenabschnitt einer Grenzgraden
$\vec{b}$	Konstanter Vektor der rechten Seite der Nebenbedingungen
B	Binäre Variable
c	Konstante
D	Zeitintervalldauer
$\hat{D}$	Dauer eines Regelleistungseinsatzes
E	Erlöse
$E\{\dots\}$	Erwartungswert eines Ausdrucks
f	Frequenz
G	Gesamtregelabweichung
H	Häufigkeit eines Regelleistungseinsatzes
I	Anzahl der Elemente, beschrieben durch den Laufindex $i$
J	Anzahl der Elemente, beschrieben durch den Laufindex $j$
k	Spezifische Kosten
K	Kosten
$\dot{K}$	Zeitbezogene Kosten
$\text{Max}\{\dots\}$	Maximum eines Ausdrucks
$\text{Min}\{\dots\}$	Minimum eines Ausdrucks
n	Netzleistungszahl
N	Nebenbedingung
P	Elektrische Leistung

---

$\dot{P}$	Leistungsänderungsgeschwindigkeit
$\dot{Q}$	Thermische Leistung
S	Anzahl Stützstellen
t	Zeit
T	Anzahl Zeitintervalle
$\hat{T}$	Gesamtzeit eines Regelvorgangs
U	Anzahl Wandler am Knoten
W	Energie
x	Optimierungsvariable
$\bar{x}$	Vektor der Optimierungsvariablen
y	Gleichverteilte Zufallszahl
Z	Zielfunktionswert

## Griechische Formelzeichen

$\beta$	Proportionalanteil des Netzreglers
$\delta$	Kontinuierliche Optimierungsvariable
$\Delta$	Abweichung
$\lambda$	Kontinuierliche Optimierungsvariable
$\nu$	Faktor zur Definition des Abbruchkriteriums
$\sigma$	Standardabweichung
$\Psi$	Binäre Variable

## Laufindizes

d	Achsennummer eines Grundelements
g	Gebot
ga	Ganglinie
h	Allgemeiner Laufindex
i	Allgemeiner Laufindex
j	Allgemeiner Laufindex
k	Allgemeiner Laufindex
q	Quelle

---

s	Stützstelle
sp	Speicher
t	Zeitintervall
u	Wandler

## Weitere Indizes

A	Anfangszeitintervall
AB	Abfahrwert
AU	Ausgangswert
AN	Anfahrwert
AUS	Ausspeicherung
BE	Bereitstellung
BL	Beladung
BR	Brennstoff
DA	Dargebot
E	Endzeitintervall
EE	Elektrische Energie
EI	Eingangswert
EIN	Einspeicherung
EK	Einkauf
EL	Entladung
EN	Energie
EZ	Erzeugung
FP	Fahrplan
FR	Fremdbezug
GE	Gebot
LA	Last
LÄ	Leistungsänderung
MAX	Maximalwert
MIN	Minimalwert
MP	Marktpreis
MS	Monte-Carlo-Simulation
PA	Preisabschlag

---

RA	Regelzone A
RL	Regelleistungslieferung
RV	Regelleistungsvorhaltung
SO	Sollwert
SRA	Sekundärregelleistung Regelzone A
TE	Thermische Energie
ÜB	Übergabe
VK	Verkauf
VO	Vorhalteleistung
+	Positiv
-	Negativ

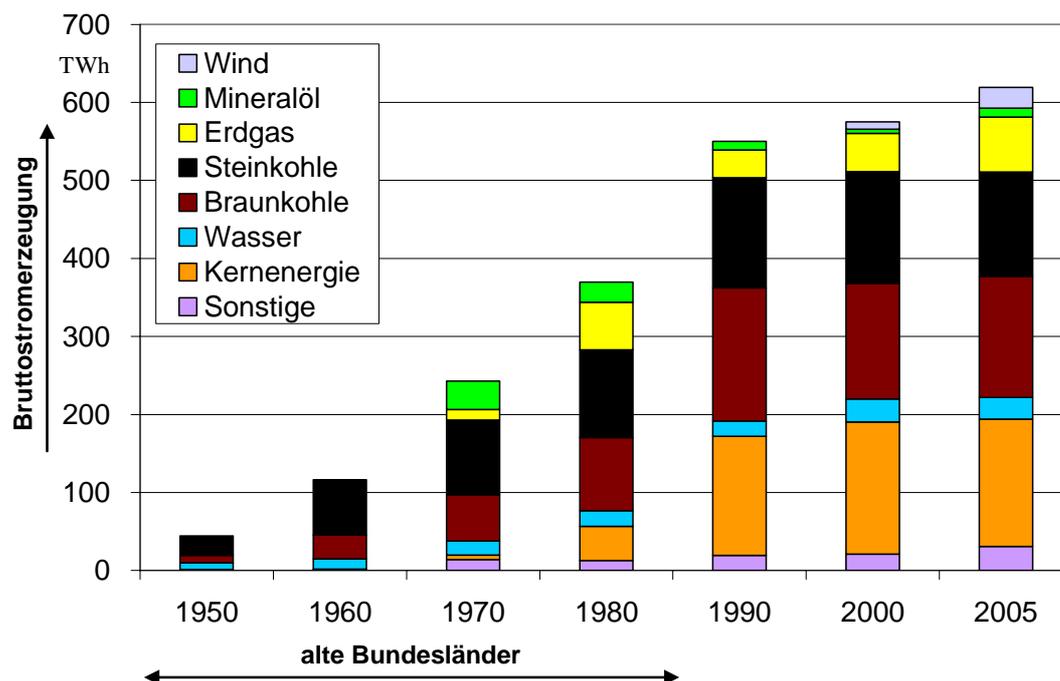
## Abkürzungen

ASCII	American Standard Code of Information Interchange
BKV	Bilanzkreisverantwortlicher
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EU	Europäische Union
GGLP	Gemischt-Ganzzahlig-Lineare-Programmierung
GWB	Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MPS	Mathematical Programming System
RE	Regelenergie
RL	Regelleistung
SOS 1	Special Ordered Set, Type 1
SOS 2	Special Ordered Set, Type 2
StromNZV	Stromnetzzugangsverordnung
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
UCPTE	Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VDN	Verband der Netzbetreiber

# 1 Einleitung

## 1.1 Elektrische Energieversorgung in Deutschland

Die Versorgung mit Energie spielt seit jeher eine zentrale Rolle bei der Gestaltung einer komfortablen Lebensweise. Die eigentlichen Nutzenergien für den Menschen, Wärme, mechanische Energie, Energie für Beleuchtung und seit Mitte des 20. Jahrhunderts zunehmend auch Energie zur Informationsübertragung können dabei auf vielfältige Weise erzeugt werden. Die elektrische Energie ist erst im letzten Jahrhundert, bedingt durch den stetigen technischen Fortschritt, zu einem sehr wichtigen Sekundärenergieträger geworden, ohne den die heutige Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft nicht existieren könnte. Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung der Bruttostromerzeugung in Deutschland, an der abgelesen werden kann, welchen Bedeutungszuwachs die elektrische Energie seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts erfahren hat.



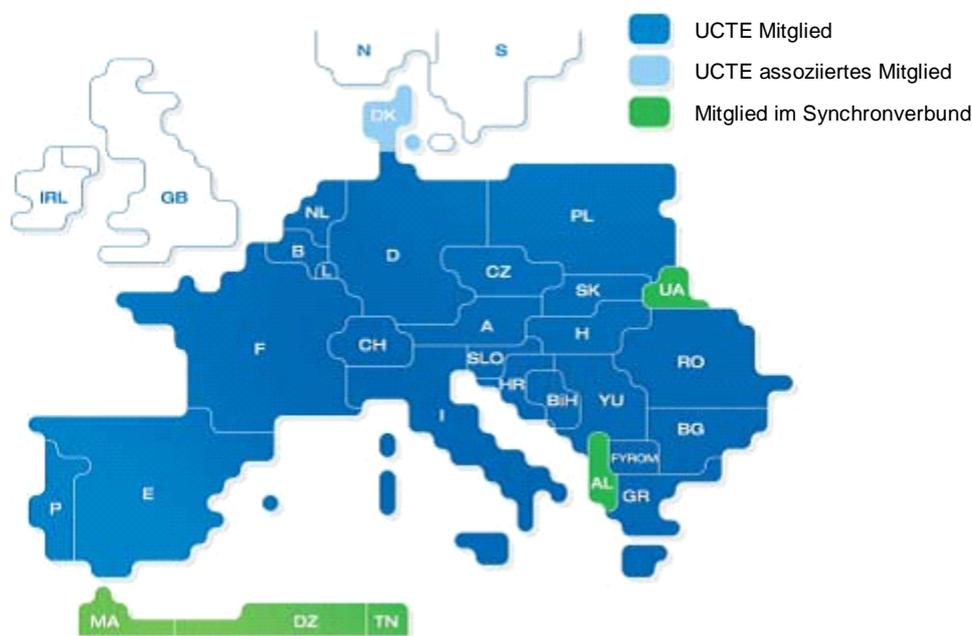
**Abbildung 1.1:** Brutto-Stromerzeugung in Deutschland (Stand 2005) [19]

Die kommerzielle elektrische Energieversorgung beginnt in Deutschland ab 1880 und geht einher mit einer stetigen Verbesserung des individuellen Lebensstandards und der Industrialisierung. Mit dem Ziel, die Möglichkeiten elektrischer Energie, insbesondere elektri-

sches Licht, überall zur Verfügung zu haben, versucht der Gesetzgeber in zahlreichen kleinen Schritten den Aufbau der leitungsgebundenen Energieversorgung zu fördern und somit einheitliche Versorgungsstandards in Deutschland zu gewährleisten. Ein erstes "Gesetz zur Förderung der Energiewirtschaft (EnWG)" wird 1935 beschlossen, durch das der Staat wesentliche Kontroll- und Genehmigungsfunktionen übernimmt. Die herausragende Bedeutung der Energiewirtschaft für den Staat führt zu der Überzeugung, dass monopolartige Strukturen für die Energiewirtschaft die wirtschaftlichste und zuverlässigste Lösung für die Versorgung der Verbraucher sind [65]. Das im Jahr 1957 erlassene "Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB)" unterstreicht dieses Ziel durch umfangreiche Ausnahmeregelungen für die leitungsgebundene Energieversorgung, durch die Demarkationsverträge, Konzessionsverträge und Verbundverträge vom Kartellverbot ausgenommen werden. Obwohl diese gesetzlichen Regelungen vielfach in der Öffentlichkeit diskutiert werden, initiiert erst die EU-Richtlinie zur Einrichtung eines wettbewerbsorientierten EU-Elektrizitätsmarktes eine "Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts" in Deutschland, so dass 1998 die Grundlage für die Liberalisierung des Energiemarktes geschaffen wird [44, 54]. Ein zentrales Element des neuen Gesetzes ist die Entflechtung von Erzeugung, Handel und Vertrieb von der Übertragung und Verteilung, die zu diesem Zeitpunkt im Rahmen der vertikalen Organisation der Energieversorgungsunternehmen zumeist in einer Hand liegen. Durch die zusätzliche Maßgabe, einen diskriminierungsfreien Netzzugang für konkurrierende Versorger zu ermöglichen, soll der Wettbewerb als regulierendes Element für die leitungsgebundene Energieversorgung eingeführt werden. Die Regulierung und Festlegung von Regeln zur Umsetzung des Gesetzes wird zunächst gänzlich den Organisationen und Verbänden der Energiewirtschaft übertragen, die zur Ausgestaltung der Einzelheiten die erforderlichen Kompetenzen haben. Im Juli 2005 wird aufbauend auf den bis dahin gewonnenen Erfahrungen mit der Liberalisierung ein "Zweites Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts" verabschiedet, das die Grundlage zur Einrichtung einer Regulierungsbehörde legt. Darüber hinaus werden die Verantwortlichkeiten für den zuverlässigen Betrieb des elektrischen Übertragungsnetzes definiert und unter anderem auch die Beschaffung von Ausgleichsleistungen geregelt [11, 18, 45].

Parallel zu dieser wirtschaftlichen und rechtlichen Organisation der elektrischen Energieversorgung wird in Deutschland mit der flächendeckenden Versorgung zusätzlich auch eine Definition technischer Randbedingungen erforderlich, für die in Deutschland ebenfalls die Organisationen und Verbände der Energiewirtschaft verantwortlich sind. Durch den Zusammenschluss eines Großteils der europäischen Elektrizitätsversorgungsnetze zu

einem synchronen Netzverbund müssen einige technische Randbedingungen allerdings auch für das gesamte Verbundsystem vereinbart werden, so dass bereits 1951 mit Gründung der UCPTE (Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity) eine Plattform zur Aufstellung einheitlicher Regeln für den zuverlässigen Betrieb des elektrischen Versorgungsnetzes ins Leben gerufen wird. Die von der UCPTE (seit 1990 UCTE) im "Operation Handbook" definierten, gemeinsamen technischen Regeln gelten damit für ein Energieversorgungssystem, das rund 450 Millionen Menschen mit jährlich 2300 TWh elektrischer Energie versorgt. Abbildung 1.2 zeigt den geographischen Umfang des synchronisierten Netzgebietes der UCTE-Kooperationspartner und welche europäischen Staaten daran beteiligt sind [58].

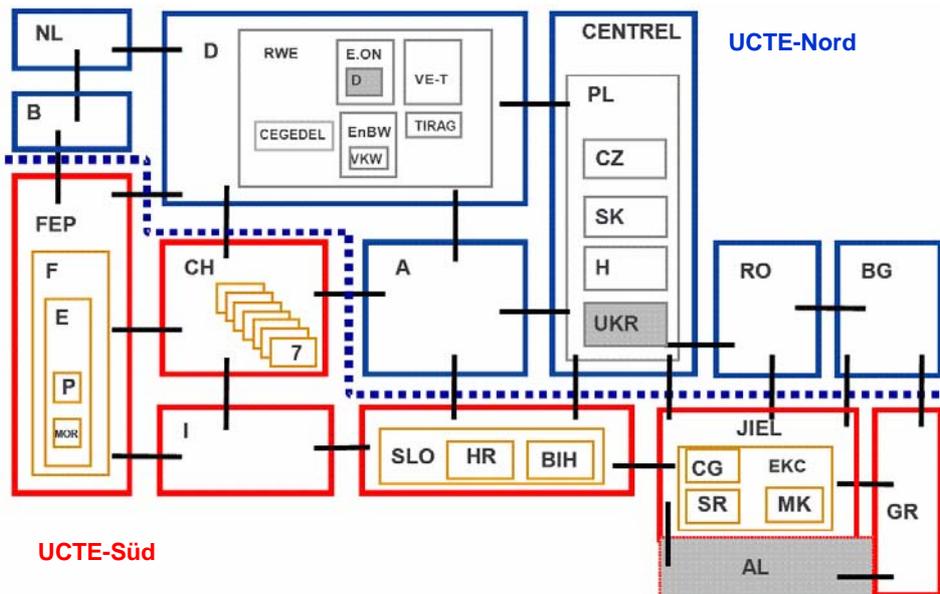


**Abbildung 1.2:** UCTE-Kooperationspartner und synchronisiertes Netzgebiet [58]

Eine der wichtigsten gemeinsamen Regeln für einen stabilen synchronen Betrieb stellt die Leistungs-Frequenz-Regelung dar, bei der über die Netzfrequenz als systemweit verfügbare Regelgröße für ein Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch gesorgt werden kann. Im Fall einer Bilanzstörung weicht die Netzfrequenz von ihrem Sollwert von 50 Hz ab und zunächst beteiligen sich UCTE-weit Erzeugungsanlagen proportional zur Frequenzabweichung an der Bereitstellung von Regelleistung. Anschließend wird die Bereitstellung von Regelleistung verursacherbezogen in die betreffenden Regelblöcke bzw. Regelzonen verlagert. Für deren Grenzen werden entsprechende Übergabeleistungen definiert, die nach

dem Ausgleich einer Bilanzstörung durch die Bereitstellung von Regelenergie wiederhergestellt werden.

Für das Beispiel Deutschland ist in Abbildung 1.3 zu erkennen, dass beispielsweise die vier Übertragungsnetzbetreiber EON, RWE, EnBW und Vattenfall innerhalb des Regelblocks Deutschland jeweils eine eigene Regelzone bilden.



**Abbildung 1.3:** UCTE-Synchronverbund, Regelblöcke und Regelzonen [58]

Für die hier vorliegende Arbeit werden die technischen und gesetzlichen Regelungen des deutschen Regelblocks zu Grunde gelegt, für deren Ausgestaltung die Bundesnetzagentur verantwortlich ist. Diese Regelungen sehen unter anderem vor, dass dem Übertragungsnetzbetreiber die Verantwortung für einen sicheren, ressourcenschonenden und ökonomischen Betrieb des Übertragungsnetzes sowie die zuverlässige Versorgung der Verbraucher zufällt. Wesentliche Grundlagen für die technischen Regelungen liefern die vom Verband der Netzbetreiber (VDN) aufgestellten Maßgaben [18, 60, 61, 62].

## 1.2 Systemdienstleistung Regelenergie

Um diese Verantwortung erfüllen zu können, ist die Bereitstellung verschiedener so genannter Systemdienstleistungen erforderlich, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen.

Die erste Gruppe beinhaltet die Dienstleistungen, die auch nach der Trennung der Erzeugung von Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie im Zuge der Liberalisierung vom Übertragungsnetzbetreiber prinzipiell alleine erbracht werden können:

### **Betriebsführung**

Die Betriebsführung umfasst die Koordination und Abrechnung aller notwendigen Maßnahmen, die der Übertragungsnetzbetreiber zur Erfüllung seiner Aufgaben durchführen muss.

### **Versorgungswiederaufbau**

Im Fall einer Versorgungsunterbrechung ist der Übertragungsnetzbetreiber für die Behebung dieser Situation verantwortlich, so dass er dafür im Vorgriff geeignete Maßnahmen und Pläne vorzuhalten hat.

Die zweite Gruppe von Dienstleistungen bedingt in der Regel den Einsatz von Erzeugungsanlagen und damit prinzipiell den Einkauf von Erzeugerleistungen am Energiemarkt durch den Übertragungsnetzbetreiber [50]:

### **Spannungshaltung**

Die Spannungshaltung, die im Wesentlichen über die gezielte Bereitstellung von Blindleistung erreicht wird, nimmt z.Z. noch eine Sonderstellung ein, weil die Erzeugungsanlagenbetreiber diese in gewissem Umfang kostenfrei bzw. fast kostenfrei zur Verfügung stellen müssen. Darüber hinaus kann Blindleistung nicht über weite Entfernungen zur Verfügung gestellt werden, so dass ein Blindleistungsmarkt schwer realisierbar ist.

### **Frequenzhaltung**

Die Frequenzhaltung bzw. die eingangs angesprochene Leistungs-Frequenz-Regelung, für die Regelenergie erbracht werden muss, bedarf der Bereitstellung von Erzeugungskapazitäten, deren Wirkleistung schnell und umfangreich variiert werden kann. Die gesetzlichen Regelungen im Rahmen des EnWG und der Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV) verpflichten den Übertragungsnetzbetreiber, die Regelenergie unter dem Aspekt der zuverlässigen Versorgung der Verbraucher diskriminierungsfrei über ein Ausschreibungsverfahren wirtschaftlich zu beschaffen. Die Regelenergie teilt sich dabei zunächst in drei zu beschaffende Produkte ein [2, 17]:

## Primärregelung

Die Primärregelung stellt unmittelbar nach einer Störung der Erzeugungs-Verbrauchs-Bilanz positive oder negative Leistung proportional zur Frequenzabweichung vom Sollwert 50 Hz zur Verfügung.

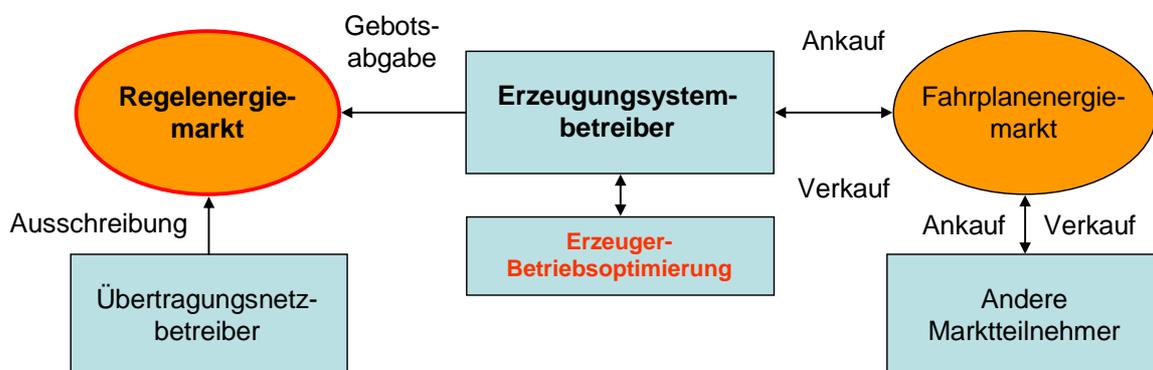
## Sekundärregelung

Als Ablösung der Primärregelung tritt die Sekundärregelung nach etwa 15 bis 30 s in Kraft. Die Erzeugungs-Verbrauchs-Bilanz im Verbundnetz wird innerhalb von höchstens 15 min vollständig ausgeglichen. Die Sekundärregelleistung wird für maximal 1 h eingesetzt.

## Minutenreserve

Zur Ablösung der Sekundärregelung wird zwischen 15 und 60 min nach einer Störung der Erzeugungs-Verbrauchs-Bilanz die Minutenreserve eingesetzt, wobei diese manuell durch den Übertragungsnetzbetreiber aktiviert wird. Darüber hinaus erfolgt der Ausgleich einer Bilanzstörung durch die Stundenreserve. Diese zählt nicht zu den Regelenergien und wird nicht durch den Übertragungsnetzbetreiber sondern durch den Bilanzkreisverantwortlichen, in dessen Bilanzkreis die Störung ihren Ursprung hat, manuell aktiviert.

Aus Sicht des Betreibers eines Erzeugungssystems bietet der damit eingeführte Markt für Regelenergie die Chance, seine Anlagenkapazitäten in Ergänzung zum bereits etablierten Markt für Fahrplanenergie gewinnbringend zu vermarkten. Abbildung 1.4 verdeutlicht die dieser Arbeit zu Grunde gelegten Zusammenhänge schematisch.



**Abbildung 1.4:** Definition der Zusammenhänge zur Erzeuger-Betriebsplanung

Demnach hat der Erzeugungssystembetreiber die Möglichkeit, sowohl elektrische Energie am Markt für Fahrplanenergie zu handeln, als auch über eine Abgabe von Geboten zur Bereitstellung von Regelenergie entsprechend der Ausschreibungen des Übertragungsnetzbetreibers am Regelenergiemarkt teilzunehmen. Damit stehen dem Erzeugungssystembetreiber weit reichende Chancen zur Verfügung, den Deckungsbeitrag für sein System zu maximieren.

### **1.3 Betriebsoptimierung in Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung**

Die resultierende Fragestellung nach einer optimalen Betriebsweise eines Erzeugungssystems unter Berücksichtigung von Regel- und Fahrplanenergiemarkt kann nur im Rahmen der Betriebsoptimierung beantwortet werden. Diese Aufgabe ist auf Grund der vielfältigen, technischen, vertraglichen, betrieblichen und umweltrelevanten Randbedingungen insbesondere für Erzeugungssysteme mit Kraft-Wärme-Kopplung sehr komplex, weil die zu berücksichtigenden Anlagen in der Regel thermische und elektrische Energie gleichzeitig, aber nicht unabhängig voneinander bereitstellen können. Zwar existiert kein vergleichbarer Fahrplanenergiemarkt für thermische Energie, gleichwohl sind aber zumeist langfristige Lieferverträge zu erfüllen, was sich in der Regel unmittelbar auf die Erzeugung elektrischer Energie auswirkt. Aus diesem Grund sind seit einiger Zeit verschiedene computergestützte Lösungen in der Entwicklung, die den Erzeugungsanlagenbetreiber bei seinen Entscheidungen unterstützen können. Bisher verfügbare Verfahren integrieren allerdings nicht die gemeinsame Betrachtung von Regel- und Fahrplanenergiemarkt in einem geschlossenen Optimierungsverfahren.

Abbildung 1.5 zeigt schematisch den Umfang eines typischen, in der Betriebsoptimierung abzubildenden Erzeugungssystems mit Kraft-Wärme-Kopplung, bei dessen Modellierung bereits ohne die Berücksichtigung des Regelenergiemarktes die folgenden Ziele im Mittelpunkt stehen:

- **Einsatzplanung von Energiebezügen**

Ein Erzeugungssystem benötigt in der Regel einen oder mehrere Energiebezüge z.B. für Brennstoffe, elektrische und thermische Energie oder andere Betriebsstoffe, die mit entsprechenden Bezugsverträge über den Energiemarkt, börslich oder bilateral organi-

siert, abgedeckt werden müssen. Die Kosten eines Bezugs können dabei in Abhängigkeit von Bezugszeit, -leistung, -menge und anderen Faktoren variieren, so dass eine Betriebsoptimierung entscheiden muss, wie ein optimaler Bezug gestaltet werden kann.

- **Einsatzplanung von Energieverkäufen**

Eine analoge Aufgabenstellung ergibt sich bei der Bestimmung optimaler Energieverkäufe, die in Abhängigkeit der Marktpreise und der Gestehungskosten der eigenen Erzeugung von Energie den Deckungsbeitrag des Erzeugungssystems verbessern können. Energieverkäufe können dabei ebenfalls wie Energiebezüge sowohl bilateral als auch am börslich organisierten Markt abgewickelt werden.

- **Einsatzplanung technischer Anlagen**

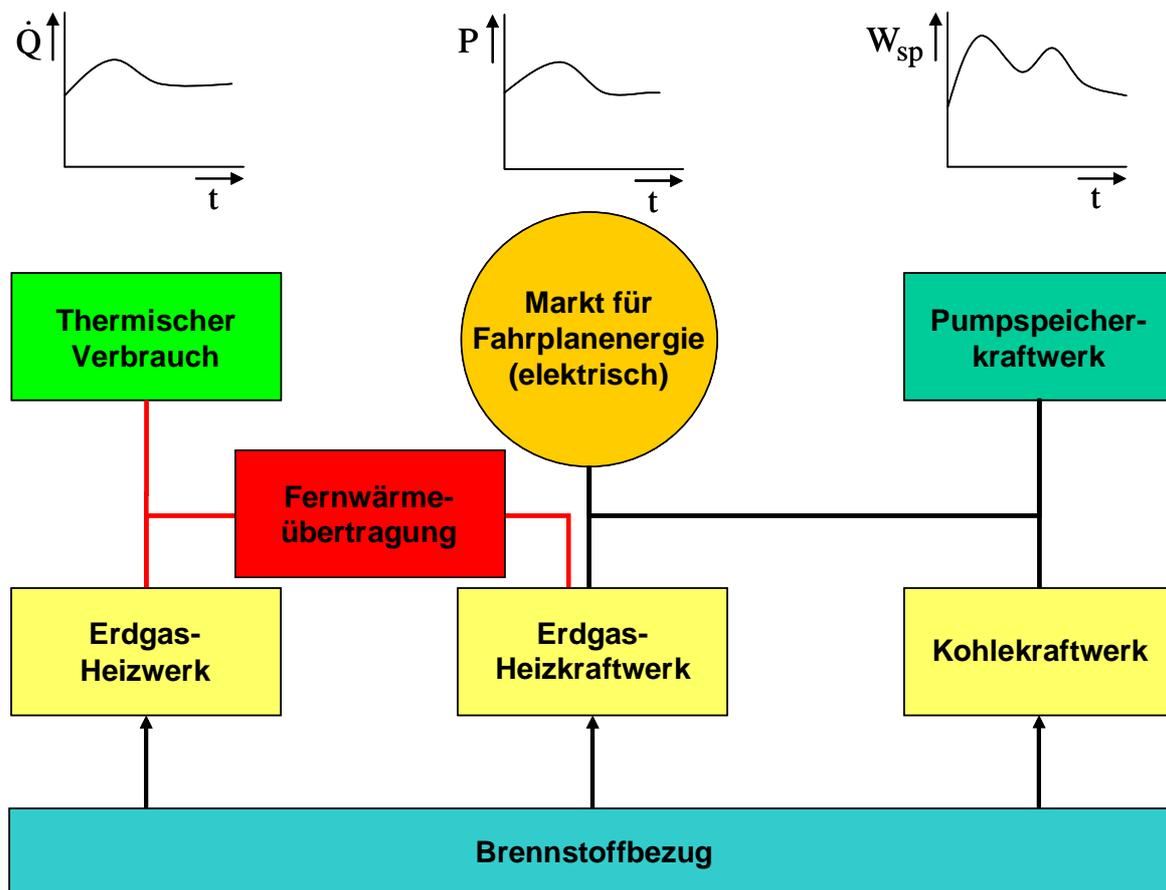
Die Einsatzplanung der technischen Anlagen steht im Mittelpunkt der Modellierung der Betriebsplanung. Gerade die gekoppelte Produktion von thermischer und elektrischer Energie führt zu komplexen technischen Zusammenhängen, die letztlich den Brennstoffbedarf in Abhängigkeit der erzeugten Energie abbilden sollen. Darüber hinaus sind eventuell weitere technische Anlagen zur Energiespeicherung und Energieverteilung, z.B. Fernwärmenetze, zu berücksichtigen, deren Betriebsweise ebenfalls einen unmittelbaren Einfluss auf den wirtschaftlichen Betrieb des Gesamtsystems haben kann.

- **Einhalten aller technischen, betrieblichen, vertraglichen und umweltrelevanten Restriktionen**

Bei der Bestimmung eines optimalen Anlageneinsatzes, Energiebezugs oder Energieverkaufs sind vor allem die zu berücksichtigenden vielfältigen Restriktionen eines Erzeugungssystems eine Hauptursache für die Komplexität des Planungsproblems. Häufig auftretende Restriktionen sind z.B.:

- Minimale und maximale Betriebsdauern bzw. Stillstandsdauern
- Anfahrkosten, entweder explizit oder über zusätzlichen Brennstoffbedarf
- Minimale und maximale Füllstände von Speichern

- Leistungsänderungsrestriktionen
- Begrenzte Emissionsmengen
- Minimale und maximale Energiemengen bei Bezugs- und Lieferverträgen



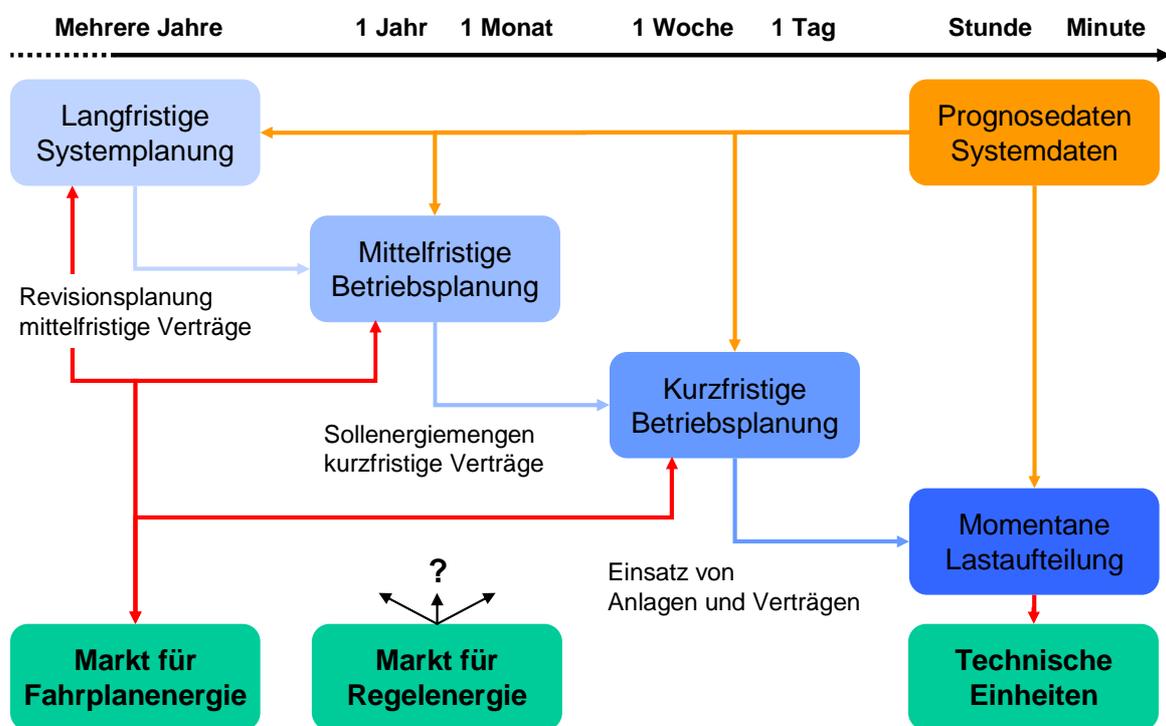
**Abbildung 1.5:** Schema eines Erzeugungssystems mit Kraft-Wärme-Kopplung

Auf Grund der Komplexität der beschriebenen Modellierungsziele muss vor der Erstellung eines Optimierungsmodells entschieden werden, welche Modellierungsgenauigkeit gewählt werden kann, um bei den heute zur Verfügung stehenden Optimierungsverfahren und Rechnerleistungen innerhalb einer akzeptablen Rechenzeit ein optimales Ergebnis zu erzielen.

Die Fragestellung einer sinnvollen bzw. optimalen Modellierungsgenauigkeit zur Betriebsplanung von Erzeugungssystemen ist bereits mehrfach untersucht worden und es hat sich gezeigt, dass eine Einteilung des Optimierungsproblems in verschiedene Betrachtungs-

tungshorizonte vorgenommen werden sollte, die sich in ihrer Aufgabenstellung und der dazu erforderlichen Modellierungsgenauigkeit unterscheiden. Langfristige Betriebsoptimierungen können mit einer weniger detailgetreuen Modellierung umgesetzt werden, wogegen bei kürzeren Betrachtungshorizonten die Modellierungsgenauigkeit zunehmend erhöht werden kann. Ausgangspunkt für die Wahl der Einteilungen, die für alle Erzeugungssysteme der Energieversorgung ähnlich gewählt werden, sind die äußeren betrieblichen Randbedingungen und die mit wachsendem Betrachtungshorizont schlechter werdenden Prognosegüten der Eingangsdaten [37, 59].

Abbildung 1.6 zeigt die Betriebsplanungshorizonte, die sich als praktikabel erwiesen haben.



**Abbildung 1.6:** Betriebsplanungshorizonte in der Energieversorgung

### Langfristige Systemplanung

Die langfristige Systemplanung hat einen Zeithorizont, der zwischen einem und mehreren Jahren liegt. Im Rahmen dieser Betrachtung spielen mittelfristige Vertragsentscheidungen, größere Anlagenrevisionen oder Inbetriebnahmen bzw. Stilllegungen eine Rolle. Dies sind allesamt Entscheidungen von eher strategischer Natur, bei denen nur grobe Zusammenhänge abgebildet werden müssen.

### **Mittelfristige Betriebsplanung**

Im Zeitbereich zwischen mehreren Wochen und einem Jahr spielen sich gerade in der Energiewirtschaft wesentliche Planungen ab. Zum einen sind die Sollenergiemengen einzelner Energieträger zu ermitteln, die im Betrachtungszeitraum benötigt werden, zum anderen wird in erster Näherung auch festgelegt, in welchem Umfang einzelne Anlagen und Anlagenteile an der Erfüllung von Lieferverpflichtungen beteiligt werden. Als Ergänzung können auch Handelsmöglichkeiten am Energiemarkt eine Rolle spielen, ebenso wie die Berücksichtigung von Emissionskontingenten, z.B. für CO<sub>2</sub> [68].

### **Kurzfristige Betriebsplanung**

Für einen Zeitbereich von einem Tag bis zu einer Woche wird die kurzfristige Betriebsplanung durchgeführt, die im Vergleich mit der Mittelfristplanung bereits deutlich exaktere Modelle von Anlagen, Verträgen und Handelsmöglichkeiten besitzt. Die Ergebnisdaten der Mittelfristplanung, vor allem also Sollenergiemengen, werden als Randbedingungen in die Eingangsdaten der kurzfristigen Betriebsplanung eingearbeitet, um ein über den gesamten Betrachtungshorizont möglichst konsistentes Ergebnis zu erhalten. Hauptanwendung der kurzfristigen Betriebsplanung ist die Bestimmung des optimalen Einsatzes von Anlagen und Verträgen quasi "heute für morgen", bei dem bereits exakte Anlagenleistungen, Einkaufs- oder Verkaufsmengen bestimmt werden [3, 25].

### **Momentanoptimierung**

Die Momentanoptimierung hat, verglichen mit den anderen Planungshorizonten, relativ geringe Freiheitsgrade. Aus den überlagerten Ergebnissen steht der Anlageneinsatz bereits fest und auch die Leistungen einzelner Blöcke können im Zeitbereich bis zu einer Stunde nur in begrenztem Umfang verändert werden. Die wesentlichen Randbedingungen dieser Planungsstufe sind daher zum einen die aktualisierten Ganglinien für Lasten und gegebenenfalls für den Spotpreis am Energiemarkt sowie die möglichen Leistungsänderungsgeschwindigkeiten bzw. die damit verbundenen Kosten.

Wenn die Betriebsoptimierung von Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung um die Berücksichtigung des Regelenergiemarktes erweitert werden soll, wie dies bereits aus Abbildung 1.4 hervorgeht, dann muss die Modellierung des Planungsproblems ein Abwägen der konkurrierenden Chancen von Fahrplan- und Regelenergiemarkt gegeneinander

ermöglichen. Abbildung 1.7 zeigt die prinzipiellen Möglichkeiten, die dem Erzeugungssystembetreiber durch Fahrplan- und Regelenergiemarkt zur Verfügung stehen, um bei dem Betrieb seines Erzeugungssystems den größtmöglichen Deckungsbeitrag zu erzielen. Der Fahrplanenergiemarkt bietet dazu sowohl börsliche als auch bilaterale Handelsmöglichkeiten für Forwardkontrakte, Spot- und Intradayhandel, die in Analogie zu Produkten der klassischen Finanzmärkte gestaltet sind. Der Regelenergiemarkt bietet hingegen sehr spezielle Produkte, wie Primär- und Sekundärregelenergie sowie Minutenreserve, die zur Zeit nur in einem Ausschreibungsverfahren gehandelt werden. Ein börslicher Markt ist zwar in der Diskussion, zurzeit ist eine Realisierung aber noch nicht absehbar [1, 10, 36, 38, 39]. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit -aus Sicht des Erzeugungssystembetreibers- auch die Stundenreserve als ein Produkt für den Regelenergiemarkt angesehen, weil diese in ihren technischen Eigenschaften analog zu den vom Übertragungsnetzbetreiber ausgeschriebenen Regelenergien ist und mit dem Bilanzkreisverantwortlichen lediglich ein anderer Vertragspartner auftritt.



**Abbildung 1.7:** Fahrplan- und Regelenergiemarkt für den Erzeugungssystembetreiber

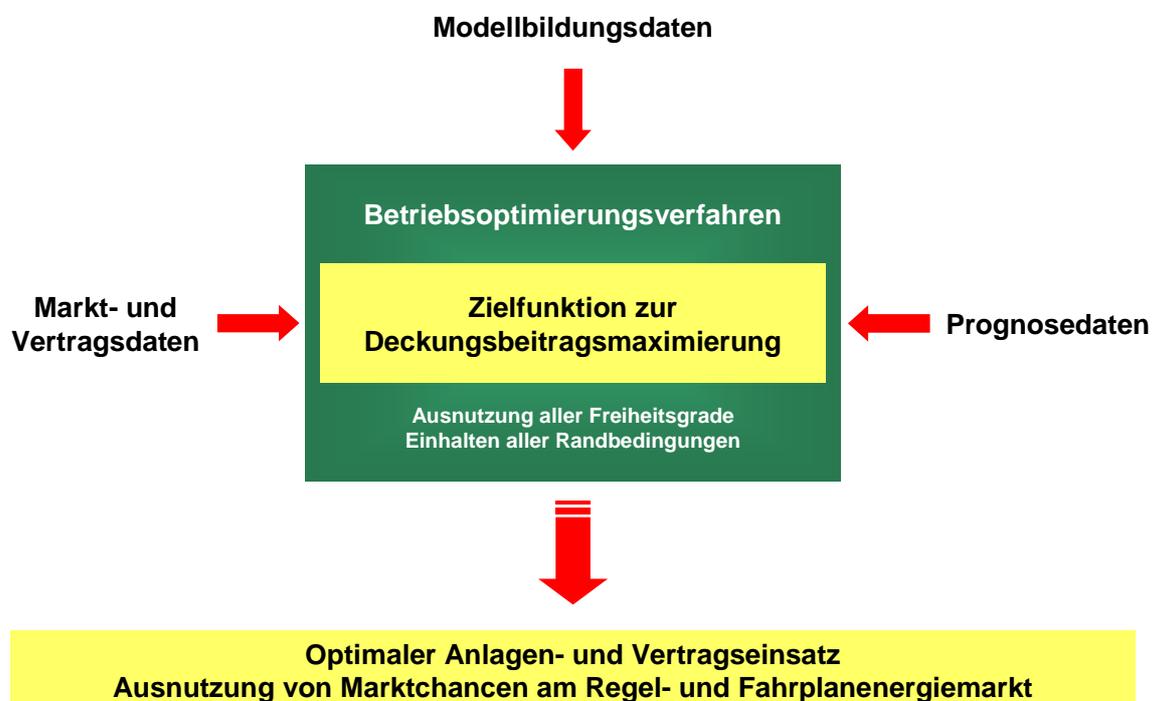
Der erweiterte Optimierungsspielraum durch den Regelenergiemarkt ist im Gegensatz zum Fahrplanenergiemarkt allerdings nicht ohne weiteres in die Betriebsoptimierung integrierbar.

Normalerweise resultieren in der Betriebsoptimierung Kosten und Erlöse aus der Lieferung einer Energie, deren Erzeugung einen Verbrauch von Brenn- und Betriebsstoffen

verursacht. Dabei können Brennstoffkosten und Erlöse für Energielieferungen ermittelt werden, weil in der Regel eine gute Prognose für die zu liefernde Energie vorliegt.

Die Auswirkungen einer Gebotsabgabe für Regelenergie auf den Deckungsbeitrag sind jedoch deutlich schwieriger zu bestimmen. Zum einen muss die Vorhaltung einer Regelenergie finanziell bewertet werden, die in der Hauptsache Kosten durch die Einschränkung des übrigen Anlagenbetriebs verursacht - also z.B. durch einen nicht mehr möglichen Verkauf von Energie am Spotmarkt wegen einer "reservierten" Erzeugungsanlage. Zum anderen verursacht auch die zu liefernde positive Regelenergie durch einen Mehreinsatz von Brennstoff dem Erzeugungssystembetreiber Kosten oder die aufzunehmende negative Regelenergie muss durch den Erzeugungssystembetreiber verwertet werden, wobei in beiden Fällen die tatsächlich zu liefernde oder aufzunehmende Regelenergie nicht in Form einer Prognose vorliegt. Darüber hinaus sind zusätzliche Restriktionen zu integrieren, die gewährleisten, dass ein abgegebenes Gebot auch technisch für den Erzeugungssystembetreiber erfüllbar ist.

Abschließend lässt sich mit Abbildung 1.8 schematisch zusammenfassen, welche Aufgabe bei der Betriebsoptimierung zu erfüllen ist.



**Abbildung 1.8:** Eingangsdaten und Aufgabe der Betriebsoptimierung

## 1.4 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Betriebsoptimierungsverfahrens für Betreiber von Energieerzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung, das unter Ausnutzung der Chancen von Regel- und Fahrplanenergiemarkt bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller relevanten vertraglichen, betrieblichen, technischen und umweltbedingten Randbedingungen eine Deckungsbeitragsmaximierung ermöglicht.

Die Aufgabe des Verfahrens ist es, optimale Einsatzfahrpläne für den Zeithorizont der kurzfristigen Betriebsoptimierung für verfügbare Anlagen und Verträge zur Deckung gegebener Verbraucherlasten zu ermitteln und dabei die konkurrierenden Marktchancen von Regel- und Fahrplanenergie unter Berücksichtigung der speziellen Eigenschaften und Restriktionen einer Bereitstellung von Regelenergie gleichermaßen zu nutzen. Der Erzeugungssystembetreiber erhält damit die Möglichkeit, potentielle Gebote für Regelenergie in seine Betriebsoptimierung zu integrieren und zu ermitteln, ob eine Gebotsabgabe wirtschaftlich ist. Der dafür zu maximierende Deckungsbeitrag setzt sich aus der Differenz von Erlösen aus Energielieferungen und Regelenergiebereitstellung sowie aus Kosten für Energiebezüge und weiteren Betriebskosten des Erzeugungssystems zusammen.

Das entwickelte Verfahren, das auf vorhandene Teillösungen aufbaut, dient zur Formulierung eines Gleichungssystems für die anschließende Verarbeitung durch ein Optimierungswerkzeug auf Basis der Gemischt-Ganzzahlig-Linearen-Programmierung (GGLP). Dazu werden gegebene Daten über das Erzeugungssystem, dessen Bezugsverträge, Energiemarktdaten und technische Randbedingungen zur mathematischen Formulierung aufbereitet und nach Abschluss der Optimierung die Ergebnisse dem Anwender über eine Schnittstelle bereitgestellt.

Auf Grundlage der beschriebenen Vorüberlegungen und den Erfahrungen aus dem praktischen Einsatz erfüllt das Verfahren folgende wesentliche Anforderungen:

### **Geschlossene Lösung der Planungsaufgabe**

Auf Grund der komplexen technischen, betrieblichen und vertraglichen Zusammenhänge, die in vielen Fällen auch zeitintegrale Kopplungen beinhalten, kann eine global optimale Lösung nur dann sicher gefunden werden, wenn die Planungsaufgabe geschlossen gelöst wird. Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren ermöglicht durch die Verwendung der

Gemischt-Ganzzahlig-Linearen-Programmierung eine geschlossene Problemformulierung, so dass immer die optimale Lösung oder zumindest eine suboptimale Lösung unter Angabe der Lösungsgüte ermittelt werden kann.

### **Universelle Problemformulierung**

Bei der Betriebsplanung von Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung ist eine große Bandbreite an verschiedenen Systemkomponenten in das mathematische Modell zu integrieren. Das entwickelte Verfahren bietet die Möglichkeit einer universellen Problemformulierung, die auf ein beliebiges Energieerzeugungssystem anwendbar ist, ohne Modifikationen am Optimierungswerkzeug selbst vornehmen zu müssen. Durch eine Systembeschreibung von hohem Abstraktionsgrad ist es möglich, ein Energieerzeugungssystem auf Basis seiner charakteristischen Eigenschaften über standardisierte Teilelemente in ein Optimierungsmodell zu überführen. Die entwickelten Modelle sind über den in dieser Arbeit behandelten kurzfristigen Betrachtungszeitraum hinaus, in allen im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Planungszeiträumen anwendbar. Damit ist eine Basis für die Praxis-tauglichkeit des Verfahrens und eine hohe Anpassungsfähigkeit an neue Aufgabenstellungen gewährleistet.

Über die bisherigen Arbeiten zur kurzfristigen Betriebsplanung hinaus werden in dieser Arbeit die folgenden Neuentwicklungen und Verbesserungen von Lösungsansätzen eingeführt mit dem Ziel der:

### **Integration der Regelenenergie in die Betriebsoptimierung von Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung.**

- Einführung einer finanziellen Bewertung von Lieferung und Vorhaltung von Regelenenergie zur geeigneten Berücksichtigung von Geboten für Regelenenergie in der Betriebsoptimierung des Erzeugungssystembetreibers mit dem Ziel einer Deckungsbeitragsmaximierung für das Gesamterzeugungssystem.
- Entwicklung von Modellen zur Abbildung von Geboten für Regelenenergie für alle Arten von positiver und negativer Regelenenergie für die kurzfristige Betriebsoptimierung.
- Berücksichtigung aller technischen, betrieblichen und vertraglichen Randbedingungen, die speziell durch die Systemdienstleistung Regelenenergie beeinflusst werden können.

- 
- Konzeption einer Modellbildung unter Berücksichtigung der Erfüllung von Geboten für Regelenergie durch Teilbeiträge verschiedener Anlagen oder Lieferverträge (Angebotspoolung) unter gleichzeitiger Einhaltung vertraglich vorgegebener Bereitstellungszeiten.
  - Entwurf von Modellen für spezielle Anlagen zur Bereitstellung von Regelenergie, u.a. für Speicher, Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung und dargebotsabhängigen Erzeugungsanlagen wie z.B. Windkraftanlagen.
  - Entwurf eines Monte-Carlo basierten Verfahrens zur Ermittlung von Regelleistungsganglinien unter Zuhilfenahme charakteristischer Daten über das stochastische Verhalten der Regelenergieanforderung.

## 2 Analyse der Betriebsoptimierungsaufgabe

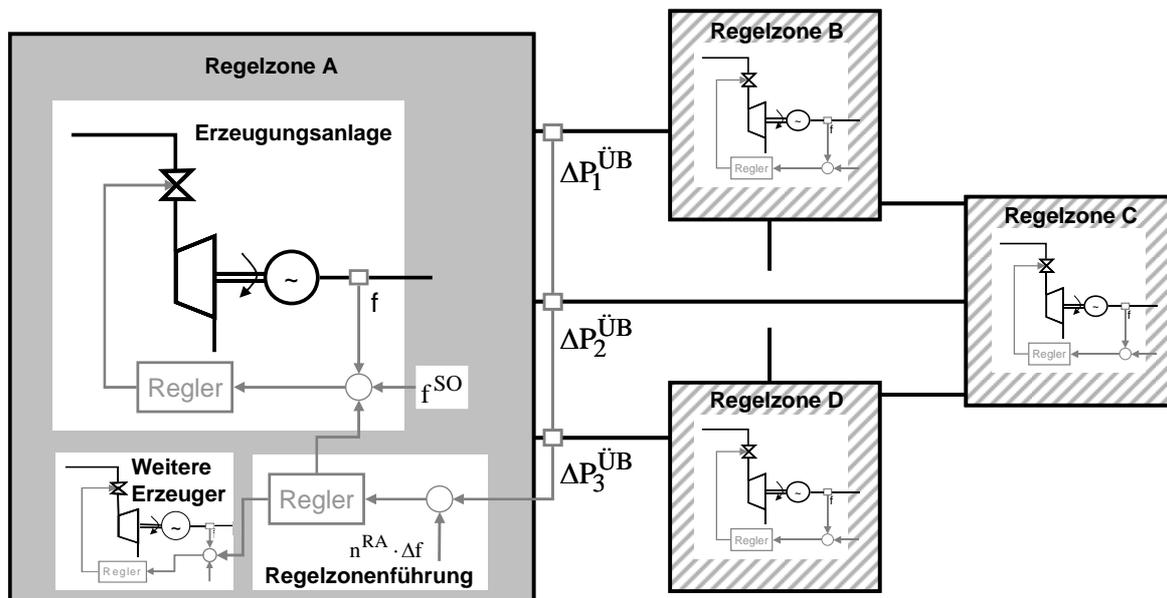
### 2.1 Einsatz von Regelenergie

Der Einsatz von Regelenergie ist für einen zuverlässigen Betrieb des elektrischen Netzes unbedingt erforderlich, weil es prinzipiell nicht möglich ist, eine Abweichung von den prognostizierten und in den Fahrplänen vorgesehenen Leistungen bei Erzeugern und Verbrauchern auszuschließen. Eine Reihe von Ursachen können für die Störung der Leistungsbilanz aus Erzeugung und Verbrauch verantwortlich sein, angefangen von einem Mehr- oder Minderverbrauch der Kunden über eine veränderte Einspeisung von dargebotsabhängigen Erzeugern bis hin zum Erzeugungsanlagenausfall. Ein Erzeugungsdefizit führt zur Absenkung, ein Erzeugungsüberschuss zur Anhebung der Frequenz, weil jeweils die fehlenden oder überschüssigen Leistungen aus den rotierenden Massen des Erzeugungssystems, z.B. Generatoren und Turbinen ausgeglichen werden. Auf jede Abweichung muss innerhalb von kürzester Zeit reagiert werden, um dafür zu sorgen, dass die Netzfrequenz nicht zu stark vom Sollwert 50 Hz abweicht was zu einer Gefährdung der zuverlässigen Versorgung führen würde.

Durch dieses Systemverhalten ist die Netzfrequenz zugleich auch die prädestinierte Regelgröße zur Aufrechterhaltung einer ausgeglichenen Leistungsbilanz, weil diese im gesamten synchronen Netzverbund nahezu zeitgleich verfügbar ist. Durch die UCTE wird im "Operation Handbook" festgelegt, auf welche Weise der Einsatz von Regelenergie technisch abläuft. Unter dem Begriff Regelenergie werden dabei die Primärregelung, die Sekundärregelung und die Minutenreserve zusammengefasst, wobei nur Primär- und Sekundärregelung tatsächliche Regelvorgänge in Abhängigkeit von Frequenz und Übergabeleistungen zwischen den Regelzonen sind. Die Minutenreserve wird zur Ablösung der Sekundärregelung manuell aktiviert. Jede Regelenergie wird zusätzlich noch unterteilt in positive Regelenergie zum Ausgleich eines Erzeugungsdefizites und in negative Regelenergie zum Ausgleich eines Erzeugungsüberschusses.

Abbildung 2.1 zeigt schematisch, wie die Bereitstellung von Regelenergie durch die Definition einzelner Regelzonen organisiert ist. Dargestellt ist der Zusammenschluss mehrerer Regelzonen zu einem Synchronverbund, die über Kuppelleitungen Leistungen austauschen. Es sind die Erzeugungsanlagen zu erkennen, die sich über den zugehörigen Regler

an der Primärregelung teilnehmen und der zu jeder Regelzonenführung gehörende Sekundärregler, der als Eingangsgrößen die Abweichungen der Übergabeleistungen  $\Delta P_i^{\text{ÜB}}$  auf den Kuppelleitungen und die Abweichung von der Sollfrequenz verarbeitet. Die weiteren dargestellten Regelzonen sind analog zur Regelzone A aufgebaut.

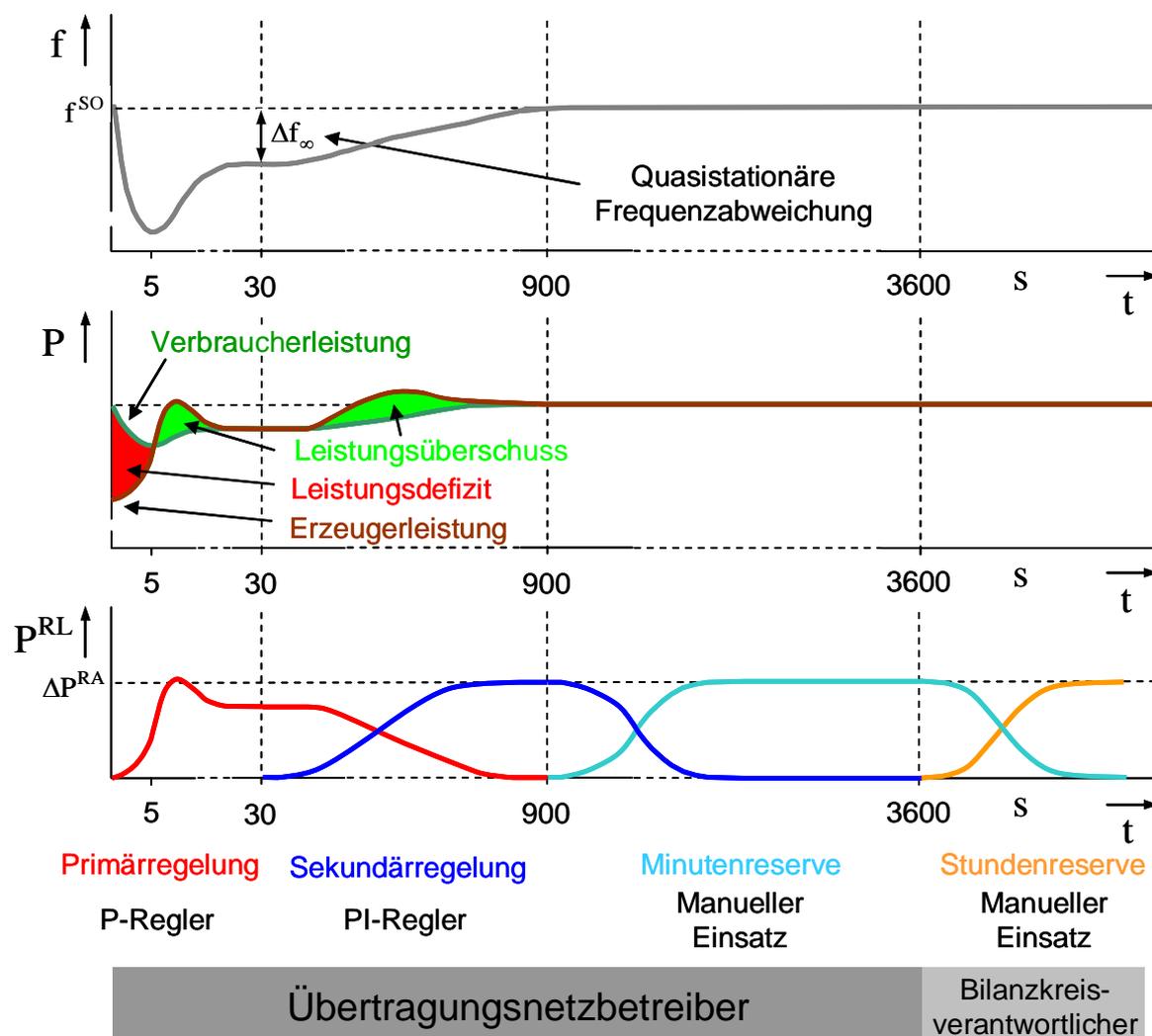


**Abbildung 2.1:** Schema der Regelung im UCTE-Synchronverbund

Auf Basis dieses Schemas laufen die Regelvorgänge der Primär- und Sekundärregelung ab, wie dies in Abbildung 2.2 am Beispiel eines Ausfalls einer Erzeugungsanlage in Regelzone A gezeigt ist.

Zum unmittelbaren Eingriff nach einer Störung der Leistungsbilanz setzt die Primärregelung ein, um die Netzfrequenz durch eine Erhöhung der eingespeisten Leistung zu stabilisieren. Bis zu dem Zeitpunkt, an dem Verbraucher- und Erzeugerleistung kurzfristig wieder ausgeglichen sind, in Abbildung 2.2 ca. 5 s nach dem Anlagenausfall, wird das Leistungsdefizit durch Energie aus den rotierenden Massen des Systems abgedeckt, so dass die Netzfrequenz absinkt. Die Reduzierung der Netzfrequenz bewirkt zeitgleich eine kleine Verringerung der Verbraucherleistung im Rahmen des Selbstregeleffektes von ca. 1 %/Hz Frequenzabweichung. Die Primärregelung erfolgt proportional zur Frequenzabweichung vom Sollwert, wie dies in Abbildung 2.3 gezeigt ist, so dass die Netzfrequenz nach einem kurzfristigen Erzeugungsüberschuss, der zur erneuten Beschleunigung der rotierenden Massen benötigt wird, den Sollwert vermindert um eine stationäre Frequenzabweichung

anstrebt. Dieser Vorgang soll innerhalb von höchstens 30 s abgeschlossen sein. Zur Primärregelung tragen im gesamten Verbundsystem alle Erzeugungsanlagen gemeinsam bei, die zur Bereitstellung von Primärregelenergie vorgesehen sind.



**Abbildung 2.2:** Ablauf des Einsatzes von Regelleistung

Damit wird jede auftretende Störung in der Leistungsbilanz durch eine Vielzahl von Anlagen abgedeckt und die Zuverlässigkeit des Netzbetriebes auch im Fall einer sehr großen Störung gewährleistet. Für das UCTE-Verbundsystem ist als Referenzfall eine Störung des Leistungsgleichgewichts von 3000 MW vorgesehen, die alleine durch die Primärregelung abgedeckt werden soll, ohne dass zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. eine Lastabtrennung eingeleitet werden müssen. Gleichzeitig soll die dabei auftretende quasistationäre Frequenzabweichung nicht mehr als 180 mHz betragen.

Die Rückführung der Frequenz und der veränderten Übergabeleistungen auf ihre Sollwerte beginnt mit der sukzessiven Ablösung der Primärregelung durch die Sekundärregelung spätestens 30 s nach Auftreten der Leistungsbilanzstörung. Dazu wird zunächst aus den veränderten Übergabeleistungen der Beitrag der Regelzonen B, C und D zur Primärregelleistung ermittelt, der von der Sekundärregelung der Regelzone A aufgebracht werden muss. Zusätzlich muss aber auch die in der Regelzone A erbrachte Primärregelleistung durch die Sekundärregelung ersetzt werden. Diese kann, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, bestimmt werden, wenn die Leistungszahl des Netzreglers gleich der Netzleistungszahl gewählt wird. Die vom Netzregler der Regelzone A eingestellte Gesamtregelabweichung ergibt sich dann zu:

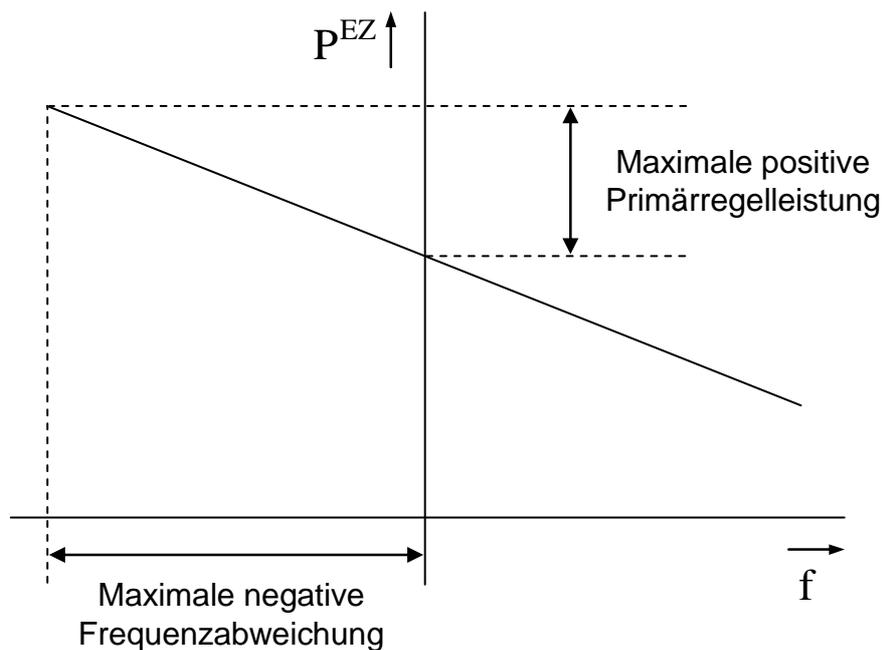
$$G^{RA} = \sum_{i=1}^3 \Delta P_i^{\text{ÜB}} + n^{RA} \cdot \Delta f \quad (2.1)$$

Für die zu erbringende Sekundärregelleistung ergibt sich mit einem Proportionalanteil  $\beta^{RA}$  des Netzreglers damit:

$$P^{SRA} = -\beta^{RA} \cdot \int_{t=0}^{\hat{T}} G^{RA} \cdot dt \quad (2.2)$$

Spätestens 900 s nach Eintreten der Leistungsbilanzstörung soll die Sekundärregelung die Wiederherstellung der Sollfrequenz gewährleisten. Gleichzeitig wird dafür gesorgt, dass die für die Sekundärregelung der Regelzone A zur Verfügung stehenden Anlagen das gesamte Leistungsdefizit alleine ausgleichen. Dabei kann Sekundärregelenergie über den Regelenergiemarkt prinzipiell auch aus anderen Regelzonen bereitgestellt werden, wenn die Übergabeleistungen dafür entsprechend modifiziert werden.

Mit der Wiederherstellung von Sollfrequenz und Sollübergabeleistungen ist der Regelvorgang abgeschlossen und die Erzeugungsanlagen zur Bereitstellung von Primärregelenergie stehen für den Ausgleich der nächsten Leistungsbilanzstörung zur Verfügung. Die Erzeugungsanlagen zur Bereitstellung von Sekundärregelenergie werden nach Ablauf des Regelvorgangs durch die manuelle Bereitstellung der Minutenreserve für bis zu eine Stunde für weitere Regelvorgänge freigegeben. Dies ist immer dann erforderlich, wenn die Ursache der Leistungsbilanzstörung voraussichtlich deutlich über die ersten 900 s hinaus fortbestehen wird.



**Abbildung 2.3:** Änderung der Erzeugerleistung durch die Primärregelung

Abbildung 2.2 zeigt zusätzlich, wie die Zuständigkeiten für den Ausgleich einer Leistungsbilanzstörung verteilt sind. Für den Einsatz und die Organisation von positiver und negativer Regelleistung ist der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) verantwortlich. Der Übertragungsnetzbetreiber beschafft diese am Regelleistungsmarkt. Nach Ablauf von einer Stunde geht die Verantwortung für die Leistungsbilanzstörung auf den Bilanzkreisverantwortlichen (BKV) über, in dessen Zuständigkeitsbereich die Leistungsbilanzstörung ihre Ursache hat. Der Bilanzkreisverantwortliche hat die Aufgabe, für eine Gruppe von Erzeugern und Verbrauchern eine ausgeglichene Leistungsbilanz aufzustellen und diese beim Übertragungsnetzbetreiber anzumelden. Damit ist der Bilanzkreisverantwortliche auch gleichzeitig der Ansprechpartner für den Übertragungsnetzbetreiber, falls diese Bilanz nicht eingehalten wird.

Der Bilanzkreisverantwortliche muss für die Beschaffung einer entsprechenden Stundenreserveleistung sorgen, in dem er z.B. bilaterale Verträge zur Bereitstellung von Stundenreserve abschließt oder Erzeugerleistung über den Intradayhandel einkauft. Die Stundenreserve ist in Abbildung 2.2 als Nachfolge für die Minutenreserve eingetragen und zählt auf Grund des Zuständigkeitswechsels per Definition nicht zur Regelleistung.

Die im Rahmen der Regelleistung durch den Übertragungsnetzbetreiber bereitgestellten oder bezogenen Energien für Sekundärregelung und Minutenreserve werden dem Bilanz-

kreisverantwortlichen dann im Rahmen der so genannten Ausgleichsenergie über ein vierstündlich ermitteltes Bilanzsaldo in Rechnung gestellt, während die Kosten für die Vorhaltung von Regelenergie den Netznutzungsentgelten zugeschlagen werden [12].

## 2.2 Stochastische Charakteristika der Regelenergie

Der im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Einsatz der Regelenergie erfolgt immer auf Grund einer Störung der Leistungsbilanz im Verbundsystem. Die Ursachen dafür können sehr vielfältig sein und lassen sich prinzipiell nicht vermeiden. Einige mögliche Gründe für eine Abweichung in der Leistungsbilanz können sein:

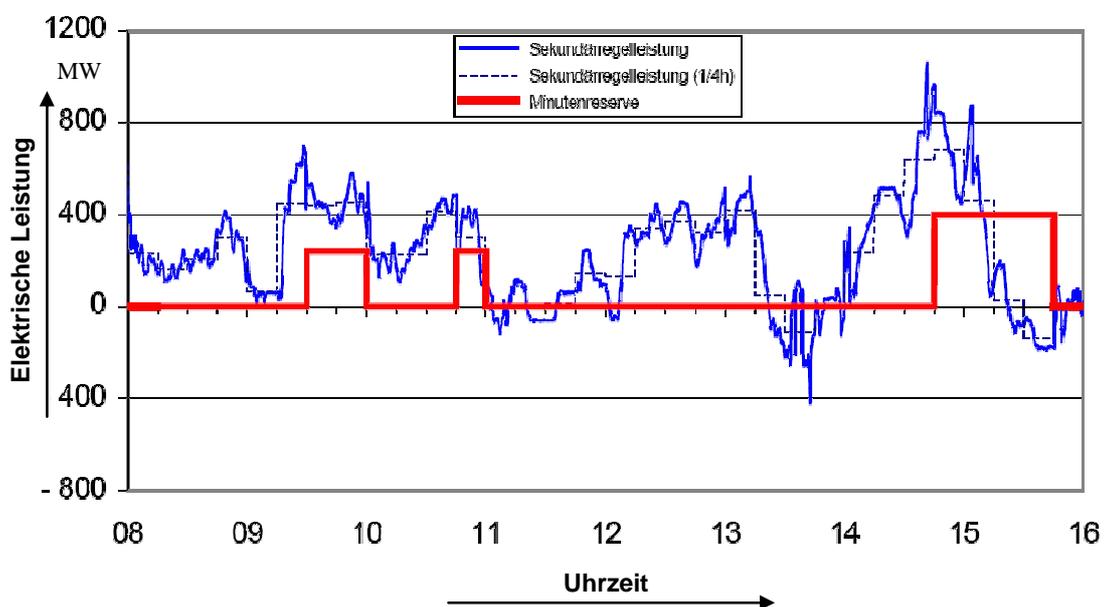
- Spontane Abweichungen von der Prognose, z.B. durch spontane Wetteränderungen
- Fehler in der Prognose der Lastganglinien
- Fehler in der Prognose der dargebotsabhängigen Erzeugung
- Technische Störungen im Übertragungs- oder Verteilnetz
- Ausfall von Erzeugungsanlagen

Das Auftreten der Regelleistungsanforderung bekommt dadurch einen stochastischen Charakter, der für die Betriebsplanung des Erzeugungsanlagenbetreibers wichtig wird, sobald er sich mit seinen Erzeugungsanlagen am Regelenergiemarkt beteiligen möchte [48].

Abbildung 2.4 zeigt exemplarisch das Zusammenspiel von Sekundärregelleistung und Minutenreserve für die RWE-Regelzone für einen 8-Stunden-Zeitraum. Deutlich zu erkennen ist, dass der Einsatz der Minutenreserve immer nur dann erfolgt, wenn die Sekundärregelleistung bereits länger als 900 s zum Einsatz gekommen ist. Der Einsatzzeitpunkt und die Höhe der jeweils benötigten positiven oder negativen Regelleistung sind aber offensichtlich nicht vorauszusagen.

In [35] ist anhand eines Testsystems mit 10 GW elektrischer Leistung untersucht worden, inwieweit die maximal und minimal benötigte Regelleistung und Regelenergie für eine Regelzone bestimmbar sind. Es zeigt sich, dass die benötigte Regelleistung über eine Normalverteilungsfunktion beschreibbar ist und sich daraus Grenzen für die Vorhaltung von positiver und negativer Regelleistung ableiten lassen. Für die zu erbringende Regelenergie

lässt sich das vergangene Betriebsgeschehen auswerten und zumindest ein durchschnittlicher Wert für Sekundärregelenergie und Minutenreserveenergie angeben. Aus Abbildung 2.4 kann zusätzlich interpretiert werden, dass aus den historischen Daten noch eine Häufigkeit abgeleitet werden kann, mit der positive und negative Regelenergie abgerufen werden. Darüber hinaus lässt sich der Einsatz der Regelenergie auch über die durchschnittliche Dauer eines Regelleistungseinsatzes beschreiben. Genauere Aussagen lassen sich auf Grund des stochastischen Verhaltens des Einsatzes von Regelenergie allerdings nicht treffen.



**Abbildung 2.4:** Beispiel für benötigte Sekundärregelleistung und Minutenreserve [23]

Für die Integration der Regelenergie in die Betriebsoptimierung fehlen damit wichtige Parameter für die Problemformulierung, die in einer Betriebsoptimierung normalerweise durch die Auswertung von Prognoseganglinien für Verbraucherlasten, Temperaturen oder Marktpreise zur Verfügung stehen. Es stellt sich demnach die Frage, wie das stochastische Verhalten von Regelenergie geeignet in die Betriebsoptimierung integriert werden kann. Für die Beschreibung des Regelenergieeinsatzes kann dazu lediglich die Verfügbarkeit von Verteilungsfunktionen für die folgenden charakteristischen Daten angenommen werden, die sich aus historischen Daten für positive und negative Regelenergie gewinnen lassen:

- Benötigte Regelleistung
- Benötigte Regelenergie
- Häufigkeit des Regelenergieeinsatzes
- Dauer des Regelenergieeinsatzes

## 2.3 Markt für Regelenergie

Für die Konzeption eines Betriebsoptimierungswerkzeugs, das die Erstellung von Geboten für den Regelenergiemarkt und die Untersuchung der Auswirkungen der Regelenergiebereitstellung auf das Erzeugungssystem ermöglichen soll, müssen neben den beschriebenen technischen und stochastischen Eigenschaften der Regelenergie auch die vorgegebenen Randbedingungen des Regelenergiemarktes analysiert werden.

Das UCTE "Operation Handbook" legt bereits fest, welche Arten von Regelenergie bereitgestellt werden müssen und welche technischen Regelungen für das gesamte Verbundnetz für die Regelenergie gelten. Die Organisation der Beschaffung von Regelenergie kann jedoch in den verschiedenen Ländern des Synchronverbundes unterschiedlich geregelt sein, was z.B. in [21] im Detail untersucht wird. Durch die gemeinsamen Regularien sind die prinzipiellen Unterschiede in der Organisation des Regelenergiemarktes allerdings so gering, dass es ausreicht, wenn auf die Regelungen für die deutschen Regelzonen näher eingegangen wird.

Hierfür legt das Energiewirtschaftsgesetz, ergänzt um die Vorschriften der Stromnetzzugangsverordnung, die Grundlage für die im Folgenden analysierten, wesentlichen organisatorischen Eckpfeiler für die Regelenergie und deren Beschaffung, die für die Betriebsoptimierung Relevanz besitzen [17, 18]:

- Es erfolgt, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, eine Unterteilung in Übertragungsnetzbetreiber und Bilanzkreisverantwortliche, die bei der Deckung von Bilanzabweichungen, z.B. durch einen Anlagenausfall, jeweils unter bestimmten Voraussetzungen einen Ausgleich der Leistungsbilanz herstellen müssen, so dass neben der Regelenergie auch eine Stundenreserve beschafft werden muss.

- Die Übertragungsnetzbetreiber sind verpflichtet, die Regelenergie in einer gemeinsamen regelzonenübergreifenden und anonymisierten Ausschreibung über eine Internetplattform zu beschaffen. Eine regelzonenbezogene Ausschreibung ist nur möglich, wenn dies technisch notwendig ist.
- Es werden drei Arten von Regelenergie ausgeschrieben, wobei die Sekundärregelenergie und die Minutenreserve getrennt nach positiver und negativer Regelleistung vergeben werden. Bei der Primärregelenergie wird positive und negative Regelleistung immer gemeinsam ausgeschrieben.
- Die Vorgabe einer Mindestgebotsleistung ist durch den Übertragungsnetzbetreiber möglich. Dies ist aus organisatorischen Gründen sinnvoll, kleineren Anbietern wird der Zugang zum Regelenergiemarkt damit allerdings erschwert. Als Ausgleich ist es jedoch möglich, dass sich Anbietergemeinschaften bilden können.
- Potentielle Anbieter von Regelenergieprodukten müssen sich einem Präqualifikationsverfahren unterziehen, mit dem sichergestellt werden soll, dass der Anbieter auch die Voraussetzungen zur Unterstützung der Versorgungssicherheit hat. Festgelegt sind diese Präqualifikationsbedingungen in [61], den gemeinsamen Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Für die hier untersuchte Betriebsoptimierung spielen die folgenden Regeln daraus eine wichtige Rolle, weil damit die Randbedingungen für ein Gebot zur Bereitstellung von Regelenergie definiert werden.

### **Betriebsoptimierungsrelevante Randbedingungen durch die Präqualifikation:**

#### **Primärregelenergie**

- Der Regelbereich einer technischen Einheit muss mindestens 2 % der Nennleistung und mindestens 2 MW betragen.
- Die Primärregelleistung muss innerhalb von 30 s gleichmäßig aktiviert und für mindestens jeweils 15 min abgegeben werden können.
- Die angebotene Primärregelenergie muss über den gesamten Gebotszeitraum, d.h. mit einer Zeitverfügbarkeit von 100 %, abrufbar sein

### **Sekundärregelenergie**

- Der Anbieter muss sicherstellen, dass die gesamte angebotene Sekundärregelleistung innerhalb von 5 min zur Verfügung steht.
- Ein Gebot von Sekundärregelenergie muss mindestens 30 MW positiv und negativ durch eine oder mehrere Erzeugungsanlagen im Verbund umfassen.
- Zur Bereitstellung von Sekundärregelenergie ist ein Leistungsgradient von mindestens 2 % der Nennleistung pro Minute bei konventionellen Anlagen und bei hydraulischen technischen Einheiten von 2 % pro Sekunde zu gewährleisten.
- Erzeugungsanlagen zur Bereitstellung von Sekundärregelenergie müssen, abgesehen von schnellstartbaren hydraulischen Anlagen, während des gesamten Gebotszeitraums betrieben werden.
- Die Teilnahme an einer der anderen Regelenergiearten oder dem Lastfolgebetrieb darf die Verfügbarkeit der angebotenen Regelenergie nicht beeinträchtigen.
- Bei der Arbeitsverfügbarkeit wird unterschieden in Pumpspeicher, hydraulische Jahresspeicher und übrige technischen Einheiten. Bei letzteren gilt die Forderung nach einer Arbeitsverfügbarkeit von 100 %. Bei den hydraulischen Speichern können auf Grund ihrer physikalisch und dargebotsabhängig begrenzten Energiemengen Lockerungen dieser Regelung vereinbart werden.
- Die technischen Einheiten zur Bereithaltung der Sekundärregelleistung müssen eine Zeitverfügbarkeit von mindestens 95 % aufweisen.

### **Minutenreserve**

- Die Nutzung abschaltbarer Verbraucher zur Erbringung der Minutenreserve ist möglich.
- Arbeitsverfügbarkeit und Zeitverfügbarkeit müssen jeweils zu 100 % der Angebotszeit gegeben sein.
- Die Stundenreserve gehört nicht zur Regelenergie und ist damit auch nicht Teil eines Präqualifikationsverfahrens, zumal nicht der Übertragungsnetzbetreiber, sondern der

Bilanzkreisverantwortliche die Beschaffung durchführt. Es gibt demzufolge auch keine Mindestanforderungen, die ein Anbieter dieser Reserveleistung generell einhalten muss.

Aus den vorgenannten Randbedingungen lassen sich für die Betriebsoptimierung die wesentlichen Punkte definieren, die in die Modellbildung zur Integration der Regelennergie einfließen müssen:

- Getrennte Modellierung von positiver und negativer Regelennergie
- Einhaltung der Mindestanforderungen an die Leistungsänderungsgeschwindigkeit einer Erzeugungsanlage zur Bereitstellung von Regelennergie
- Abbildung möglicher Anbieterkooperationen zur Erbringung von Regelennergie als "virtuelles Regelkraftwerk" [56]
- Berücksichtigung der Kopplung von Regelennergiebereitstellung und Lastfolgebetrieb
- Berücksichtigung der Einhaltung der Arbeits- und Zeitverfügbarkeit
- Modellierung abschaltbarer Verbraucher zur Bereitstellung von Regelennergie

Darüber hinaus spielt die Art der Gebotsabgabe eine wichtige Rolle für die Integration in die Betriebsoptimierung. In der Stromnetzzugangsverordnung wird geregelt, dass als Vergütung für ein Gebot, das vom Übertragungsnetzbetreiber eingesetzt wird, der im Gebot geforderte Preis anzusetzen ist. Damit steht für die Betriebsoptimierung bereits ein Preis zur Verfügung mit dem die Auswirkungen der Gebotsabgabe auf den Deckungsbeitrag des Gesamtsystems ermittelt werden können. Bei der Art der Vergütung wird, wie in Tabelle 2.1 gezeigt, für die verschiedenen Regelennergien unterschieden.

	Leistungspreis	Arbeitspreis
<b>Primärregelennergie</b>	X	
<b>Sekundärregelennergie</b>	X	X
<b>Minutenreserve</b>	X	X

**Tabelle 2.1:** Vergütung für die Bereitstellung von Regelennergie

Für die Erstellung eines Gebotes ist zusätzlich wichtig, zu welchem Zeitpunkt die Regelenergie angeboten werden kann und für welchen Zeitraum ein Angebot abgegeben wird. Zurzeit wird für die Primär- und Sekundärregelenergie eine Ausschreibung für 6 Monate durchgeführt. Während dieses Zeitraums verpflichtet sich der Anbieter, die gebotene Regelleistung ununterbrochen vorzuhalten und gegebenenfalls zu liefern. Für die Minutenreserve erfolgt die Ausschreibung für den Zeitraum "heute für morgen" wobei auch hier eine ununterbrochene Vorhaltung von Regelleistung anzubieten ist.

Diese Vorgehensweise bei der Wahl der Ausschreibungszeiträume wird zurzeit von verschiedenen Seiten in Frage gestellt, weil die lange Bindungsfrist des Gebotes Nachteile für den Bieter zur Folge hat. Dieser ist in seiner Planung stark eingeschränkt, kann über einen langen Zeitraum eventuell bessere Marktchancen nicht nutzen und hat gleichzeitig dafür zu sorgen, dass seine Erzeugungsanlage zur Bereitstellung der Regelenergie in der Regel während des gesamten Zeitraums in Betrieb zu sein hat, d.h. eine Grundaustauslastung der Anlage gewährleistet sein muss. Vor allem Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die auf Grund der jahreszeitlichen Schwankungen des Wärme-Absatzes grundlegende Änderungen ihres Anlagenbetriebes innerhalb eines Jahrs durchfahren, haben deswegen zur Zeit nur geringe Chancen, sich an der Regelenergie zu beteiligen.

Tendenziell ist deshalb zu erwarten, dass die Ausschreibungszeiträume deutlich kürzer werden und gleichzeitig auch Gebote für verschiedene Zeitscheiben innerhalb eines Tages abgegeben werden können, um den Markt für Regelenergie für potentielle Bieter attraktiver zu machen.

Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch die Gebotsstruktur, die für die Konzeption des Betriebsoptimierungswerkzeugs zu Grunde gelegt wird. Es wird davon ausgegangen, dass für den folgenden Tag bis hin zu einer Woche ein Gebot für Regelenergie abgegeben werden kann, bei dem beliebig wählbare Teilzeiträume mit einer definierten Regelleistung angegeben werden können.

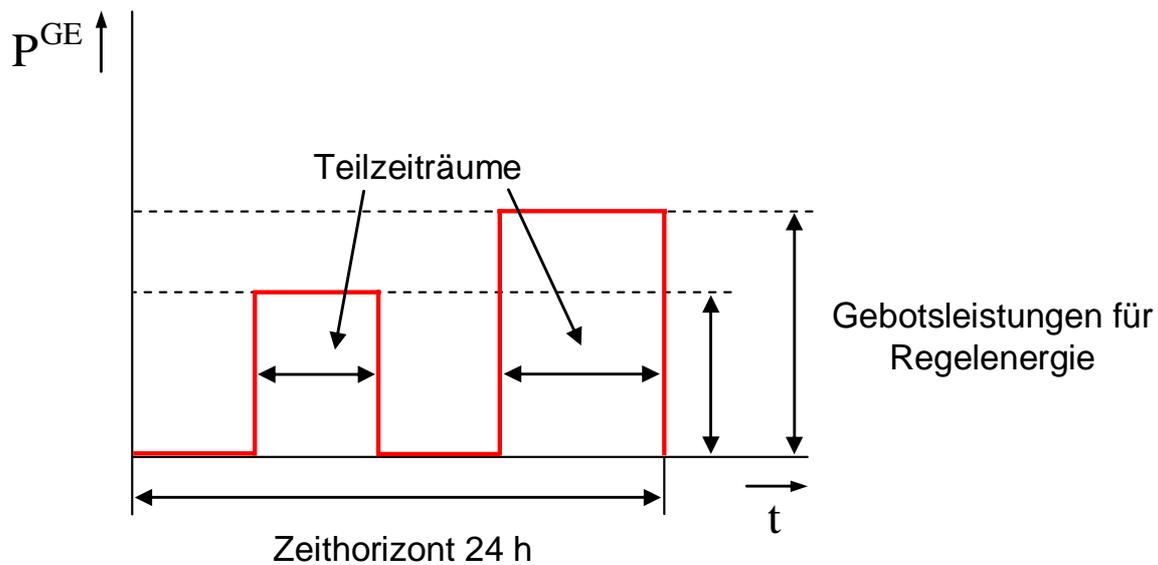


Abbildung 2.5: Allgemeines Gebot für die Erbringung von Regelenergie

## 2.4 Betriebsoptimierung unter Berücksichtigung von Regelenergie

### 2.4.1 Definition der Betriebsoptimierung

Aus der in Kapitel 1.3 vorgestellten Planungsaufgabe geht hervor, dass bei der Berücksichtigung von Regelenergie in der Betriebsoptimierung grundsätzlich die Frage beantwortet werden muss, ob die Beteiligung am Regelenergiemarkt durch eine Gebotsabgabe zu einem höheren Deckungsbeitrag führt, als der Betrieb des Erzeugungssystems ohne Bereitstellung von Regelenergie.

Zur Lösung dieser Aufgabe muss analysiert werden, welche Art von Ergebnissen der Erzeugungsanlagenbetreiber für seine Entscheidung pro oder contra Gebotsabgabe am Regelenergiemarkt benötigt. Dies wird aus den in Kapitel 2.3 genannten Anforderungen an den Bieter deutlich. Zum einen darf demnach ein Lastfolgebetrieb keine negativen Auswirkungen auf die Lieferung von Regelleistung haben, zum anderen ist zu gewährleisten, dass die an der Regelenergiebereitstellung beteiligten Erzeugungsanlagen zumindest für Primär- und Sekundärregelenergie während des Gebotszeitraums in Betrieb sind und die geforderte Regelleistung in der vorgegebenen Zeitspanne aufbringen können. Diese Ergebnisse werden in geeigneter Form nur im Rahmen einer kurzfristigen Planungsrechnung

ermittelt, die unmittelbar die optimale Betriebsweise der Anlagen bestimmen kann. Im Gegensatz zu längerfristigen Betrachtungshorizonten stehen nur für den Zeitraum bis zu einer Woche ausreichend genaue Prognosedaten für Ganglinien, Marktpreise, Wetter u.a. zur Verfügung, mit denen Anlageneinsatz, Bezugsvertragseinsatz und das agieren an den Energiemärkten detailliert bestimmt werden können. Der Betriebsplaner kann aus der kurzfristigen Betriebsoptimierung Ergebnisse erhalten, aus denen exemplarisch hervorgeht, mit welcher Regelleistung sich einzelne Erzeugungsanlagen an der Bereitstellung beteiligen würden und welche Auswirkungen diese Bereitstellung auf den übrigen Betrieb hätte. Der mittelfristige und langfristige Betrachtungshorizont behält, wie in Kapitel 1.3 erläutert, für den Betriebsplaner gleichzeitig die wichtige Aufgabe, Energiemengen, Revisionen und weitere langfristige Restriktionen in eine Planungsrechnung zu integrieren und darauf aufbauend Randbedingungen für die nachfolgenden kurzfristigen Betriebsoptimierungen zu ermitteln. Im Zuge verschiedener Optimierungsszenarien kann auch in der mittel- und langfristigen Betriebsoptimierung auf die Planung von vorzuhaltenden Regelenergiemengen oder freizuhaltenden Erzeugungskapazitäten eingegangen werden, um zu ermitteln, ob eine geänderte Bezugsvertragsgestaltung oder ein geänderter Anlagenbetrieb zu Gunsten einer Beteiligung am Regelenergiemarkt wirtschaftlich ist. Eine detaillierte Berücksichtigung der Regelenergie bis auf die Ebene des Anlageneinsatzes ist auf Grund der Prognoseungenauigkeiten für diesen langen Zeitraum allerdings nicht sinnvoll.

Damit stellen sich insbesondere für die Modellbildung der kurzfristigen Betriebsoptimierung auf Basis des in Kapitel 2.2 beschriebenen stochastischen Verhaltens von Regelenergie zwei wesentliche zu lösende Aufgaben:

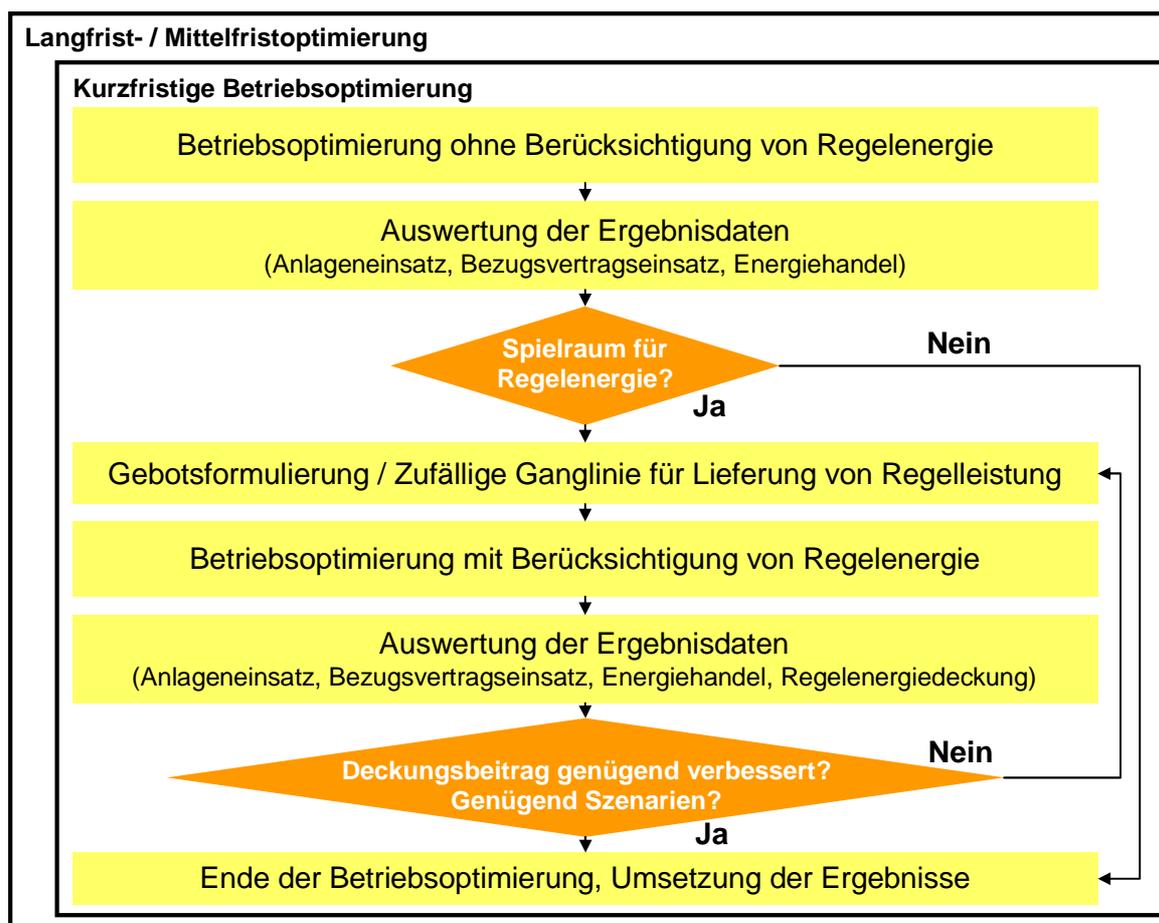
- Integration der dem Betreiber durch das Vorhalten von Regelenergie unvermeidbar entstehenden Kosten in die Deckungsbeitragsmaximierung.
- Berücksichtigung der Auswirkungen von Vorhaltung und Lieferung von Regelenergie auf den wirtschaftlichen Einsatz von Energiebezugsverträgen und auf die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems?

Um diese Fragestellungen zu beantworten, ist zuerst zu klären, auf Basis welcher Eingangsdaten die Gebotserstellung für Regelenergie in die Planungsrechnung eingehen kann. Für die Zeiträume, die Art der Regelenergie und die bereitgestellte Regelleistung können Annahmen getroffen werden, die sich an den aktuellen Marktpreisen für Regelenergie und dem aktuellen Anlageneinsatz orientieren. Dabei ist es für eine Gebotserstellung sinnvoll,

zunächst eine Planungsrechnung ohne die Berücksichtigung von Regelenergie durchzuführen und anhand der Lösung ein mögliches Gebot für die Bereitstellung von Regelenergie unter Berücksichtigung des ermittelten Anlagen- und Bezugsvertragsesinsatzes und der freien Kapazitäten zusammenzustellen. Darüber hinaus zeigt die Lösung dieser ersten Rechnung, wie der Betrieb des Erzeugungssystems ablaufen soll und wie hoch der Deckungsbeitrag ist, wenn der Übertragungsnetzbetreiber das Gebot nicht annimmt. Danach muss für die Abbildung der Auswirkungen eines Gebots bzw. einer Lieferung von Regelenergie auf die Betriebsoptimierung das stochastische Auftreten eines Abrufs von Regelenergie, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, in die Planungsrechnung einfließen und entschieden werden, ob ein Zuwachs des Deckungsbeitrags durch die Gebotsabgabe erzielt werden kann.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die stochastische Lieferung von Regelenergie als Folge einer Gebotsabgabe zu beschreiben. Eine Möglichkeit ist die Abbildung des Regelenergieeinsatzes im Rahmen eines Szenarienbaumes, der den Einsatz von Regelleistung entsprechend der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens beschreibt. Das betrachtete Planungsproblem wird allerdings durch eine Reihe von zeitintegralen und systemweit koppelnden Nebenbedingungen beschrieben, so dass selbst eine kleine Auswahl von Szenarien zu einer Problemgröße führt, die mit heutigen Computersystemen nicht mehr handhabbar ist [5, 6, 7]. Die in dieser Arbeit gewählte Möglichkeit zur Beschreibung einer Lieferung von Regelenergie ist die Bestimmung einer zufälligen Regelleistungsganglinie, die unter zu Hilfenahme der in Kapitel 2.2 beschriebenen charakteristischen Daten gewonnen wird. Wird die Betriebsoptimierung dann mehrmals mit verschiedenen, zufällig generierten Regelleistungsganglinien wiederholt, kann eine Aussage getroffen werden, ob es sinnvoll ist, das potentielle Gebot am Regelenergiemarkt abzugeben. Abbildung 2.6 beschreibt zusammenfassend den sich daraus ergebenden Ablauf der Betriebsoptimierung.

Ausgehend von den Ergebnissen langfristiger und mittelfristiger Planungsrechnungen können langfristige Restriktionen in die kurzfristige Betriebsoptimierung eingebracht werden. Anschließend erfolgt eine Optimierung ohne Berücksichtigung von Regelenergie, die dem Betriebsplaner einen ersten Hinweis auf mögliche Spielräume für die Abgabe von Geboten für Regelenergie gibt. Der dann folgende Prozess aus Gebotsformulierung / Ermitteln einer neuen Regelleistungsganglinie und Optimierung wird so lange durchgeführt, bis entweder ein wirtschaftlich attraktives Gebot gefunden wurde oder auf eine Gebotsabgabe verzichtet wird.



**Abbildung 2.6:** Betriebsoptimierung unter Berücksichtigung von Regelenergie

Die Häufigkeit der durchzuführenden Planungsrechnungen richtet sich danach, mit wie vielen Stichproben der Betreiber eine für ihn ausreichende statistische Sicherheit des Ergebnisses erzielt. Dabei spielt sowohl das jeweilige finanzielle Risiko einer möglichen Fehlentscheidung eine Rolle als auch die Sensibilität des Erzeugungssystems auf eine geänderte Anforderung von Regelleistung. Eine Aussage darüber muss dazu von jedem Betreiber individuell getroffen werden und bedarf umfangreicher Szenarienanalysen.

## 2.4.2 Anforderungen an das Optimierungsmodell

Die Bestimmung der Auswirkungen einer Regelenergiebereitstellung setzt voraus, dass die potentiellen Einflüsse von Vorhaltung und Lieferung von Regelenergie auf die verschiedenen Teile eines Erzeugungssystems im Optimierungsmodell in Ergänzung zur Abbildung des regulären Betriebs formuliert werden können. Dazu ist es erforderlich, diese potentiellen Einflüsse der Regelenergie zu analysieren:

## **Energiebezug und Bezug von Betriebsstoffen**

Jedes Erzeugungssystem benötigt einen oder mehrere Energiebezüge für Primär- oder Sekundärenergie und weitere Betriebsstoffe als Ausgangspunkt für einen Verarbeitungsprozess, an dessen Ende ein Produkt steht, mit dem Erlöse erzielt werden können. Kohle und Erdgas sind hier als wichtigste Primärenergieträger im Rahmen einer Betriebsoptimierung zu nennen. Die benötigten Betriebsstoffe können dagegen sehr vielfältig sein und richten sich nach den jeweiligen betrachteten Erzeugungsanlagen. Exemplarisch kann hier Kühlwasser, das bei einer Flusswasserkühlung nur begrenzt zur Verfügung steht, angeführt werden. Die Verträge zum Bezug dieser Ausgangsstoffe sind dabei sehr vielfältig und beinhalten oftmals Leistungs- und Mengenrestriktionen sowie leistungs- oder mengenabhängige Preise, die in die Betriebsoptimierung zu integrieren sind. Ziel der Betriebsoptimierung ist es, aus den verschiedenen zur Verfügung stehenden Bezugsmöglichkeiten eine wirtschaftliche Auswahl zu treffen und die zu beziehenden Leistungen und Mengen zu quantifizieren.

Ein Bezugsvertrag kann darüber hinaus direkt oder indirekt über einen Wandlungsprozess zur Bereitstellung von Regelenergie eingesetzt werden. Zum Beispiel trägt ein Kohlebezugsvertrag, der den Brennstoff für ein Regelkraftwerk bereitstellt, indirekt zur Vorhaltung und Lieferung von Regelenergie bei. Die Vorhaltung und Lieferung von Regelenergie ist damit immer unter Einhaltung der Restriktionen des Bezugsvertrags zu planen:

- Vorhalteleistung und Bezugsleistung dürfen die vertraglich festgelegte maximale und minimale Leistungsgrenze nicht über- oder unterschreiten.
- Bezugsmenge und vorzuhaltende Bezugsmenge dürfen die vertraglich festgelegte maximale und minimale Bezugsmenge nicht über- oder unterschreiten. Für die vorzuhaltende Bezugsmenge ist zu einzuplanen, dass in der Regel eine Arbeitsverfügbarkeit von 100 % für die Vorhaltung von Regelenergie zu gewährleisten ist.

## **Energiewandlung und Energiespeicherung**

Kern eines Energieerzeugungssystems ist die Energiewandlung, die prinzipiell einen reinen Energiehandel von der Energieerzeugung unterscheidet. Für die Energiewandlung und damit in den meisten Fällen auch für die Bereitstellung von Regelenergie stehen eine Reihe von Erzeugungsanlagen zur Verfügung, die in der Betriebsoptimierung abzubilden

sind. Abbildung 2.7 zeigt eine Übersicht der Erzeugungsanlagen, die zur Bereitstellung von Regelenergie beitragen können. Dabei sind die verschiedenen Regelenergiearten gekennzeichnet, zu denen die Anlagen typischerweise beitragen können. Die eingeklammerten Kreuze zeigen die eingeschränkte Eignung eines Typs von Erzeugungsanlage zur Bereitstellung von Regelenergie an.

- Thermische Kraftwerke teilen sich prinzipiell in zwei Typen auf, zum einen in Kondensationskraftwerke, die nur elektrische Energie bereitstellen, zum anderen in Erzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung, die eine Kombination elektrischer und thermischer Energie bereitstellen. In beiden Fällen, reine Gasturbinenanlagen seien zunächst ausgenommen, wird über einen Dampferzeuger Brennstoffenergie auf einen Wasser-Dampf-Kreislauf übertragen und mechanische Arbeit bei der Entspannung des Dampfs über eine Turbine gewonnen und in elektrische Energie umgewandelt. Je nach Typ der Turbine ist die Möglichkeit zu einer Auskopplung von Dampf zur Wärmege-  
winnung vorgesehen.

	Primär-	Sekundär-	Minuten-	Stunden-
	regelenergie		reserve	
Thermische Kraftwerke	x	x	x	x
Gasturbinen / GuD-Kraftwerke	x	x	x	x
Pumpspeicherkraftwerke	x	x	x	(x)
Speicherkraftwerke	x	x	x	(x)
Brennstoffzellen-BHKW	(x)	(x)	x	x
Motor-/Gasturbinen-BHKW	(x)	(x)	x	x
Notstromaggregate	(x)	(x)	x	(x)
Laufwasserkraftwerke	(x)	(x)	(x)	(x)
Windkraftanlagen	(x)			
Steuerbare Verbraucher	(x)	(x)	x	

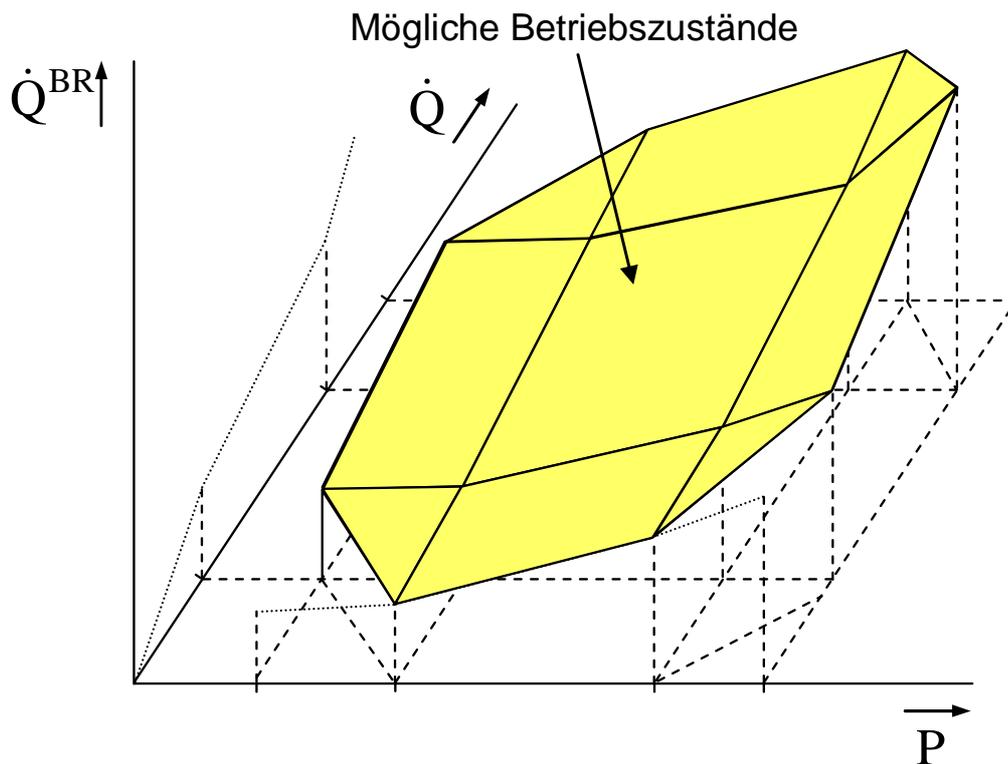
**Abbildung 2.7:** Einsatzbereiche verschiedener Anlagentypen zur Regelenergiebereitstellung

Bei der Modellierung eines Dampfkraftwerks in der Betriebsoptimierung sind wegen des komplexen technischen Prozesses eine Reihe von Restriktionen zu berücksichtigen, z.B.:

- Maximale und minimale Leistungsgrenzen von Dampferzeuger bzw. Turbine sowie der thermischen Auskopplung
- Leistungsänderungsgeschwindigkeit des Dampferzeugers
- Mindest- und Höchstbetriebszeiten
- Energiebedarf für das Anfahren der Anlage

Kondensationskraftwerke wie auch Erzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung Anlagen sind in der Lage, alle Arten von Regelenergie bereitzustellen und haben als Dampfkraftwerke die Schwierigkeit zu überwinden, im Fall einer positiven Regelleistungsanforderung, vor allem für Primär- und Sekundärregelenergie schnell genug die erforderliche Dampfleistung aufzubringen. Die Erhöhung der Leistung des Dampferzeugers ist nur mit einem Zeitverzug möglich, so dass verschiedene Verfahren angewendet werden, um die Reaktionszeit des Dampfkraftwerks zu verkürzen. Dabei wird neben der Abschaltung der Niederdruckvorwärmung und der Reduktion des Kondensatstroms vor allem eine Androsselung der Turbinenventile vorgenommen, damit eine Speicherwirkung im Dampferzeuger entsteht, die ohne Zeitverzug zur kurzfristigen Leistungserhöhung abgerufen werden kann. Dieses Vorgehen ist gleichzeitig mit dem Nachteil verbunden, dass zusätzlicher Brennstoff, für die Vorhaltung der Regelenergie benötigt wird und sich der Wirkungsgrad der Anlage insgesamt sowohl während der Vorhaltung als auch während der Lieferung von positiver Regelenergie verschlechtert. Dieser Brennstoffmehrbedarf für die Regelenergie muss demnach ebenso in die Modellbildung einfließen wie die mögliche Leistungsänderungsgeschwindigkeit, die insbesondere bei Erzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung eine wichtige Restriktion darstellt [8, 13, 51, 52, 55].

Wichtigste Restriktion beim Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis von Dampfkraftwerken, die Regelenergie bereitstellen sollen, ist allerdings die Berücksichtigung der möglichen Betriebszustände. Abbildung 2.8 zeigt an einem Brennstoffverbrauchsdiagramm für eine Entnahme-Kondensations-Turbine die zulässigen Betriebsbereiche auf.



**Abbildung 2.8:** Brennstoffverbrauchsdiagramm einer Erzeugungsanlage mit Entnahme-Kondensations-Turbine

Die Produktion von thermischer und elektrischer Energie erfolgt in diesem Fall nicht unabhängig voneinander. Für die Berücksichtigung einer Vorhaltung von Regelenergie in der Betriebsoptimierung bedeutet dies, dass die Grenzen des Betriebsdiagramms für den Fall maximaler und minimaler Vorhalteleistung nach wie vor eingehalten werden müssen und zusätzlich zu gewährleisten ist, dass die thermische Auskopplung unbeeinflusst von der Bereitstellung der Regelleistung weiterhin durchgeführt werden kann. Verfügt die Anlage über eine Gegendruckturbine, dann kann die elektrische Leistung nur zusammen mit der thermischen Leistung in einem festen Verhältnis verändert werden, so dass im Fall einer Bereitstellung von Regelenergie weitere thermische Anlagen zum Ausgleich der thermischen Mehr- oder Minderleistung zur Verfügung stehen müssen.

- Bei Gasturbinenkraftwerken wird im Gegensatz zum Dampfkraftwerk auf einen Wasser-Dampf-Kreislauf verzichtet, so dass der komplexe Prozess der Dampferzeugung entfällt. Stattdessen wird in einer Brennkammer mit verdichteter Luft der Brennstoff verbrannt und das dabei entstehende Rauchgas in einer Turbine entspannt, um mecha-

nische bzw. elektrische Energie zu gewinnen. Die Anlagen sind zumeist kompakt aufgebaut und haben eine so hohe Leistungsänderungsgeschwindigkeit, dass eine Berücksichtigung dieser Restriktion in der Betriebsoptimierung ohne Regelenergie meist nicht erfolgen muss. Mindest- und Höchstbetriebszeiten können eventuell eine Rolle spielen, weil das An- und Abfahren die Lebensdauer der Anlage verkürzt [34].

Gasturbinenkraftwerke sind für die Bereitstellung von Regelenergie sehr gut geeignet, weil eine hohe Leistungsänderungsgeschwindigkeit möglich ist und im Gegensatz zum Dampfkraftwerk kein zusätzlicher Brennstoff für die Vorhaltung benötigt wird. Einzige Restriktion ist, dass ein kontinuierlicher Betrieb während des Gebotszeitraums für Primär- und Sekundärregelenergie erforderlich ist.

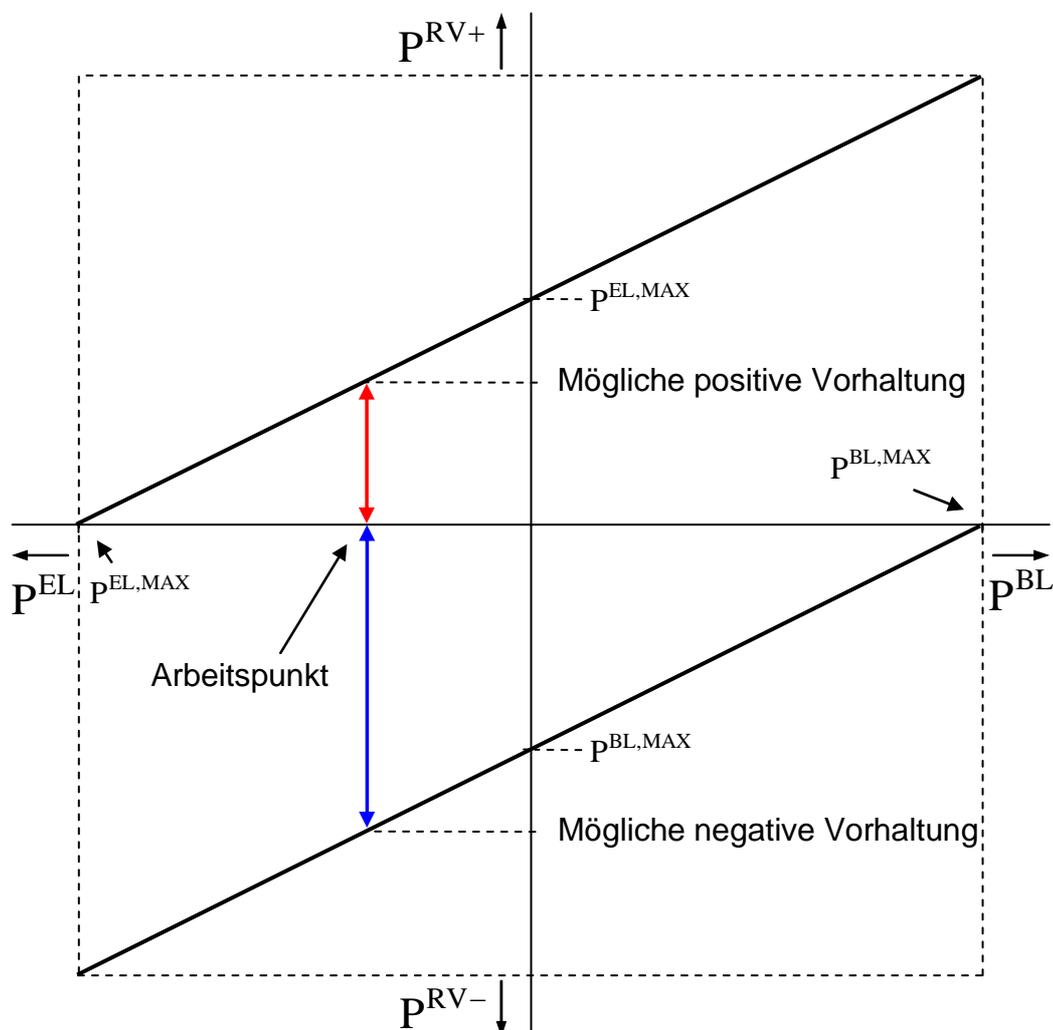
Für GuD-Anlagen, bei denen der Gasturbinenprozess noch um einen Wasser-Dampf-Kreislauf ergänzt wird, der die Wärme der Abgase über einen Abhitzeessel ausnutzt, gelten prinzipiell die gleichen Aussagen. Diese Anlagen haben auf Grund des mit Dampf gekoppelten Prozesses gegebenenfalls eine kleinere Leistungsänderungsgeschwindigkeit. Ist die Anlage gleichzeitig mit einer thermischen Auskopplung, z.B. über eine Entnahme-Kondensations-Turbine ausgestattet, dann gelten die Restriktionen, die sich aus dem obigen Brennstoffverbrauchsdiagramm ergeben analog.

- Über Pumpspeicherkraftwerke kann elektrische Energie dem Netz entnommen oder zugeführt werden. Die Speicherung erfolgt in Form von potentieller Lageenergie, indem ein höher liegendes Speicherbecken für Wasser durch Pumpen gefüllt bzw. durch Turbinieren entleert wird. Für die Modellbildung ist hier als wichtigstes die Speicherung selbst abzubilden, d.h., dass Energiemengen über den Betrachtungshorizont bilanziert werden. Gleichzeitig sind verschiedene Restriktionen einzuhalten, z.B. [43]:
  - Gewährleistung eines definierten Füllstands zu einem Zeitpunkt
  - Minimale- und maximale Füllstände
  - Vorgabe von Anfangs- und Endfüllstand für den Planungszeitraum
  - Maximale und minimale Ein- und Ausspeicherleistung

Pumpspeicher können prinzipiell alle Arten von Regelenergie in Abhängigkeit ihres Speicherfüllstandes und des momentanen Betriebszustandes bereitstellen. Beide Ab-

hängigkeiten müssen in das Optimierungsmodell eingehen. Die Arbeitsverfügbarkeit eines Speichers zur Bereitstellung von Regelenergie hängt wesentlich vom Inhalt des Speichers ab:

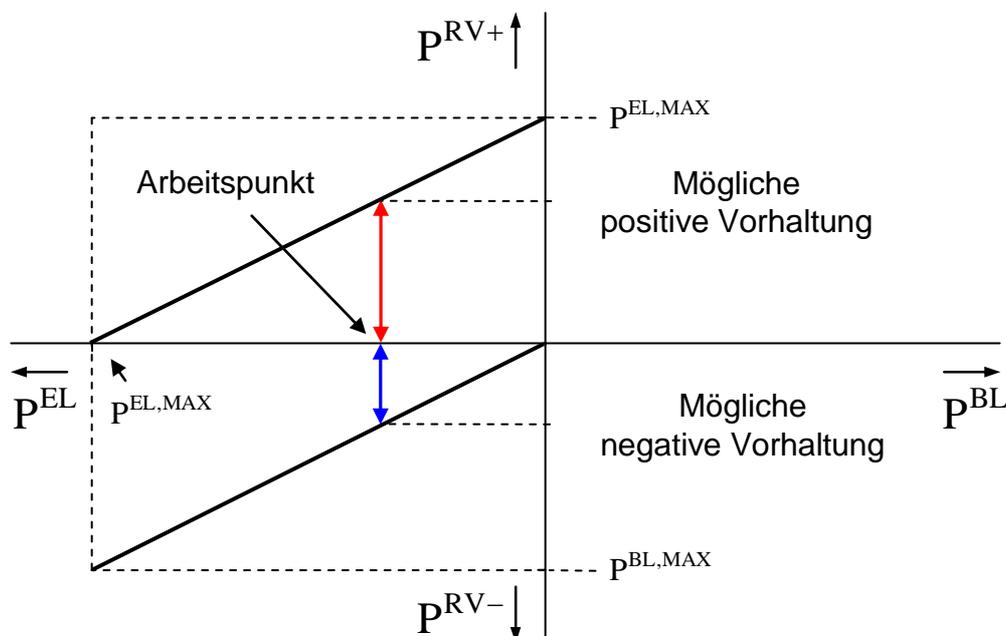
- Zur Vorhaltung von positiver Regelenergie muss gewährleistet sein, dass genügend Energie gespeichert ist, um die vorgehaltene Regelleistung im gesamten Gebotszeitraum abgeben zu können.
- Zur Vorhaltung von negativer Regelenergie muss gewährleistet sein, dass die vorgehaltene Regelleistung während des gesamten Gebotszeitraums aufgenommen werden kann.



**Abbildung 2.9:** Regelenergiebereitstellung eines Pumpspeicherkraftwerks

Welche Regelleistung der Speicher in Abhängigkeit vom momentanen Arbeitspunkt bereitstellen kann, hängt davon ab, wie Pumpen und Turbinen eingesetzt sind. Abbildung 2.9 zeigt die Zusammenhänge hierfür exemplarisch. Es ist vereinfachend angenommen, dass die vorhandenen Pumpen und Turbinen so eingesetzt werden können, dass sich ein kontinuierliches Leistungsspektrum für das Pumpspeicherkraftwerk ergibt. Stufenweise Leistungsänderungen durch nicht regelbare Pumpen oder Restriktionen durch ein nicht kontinuierliches Leistungsspektrum des Pumpspeicherkraftwerks ließen sich analog modellieren.

Die in Abbildung 2.7 aufgeführten Speicherkraftwerke verhalten sich ähnlich, wie die Pumpspeicherkraftwerke. Hier wird lediglich die Beladung des Speichers durch einen natürlichen Zufluss auf hohem potentielltem Niveau durchgeführt. Die zu berücksichtigenden Restriktionen bleiben damit gleich und es ergibt sich bei der Berücksichtigung einer Regelenergievorhaltung ein geändertes Diagramm für die mögliche Regelenergievorhaltung, wie in Abbildung 2.10 gezeigt. Die Randbedingungen, die in Abhängigkeit vom Speicherfüllstand für den Pumpspeicher zu formulieren sind, gelten gleichermaßen für Speicherkraftwerke. Es muss ebenfalls für den gesamten Gebotzeitraum genügend Speicherinhalt vorhanden bzw. frei sein, um die benötigten Regelenergien aufnehmen bzw. abgeben zu können.



**Abbildung 2.10:** Regelenergiebereitstellung eines Speicherkraftwerks

- Zusätzlich zu den Speichern für die elektrische Energieerzeugung sind in Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung häufig auch thermische Speicher im Einsatz. Diese können nur indirekt zur Bereitstellung von Regelenergie beitragen, z.B. indem die thermische Erzeugung zu Gunsten einer Regelenergielieferung zeitweise von ihrem geplanten Leistungswert abweicht und die Differenz zwischen thermischer Erzeugung und Verbrauch aus dem Speicher abgedeckt wird. Der Einsatz des thermischen Speichers muss dementsprechend auch in Abhängigkeit eines möglichen Regelenergiegebotes optimiert werden können, wobei analoge Restriktionen gelten, wie bei einem Pumpspeicher für elektrische Energie.
- Blockheizkraftwerke und Notstromaggregate sind kleinere Erzeugungsanlagen, die auf Basis von Verbrennungsmotoren, kleinen Gasturbinen oder Brennstoffzellen Energie für die dezentrale Versorgung bereitstellen.

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Ausführungen, die zwar prinzipiell alle Arten von Regelenergie bereitstellen können, in vielen Fällen mangels technischer Voraussetzungen nur für die Bereitstellung von Minutenreserve oder eingeschränkt für Stundenreserve eingesetzt werden können. Die abzubildenden Restriktionen orientieren sich an denen der voran beschriebenen Energiewandlungsanlagen.

- Laufwasserkraftwerke zählen zur Gruppe dargebotsabhängiger Erzeugungsanlagen, bei denen je nach aktuellem Pegelstand elektrische Energie gewonnen werden kann. Die von der Durchflussmenge abhängige Minimal- und Maximalleistung ist die wesentliche Restriktion, die bei der Formulierung des Optimierungsmodells zu berücksichtigen ist.

Zur Lieferung von Regelenergie jeder Art sind Laufwasserkraftwerke prinzipiell geeignet, wobei die Prognosegenauigkeit der Durchflussmenge und die vorhandene technische Ausrüstung das ausschlaggebende Kriterium für die mögliche Gebotsabgabe ist. Die Vorhaltung positiver Regelenergie erfolgt durch das Androsseln der Erzeugungleistung, so dass ein Teil des Dargebots nicht zur Energieerzeugung genutzt werden kann und verhält sich analog zu Regelenergievorhaltung durch das Speicherkraftwerk. Die dabei möglicherweise entstehenden Mindereinnahmen müssen im Optimierungsmodell Berücksichtigung finden.

- Windkraftanlagen sind ebenfalls dargebotsabhängig und in der Modellbildung der Betriebsoptimierung ist der prognostizierte Verlauf der Einspeisung genau wie der Pegelstand bei den Laufwasserkraftwerken zu berücksichtigen.

Auf Grund der Schwankungen des Winddargebots ist bisher nur über den Einsatz der Windkraftanlagen für die Bereitstellung von Primärregelenergie nachgedacht worden. Dazu wird die Windkraftanlage um bis zu 5 % ihrer momentanen Wirkleistung gedrosselt, um auch positive Regelleistung abgeben zu können. Bei der Berücksichtigung in der Betriebsoptimierung ist wie bei den Laufwasserkraftwerken auch, der durch die Vorhaltung unvermeidliche Verlust potentiell erzeugter Energie finanziell zu bewerten [28, 46, 49].

Die damit vorgestellten möglichen Erzeugungsanlagen zur Bereitstellung von Regelenergie lassen sich prinzipiell durch weitere Anlagentypen ergänzen, die allerdings in ihrer Modellierung keine neuen Problemstellungen aufwerfen und somit in Analogie zu den vorgestellten Erzeugungsanlagen Berücksichtigung finden können.

Bei allen Energiewandlungsanlagen und Speichern ist bei der Formulierung des Optimierungsmodells zu berücksichtigen, dass die Zusammenhänge zwischen eingehenden und ausgehenden Leistungen, ob Brennstoff, elektrische Energie, thermische Energie o.Ä. in der Regel nichtlinear sind. Dies folgt bereits aus der bekannten Tatsache, dass der Wirkungsgrad einer Energiewandlungsanlage sich in der Regel in Abhängigkeit ihres Arbeitspunktes verändert. Das Verhältnis aus Eingangsleistung, z.B. Brennstoff, zu Ausgangsleistung, z.B. Dampf, bleibt dabei nicht konstant und kann somit auch nicht über eine lineare Kennlinie beschrieben werden. Die Kennlinien können darüber hinaus auch nicht konvex sein, wenn beispielsweise eine stufenweise einsetzende Feuerung zu beschreiben ist, deren Wirkungsgrad sich zwischen minimaler und maximaler Leistung sowohl phasenweise verbessert als auch verschlechtert. Werden bestimmte Betriebsbereiche zwischen einer Minimal- und Maximalleistung aus technischen Gründen nicht angefahren, dann können zusätzlich auch Unstetigkeiten in der abzubildenden Kennlinie der Energiewandlungsanlage zu modellieren sein.

### **Energielieferung**

Energielieferungen resultieren in vielen Fällen aus längerfristigen Vertragsbindungen, die der Betreiber eines Erzeugungssystems abschließt, um einen Grundabsatz für seine Erzeu-

gungsanlagen sicherzustellen. Damit können auch längerfristige Preisschwankungen am Energiemarkt teilweise ausgeglichen werden. Die zu liefernden Energien liegen dazu in Form einer Ganglinie vor, die in die kurzfristige Betriebsoptimierung eingebunden wird. In Bezug auf die Bereitstellung von Regelenergie ist hier zu beachten, dass die Deckung dieser Lieferverpflichtungen zusätzlich zur Erbringung von Regelenergie immer zu gewährleisten ist.

Über diesen Grundfall hinausgehend besteht die Möglichkeit von Vereinbarungen zur Laststeuerung, mit denen der Erzeugungssystembetreiber seinen Planungsspielraum erweitern kann. Dabei wird in der Regel eine Zeitspanne vereinbart, in der ein Verbraucher mit weniger oder gar keiner Energie versorgt werden braucht, wobei die fehlende Energiemenge im Anschluss nachgeliefert werden muss. Dieses Vorgehen ist z.B. bei chemischen Produktionsanlagen möglich, deren Produktionsmenge in direktem Zusammenhang mit der eingesetzten Energie steht und das Erreichen der Sollproduktionsmenge zeitlich flexibel ist [22, 31].

Dieser Spielraum kann grundsätzlich auch für die Bereitstellung von Regelenergie durch den Erzeugungsanlagenbetreiber eingesetzt werden. Die Formulierung des Optimierungsmodells muss dabei ermöglichen, die vereinbarten Restriktionen des Liefervertrages auch unter Berücksichtigung der vorzuhaltenden Regelenergie zu gewährleisten:

- Einhaltung minimaler und maximaler Leistungsgrenzen
- Einhaltung der zu liefernden Energiemengen im vereinbarten Zeitraum

### **Energiehandel**

Der Betreiber von Erzeugungsanlagen hat die Möglichkeit, an den Energiemärkten zu handeln und damit den Einsatz seines Erzeugungssystems zusätzlich zu verbessern. Entscheidungen über längerfristige Geschäfte werden in der mittelfristigen Betriebsoptimierung getroffen bei der die Regelenergiebereitstellung nicht detailliert berücksichtigt wird. Für den kurzfristigen Betrachtungshorizont, innerhalb dessen die Berücksichtigung der Regelenergie im Detail erfolgt, ist der Spotmarkt für elektrische Energie ausschlaggebend für die zusätzliche Vermarktung der eigenen Erzeugungskapazitäten. Deswegen muss die kurzfristige Betriebsoptimierung diesen Markt im Optimierungsmodell abbilden können. Bis auf die Erfüllung der getätigten Geschäfte, auch für den Fall einer Beteiligung an der

Regelenergielieferung, sind keine weiteren Restriktionen für die Betriebsoptimierung mit integrierter Regelenergie relevant.

### **Regelenergiemarkt**

Neben dem Spotmarkt bietet der Regelenergiemarkt die bereits beschriebenen Möglichkeiten der Gebotsabgabe für positive und negative Regelenergie für Primär- und Sekundärregelenergie sowie Minutenreserve. Bei der Abbildung dieses Marktes in einem Optimierungsmodell sind wesentliche Restriktionen zu berücksichtigen:

- Positive und negative Regelenergie müssen getrennt voneinander abgebildet werden können.
- Höhe und Zeitraum des Gebotes müssen definiert werden.
- Die minimal geforderte Leistungsänderungsgeschwindigkeit bzw. die maximale Zeit bis zur Bereitstellung der Regelenergie muss in die Planungsrechnung eingehen.
- Die Regelenergiebereitstellung für ein Gebot kann durch mehrere Anlagen gemeinsam erbracht werden.

Zusätzlich zu den eigentlichen Regelenergien ist es sinnvoll, auch die Abgabe von Geboten für die Stundenreserve zu ermöglichen. Die Stundenreserve hat auch stochastische Eigenschaften und kann damit prinzipiell ohne zusätzlichen Aufwand in die Betriebsoptimierung integriert werden.

## **2.5 Optimierungsverfahren**

Neben der Analyse der abzubildenden Teile eines Energieerzeugungssystems in der kurzfristigen Betriebsplanung ist die Formulierung einer Zielfunktion für die Optimierungsaufgabe erforderlich. Ziel der hier beschriebenen Planungsaufgabe ist ein maximal zu erwirtschaftender Deckungsbeitrag, zu dem Erzeugungsanlagen, Bezugsverträge, Energielieferungen und die Teilnahme am Regel- und Fahrplanenergiemarkt sowohl positiv in Form von Erlösen als auch negativ in Form von Kosten beitragen können, z.B. durch:

## Kosten

- Brenn- und Betriebsstoffe
- Energiebezüge
- Leistungsänderungskosten, Anfahrkosten u.Ä.

## Erlöse

- Energieverkäufe
- Bereitstellung und Lieferung von Regelenergie

Für die Definition der Zielfunktion ist außerdem zu berücksichtigen, dass es für die Betriebsoptimierung von Erzeugungssystemen sinnvoll ist, den Betrachtungshorizont zu diskretisieren und dadurch die Beschreibung des mathematischen Problems zu vereinfachen. Dazu wird in der Regel für die kurzfristige Betriebsoptimierung der betrachtete Zeitraum in Zeitintervalle von 15 min bis zu 1 h eingeteilt und angenommen, dass der Zustand des Systems innerhalb eines Zeitintervalls unverändert bleibt. Eine Einteilung in kürzere Zeiträume ist nicht sinnvoll, weil dann zum einen die Prognosegenauigkeit für Lastgänge, Temperaturen u.Ä. nicht mehr groß genug ist, zum anderen werden Lastprofile von Lieferungen und Preise bzw. Handelsmengen selbst nur in Viertelstundendenwerten angegeben.

In jedem Zeitintervall muss eine Bilanz aus Erlösen und Kosten gebildet werden, die für jeden Teil  $i$  des Erzeugungssystems den Beitrag zur Zielfunktion beinhaltet, der sich in Abhängigkeit einer zugehörigen Optimierungsvariablen ergibt. Die Optimierungsvariablen können, je nach dem zu beschreibenden Typ von Kosten oder Erlösen, sowohl kontinuierlich, z.B. bei Energiebezügen, als auch binär, z.B. bei Anfahrkosten, sein. Damit ergibt sich allgemein die mathematische Formulierung der Zielfunktion des Planungsproblems:

## Zielfunktion

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (E_{i,t} - K_{i,t}) \cdot x_{i,t} \quad (2.3)$$

Über die Zielfunktion hinaus müssen noch eine Reihe von Nebenbedingungen, wie oben für die einzelnen Teile eines Erzeugungssystems analysiert, in das Planungsproblem integ-

riert werden. Diese können sich auf einzelne Zeitintervalle beziehen aber auch zeitintegral wirksam sein, wenn beispielsweise Mengenrestriktion über mehrere Zeitintervalle einzuhalten sind. Dabei können zwei Arten von Nebenbedingungen unterschieden werden:

### **Gleichheitsnebenbedingungen**

Der einfachste Fall ist die Formulierung einer Gleichheitsnebenbedingung für die Abbildung einer Energielieferung. Die Verbraucheranforderung muss in der Regel genau erfüllt werden. Die allgemeine mathematische Beschreibung dazu ist:

$$N_j(x_{i,t}) = c_j \quad (2.4)$$

### **Ungleichheitsnebenbedingungen**

Ungleichheitsnebenbedingungen werden in vielen Fällen benötigt, z.B. bei der Abbildung eines Maximal- oder Minimalenergieinhalts eines Energiespeichers. Allgemein mathematisch formuliert:

$$N_k(x_{i,t}) \leq c_k \quad (2.5)$$

Auf Basis der mathematischen Formulierung der Optimierungsaufgabe und den im Vorfeld beschriebenen, abzubildenden Teilen eines Erzeugungssystems muss ein geeignetes Verfahren zur Optimierung ausgewählt werden. Das Verfahren muss dazu auf ein Problem anwendbar sein, das die folgenden Eigenschaften besitzt:

- Die zu beschreibenden Zusammenhänge sind im Allgemeinen nichtlinear, nicht konvex und können Unstetigkeiten beinhalten.
- Ganzzahlige und kontinuierliche Variablen werden zur Formulierung des Problems benötigt.
- Eine Vielzahl von Gleichheits- und Ungleichheitsnebenbedingungen müssen formuliert werden können, die auch zur Abbildung zeitintegraler Restriktionen dienen. Dies erfordert gleichzeitig eine Formulierung des Planungsproblems ohne Separation in Teilprobleme [9].

- Das Optimierungsproblem ist im Allgemeinen multimodaler Struktur, so dass es notwendig ist, zu einer Lösung auch die Lösungsgüte angeben zu können bzw. nachweisen zu können, das globale Optimum ermittelt zu haben.

Die in Kapitel 2 analysierten stochastischen Eigenschaften der Lieferung von Regelenergie stellen keine zusätzliche Anforderung an das Optimierungsverfahren dar, weil deren Berücksichtigung im Vorfeld der eigentlichen Optimierung im Rahmen der Ganglinienaufbereitung durchgeführt wird. Die Integration in eine stochastische Optimierung scheidet auf Grund der systemweit und zeitlich koppelnden Restriktionen aus, die bereits bei einer kleinen Anzahl betrachteter Szenarien zu einer nicht mehr handhabbaren Problemgröße führen.

Zur Lösung des klassischen Betriebsoptimierungsproblems, wie dies in Kapitel 1.3 vorgestellt wurde, sind eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden, die auf unterschiedlichen Optimierungsverfahren beruhen und teilweise sind daraus bereits kommerzielle Anwendungen entstanden. Die Integration der Regelenergie in die Betriebsoptimierungsaufgabe ist allerdings bisher nicht ausreichend untersucht worden, so dass auf Basis der bekannten Stärken und Schwächen der verschiedenen Verfahren eine neue Auswahl im Hinblick auf die beschriebenen, speziellen Anforderungen der Planungsaufgabe getroffen werden muss.

Grundsätzlich lassen sich zwei Gruppen von Verfahren zur Bearbeitung der Betriebsoptimierungsaufgabe definieren. Zum einen sind dies die heuristischen Methoden, die auf Basis von Erfahrungswissen aus der praktischen Einsatzplanung Kriterien für einen optimalen Anlagen- und Vertragseinsatz ableiten. Dazu ist zunächst eine große und zeitaufwändige Sammlung von Eingangsdaten notwendig, die in einen komplexen Entscheidungsalgorithmus integriert werden müssen. Ist diese Arbeit geleistet, dann sind diese Methoden in der Anwendung sehr schnell, weil in diesem Fall keine umfangreichen Berechnungsalgorithmen durchlaufen werden müssen. Preise und andere Restriktionen ändern sich im Allgemeinen allerdings sehr häufig, so dass jedes Erfahrungswissen schnell veraltet. Darüber hinaus basiert das gesammelte Erfahrungswissen zumeist auf einer rein subjektiven Bewertung des Problems und hält somit einer Beurteilung nach objektiven Gesichtspunkten unter Umständen nicht stand. Die produzierten Ergebnisse sind deswegen in vielen Fällen nur suboptimal und somit nicht die erste Wahl bei der Lösung der Aufgabenstellung [29, 37].

Zum anderen sind dies die Verfahren aus der Gruppe der numerischen Optimierungsverfahren, bei denen versucht wird, das globale Optimum im Lösungsraum zu finden. Dabei ist auch eine Kombination verschiedener Verfahren üblich, in der Hoffnung, die Vorteile und Nachteile verschiedener Algorithmen durch Hybridisierung vorteilhaft zu kombinieren. Zu den klassischen, mathematisch-numerischen Optimierungsverfahren zählen beispielsweise die Dynamische Programmierung, die Lagrange-Relaxation sowie die Lineare Programmierung und die Gemischt-Ganzzahlig-Lineare-Programmierung. Bei diesen Verfahren ist es erforderlich, das Planungsproblem nach strengen mathematischen Kriterien zu formulieren, die durch das jeweilige Optimierungsverfahren vorgegeben sind. Dies betrifft die Art der verwendbaren Variablen, ganzzahlig oder kontinuierlich, sowie die Art des zulässigen Lösungsraums, unimodal oder multimodal, die Beschreibung funktionaler Zusammenhänge, konvex oder nicht konvex sowie die Abbildbarkeit zeitintegraler Nebenbedingungen. Die Bandbreite des Einsatzes jedes einzelnen Verfahrens wird dadurch eingeschränkt und die Auswahl eines Verfahrens muss auf die mathematischen Eigenschaften des Optimierungsproblems abgestimmt sein [37, 64].

Die Dynamische Programmierung ist für die vorliegende Aufgabenstellung nicht geeignet, weil eine Abbildung von zeitintegralen Zusammenhängen nicht ohne Probleme möglich ist, die Lagrange-Relaxation scheidet aus, weil diese auf einer konvexen Problemformulierung basiert und die Lineare Programmierung ist nicht in der Lage, ganzzahlige Variablen zu verarbeiten.

Über die klassischen Optimierungsverfahren hinaus wird die Gruppe der numerischen Verfahren in den letzten Jahren zunehmend erweitert durch die Verfahren des Bereichs der Künstlichen Intelligenz. Hierzu zählen beispielsweise Neuronale Netze, Genetische Algorithmen oder Evolutionsstrategien, die zur Anwendung auf eine Optimierungsaufgabenstellung auch vielfältig kombiniert werden können. Diese Verfahren stellen nur geringe Anforderungen an die mathematischen Eigenschaften des Optimierungsproblems und haben deshalb prinzipiell einen großen Einsatzbereich. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass die Steuerung des Optimierungsablaufs in der Regel von einer Reihe von Parametern abhängig ist, die je nach Optimierungsaufgabe neu zu bestimmen sind. Darüber hinaus sind häufig spezielle Anpassungen der Standardverfahren an das Optimierungsproblem erforderlich, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen, wenn beispielsweise die Berücksichtigung ganzzahliger Optimierungsvariablen erforderlich wird. Ein entscheidender Nachteil dieser Verfahren liegt darin, keine Lösungsgüte bzw. nachweislich optimale Lö-

sung zu ermitteln, was besonders bei der hier vorliegenden komplexen Betriebsoptimierungsaufgabe nachteilig ist. Eine Beurteilung des vorliegenden Ergebnisses und des Optimierungsmodells wird dem Betriebsplaner damit sehr erschwert, weshalb diese Verfahren für den vorliegenden Anwendungsfall weniger geeignet sind [15, 27, 29].

Im Vergleich der verschiedenen Stärken und Schwächen der vorgestellten Optimierungsverfahren fällt die Wahl auf die Gemischt-Ganzzahlig-Lineare-Programmierung (GGLP), die als mathematisch-numerisches Optimierungsverfahren die Anforderungen der Betriebsoptimierungsaufgabe unter Berücksichtigung von Regelenergie am besten erfüllt.

Das Verfahren bietet eine geschlossene Lösung der Aufgabenstellung unter Berücksichtigung auch zeitintegraler Zusammenhänge und ermöglicht eine Problemformulierung durch ganzzahlige und kontinuierliche Variablen unter Verwendung des Branch-and-Bound-Algorithmus. Die Optimierung in multimodalen, nicht konvexen Lösungsräumen ist möglich, wobei zu jedem Ergebnis eine Güte angegeben werden kann und auch die Bestimmung der global optimalen Lösung durchführbar ist. Die Nachteile dieses Verfahrens sind dagegen gut in Kauf zu nehmen bzw. können durch eine geeignete Problemformulierung ausgeglichen werden. Die oben beschriebenen oftmals nichtlinearen Zusammenhänge der Betriebsoptimierung können durch stückweise Linearisierung ausreichend genau approximiert werden, für die Beschreibung von multiplikativen Verknüpfungen von Optimierungsvariablen werden in [24] Möglichkeiten einer Abbildung im Rahmen der GGLP angegeben [53]. Schließlich ist das Durchsuchen des Lösungsraumes mit dem Branch-and-Bound Verfahren oftmals sehr rechenzeitintensiv, wobei dieses Problem durch die stetig steigenden Rechnerleistungen und die Verbesserung der Lösungsalgorithmen zunehmend entschärft wird.

## 3 Mathematische Modellbildung

### 3.1 Gemischt-Ganzzahlig-Lineare-Programmierung

Bei Verwendung der GGLP als Optimierungsverfahren muss zunächst das komplette Planungsproblem mathematisch formuliert werden. Dabei wird zunächst eine Zielfunktion definiert, die sich ausschließlich aus der Linearkombination von Variablen und deren Koeffizienten zusammensetzen darf. Gleichung 3.1 beschreibt den allgemeinen Fall:

$$Z = \sum_{i=1}^I c_i \cdot x_i \quad (3.1)$$

Die Variable  $x$  steht in diesem Fall entweder für eine ganzzahlige oder eine kontinuierliche Variable, wobei die Konstante  $c$  jeweils einer Variablen zugeordnet ist. Die im Rahmen der mathematischen Formulierung für das vorliegende Betriebsoptimierungsproblem notwendigen, ganzzahligen Variablen sind ausschließlich binär, so dass im Folgenden immer dieser Spezialfall betrachtet wird.

Zur Beschreibung des Optimierungsproblems wird neben Gleichung 3.1 eine Formulierung für die Nebenbedingungen nach Gleichung 3.2 benötigt. Die Variablen der Zielfunktion werden darin mit den zugehörigen Koeffizienten gewichtet in die jeweiligen Gleichungen zur Beschreibung aller notwendigen Restriktionen eingetragen. Der Vektor  $\vec{b}$  fasst dabei alle Konstanten Terme jeder Nebenbedingung auf der rechten Seite der Ungleichung zusammen.

$$A \cdot \vec{x} \leq \vec{b} \quad (3.2)$$

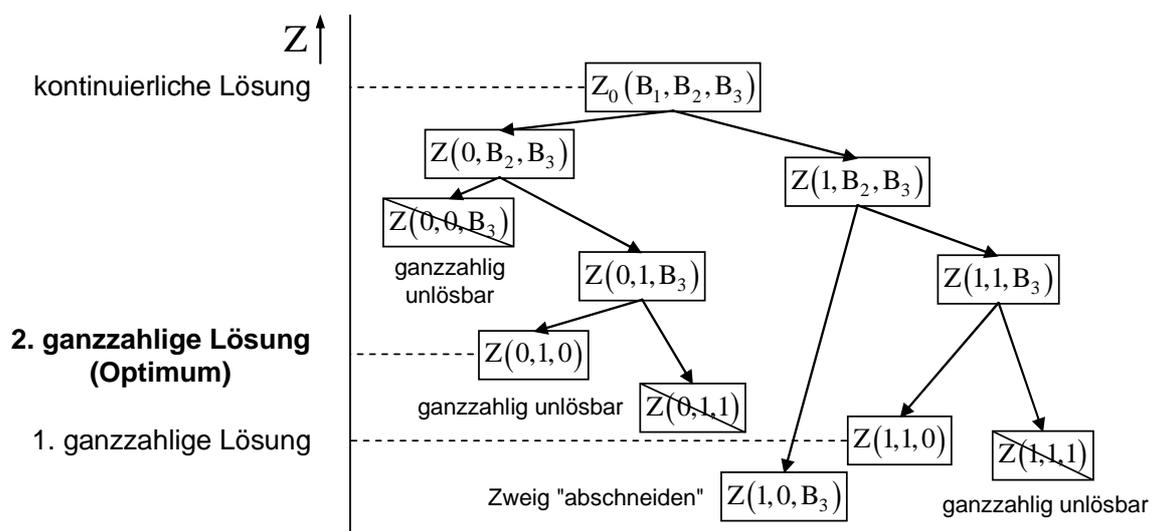
Das Optimierungsverfahren selbst besteht aus zwei Teilen, zum einen dem Simplex-Algorithmus und dem übergeordneten Branch-and-Bound Algorithmus, die aufeinander aufbauend die optimale Lösung aus dem gesamten Lösungsraum ermitteln können.

Der Simplex-Algorithmus löst in einem ersten Schritt das relaxierte Problem, um damit eine Basislösung zu generieren. Dazu werden alle Binärvariablen  $B_i$  des Problems zunächst als kontinuierlich angenommen und eine Lösung ermittelt. Generell ist davon auszugehen, dass eine binäre Entscheidung das Optimierungsergebnis, ausgehend von einer kontinuierlichen Lösung einer Variablen, immer verschlechtert. D.h. nach Ermittlung der

Basislösung steht ein Zielfunktionswert fest, der bei einer Maximierungsaufgabe nicht überschritten werden kann. Die Basislösung ist im Allgemeinen keine zulässige Lösung des gesamten Problems, dennoch kann das Ergebnis als Vergleichswert zur Beurteilung der Güte der nachfolgend ermittelten, zulässigen Lösungen herangezogen werden.

Der nachfolgende Branch-and-Bound Algorithmus setzt die Werte der relaxierten binären Variablen auf 0 oder 1 und ermittelt eine erste ganzzahlige Lösung des Optimierungsproblems, die gleichzeitig auch die erste zulässige Lösung darstellt. Davon ausgehend werden weitere ganzzahlige Lösungen gesucht, die einen besseren Zielfunktionswert als die erste Lösung haben, um schließlich das globale Optimum anzustreben. Dieses Vorgehen führt zur Ermittlung eines Lösungsbaumes, wie er in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Nach dem Erhalt einer ersten ganzzahligen Lösung kann das Verfahren den Lösungsbaum effektiv durchsuchen, indem beim schrittweisen Verzweigen der Binärvariablen auf 0 oder 1 die Zweige, die einen schlechteren Zielfunktionswert als die bekannten ganzzahligen Lösungen erreichen, nicht weiter durchsucht werden.

Trotzdem kann die Suche bei hochdimensionalen Problemen sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, weshalb im Laufe der Zeit eine Reihe von Verbesserungen dieses Untersuchungsalgorithmus vorgestellt wurden, die eine starke Verkürzung der Rechenzeiten ermöglichen [24, 29].



**Abbildung 3.1:** Verzweigungsbaum beim "Branch-and-Bound"-Algorithmus

Die Beschreibung eines mathematischen Problems, das mit der GGLP gelöst werden soll, erfordert eine geschlossene Formulierung der Aufgabenstellung. Mit der weiten Verbreitung der GGLP, vor allem im Bereich der betriebswirtschaftlichen Planung, haben eine Reihe von Herstellern so genannte GGLP-Solver auf den Markt gebracht. Im Zuge dieser Entwicklung wurde auch das weit verbreitete MPS-Format zur einheitlichen Beschreibung von GGLP-Problemen entwickelt, auf dessen Basis die Problemdata von verschiedenen Solvern verarbeitet werden können. Zur Erleichterung der Modellbildung wurden darüber hinaus im Rahmen der Formulierung des MPS-Formats Vereinfachungen zur Beschreibung stückweise linearer Zusammenhänge durch die Definition von "Special ordered Sets" vereinbart.

Zur Formulierung stückweise linearer Zusammenhänge ist normalerweise eine Reihe von Gleichungen erforderlich, um den inhaltlichen Zusammenhang zweier linearer Teilelemente, wie z.B. bei der Funktion aus Abbildung 3.2 mathematisch zu formulieren. Unter Verwendung von "Special Ordered Sets" lässt sich die explizite Formulierung dieser Teilleichungssysteme umgehen:

#### **"Special Ordered Set", Typ 1:**

Der SOS 1 definiert für eine geordnete Menge von Optimierungsvariablen  $\{x_1, \dots, x_n\}$  von denen nur eine einen Wert ungleich ihres unteren Grenzwertes annehmen darf. Auf diese Weise lassen sich Auswahlprobleme effizient definieren [4].

#### **"Special Ordered Set", Typ 2:**

Der SOS 2 definiert für eine geordnete Menge von Optimierungsvariablen  $\{x_1, \dots, x_n\}$  die Bedingung, dass die Summe zweier aufeinander folgender Variablen höchstens einen Wert gleich einer oberen Grenze haben darf. Wird diese Grenze beispielsweise auf 1 gesetzt, lassen sich damit auch nicht konvexe Funktionen linearisiert abbilden [4].

Zur Modellbildung stückweise linearisierter Funktionen werden darauf aufbauend zwei Formulierungen unterschieden. Liegt ein konvexer funktionaler Zusammenhang vor, dann lässt sich dieser, am Beispiel eines Zusammenhangs von Kosten und Leistung in Abbildung 3.2 veranschaulicht, über die so genannte Delta-Formulierung modellieren. Dabei wird jedem Abschnitt der Kennlinie, im Bild durch die geschweiften Klammern angedeutet, eine kontinuierliche Optimierungsvariable  $\delta$  zugeordnet. Die Optimierung kann dann

die Werte der Variablen optimal einstellen und gleichzeitig die zugehörigen Abschnitte auswählen, wenn die Abschnitte vom untersten zum obersten in aufsteigender Reihenfolge durchlaufen werden. Der Arbeitspunkt ergibt sich dann anhand der Gleichungen 3.3 und 3.4.:

$$K = \tilde{K}_1 + \sum_{s=1}^{S-1} (\tilde{K}_{s+1} - \tilde{K}_s) \cdot \delta_s \quad (3.3)$$

$$P = \tilde{P}_1 + \sum_{s=1}^{S-1} (\tilde{P}_{s+1} - \tilde{P}_s) \cdot \delta_s \quad (3.4)$$

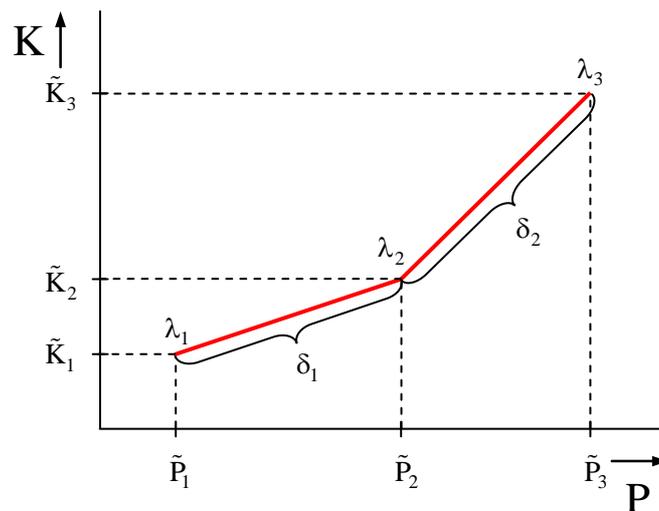
Liegt der allgemeine Fall, also ein nicht konvexer Funktionsverlauf vor, dann wird die so genannte Lambda-Formulierung zur mathematischen Beschreibung verwendet. Dabei wird im Gegensatz zur vorgenannten Formulierung für konvexe Funktionsverläufe, für jede Stützstelle eine Variable  $\lambda$  eingeführt, die zusammen in einen SOS2 eingebunden werden. Dabei wird festgelegt, dass zwei aufeinander folgende Variablen einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen müssen und zwar so, dass deren Summe den Wert 1 ergibt. Daraus ergibt sich dann ein von der GGLP auszuwählender, optimaler Arbeitspunkt mit den Gleichungen 3.5 und 3.6:

$$K = \sum_{s=1}^S \tilde{K}_s \cdot \lambda_s \quad (3.5)$$

$$P = \sum_{s=1}^S \tilde{P}_s \cdot \lambda_s \quad (3.6)$$

Gleichung 3.7 definiert die Konvexitätsbedingung für die Optimierungsvariablen  $\lambda_s$  :

$$\sum_{s=1}^S \lambda_s = 1, \quad \{\lambda_s | s = 1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \quad (3.7)$$



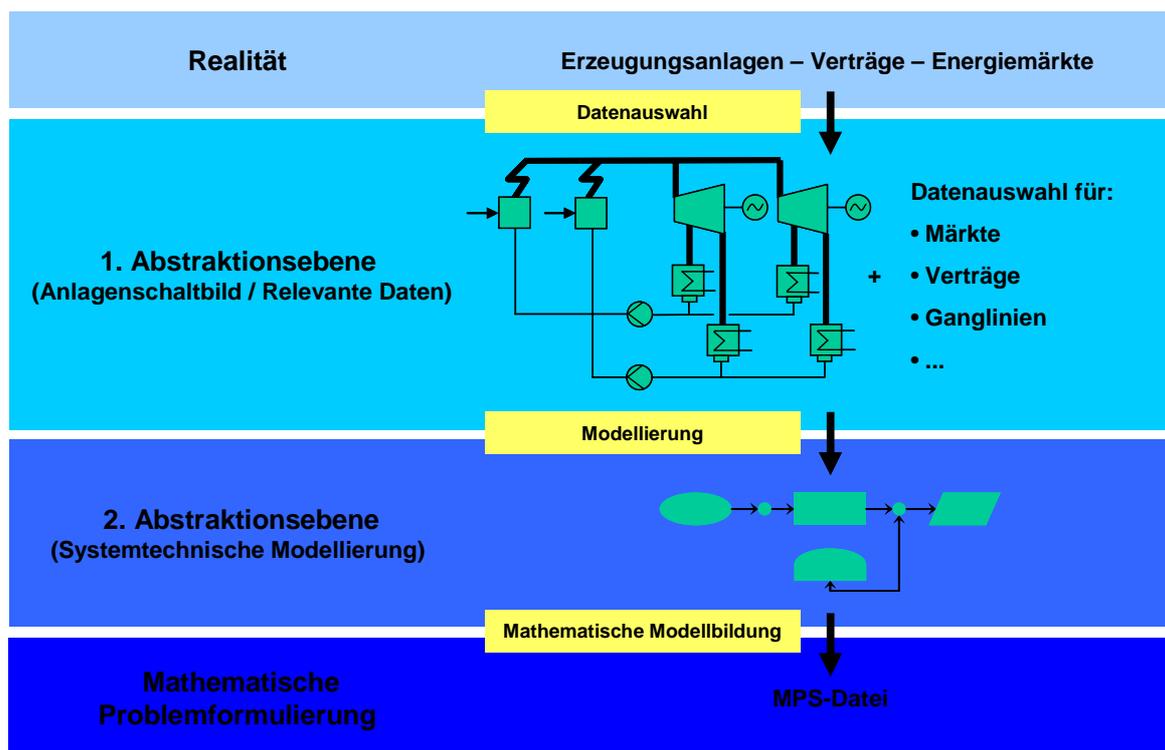
**Abbildung 3.2:** Verlauf einer stückweise linearen Kennlinie

## 3.2 Systemtechnische Modellierung

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren beruht auf der am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung in vorangegangenen Arbeiten entwickelten systemtechnischen Modellierung zur Transformation des realen Betriebsplanungsproblems in ein optimierbares mathematisches Modell [26]. Abbildung 3.3 verdeutlicht hierzu den Aufbereitungsprozess der Informationen bis zum mathematischen Modell.

Zunächst ist es die Aufgabe des Anwenders, aus den zur Verfügung stehenden Informationen über Erzeugungsanlagen, Energiebezugsverträgen, Energielieferungen, Fahrplan- und Regelenergiehandel relevante Daten für die Optimierung in einer ersten Abstraktionsebene zusammenzustellen. Darauf aufbauend wird ein Modell auf Basis der systemtechnischen Modellierung entworfen, das in der zweiten Abstraktionsebene die optimierungsrelevanten Zusammenhänge abbildet.

Ausgehend von diesen Eingangsdaten wird von dem hier vorgestellten Verfahren das mathematische Gleichungssystem generiert und in einer Modelldatei im genormten MPS-Dateiformat abgelegt. Das Modell kann auf Basis dieser Schnittstelle von diversen kommerziell verfügbaren GGLP-Solvern eingelesen und optimiert werden.

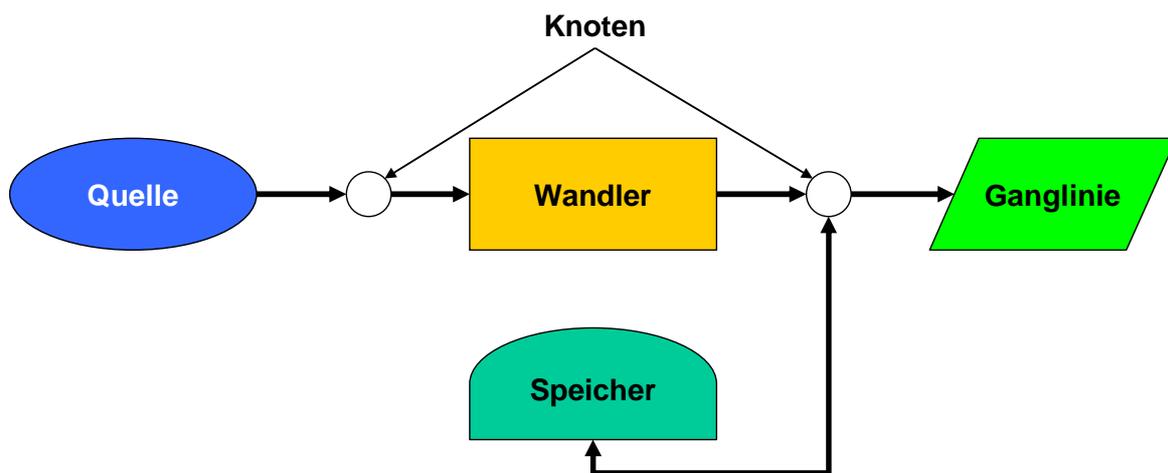


**Abbildung 3.3:** Aufbereitungsprozess der Informationen zur mathematischen Problemformulierung

Die systemtechnische Modellierung, die zur Formulierung des Optimierungsproblems durch den Anwender dient, basiert auf 5 Grundelementen, die zur Abbildung eines beliebigen Erzeugungssystems ausreichen. Die Modellierung erfolgt dadurch auf einem sehr abstrakten Niveau, bei dem die einzelnen Teile eines Erzeugungssystems auf ihre charakteristischen Eigenschaften, Erlöse/Kosten, Bezug/Lieferung, Speicherung und Wandlung/Übertragung reduziert werden. Dieses Vorgehen hat im Gegensatz zu einer Modellierung auf weniger abstraktem Niveau den Vorteil, dass neue Teile des Erzeugungssystems, neue Verträge oder andere Restriktionen zumeist einfach in das Optimierungsmodell zu integrieren sind, ohne an der mathematischen Modellbildung Änderungen vornehmen zu müssen.

Bei der Integration der Regelenergie in die Betriebsoptimierung sind die Anforderungen an die Modellierung allerdings sehr speziell, so dass trotz der großen Flexibilität des Ansatzes eine Reihe neuer mathematischer Modelle erforderlich sind.

Abbildung 3.4 zeigt eine schematische Zusammenschaltung der im Folgenden beschriebenen Grundelemente:



**Abbildung 3.4:** Schematische Zusammenschaltung der Grundelemente

### **Knoten**

Der Knoten bildet das zentrale Grundelement in der systemtechnischen Modellierung und dient zur Verknüpfung aller anderen Grundelemente. Für jeden Knoten wird für jedes Zeitintervall des Betrachtungshorizontes eine Bilanz aus eingehenden und ausgehenden Leistungen gebildet, die ausgeglichen sein muss.

### **Quelle**

Mit einer Quelle kann die Abbildung von Kosten und Erlösen realisiert werden, die für Mengen oder Leistungen anfallen. Darüber hinaus können auch Mengen- oder Leistungsgrenzen für den Betrachtungszeitraum oder Teilzeiträume über eine Quelle formuliert werden und auf diese Weise effektiv die Abbildung von Restriktionen des Erzeugungssystems durchgeführt werden.

### **Wandler**

Zur Abbildung von Anlagen zur Energiewandlung oder allgemein zur Abbildung aller anderen über eine stückweise linearisierbare Kennlinie formulierbaren Zusammenhänge zwischen einer Eingangsleistung und einer oder mehrerer Ausgangsleistungen wird das Grundelement Wandler verwendet. Durch die Möglichkeit, für einzelne Zeiträume innerhalb des Planungshorizontes Ein- oder Ausschaltvorgaben definieren zu können, ist der Wandler sehr flexibel einsetzbar.

## **Speicher**

Die Abbildung von Anlagen, die eine Speichereigenschaft besitzen ist generell über das Grundelement Speicher durchführbar. Es wird dafür eine Energiebilanz mit den ein- oder ausgespeisten Energien gebildet. Ergänzend können Mengenvorgaben für bestimmte Zeitintervalle oder Zeiträume des Planungshorizonts gemacht werden. Maximale und minimale Energiemengen sowie zeitabhängige Speicherverluste können berücksichtigt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit den Planungszeitraum als zyklisch zu definieren, so dass im Start- und Endzeitintervall jeweils die gleichen Energiemengen im Speicher vorliegen müssen.

## **Ganglinie**

Zur Abbildung von Energielieferungen, Preisverläufen und Temperaturverläufen sowie allen anderen sich zeitintervallabhängig verändernden Werten, die für die Betriebsoptimierung relevant sind, wird das Grundelement Ganglinie verwendet.

Alle Grundelemente können in vielfältiger Weise miteinander kombiniert werden, um auch komplexe technische Zusammenhänge und Restriktionen abbilden zu können. Die in dieser Arbeit aufgestellten Modellierungen basieren alle auf solchen Grundelement-Kombinationen, wobei die Modellbildung der einzelnen Grundelemente um die für die Abbildung der Regelenergie notwendigen Eigenschaften erweitert wird.

### **3.3 Modellierungskonzept zur Abbildung von Regelenergie**

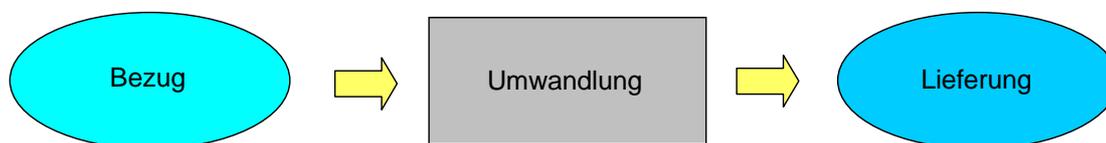
Die Integration der Regelenergie in die Betriebsoptimierung erfordert bei der Modellierung eine konsequente Berücksichtigung der in Kapitel 2 beschriebenen Anforderungen an das Optimierungswerkzeug. Dies kann umgesetzt werden, indem die generell in der Betriebsoptimierung abzubildenden Vorgänge Bezug, Umwandlung und Lieferung, sofern sie direkt oder indirekt zur Bereitstellung von Regelenergie eingesetzt werden, jeweils um die Berücksichtigung der Vorhaltung und Lieferung von positiver und negativer Regelenergie ergänzt werden.

Die Berücksichtigung einer angenommenen Lieferung von Regelenergie ermöglicht vor allem, die Kosten und Erlöse durch die Änderungen im Umwandlungsprozess und in den Bezügen repräsentativ in Abhängigkeit vom aktuellen Arbeitspunkt zu bestimmen.

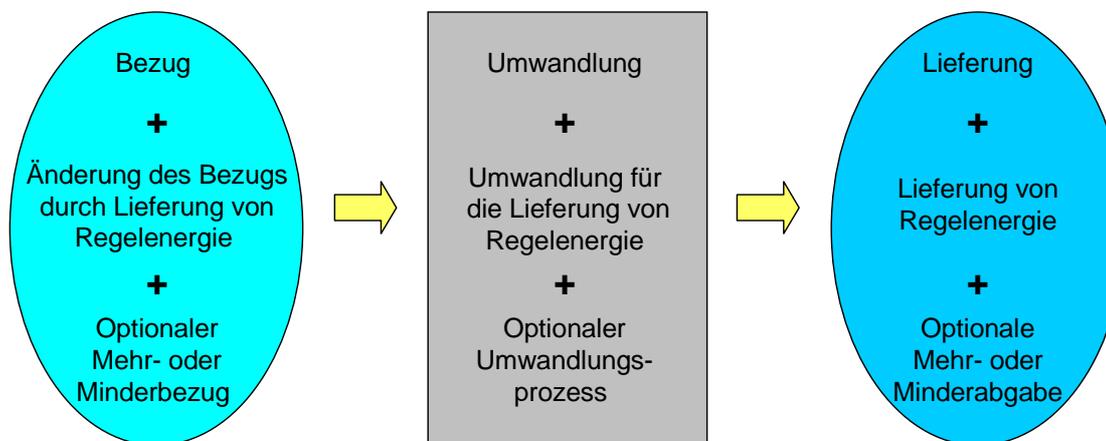
Die Vorhaltung von Regelenergie wird über die Berücksichtigung der optionalen Mehr- oder Minderleistungen im Fall der maximalen Anforderung von Regelenergie in das Optimierungsproblem integriert. Dadurch wird gewährleistet, dass ein abgegebenes Gebot für die Bereitstellung der Regelenergie mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten des Erzeugungssystems erfüllt werden kann. Gleichzeitig werden auch die Auswirkungen der Vorhaltung von Regelenergie auf den Deckungsbeitrag, z.B. durch eine mögliche Einschränkung der Verkaufsmengen am Fahrplanenergiemarkt, objektiv bewertet.

Abbildung 3.5 verdeutlicht den Unterschied zwischen einer Betriebsoptimierung ohne und mit der Integration von Regelenergie hierzu schematisch [67].

**Betriebsoptimierung ohne Regelenergie:**



**Betriebsoptimierung mit Regelenergie:**



**Integration aller Regelenergiearten in einer allgemeinen Modellbildung!**  
**Gleichzeitige Berücksichtigung von positiver und negativer Regelenergie!**

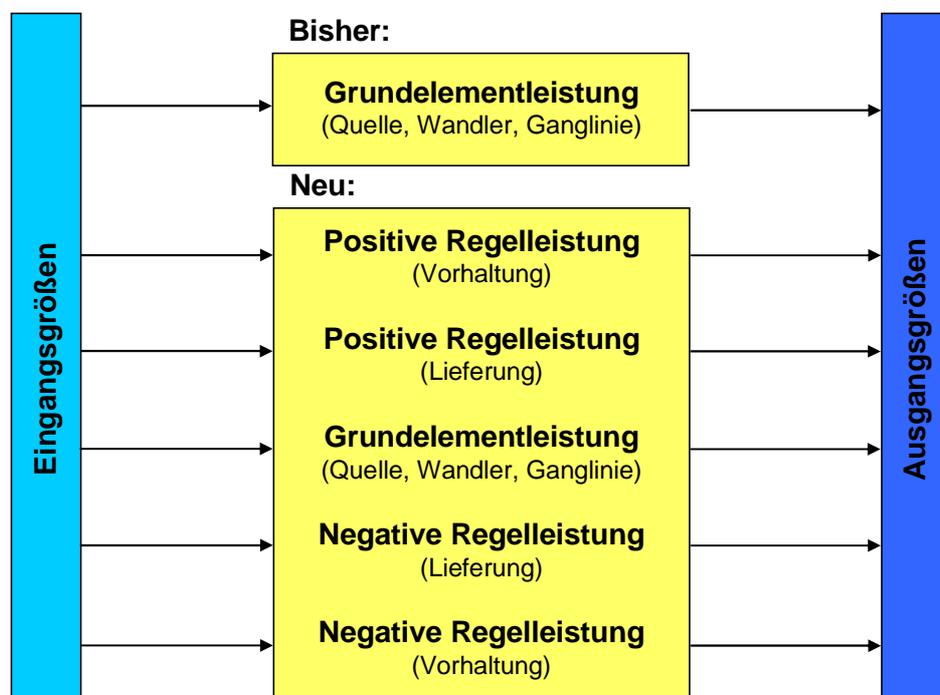
**Abbildung 3.5:** Prinzip der Integration von Regelenergie in die Betriebsoptimierung

Die zur Abbildung des Erzeugungssystems unter Berücksichtigung von Regelenergie benötigten Grundelemente müssen damit grundsätzlich um die Bestimmung vier zusätzlicher Leistungen erweitert werden, wie dies in Abbildung 3.6 verdeutlicht wird.

Die in dieser Arbeit entwickelten, neuen mathematischen Modelle für die bestehenden Grundelemente dienen dazu, die Umsetzung des in Abbildung 3.6 gezeigten Schemas zu ermöglichen und damit die Modellbildung zur Integration der Regelenergie zu erweitern.

**Die nachfolgend vorgestellten mathematischen Modelle sind so allgemein formuliert, dass alle Arten von positiver und negativer Regelenergie (Primär-/Sekundärregelenergie, Minuten-/Stundenreserve) mit den gleichen Modellen in der Betriebsoptimierung abgebildet werden können.**

Es wird deshalb nur bei der Beschreibung von Sonderfällen explizit auf einzelne Regelenergiearten eingegangen.



**Abbildung 3.6:** Neue durch ein Grundelement zu ermittelnde Leistungen

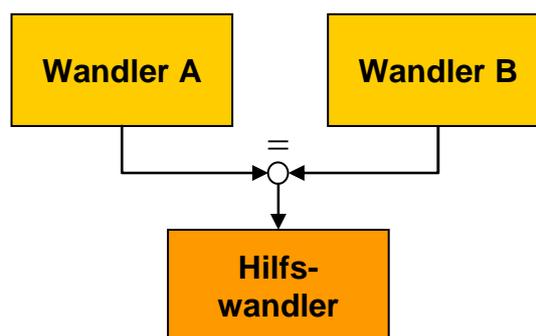
### 3.4 Knoten

Das Grundelement Knoten dient zur Verknüpfung aller übrigen Grundelemente miteinander und bewirkt im mathematischen Modell das Aufstellen einer Bilanzgleichung mit allen ein- und ausgehenden Leistungen des Knotens. In Summe muss die Bilanz dabei zu 0 ausgeglichen sein. Bei der Modellierung der Regelenergie in der Betriebsoptimierung ist es erforderlich, eine Vielzahl von Nebenbedingungen zu formulieren, bei denen der Knoten

zur Kombination von Ein- und Ausgangsgrößen der Grundelemente benötigt wird. Wird beispielsweise gefordert, dass die Maximalleistung eines Anlagenteils durch die Vorhaltung von positiver Regelleistung nicht überschritten werden darf, so formuliert sich diese Nebenbedingung nach Gleichung 3.8 folgendermaßen:

$$P_{u,t} + P_{u,t}^{RV+} \leq P_u^{MAX} \quad (3.8)$$

In der Modellbildung existieren zunächst zwei kontinuierliche Optimierungsvariablen, die  $P_{u,t}$  und  $P_{u,t}^{RV+}$  bestimmen. Modelliert man die exemplarische Nebenbedingung unter Verwendung eines Knotens, der eine ausgeglichene Bilanz fordert, so kann man dies nur erreichen, indem man eine weitere kontinuierliche Optimierungsvariable für  $P_u^{MAX}$  einführt, um der Bilanzgleichung einen Wert zwischen 0 und  $P_u^{MAX}$  wieder zu entziehen. Damit wird die Einführung eines Hilfswandlers erforderlich, wie dies in Abbildung 3.7 für zwei Wandler exemplarisch dargestellt ist.



**Abbildung 3.7:** Modellierung einer Maximalleistungsnebenbedingung

Auf Grund der Komplexität der Aufgabenstellung und der damit verbundenen Forderung nach einer effizienten Problemformulierung ist es sinnvoll, die Modellbildung des Bilanzknotens um zwei zusätzliche Bilanzarten zu erweitern, wodurch je über einen Knoten abzubildender Nebenbedingung bereits eine Variable pro Zeitintervall eingespart werden kann.

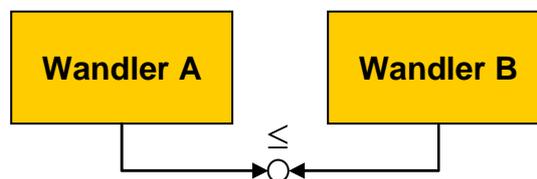
Es ergeben sich damit für die Modellbildung insgesamt drei Arten von Bilanzgleichungen mit der Formulierung laut Gleichung 3.9 bis 3.11, wobei  $i$  die am Knoten angeschlossenen Grundelemente beschreibt:

$$\text{Gleichheitsbedingung: } \sum_{i=1}^I P_{i,t} = 0 \quad (3.9)$$

$$\text{Größergleichbedingung: } \sum_{i=1}^I P_{i,t} \geq 0 \quad (3.10)$$

$$\text{Kleingleichbedingung: } \sum_{i=1}^I P_{i,t} \leq 0 \quad (3.11)$$

Dadurch ergibt sich die neue Modellierung für die Nebenbedingung nach Gleichung 3.8 in Abbildung 3.8.



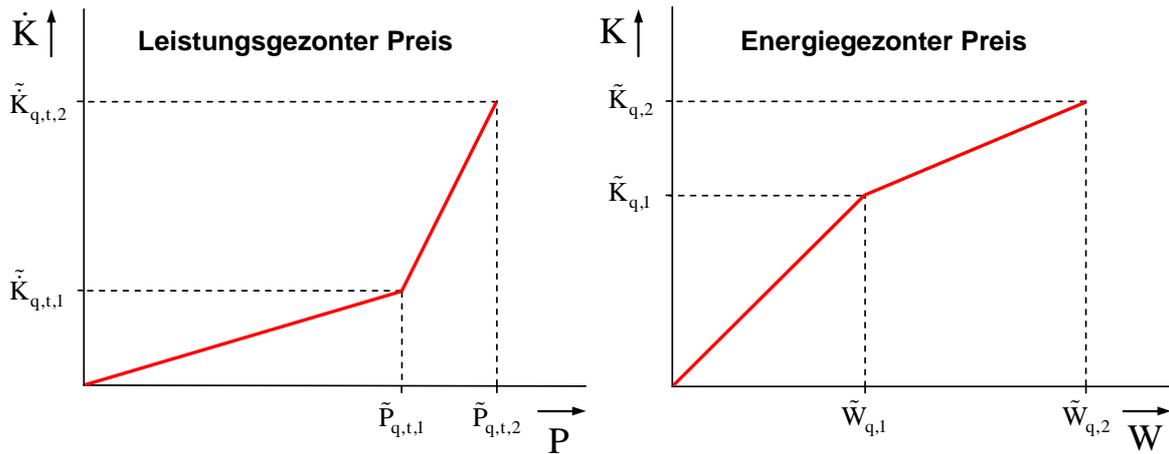
**Abbildung 3.8:** Vereinfachte Modellierung einer Maximalleistungsnebenbedingung

## 3.5 Quelle

### 3.5.1 Energiebezüge

Die Quelle dient zur Abbildung von Kosten und Erlösen, die für Mengen oder Leistungen anfallen sowie zur Abbildung von Mengen- und Leistungsrestriktionen. In den meisten Fällen bedeutet dies, dass ein beliebiger Vertrag zwischen Erzeugungssystembetreiber und einem externen Partner, über den eine Energie, Menge oder Leistung bezogen wird, mit diesem Grundelement in das Optimierungsmodell integriert wird.

In Abbildung 3.9 sind hierzu zwei typische Arten von Bezugsverträgen gezeigt. Dabei handelt es sich zum einen um einen Vertrag mit leistungsgezontem Preis, bei dem in Abhängigkeit von der im aktuellen Zeitintervall bezogenen Leistung die Kosten um einen Betrag ansteigen.



**Abbildung 3.9:** Typische Beispiele für Energiebezugsverträge

Die Gleichungen 3.12 bis 3.14 beschreiben diesen Zusammenhang mathematisch für den allgemeinen, nicht konvexen Fall über die Lambda-Formulierung. Eine Formulierung für den konvexen Fall kann nach den Gleichungen 3.3 und 3.4 analog erfolgen.

$$K_{q,t} = \dot{K}_{q,t} \cdot D_t = \sum_{s=1}^S D_t \cdot \tilde{K}_{q,t,s} \cdot \lambda_{q,t,s} \quad (3.12)$$

$$W_{q,t} = P_{q,t} \cdot D_t = \sum_{s=1}^S D_t \cdot \tilde{P}_{q,t,s} \cdot \lambda_{q,t,s} \quad (3.13)$$

$$\text{mit } \sum_{s=1}^S \lambda_{q,t,s} = 1, \quad \{\lambda_{q,t,s} \mid s = 1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \quad (3.14)$$

Zum anderen spielen sehr häufig, vor allem beim Bezug von Brennstoffmengen energiegezonnte Preise eine wichtige Rolle. Dieser Fall wird in Anlehnung an die vorstehenden Gleichungen folgendermaßen formuliert:

$$K_q = \sum_{i=1}^{S^{\text{EN}}} \tilde{K}_{q,i} \cdot \lambda_{q,i} \quad (3.15)$$

$$W_q = \sum_{i=1}^{S^{\text{EN}}} \tilde{W}_{q,i} \cdot \lambda_{q,i} = \sum_{t=1}^T D_t \cdot P_t = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S D_t \cdot \tilde{P}_{q,t,s} \cdot \lambda_{q,t,s} \quad (3.16)$$

$$\text{mit } \sum_{s=1}^S \lambda_{q,t,s} = 1, \quad \{\lambda_{q,t,s} \mid s = 1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \quad (3.17)$$

$$\text{und } \sum_{i=1}^{S^{\text{EN}}} \lambda_{q,i} = 1, \quad \{\lambda_{q,i} \mid i = 1, \dots, S^{\text{EN}}\} \in \text{SOS2} \quad (3.18)$$

Diese prinzipielle Formulierung lässt sich noch um weitere Details zur Vertragsgestaltung ergänzen. Die Gleichung 3.15 kann beispielsweise auch nur die Kosten in einem Zeitraum beschreiben, der einen Teil des Planungshorizontes umfasst. D.h. aus den verschiedenen Arbeitspreisen des energiegezentrierten Bezugsvertrags wird über unterschiedliche Preiszeiträume auch noch eine Variation der Funktion aus Abbildung 3.9 rechts innerhalb des Optimierungszeitraums ermöglicht. Zusätzlich sind in den Vertragsfällen der Abbildung 3.9 auch häufig Leistungs- oder Energiegrenzen definiert, die sich durch eine Kombination der oben aufgeführten Gleichungen abbilden lassen.

Außer zur Abbildung von Bezugsverträgen können z.B. auch reine Mengenbedingungen oder Leistungsbeschränkungen über das Grundelement realisiert werden, indem keine Kosten in die Zielfunktion eingetragen werden.

Die beschriebenen Zusammenhänge lassen sich analog zu den hier aufgeführten Zusammenhängen für Kosten gleichermaßen für Erlöse aus Lieferungen von Energie, Mengen oder Leistungen in das Modell integrieren.

### 3.5.2 Regelenergiebilanzierung

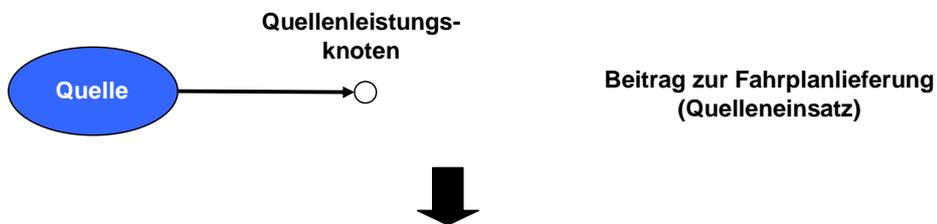
Trägt eine Quelle direkt oder indirekt zur Bereitstellung von Regelenergie bei, dann muss im Rahmen der Modellierung dafür gesorgt werden, dass zusätzlich zur Bilanzierung der Energien, Mengen oder Leistungen, die für Fahrplanlieferungen benötigt werden, auch die entsprechenden Werte für Vorhaltung und Lieferung von Regelenergie bilanziert werden.

Im Folgenden wird für die Betrachtung der Quelle der Begriff Regelenergie bzw. Regelleistung auch für die entsprechende Vorhaltung und Lieferung von Brennstoffen und anderen Energien, Mengen oder Leistungen verwendet, durch die eine Quelle indirekt zur eigentlichen, elektrischen Regelenergie beiträgt.

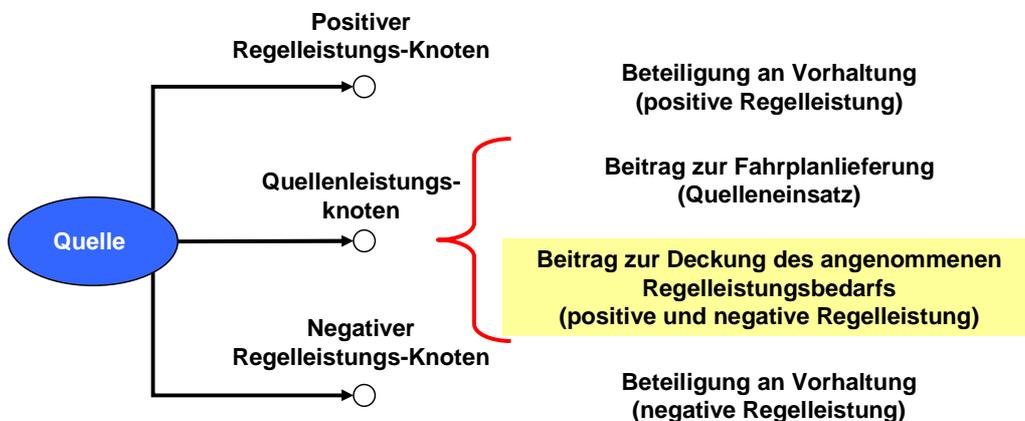
Ziel der Modellierung ist, in der Planungsrechnung den optimalen Beitrag der Quelle zur Deckung eines Regellenergiegebotes zu ermitteln, wobei gewährleistet sein muss, dass die vertraglich festgelegten Grenzen für Energien, Mengen und Leistungen durch die optimierte Vorhalteleistung bzw. -menge auch bei maximal möglichem Abruf von Regellenergie eingehalten werden. Implizit wird durch das Einplanen einer vorzuhaltenden Regelleistung bzw. -energie der Einsatzspielraum der Quelle eingeschränkt und damit die Auswirkung der Vorhaltung auf den Anlagenbetrieb abgebildet. Gleichzeitig bewirkt die Berücksichtigung der angenommenen Lieferung von Regellenergie eine Abschätzung der Auswirkungen der Gebotsabgabe auf den Deckungsbeitrag.

Es ist bei der Erweiterung der Modellierung einer Quelle zur Berücksichtigung von Regellenergie außerdem erforderlich, dass die ursprüngliche Eigenschaft des Grundelements erhalten bleiben, bei der eine Quelle über einen Knoten auch mehrere andere Grundelemente gleichzeitig aus einem Bezugsvertrag speisen kann. Abbildung 3.10 zeigt, wie die Modellierung der Quelle um zwei weitere Knoten ergänzt wird, die zur getrennten Bilanzierung von Quellenleistung zur Vorhaltung von positiver und negativer Regellenergie dienen.

**Bisherige Modellierung:**



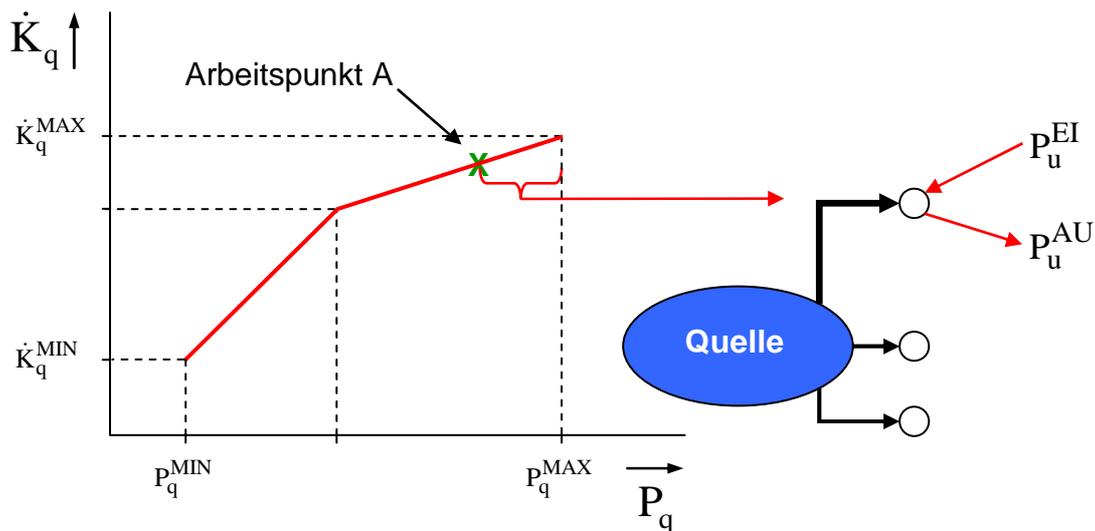
**Neue Modellierung:**



**Abbildung 3.10:** Übergang von bisheriger zu neuer Quellenmodellierung

Die Quellenleistung zur Lieferung von Regelenergie kann der Quellenleistung zur Lieferung von Fahrplanenergie zugeschlagen werden, so dass hierfür kein zusätzlicher neuer Knoten modelliert werden muss [69].

Die Modellierung nach Abbildung 3.10 dient als Basis für die mathematische Formulierung, die anhand von Abbildung 3.11 verdeutlicht werden kann.



**Abbildung 3.11:** Problematik der Regelenergiebereitstellung durch eine Quelle

In die Quellenkennlinie ist der Arbeitspunkte A eingetragen, der sich in einer Planungsrechnung ohne die Berücksichtigung von Regelenergie als optimal erwiesen hat. Im Arbeitspunkt A ist die Quelle relativ stark ausgelastet und es verbleibt nur ein kleiner Spielraum bis zur Maximalleistung, der für die Vorhaltung und Lieferung von positiver Regelenergie ausgenutzt werden kann. Umgekehrt kann in diesem Arbeitspunkt eine relativ große Leistung für negative Regelenergie bereitgestellt werden, die nur durch die Minimalleistung der Quelle beschränkt wird. Die Möglichkeit, die Quelle auszuschalten, um noch mehr negative Regelenergie liefern zu können, scheidet aus, weil Regelenergie in einem kontinuierlichen Band bereitgestellt werden muss.

Die noch freie Leistung der Quelle für einen Beitrag zur Regelenergie kann aus den zugehörigen Restriktionen und dem aktuellen Arbeitspunkt ermittelt werden, woraus sich die zulässige Vorhaltung von Regelenergie ergibt. Wie in Abbildung 3.11 für positive Regelenergie gezeigt, werden am positiven Regelleistungsknoten der Quelle die neuen Nebenbedingungen implementiert. Allgemein formuliert werden dazu unterschiedliche Ein-

gangs- und Ausgangsleistungen von Wandlern zur Bereitstellung von Regelenergie in diesem Knoten bilanziert, wobei  $P_{q,t}^{RV+}$  letztlich der Vorhalteleistung entspricht. Die mathematische Formulierung ergibt sich dann für den allgemeinen Fall mit den Gleichungen 3.19 bis 3.22:

$$P_{q,t}^{RV+} = \sum_{u=1}^U (P_{u,t}^{EI} - P_{u,t}^{AU}) = \sum_{u=1}^U \left( \sum_{s=1}^S \tilde{P}_{u,t,s}^{EI} \cdot \lambda_{u,t,s} - \sum_{s=1}^S \tilde{P}_{u,t,s}^{AU} \cdot \lambda_{u,t,s} \right) \leq 0 \quad (3.19)$$

$$\text{mit } \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} = 1, \quad \{\lambda_{u,t,s} | s = 1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \quad (3.20)$$

Mit Gleichung 3.19 wird am positiven Regelleistungsknoten der Quelle eine Vorzeichendefinition getroffen, die der Konvention entspricht, dass einer Quelle grundsätzlich nur entnommen werden kann. Um die Energieaufnahme durch eine Quelle zu modellieren, besteht die Möglichkeit, eine Vorzeichenumkehr bei den angeschlossenen Wandlern durchzuführen.

Aufbauend auf Gleichung 3.19 formuliert Gleichung 3.21 die Maximalleistungsbedingung, die bei einer zulässigen Vorhaltung von Regelenergie nicht überschritten werden darf. Die Binärvariable sorgt dabei dafür, dass die Quelle im ausgeschalteten Zustand keine Vorhalteleistung bereitstellen kann, weil die rechte Seite von Gleichung 3.21 zu 0 wird.

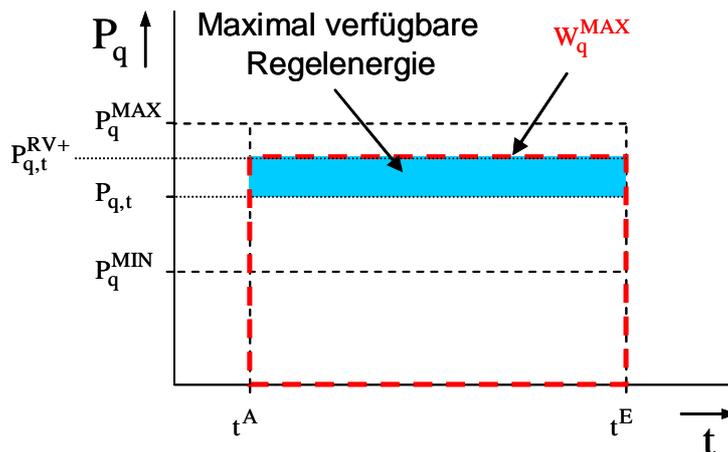
$$-P_{q,t}^{RV+} \leq P_{q,t}^{\text{MAX}} \cdot B_{q,t} \quad (3.21)$$

$$\text{wobei mit Gl. 3.19 } P_{q,t}^{RV+} \leq 0 \quad (3.22)$$

Für den Fall, dass die betrachtete Quelle einer Energiemengenbeschränkung unterliegt, ist die in Abbildung 3.12 verdeutlichte Nebenbedingung mathematisch zu formulieren. Die Abbildung zeigt die einer Quelle entnommene Energiemenge während eines Betrachtungszeitraums, für den die Energiemengenrestriktion  $W_q^{\text{MAX}}$  gelten soll. Dabei bestimmt sich aus der Dauer des Betrachtungszeitraums und der Quellenleistung die reale Energiemenge. Die obere Fläche, die eine Ergänzung bis zur Maximalleistung der Quelle darstellt, beschreibt die für die Regelenergievorhaltung maximal noch zur Verfügung stehende Energie ohne eine weitere Energiemengenrestriktion. Gleichung 3.23 beschreibt die erforderliche

derliche Nebenbedingung für den Fall, dass die maximale Regelenergie noch durch eine zusätzliche Energiemengenrestriktion eingeschränkt wird:

$$\sum_{t=t^A}^{t^E} \left( -D_t \cdot (P_{q,t}^{RV+} - P_{q,t}) \right) \leq W_q^{MAX} \leq \sum_{t=t^A}^{t^E} \left( D_t \cdot P_{q,t}^{MAX} \cdot B_{q,t} \right) \quad (3.23)$$



**Abbildung 3.12:** Vorhaltbare Regelenergie einer Quelle mit Energiemengenbeschränkung

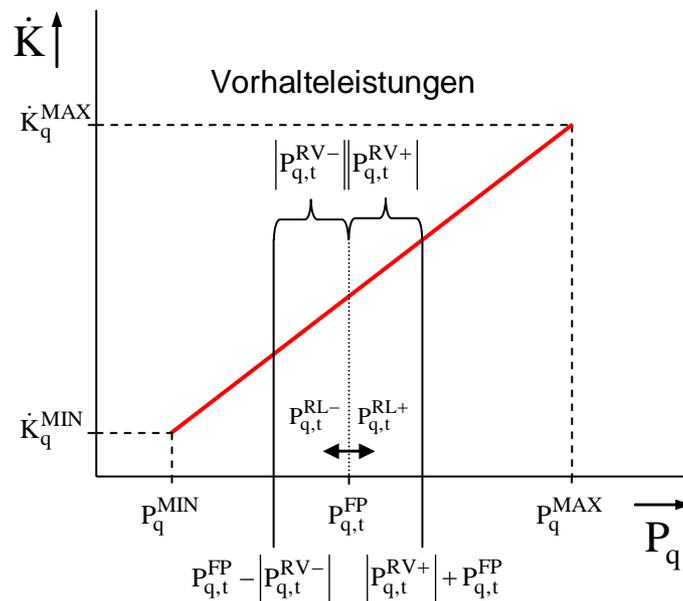
Die oben beschriebenen Gleichungen lassen sich in ähnlicher Form auch für die Bereitstellung der negativen Regelenergie formulieren. Gleichung 3.19 bleibt hierzu unverändert und dient wiederum der Definition eines eindeutigen Vorzeichens zur Entnahme aus dem Knoten für die Vorhaltung negativer Regelenergie. Gleichung 3.24 ist im Gegensatz zu Gleichung 3.21 dafür zuständig, dass die Vorhaltung negativer Regelenergie in keinem Fall eine Quellenleistung unterhalb der Minimalleistung erzwingt.

$$-P_{q,t}^{RV-} \geq P_{q,t}^{MIN} \cdot B_{q,t} \quad (3.24)$$

wobei analog zu Gl. 3.19  $P_{q,t}^{RV-} \leq 0$  (3.25)

Abbildung 3.13 verdeutlicht die Zusammenhänge der vorstehenden Gleichungen schematisch. Die Quellenleistung ist dabei nach Gleichung 3.26 die Summe aus Fahrplanleistung und zu liefernder Regelleistung, wobei positive und negative Regelleistung nie gleichzeitig zu liefern sind.

$$P_{q,t} = P_{q,t}^{FP} + P_{q,t}^{RL+} - P_{q,t}^{RL-} \tag{3.26}$$



**Abbildung 3.13:** Variablendefinition für die Quellenmodellbildung

Damit sind alle notwendigen mathematischen Formulierungen gegeben, die zur Einhaltung der oben beschriebenen Restriktionen und zur Bestimmung des optimalen Beitrags einer Quelle zur Regelenergie erforderlich sind.

### 3.6 Wandler

#### 3.6.1 Umwandlungsfunktion

Das Element Wandler verknüpft Eingangsgrößen über die Verwendung von Optimierungsvariablen mit Ausgangsgrößen über stückweise lineare Kennlinien. Damit ist es möglich, beliebige reale Anlagen zur Energiewandlung über einen oder die Verschaltung mehrerer Wandler abzubilden und damit auch den Detaillierungsgrad der Modellierung beliebig auszuwählen.

Die mathematische Formulierung entspricht dem bereits in Kapitel 3.1 vorgestellten Vorgehen zur Abbildung einer stückweise linearisierten Funktion. Für die Definition eines Wandlers sind lediglich einige Ergänzungen vorzunehmen, wie z.B. die Festlegung eines Wandlerzustandes über eine Binärvariable. Zusätzlich sind die Stützstellen der einzelnen

Kennlinien noch zeitabhängig variabel zu definieren, weil sich die Kennlinienverläufe in Abhängigkeit von schnellveränderlichen Parametern, wie z.B. Temperaturen oder Preisprognosen innerhalb des Planungshorizontes ändern können.

Die Gleichungen 3.27 und 3.28 zeigen die Modellbildung für den konvexen Fall. Die Kennlinienabschnitte werden dabei der Reihe nach durchlaufen, wenn sich die konvexe Funktion mit zunehmenden Werten negativ auf den Deckungsbeitrag auswirkt. Dann entscheidet die Aktivierung der ersten Stützstelle durch die Binäre Variable B über den Zustand des Wandlers. In den folgenden Gleichungen wird beispielhaft die Brennstoffmenge  $\dot{Q}^{BR}$  für den Wandlereingangswert und die Leistung P allgemein den für den Wandlerausgangswert eingesetzt, wobei beide Platzhalter prinzipiell durch beliebige andere Leistungsarten ersetzt werden können.

$$\dot{Q}_{u,t}^{BR} = B_{u,t} \cdot \tilde{Q}_{u,t,1}^{BR} + \sum_{s=1}^{S-1} \left( \tilde{Q}_{u,t,s+1}^{BR} - \tilde{Q}_{u,t,s}^{BR} \right) \cdot \delta_{u,t,s} \quad (3.27)$$

$$P_{u,t} = B_{u,t} \cdot \tilde{P}_{u,t,1} + \sum_{s=1}^{S-1} \left( \tilde{P}_{u,t,s+1} - \tilde{P}_{u,t,s} \right) \cdot \delta_{u,t,s} \quad (3.28)$$

Die Gleichungen 3.29 bis 3.31 zeigen die Formulierung für den allgemeinen Fall einer Kennlinie, die nicht konvex zu sein braucht. Dabei wird die Binäre Variable B in die Konvexitätsbedingung eingebracht, die nur den Wert 0 annehmen kann, wenn entweder alle Lambda-Werte auch 0 sind oder die Variable B den Wert 1 annimmt.

$$\dot{Q}_{u,t} = \sum_{s=1}^S \tilde{Q}_{u,t,s}^{BR} \cdot \lambda_{u,t,s} \quad (3.29)$$

$$P_{u,t} = \sum_{s=1}^S \tilde{P}_{u,t,s} \cdot \lambda_{u,t,s} \quad (3.30)$$

Gleichung 3.31 definiert dann die Konvexitätsbedingung für die Optimierungsvariablen  $\lambda_{u,t,s}$  unter Berücksichtigung des Zustands des Wandlers durch die Variable B:

$$\sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} - B_{u,t} = 0, \quad \left\{ \lambda_{u,t,s} \mid s = 1, \dots, S \right\} \in \text{SOS2} \quad (3.31)$$

Mit diesen Formulierungen ist gewährleistet, dass ein Wandler mit einem von 0 verschiedenen Startpunkt seiner Kennlinie immer einen definierten Zustand besitzt, der in verschiedenen Nebenbedingungen weiterverarbeitet werden kann.

Reale technische Anlagen, zu deren Abbildung der Wandler allgemein dienen soll, sind in der Regel relativ komplexe Gebilde, die in vielen Fällen nicht nur eine Eingangs- oder Ausgangsgröße haben. Wichtigstes Beispiel dafür sind die Erzeugungsanlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung, die immer mindestens zwei Ausgangsgrößen aufweisen. Mehrere Eingangsgrößen treten beispielsweise auf, sobald eine Erzeugungsanlage mehrere Brennstoffe mischen kann. Um dieser Verallgemeinerung gerecht werden zu können, hat auch das Modellelement Wandler die Möglichkeit über die Definition mehrerer Eingangs- und Ausgangsachsen zusätzliche Eingangs- und Ausgangswerte zu bestimmen.

Eine Abbildung mehrerer Eingangsgrößen an einem Wandler ist prinzipiell immer dann sinnvoll, wenn sich dadurch die Anzahl der Binärvariablen reduzieren lässt. Dies ist dann der Fall, wenn die Eingangsgrößen immer gleichzeitig den Zustand Ein oder Aus zugeordnet bekommen. Andernfalls lässt sich eine weitere Eingangsgröße immer auch über einen zusätzlichen Wandler abbilden.

Bei den Ausgangsgrößen hingegen ist es viel häufiger erforderlich, mehrere Werte durch einen Wandler bestimmen zu lassen, wenn z.B. bei einer Dampfauskopplung einer Anlage in Abhängigkeit von einem Eingangswert mehrere Dampfdruckstufen geliefert werden. Dabei werden diese in Anlehnung an Gleichung 3.30 über ein und dieselbe Optimierungsvariable ermittelt, wie dies in Gleichung 3.32 der Fall ist, wobei  $d$  die Laufvariable für die Ausgangsachsen darstellt.

$$P_{u,d,t} = \sum_{s=1}^S \tilde{P}_{u,d,t,s} \cdot \lambda_{u,t,s} \quad (3.32)$$

Sobald eine weitere Eingangsachse an einem Wandler eine Rolle spielt, muss ein zweiter Variablensatz definiert werden, der zwar die gleiche Binärvariable beinhaltet, ansonsten aber einen von den übrigen Variablensätzen unabhängigen Ausgangswert liefert. Für den allgemeinen, nicht konvexen Fall mit mehreren Ein- und Ausgangswerten ergeben sich die Gleichungen 3.33 bis 3.35 in der  $d$  die Laufvariable der Ausgangsachsen und  $j$  die Laufvariable der Variablensätze bzw. Eingangsachsen beschreibt:

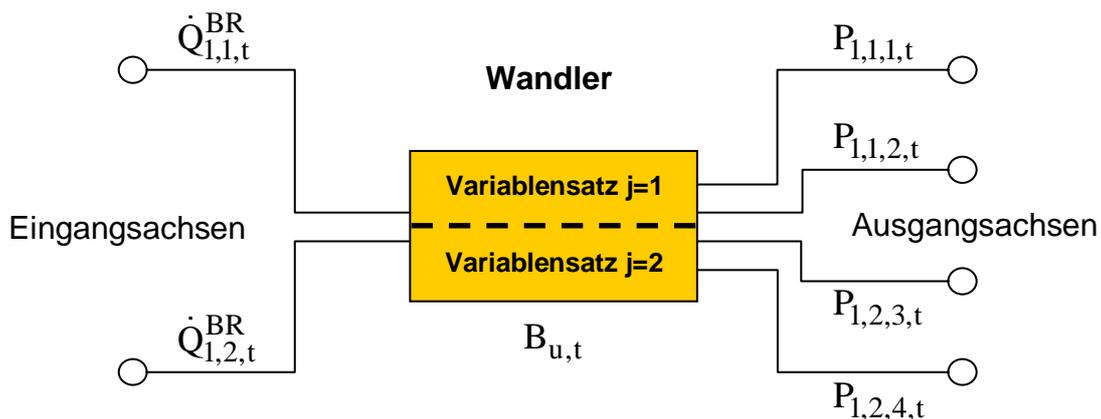
$$\dot{Q}_{u,j,t} = \sum_{s=1}^S \tilde{Q}_{u,j,t,s}^{BR} \cdot \lambda_{u,j,t,s} \tag{3.33}$$

$$P_{u,j,d,t} = \sum_{s=1}^S \tilde{P}_{u,j,d,t,s} \cdot \lambda_{u,j,t,s} \tag{3.34}$$

Gleichung 3.35 definiert die Konvexitätsbedingungen für die Optimierungsvariablen  $\lambda_{u,j,t,s}$  unter Berücksichtigung des Zustands des Wandlers:

$$\sum_{s=1}^S \lambda_{u,j,t,s} - B_{u,t} = 1, \quad \{\lambda_{u,j,t,s} \mid s = 1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \tag{3.35}$$

Die Abbildung 3.14 verdeutlicht die Definitionen für den allgemeinen Wandler in der Darstellung der systemtechnischen Modellierung:



**Abbildung 3.14:** Systemtechnische Darstellung eines allgemeinen Wandlers

### 3.6.2 Leistungsänderungsgeschwindigkeit

Bei der Modellierung eines Erzeugungssystems ist insbesondere bei der kurzfristigen Betriebsoptimierung zu berücksichtigen, dass eine reale technische Erzeugungsanlage im Allgemeinen ihre Leistung nicht beliebig schnell ändern kann, wie dies in Kapitel 2 anhand von Erzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung verdeutlicht wurde. Die Leistungsänderungsgeschwindigkeit spielt bei der Bereitstellung von Regelenergie darüber hinaus eine wesentliche Rolle für die Frage, ob ein geplantes Gebot am Regelenergiemarkt überhaupt technisch erfüllbar ist.

Für die Berücksichtigung der Leistungsänderungsgeschwindigkeit in der Modellbildung findet sich in [29] eine Lösung. Durch den Vergleich der Leistungen zweier aufeinander folgender Zeitintervalle kann eine Nebenbedingung formuliert werden, die das Einhalten der Grenzen der Leistungsänderungsgeschwindigkeit gewährleistet. Problematisch ist lediglich das An- und Abfahren eines Wandlers, denn bei einer kleinen zulässigen Leistungsänderungsgeschwindigkeit muss ein Leistungssprung von 0 auf die Minimalleistung bzw. von der Minimalleistung auf 0 möglich sein. Dies wird in der Lösung aus [29] über An- und Abfahrvariablen gelöst, die einem Wandler zugeordnet werden.

Bei der Modellierung der Regelenergie werden allerdings für die getrennte Berücksichtigung von positiver und negativer Regelenergie zumindest zwei Achsen an einem Wandler benötigt, die ihre Leistung auch von 0 auf eine Minimalleistung bzw. umgekehrt ändern können. Dies kann auch erforderlich sein, wenn der Wandler in den vorangegangenen Zeitintervallen bereits eingeschaltet war oder eingeschaltet bleibt. Zur Anwendung kommt dies z.B. bei der Bestimmung der vorzuhaltenden Regelleistung durch einen Wandler, wenn dieser im gesamten Zeitraum eingeschaltet ist, das zu deckende Regelenergiegebot aber nur einen Teil des gesamten Zeitraums umfasst.

Deswegen wird eine geänderte Modellbildung eingeführt, die eine achsenbezogene Definition der Leistungsänderungsgeschwindigkeit ermöglicht und dabei die Leistung der Achse im vorhergehenden bzw. im nachfolgenden Zeitintervall auswertet. Beträgt die Leistung im vorhergehenden oder im nachfolgenden Zeitintervall 0, dann kann ein Leistungssprung von 0 auf einen vorgegebenen Minimalwert oder von einem vorgegebenen Maximalwert auf 0 erfolgen.

Bei der Formulierung einer Nebenbedingung für die Leistungsänderungsgeschwindigkeit muss zwischen positiver und negativer zulässiger Änderungsgeschwindigkeit unterschieden werden, weil diese in vielen Fällen voneinander abweichen. Die Gleichungen 3.36 bis 3.39 beschreiben dabei die Leistungsänderungsnebenbedingung:

$$P_{u,d,t+1} - P_{u,d,t} - \Psi_{u,d,t}^+ \cdot P_{u,d,t}^{AN+} \leq \dot{P}_{u,d,t}^{MAX} \quad (3.36)$$

$$P_{u,d,t} - P_{u,d,t+1} - \Psi_{u,d,t}^- \cdot P_{u,d,t}^{AB-} \leq \dot{P}_{u,d,t}^{MAX} \quad (3.37)$$

$$\Psi_{u,d,t}^+ + P_{u,d,t} \leq 1 \quad (3.38)$$

$$\Psi_{u,d,t}^- + P_{u,d,t+1} \leq 1 \quad (3.39)$$

Gleichung 3.36 beschreibt dabei die positive Leistungsänderung zwischen zwei Zeitintervallen, die stets kleiner sein muss als die Vorgabe auf der rechten Seite der Gleichung, solange der Wandler in Betrieb ist. Hat die Achse eine Leistung von 0, kann über Gleichung 3.38 die binäre Variable  $\Psi_{u,d,t}^+$  für die positive Leistungsänderung den Wert 1 annehmen und somit die vorgegebene Minimalleistung  $P_{u,d,t}^{AN+} + \dot{P}_{u,d,t}^{MAX}$  angefahren werden. Dieser Wert ist vor Beginn der Optimierung frei wählbar. Im Fall der negativen Leistungsänderungsgeschwindigkeit greifen die Gleichungen 3.37 und 3.39 analog. Bei der Bestimmung der zulässigen Leistungsänderung zwischen zwei Zeitintervallen wird  $\dot{P}_{u,d,t}^{MAX}$  nach Gleichung 3.40 entsprechend der Länge der zwei betrachteten Zeitintervalle bestimmt.

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Leistung des Wandlers im Zeitintervall  $t$  jeweils genau in der Mitte des Zeitintervalls erreicht wird.

$$\dot{P}_{u,d,t}^{MAX} = \dot{P}_{u,d,t}^{MAX} \cdot \left( \frac{1}{2} D_t + \frac{1}{2} D_{t+1} \right) \quad (3.40)$$

Bei realen Anlagen ist zusätzlich in vielen Fällen eine Leistungsänderung mit zusätzlichen Kosten verbunden. Diese können durch eine Verkürzung der Lebensdauer oder durch einen erhöhten Energieverbrauch während der Leistungsänderung begründet sein. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, eine Leistungsänderung in der Betriebsoptimierung auch mit Kosten zu bewerten. Die Gleichungen 3.41 und 3.42 definieren hierzu die Kosten für positive Leistungsänderungen, die Gleichungen 3.43 und 3.44 für negative Leistungsänderungen.

$$P_{u,d,t+1} - P_{u,d,t} - \Delta P_{u,d,t}^+ \leq 0 \quad (3.41)$$

$$K_{u,d,t}^{LÄ+} = \Delta P_{u,d,t}^+ \cdot k_{u,d,t}^{LÄ+} \quad (3.42)$$

$$P_{u,d,t} - P_{u,d,t+1} - \Delta P_{u,d,t}^- \leq 0 \quad (3.43)$$

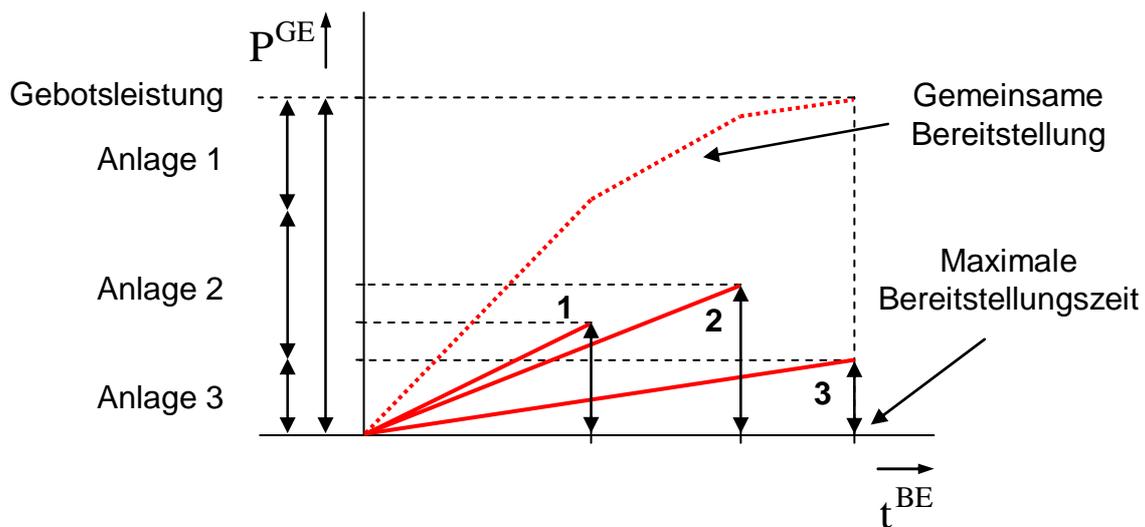
$$K_{u,d,t}^{\text{LÄ}^-} = \Delta P_{u,d,t}^- \cdot k_{u,d,t}^{\text{LÄ}^-} \quad (3.44)$$

Damit ist die Möglichkeit einer Definition von achsenbezogenen Leistungsänderungsgeschwindigkeiten gegeben, die als Voraussetzung für die Modellierung der Regelenergie im Rahmen der Betriebsplanung benötigt werden.

### 3.6.3 Regelenergiebereitstellung durch mehrere Wandler

Eine Beteiligung kleinerer Erzeugungsanlagen an der Bereitstellung von Regelenergie wird dadurch erschwert, dass die Übertragungsnetzbetreiber bei der Ausschreibung die Höhe eines Mindestgebotes festlegen können. Wollen Betreiber kleinerer Anlagen auch am Regelenergiemarkt teilnehmen, so müssen sie entweder mehrere eigene Erzeugungsanlagen zusammen für eine Gebotsabgabe einplanen oder eine Kooperation mit anderen Erzeugungssystembetreibern anstreben. In beiden Fällen müssen in die Betriebsoptimierung die Restriktionen des geplanten Gebotes integriert werden. Die eingeplanten Erzeugungsanlagen müssen zusammen die geforderte Regelleistung aufbringen können und die je nach Regelenergieart erforderliche Zeit, innerhalb derer die Regelleistung zur Verfügung stehen muss, ist auf jeden Fall einzuhalten.

Abbildung 3.15 zeigt schematisch, wie die Erbringung von Regelenergie durch mehrere Erzeugungsanlagen gewährleistet werden kann. Hierzu lässt sich eine minimale mittlere Leistungsänderungsgeschwindigkeit mit Gleichung 3.45 definieren, aus der man umgeformt erkennen kann, wie die mathematische Formulierung im Rahmen der GGLP über die beiden Gleichungen 3.46 und 3.47 für die Vorhaltung von Regelenergie realisiert werden kann. Dabei bewirkt Gleichung 3.46 die Erfüllung der Leistung des Regelenergiegebotes, die Gleichung 3.47 definiert für jede der beteiligten Anlagen eine Höchstzeit für die Bereitstellung ihres Beitrags. Beide Gleichungen sind sowohl für die Vorhaltung von Regelenergie als auch für die Deckung der angenommenen Regelleistungsganglinie separat zu formulieren, damit die Betriebsoptimierung die Kosten für die Vorhaltung wie auch für die Lieferung von Regelenergie korrekt berücksichtigt. Die Formulierung ist darüber hinaus für positive und negative Regelenergie getrennt durchzuführen.



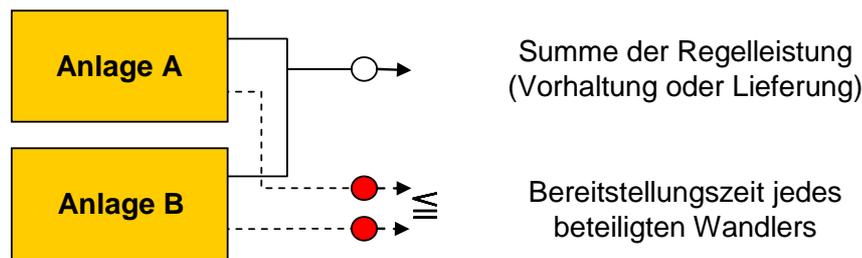
**Abbildung 3.15:** Deckung eines Regelenergiegebots durch mehrere Erzeugungsanlagen

$$\left. \frac{d\bar{P}}{dt^{BE}} \right|^{RV,MIN} = \frac{\sum_{u=1}^U P_{u,t}^{RV}}{t^{BE,MAX}} = \frac{P_{1,t}^{RV}}{t^{BE,MAX}} + \dots + \frac{P_{U,t}^{RV}}{t^{BE,MAX}} \quad (3.45)$$

$$\sum_{u=1}^U P_{u,t}^{RV} = P_{g,t} \quad (3.46)$$

$$t_{u,t}^{BE} \leq t^{BE,MAX} \quad \text{mit } u = 1, \dots, U \quad (3.47)$$

Diese Modellbildung lässt sich im Rahmen der Modellierung eines Erzeugungssystems mit den Grundelementen der systemtechnischen Modellierung realisieren, wie dies in Abbildung 3.16 gezeigt ist. Dazu werden jedem an der Regelung potentiell beteiligten Wandler zusätzlich zwei Ausgangswerte zugeordnet, die zum einen in den Leistungsbilanzknoten und zum anderen in den Bereitstellungszeitknoten einfließen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Betriebsoptimierung frei entscheiden kann, welche Anlagen die Regelleistung für ein Gebot bereitstellen, weil gleichzeitig immer die erforderlichen Randbedingungen für die Bereitstellung eingehalten werden.



**Abbildung 3.16:** Modellierung der Bereitstellung durch mehrere Erzeugungsanlagen

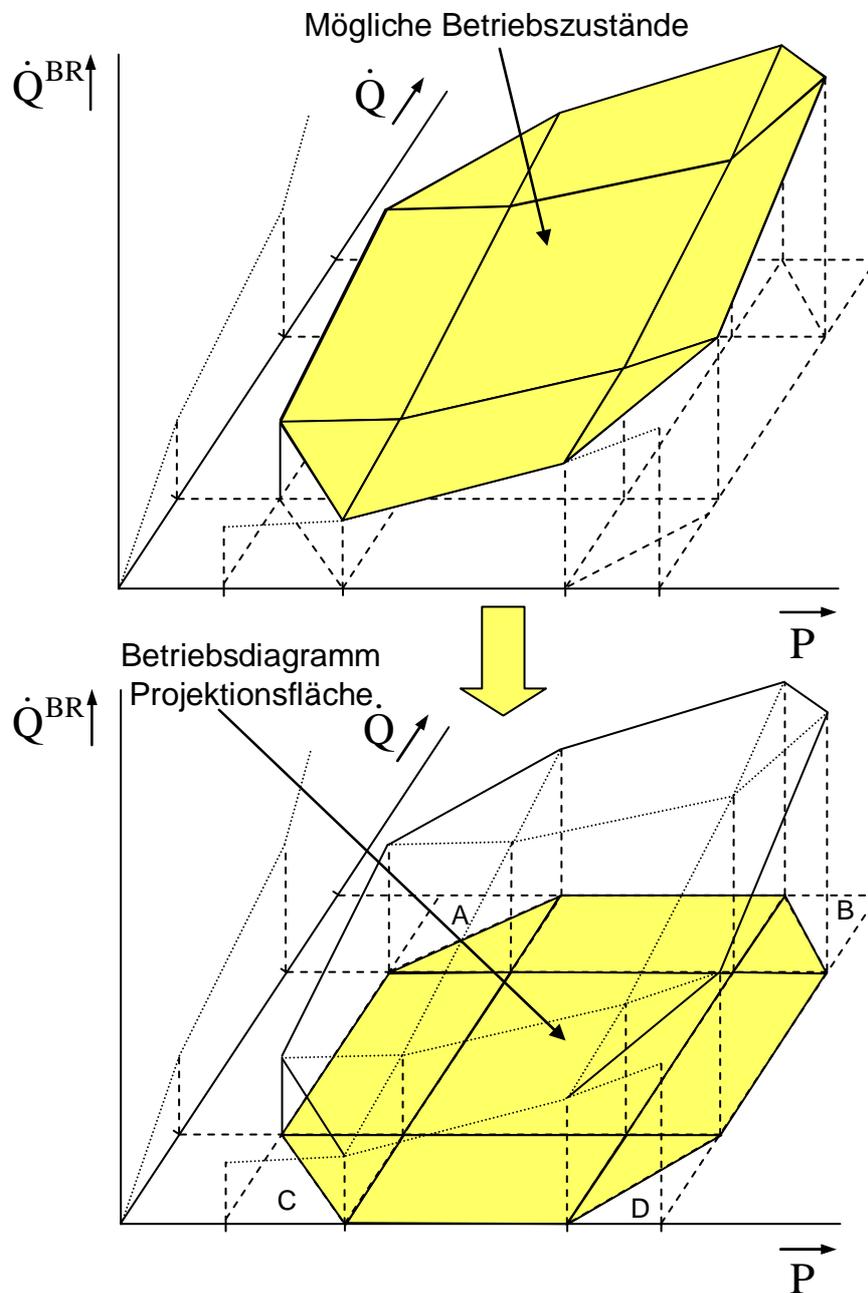
### 3.6.4 Betriebsdiagramme bei der Kraft-Wärme-Kopplung

Die Bereitstellung von Regelenergie durch Erzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung stellt für die Betriebsoptimierung eine besondere Herausforderung dar. In vielen Fällen wird die gekoppelte Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie über die Integration eines Betriebsdiagramms in die Planungsrechnung eingeführt, das die Grenzen der gekoppelten Erzeugung und den zugehörigen Primärenergieverbrauch beschreibt.

Zur mathematischen Modellbildung der Betriebsdiagramme gibt es zwei verschiedene Ansätze, die in [29] bzw. [54] vorgeschlagen werden. In [29] wird dazu die in Kapitel 2.4.2 dargestellte, allgemein dreidimensionale Form des Betriebsdiagramms über die Zerlegung in kleine, zweidimensionale Teilflächen angenähert abgebildet. Die aufwändige Modellbildung ist jedoch nicht geeignet, um eine Integration der Restriktionen der Regelenergie zu ermöglichen. Die in [54] vorgeschlagene Modellbildung ist weniger umfangreich und verwendet eine Linearkombination zweier Funktionen zur Beschreibung des Primärenergieverbrauchs. Dies hat sich im praktischen Einsatz zur Abbildung von Betriebsdiagrammen bereits vielfach bewährt und bietet darüber hinaus Erweiterungsmöglichkeiten zur Integration der bei der Berücksichtigung von Regelenergie zu modellierenden Restriktionen. Abbildung 3.17 zeigt schematisch ein Beispiel für die hier gewählte Beschreibung.

Zunächst wird die Projektionsfläche des Betriebsdiagramms ermittelt. Jedem Punkt dieser Fläche kann eindeutig eine thermische und elektrische Erzeugung zugeschrieben werden [42]. In den verschiedenen Ecken der zweidimensionalen Fläche des Betriebsdiagramms sind in vielen Fällen Bereiche abgetrennt, die auf Grund technischer Restriktionen nicht angefahren werden können. Dies lässt sich in der Modellierung durch die Definition von

Grenzgeraden realisieren, die als weitere Nebenbedingungen in das Optimierungsproblem eingepflegt werden.



**Abbildung 3.17:** Aufbereitung eines Betriebsdiagramms

Beschreibt das Betriebsdiagramm eine Entnahme-Kondensationsmaschine sind die typischerweise zusätzlich zu den Maximal- und Minimalleistungen von thermischer und elektrischer Erzeugung zu modellierenden Grenzen näher in [54] analysiert und deswegen hier nur kurz aufgezählt:

- A Maximaler Dampfdurchsatz des Niederdruckturbinenteils
- B Maximale Dampferzeugerleistung wird erreicht
- C Minimale Dampferzeugerleistung wird erreicht
- D Minimale Niederdruckturbinenleistung bzw. Gegendruckgerade

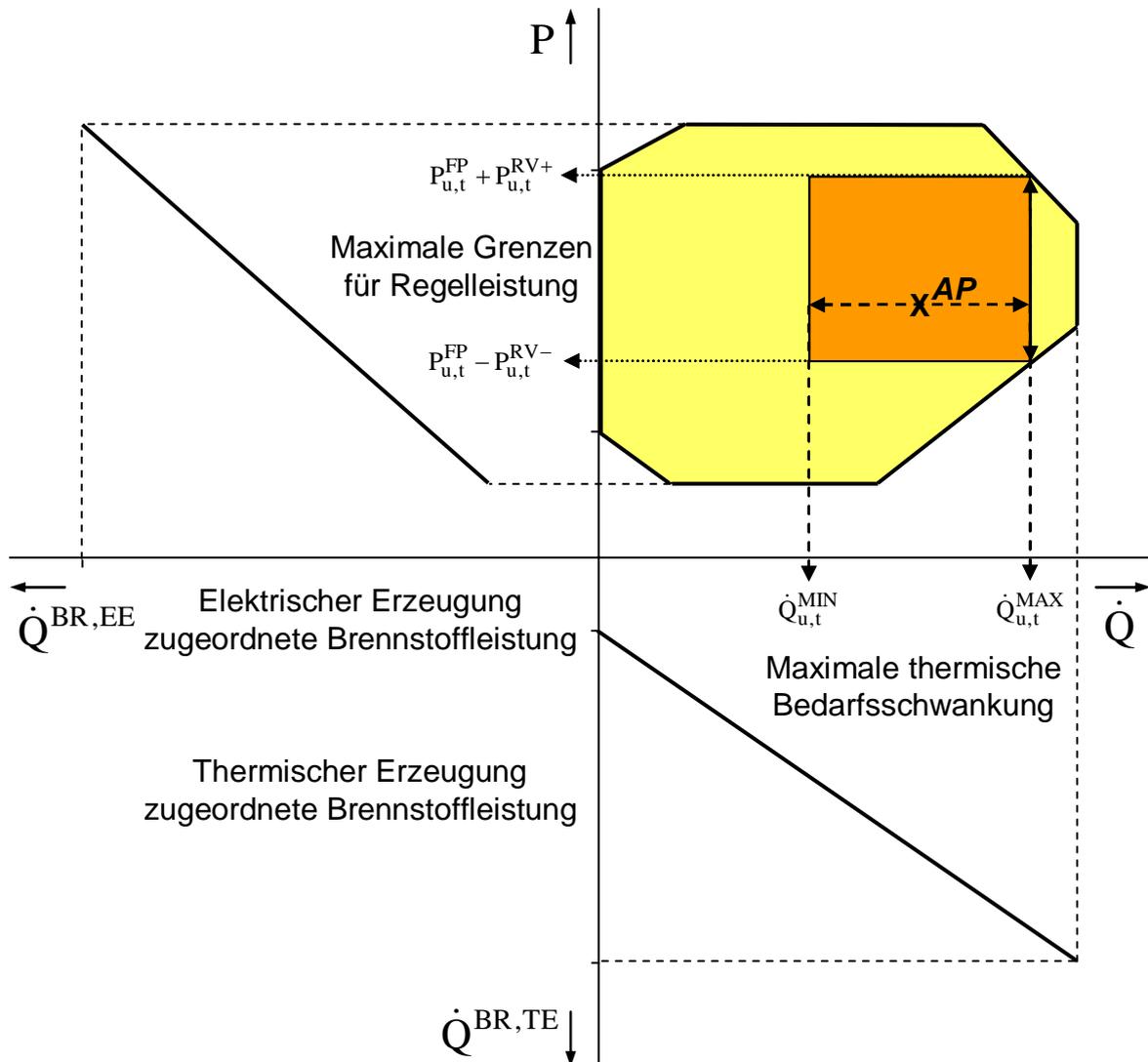
Wird die Berücksichtigung einer potentiellen Regelleistungslieferung in der Modellierung des Wandlers erforderlich, dann muss dafür gesorgt sein, dass in jedem Fall einer Lieferung und Vorhaltung von Regelenergie die Grenzen der thermischen Auskopplung berücksichtigt werden.

In Bild 3.18 wird gezeigt, wie auf Basis der in 3.17 ermittelten Projektionsfläche eine Zuordnung des Primärenergieverbrauchs zur Erzeugung thermischer und elektrischer Energie vorgenommen wird und welche Restriktionen durch die Regelenergie zusätzlich integriert werden müssen.

Die Prognose der benötigten thermischen und elektrischen Last ist immer mit Unsicherheiten verbunden. Bei der elektrischen Erzeugung werden die Abweichungen von der Prognose durch die Regelenergie und die Stundenreserve ausgeglichen, so dass der einzelne Erzeuger einen zuverlässigen Fahrplan für die zu liefernde elektrische Energie aufstellen kann. Die thermische Erzeugung wird in der Regel nur von wenigen Anlagen für ein Erzeugungssystem aufgebracht, so dass der Betriebsplaner die Verantwortung für die Deckung von Prognoseabweichungen alleine trägt und diese bereits in seiner Optimierung berücksichtigen muss. Wird insbesondere ein Gebot für Regelenergie in die Optimierung integriert, dann muss bei einer Erzeugungsanlage zur gekoppelten Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie über die Modellbildung des Betriebsdiagramms gewährleistet werden, dass auch im Fall einer angenommenen Schwankungsbreite der thermischen Erzeugung das Regelenergiegebot erfüllt werden kann.

In Abbildung 3.18 ist hierzu in Abhängigkeit eines Arbeitspunktes (AP) die angenommene Schwankungsbreite der thermischen Erzeugung eingetragen. Daraus resultiert, dass sich innerhalb des Betriebsdiagramms ein kleineres Rechteck eintragen lässt, das zu gegebenem Arbeitspunkt eine Grenze für die Bereitstellung positiver und negativer Regelleistung definiert. Innerhalb dieser Fläche lässt sich auch im Fall einer extremen Bereitstel-

lungsanforderung jeder Betriebspunkt anfahren, so dass eine zuverlässige Deckung der Lieferverpflichtungen, thermisch wie elektrisch, gewährleistet ist.



**Abbildung 3.18:** Modellbildung des Betriebsdiagramms einer KWK-Anlage

Die Gleichungen 3.48 und 3.49 beschreiben die Definition dieses Regelleistungsrechtecks mathematisch:

$$P_{u,t}^{RV+} \leq \text{Min} \left\{ P_{u,t}^{\text{MAX}} \left( \dot{Q}_{u,t}^{\text{MIN}} \right); P_{u,t}^{\text{MAX}} \left( \dot{Q}_{u,t}^{\text{MAX}} \right) \right\} - P_{u,t}^{\text{FP}} \quad (3.48)$$

$$P_{u,t}^{RV-} \leq P_{u,t}^{\text{FP}} - \text{Max} \left\{ P_{u,t}^{\text{MIN}} \left( \dot{Q}_{u,t}^{\text{MIN}} \right); P_{u,t}^{\text{MIN}} \left( \dot{Q}_{u,t}^{\text{MAX}} \right) \right\} \quad (3.49)$$

In den Gleichungen 3.48 und 3.49 können jeweils die maximalen und minimalen Leistungen am Rand des Rechtecks eingesetzt werden, weil auf Grund der Definition der zusätzlichen Grenzen des Betriebsdiagramms über die in Gleichung 3.50 exemplarisch formulierten Geraden kein kleineres zulässiges Gebiet im Betriebsdiagramm formuliert werden kann.

$$P \leq a_i \cdot \dot{Q} + b_j \quad \text{und} \quad P \geq a_k \cdot \dot{Q} + b_h \quad (3.50)$$

Um die Beschreibung des Betriebsdiagramms allgemein zu halten, wird für die thermische Erzeugung, analog zu den Gleichungen 3.48 und 3.49 formuliert:

$$\dot{Q}_{u,t}^{VO+} \leq \text{Min} \left\{ \dot{Q}_{u,t}^{\text{MAX}} \left( P_{u,t}^{RV-} \right); \dot{Q}_{u,t}^{\text{MAX}} \left( P_{u,t}^{RV+} \right) \right\} - \dot{Q}_{u,t}^{\text{FP}} \quad (3.51)$$

$$\dot{Q}_{u,t}^{VO-} \leq \dot{Q}_{u,t}^{\text{FP}} - \text{Max} \left\{ \dot{Q}_{u,t}^{\text{MIN}} \left( P_{u,t}^{RV-} \right); \dot{Q}_{u,t}^{\text{MIN}} \left( P_{u,t}^{RV+} \right) \right\} \quad (3.52)$$

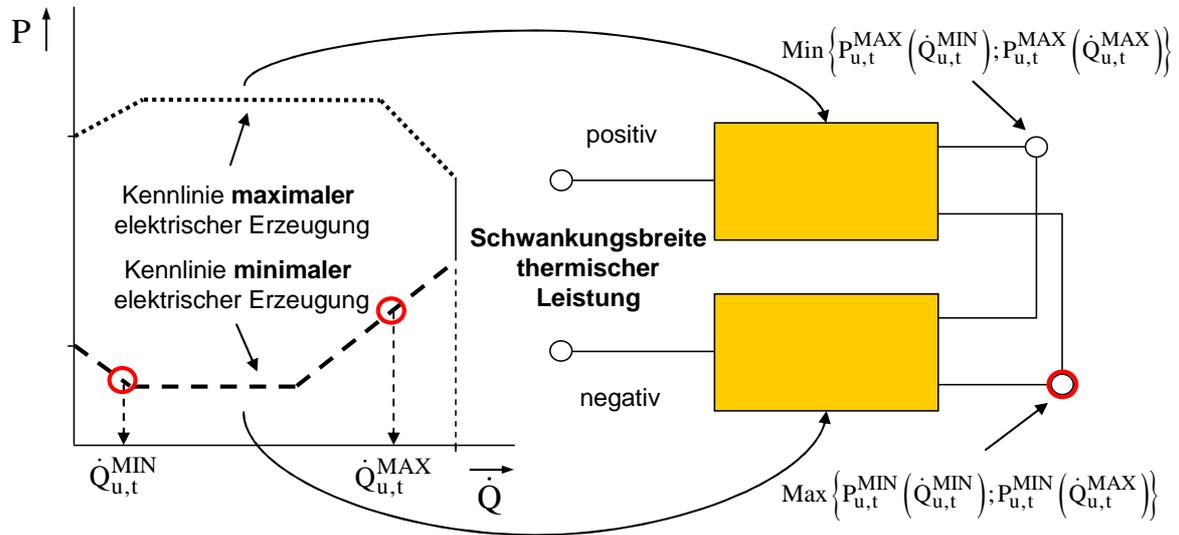
Die Modellbildung nach den vorstehenden Gleichungen erfordert jeweils die Ermittlung eines Maximal- und Minimalwertes aus den Grenzen des Betriebsdiagramms. Die Grenzbestimmung muss dazu durch die Optimierung selbst durchgeführt werden, weil die beschriebenen Grenzen vom aktuellen Arbeitspunkt abhängig sind.

Dazu werden die in Abbildung 3.19 dargestellten Kennlinien der maximalen und minimalen elektrischen Erzeugung aus dem Betriebsdiagramm ermittelt und dazu verwendet, in Abhängigkeit der Schwankungsbreite der thermischen Erzeugung die maximale und minimale zulässige elektrische Erzeugung zu bestimmen. Es muss dann lediglich bestimmt werden, ob durch die minimale oder die maximal thermische Erzeugung der Grenzwert für die elektrische Erzeugung am stärksten eingeschränkt wird.

Das Ergebnis dieser Modellierung sind die maximalen und minimalen Grenzen für die Vorhalteleistung, die sich aus dem Betriebsdiagramm ergeben, so dass die Gleichungen 3.48 und 3.49 auf diese Weise abgebildet werden. Über eine analoge Vorgehensweise könnten auch die Gleichungen 3.51 und 3.52 umgesetzt werden.

Die Maximal- bzw. Minimalleistung an den Knoten rechts im Abbildung 3.19 muss aus den Achsenwerten der die beiden Kennlinien abbildenden Wandler ermittelt werden. Dazu

werden die folgenden zusätzlichen Nebenbedingungen eingeführt, die in Abbildung 3.20 verdeutlicht werden.



**Abbildung 3.19:** Ermittlung von Grenzkennlinien aus dem Betriebsdiagramm

Für die Maximalleistung in einem Zeitintervall  $t$ , die unter  $I$  verschiedenen Wandlerachsen ermittelt werden soll, kann formuliert werden:

$$\tilde{P}_{t,s}^{MAX} = \text{Max} \left\{ \tilde{P}_{i,t,s} \mid i = 1, \dots, I; s = 1, \dots, S \right\} \quad (3.53)$$

$$P_{i,t} - \delta_t^{MAX} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX} \leq 0 \quad (3.54)$$

$$P_{i,t} - \delta_t^{MAX} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX} + B_{i,t}^{MAX} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX} \geq 0 \quad (3.55)$$

$$\sum_{i=1}^I B_{i,t}^{MAX} \leq I-1 \quad \text{mit } i = 1, \dots, I \quad (3.56)$$

Gleichung 3.53 wählt aus allen Stützstellen der auf Maximalleistung zu untersuchenden Wandlerachsen die größte aus. Durch die Gleichung 3.54 wird erreicht, dass der Term  $\delta_t^{MAX} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX}$  immer einen Wert annehmen muss, der größer oder gleich als alle Leistungen der angeschlossenen Wandlerachsen ist. Zusätzlich verhindert Gleichung 3.55, dass der majorisierende Term aus 3.54 einen größeren Wert als die aktuelle Maximalleistung annimmt, indem die Binärvariable laut Gleichung 3.56 nur  $(I-1)$  mal den Wert 1 annehmen

darf. Dadurch ist gewährleistet, dass 3.54 mindestens einmal den Wert 0 annimmt und damit  $\delta_t^{MAX} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX}$  den Maximalleistungswert beschreibt.

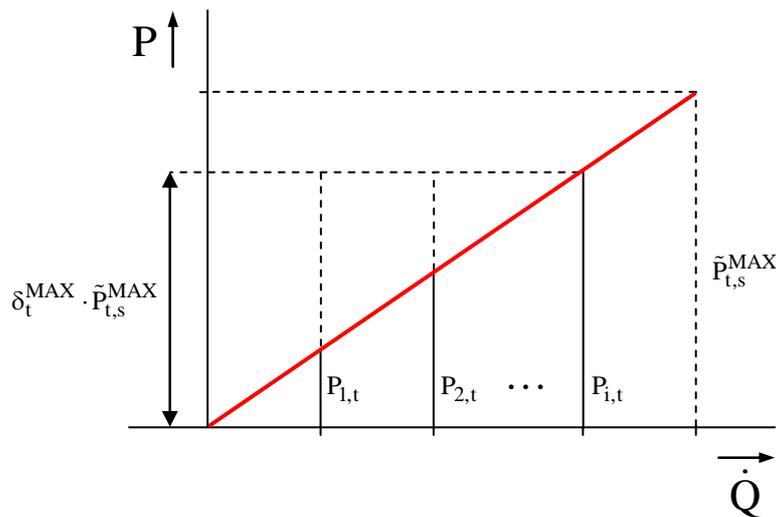
Für die Minimalleistung in einem Zeitintervall t, die aus I verschiedenen Wandlerachsen ermittelt werden soll, ergibt sich analog zur Maximalleistungsbestimmung die folgende Formulierung:

$$\tilde{P}_{t,s}^{MAX} = \text{Max} \{ \tilde{P}_{1,t,s} | i = 1, \dots, I; s = 1, \dots, S \} \tag{3.57}$$

$$P_{i,t} - \delta_t^{MIN} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX} \geq 0 \tag{3.58}$$

$$P_{i,t} - \delta_t^{MIN} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX} - B_{i,t}^{MIN} \cdot \tilde{P}_{t,s}^{MAX} \leq 0 \tag{3.59}$$

$$\sum_{i=1}^I B_{i,t}^{MIN} \leq I - 1 \quad \text{mit } i = 1, \dots, I \tag{3.60}$$



**Abbildung 3.20:** Bestimmung der Maximal- bzw. Minimalleistung mehrerer Wandler

Die Modellbildung des Betriebsdiagramms ist so allgemein gehalten, dass nicht nur eine Kraft-Wärme-Kopplung damit abgebildet werden kann, sondern jede beliebige gekoppelte Erzeugung zweier Produkte umsetzbar ist. Die analogen Überlegungen zur Abbildung 3.19 würden zusätzlich zur elektrischen Regelenergie auch die Formulierung einer "Regelenergie" für ein zweites Produkt ermöglichen, z.B. für die Abbildung einer Dampfaus-

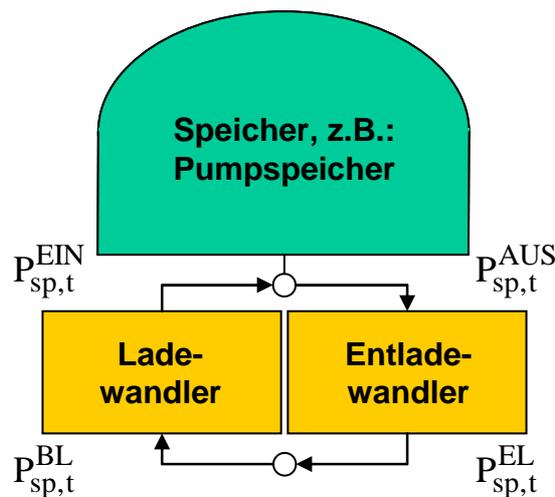
kopplung für die industrielle Produktion, bei der ebenfalls sehr schnell auf Änderungen des Verbraucherverhaltens reagiert werden muss.

## 3.7 Speicher

### 3.7.1 Energiespeicherung

Bei der hier verwendeten Modellierung besteht ein Speicher grundsätzlich aus drei Komponenten, die in Abbildung 3.21 aufgeführt sind. Damit lassen sich alle spezifischen Eigenschaften der in Kapitel 2 angesprochenen Speichertypen modellieren.

Das zentrale Element, der Speicher selbst, stellt das Bilanzelement dar, in dem die ein- und ausgespeicherte Leistung zum Energieinhalt des Speichers bilanziert wird. Dabei ist es möglich, dem Speicher einen inhaltsabhängigen Verlustfaktor mitzugeben, der z.B. bei der Abbildung einer thermischen Speicherung erforderlich ist.



**Abbildung 3.21:** Allgemeine Modellierung eines Energiespeichers

Die Bilanzierung des Speicherinhalts wird allgemein durch eine Kontinuitätsgleichung realisiert:

$$W_{sp,t} = W_{sp,t-1} + D_t \cdot (P_{sp,t}^{EIN} - P_{sp,t}^{AUS}) \quad (3.61)$$

$$\text{mit } W_{\text{sp},t} = W_{\text{sp},t}^{\text{MAX}} \cdot \delta_{\text{sp},t} \text{ wobei } \delta_{\text{sp},t} = \left[ \left( \frac{W_{\text{sp},t}^{\text{MIN}}}{W_{\text{sp},t}^{\text{MAX}}} \right), \dots, 1 \right] \quad (3.62)$$

Durch die Definition in Gleichung 3.62 wird ermöglicht, dass ein Maximal- und Minimalwert für den Speicherinhalt vorgegeben werden kann, während Gleichung 3.61 jeweils zwei aufeinander folgende Zeitintervalle bei der Bestimmung des aktuellen Speicherinhalts berücksichtigt. Formuliert man diese Gleichung für jedes Zeitintervall des Betrachtungszeitraums, dann ist eine vollständige Beschreibung der Speicherbilanz möglich. Die beiden Wandler zum Laden und Entladen des Speichers entsprechen in ihrer Funktion dem gewöhnlichen, bereits vorgestellten Wandlermodell und können durch entsprechende Kennlinienanpassungen die bei der Ein- und Ausspeicherung auftretenden Verluste und die minimale und maximale Speicherleistung abbilden.

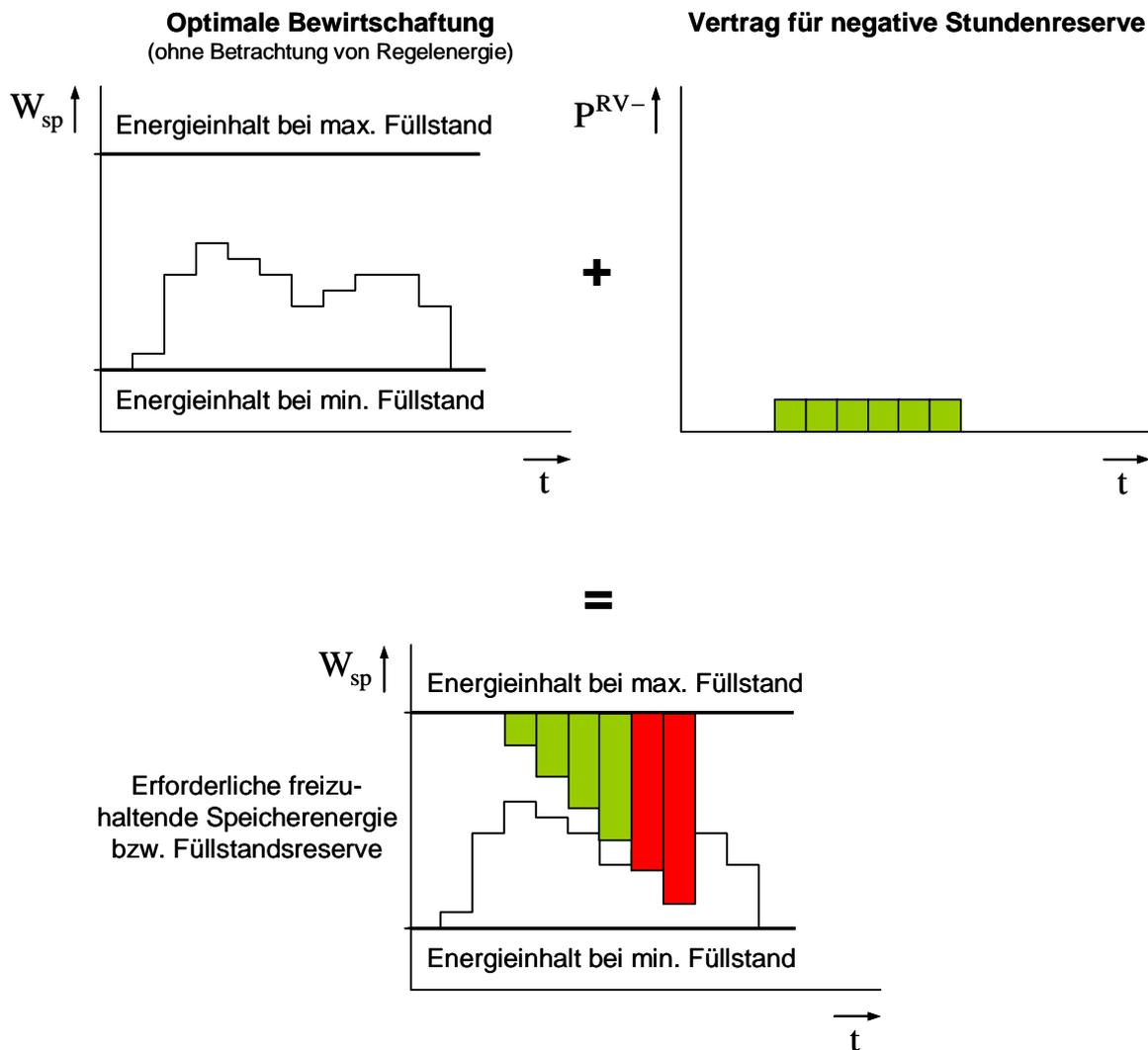
### 3.7.2 Regelenergiebilanzierung

Die Analyse in Kapitel 2 hat verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, wie Pumpspeicher- und Speicherkraftwerke prinzipiell an eine Bereitstellung von Regelenergie beteiligt werden können. Je nach Betriebszustand der Anlage ergeben sich dabei unterschiedliche Regelleistungen, die abgegeben werden können. Die Abbildung dieser möglichen Regelleistungsabgabe kann durch zusätzliche Wandler und Wandlerachsen in der Speichermodellierung berücksichtigt werden, ohne dafür Änderungen an der mathematischen Modellbildung durchzuführen.

Neben der Bilanzierung der Speicherleistungen ist zusätzlich eine Bilanzierung der Vorkhaltung von Regelenergie zu integrieren, um die erforderliche Arbeitsverfügbarkeit für die Regelenergiebereitstellung zu gewährleisten. Dazu sind zwei Randbedingungen entscheidend:

- Ist der Energieinhalt des Speichers ausreichend, um die vorgehaltene positive Regelenergie für den gesamten Gebotszeitraum abgeben zu können?
- Ist im Speicher genügend Kapazität vorhanden, um die vorgehaltene negative Regelenergie für den gesamten Gebotszeitraum aufnehmen zu können?

Das Beispiel aus Abbildung 3.22 verdeutlicht die Problematik. Dabei ist zunächst der optimale Speicherfahrplan eines Pumpspeicherkraftwerks gegeben, dessen Betrieb zwischen maximalem und minimalem Füllstand erfolgen muss.



**Abbildung 3.22:** Beispiel für notwendige Füllstandsreserve durch Regelenergiegebote

Soll ein Gebot für negative Minutenreserve über das Pumpspeicherkraftwerk abgedeckt werden, wie dies rechts für 6 Zeitintervalle angenommen ist, dann zeigt die Grafik darunter, welche Speicherkapazität durch das Pumpspeicherkraftwerk während des Gebotszeitraums vorgehalten werden muss.

Es ist zu erkennen, dass der ehemals optimale Speicherfahrplan bei gleichzeitiger Gebotsabgabe nicht mehr eingehalten werden kann. Die dadurch vom ehemaligen Optimum ab-

weichende Fahrweise des Pumpspeicherkraftwerks verursacht zwangsläufig Kosten, die den Erlösen der Regelennergiebereitstellung gegenüberstehen.

Zur mathematischen Beschreibung sind zusätzlich Kontinuitätsgleichungen in Analogie zu Gleichung 3.61 zu formulieren. Dabei ist zunächst eine Erweiterung der oben beschriebenen Speichergleichung um den Anteil der zu liefernden positiven und negativen Regelleistung vorzunehmen. Diese wird schließlich am Speicherknoten, an den auch Lade- und Entladewandler angeschlossen sind formuliert:

$$W_{sp,t} = W_{sp,t-1} + D_t \cdot (P_{sp,t}^{EIN} - P_{sp,t}^{AUS} + P_{sp,t}^{RL-} - P_{sp,t}^{RL+}) \quad (3.63)$$

$$\text{mit } W_{sp,t} = W_{sp,t}^{MAX} \cdot \delta_{sp,t} \text{ wobei } \delta_{sp,t} = \left[ \left( \frac{W_{sp,t}^{MIN}}{W_{sp,t}^{MAX}} \right), \dots, 1 \right] \quad (3.64)$$

Neben dieser Erweiterung, die eine Bilanzierung der Lieferung von positiver und negativer Regelennergie durchführt, ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass ein Speicher keine Regelennergie erzeugen kann. Die durch einen Speicher vorgehaltene Regelennergie muss durch das Erzeugungssystem selbst oder über andere Bezugsverträge wieder ausgeglichen werden können, wie dies in Abbildung 3.23 an einem Beispiel gezeigt wird. Dieser Bilanzausgleich sollte prinzipiell innerhalb des Betrachtungshorizontes erfolgen. Durch den Einsatz des Speichers zur Bereitstellung von Regelennergie wird deshalb vor allem die Leistungsänderungsgeschwindigkeit als Restriktion zur Bereitstellung von Regelennergie entschärft.

Es muss also für die vorgehaltene Regelennergie wiederum über Kontinuitätsgleichungen eine Bilanz gebildet werden:

$$W_{sp,t}^{RV+} = W_{sp,t-1}^{RV+} + D_t \cdot (P_{sp,t}^{RV+,EIN} - P_{sp,t}^{RV+,AUS}) \quad (3.65)$$

$$\text{mit } W_{sp,t}^{RV+} = W_{sp,t}^{RV+,MAX} \cdot \delta_{sp,t}^{RV+}$$

$$\text{wobei } \delta_{sp,t}^{RV+} = \left[ \left( \frac{W_{sp,t}^{RV+,MIN}}{W_{sp,t}^{RV+,MAX}} \right), \dots, 1 \right] \quad (3.66)$$

$$W_{sp,t}^{RV-} = W_{sp,t-1}^{RV-} + D_t \cdot (P_{sp,t}^{RV-,EIN} - P_{sp,t}^{RV-,AUS}) \quad (3.67)$$

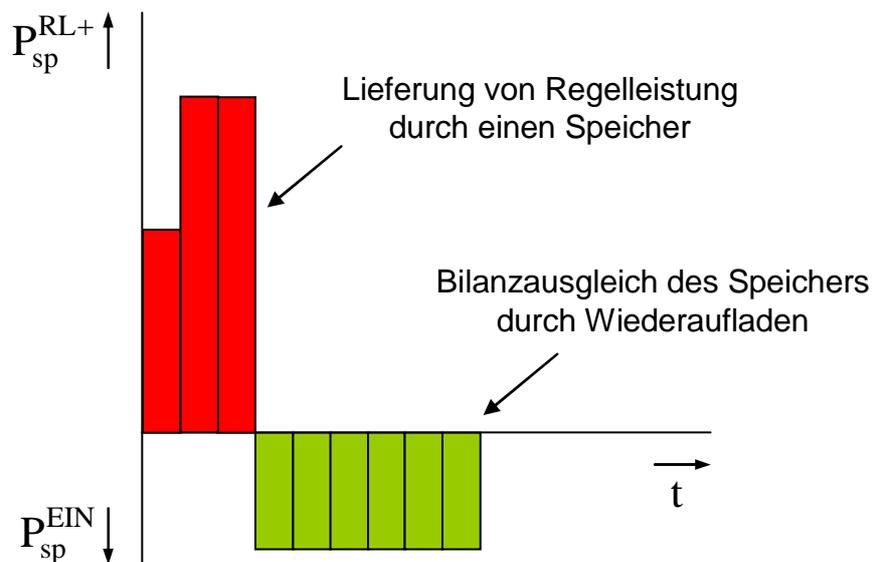
mit  $W_{sp,t}^{RV-} = W_{sp,t}^{RV-,MAX} \cdot \delta_{sp,t}^{RV-}$

wobei  $\delta_{sp,t}^{RV-} = \left[ \left( \frac{W_{sp,t}^{RV-,MIN}}{W_{sp,t}^{RV-,MAX}} \right), \dots, 1 \right]$  (3.68)

Zur Verknüpfung der Gleichungen 3.63, 3.65 und 3.77 muss dann eine weitere Nebenbedingung formuliert werden, die dafür sorgt, dass die obere und untere Speicherinhaltsgrenze auf jeden Fall eingehalten werden:

$$W_{sp,t} + W_{sp,t}^{RV-} \leq W_{sp,t}^{MAX} \quad (3.69)$$

$$W_{sp,t} - W_{sp,t}^{RV+} \geq W_{sp,t}^{MIN} \quad (3.70)$$



**Abbildung 3.23:** Beispiel für die Regellenergiebilanzierung

Der bereits angesprochene Bilanzausgleich bei der Vorhaltung von Regelenergie wird ebenfalls über zwei weitere Nebenbedingungen realisiert, die mit Gleichung 3.71 und 3.72 definiert werden können:

$$W_{sp,t^A}^{RV-} - W_{sp,t^E}^{RV-} = 0 \quad (3.71)$$

$$W_{sp,t^A}^{RV+} - W_{sp,t^E}^{RV+} = 0 \quad (3.72)$$

Dabei können innerhalb des Betrachtungshorizontes auch beliebige Zwischenzeiträume angegeben werden, innerhalb derer diese Bedingungen eingehalten werden müssen. Weiterhin ist es sinnvoll, einen Übertrag dieser Bilanzwerte zu ermöglichen, wenn beispielsweise eine unvorhergesehene Prognoseabweichung ein Einhalten im letzten Planungszeitraum unmöglich gemacht hat. Dazu kann die rechte Seite der Gleichung mit einem von 0 verschiedenen Wert belegt werden.

## 3.8 Ganglinie

### 3.8.1 Energielieferungen

Das Grundelement Ganglinie bietet die Möglichkeit, jede Art von Zeitreihen in die Betriebsoptimierung zu integrieren. Die Werte der Ganglinie in den einzelnen Zeitintervallen werden bei der mathematischen Modellbildung in die Knotenbilanz eingetragen, an der die Ganglinie angeschlossen ist. Kombiniert mit den drei verschiedenen Knotenbilanzen, die in Kapitel 3.4 vorgestellt wurden, ergeben sich eine Vielzahl von Anwendungen für die Modellierung von Erzeugungssystemen, bei denen das Grundelement Ganglinie Verwendung findet.

Die Hauptaufgabe der Ganglinie ist allerdings die Abbildung von Energielieferungen in Form von Fahrplänen. Die Gleichungen 3.73 bis 3.75 zeigen die mathematische Formulierung für die drei allgemeinen Fälle, wobei  $i$  die am Knoten angeschlossenen Grundelemente bezeichnet:

$$\text{Gleichheitsbedingung: } \sum_{i=1}^I P_{i,t} = P_{ga,t} \quad (3.73)$$

$$\text{Größergleichbedingung: } \sum_{i=1}^I P_{i,t} \geq P_{ga,t} \quad (3.74)$$

$$\text{Kleingleichbedingung: } \sum_{i=1}^I P_{i,t} \leq P_{ga,t} \quad (3.75)$$

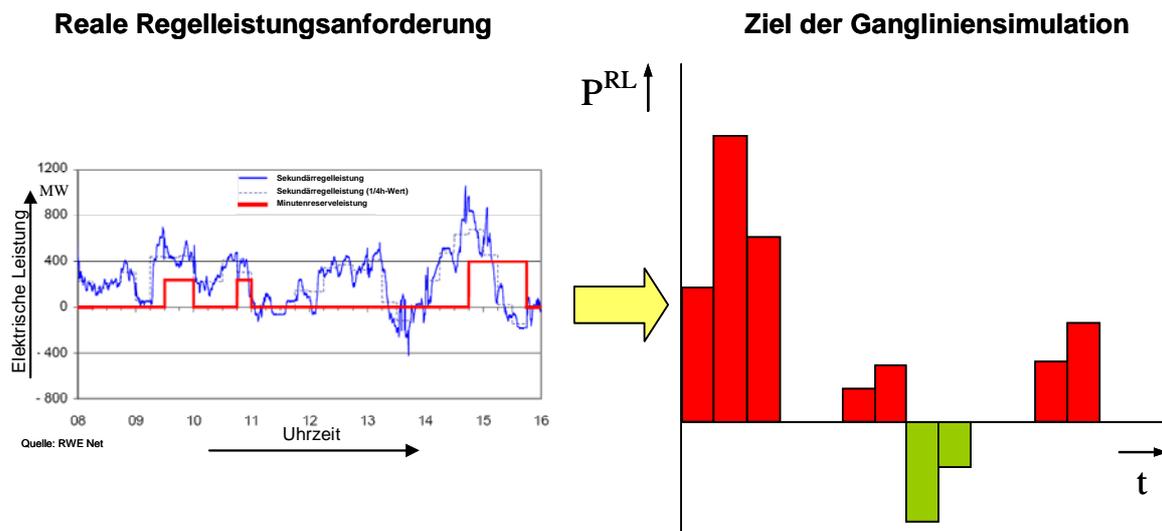
Gleichung 3.73 wird für die meisten Fälle von Energielieferungen anzuwenden sein, weil ein gegebener Fahrplan für die Lieferung von Energie in der Regel exakt einzuhalten ist. Die Modellierung von Energielieferungen über das Grundelement Ganglinie kann in speziellen Fällen aber auch zur Abbildung von Restriktionen verwendet werden, wodurch die Anwendung der Gleichungen 3.74 und 3.75 sinnvoll wird. Beispielsweise kann die Abgabe von Wärme an ein Gewässer als eine "Energielieferung" aufgefasst werden und über eine Ganglinie abgebildet werden, die in Abhängigkeit von der prognostizierten Durchflussmenge eine maximal zulässige Wärmeabgabe definiert. In diesem Fall wäre Gleichung 3.75 die passende mathematische Formulierung. Gleichung 3.74 wäre sinnvoll anzuwenden, wenn bei einer vereinbarten Energielieferung, z.B. für thermische Energie, eine minimal aufzubringende Wärmeleistung in Form eines Fahrplans vorgegeben wird. Für den gesamten Betrachtungszeitraum kann dann zusätzlich eine einzuhaltende Energie definiert werden, so dass der Erzeugungsanlagenbetreiber letztlich einen zusätzlichen Planungsspielraum erhält.

### 3.8.2 Lieferung von Regelenergie

Zur Integration der zu liefernden Regelenergie in die Betriebsoptimierung wird eine zufällige Ganglinie ermittelt, die auf Basis der in Kapitel 2.2 vorgestellten charakteristischen Daten bestimmt wird. Abbildung 3.24 verdeutlicht das Ziel der Ganglinienbestimmung, eine möglichst realitätsnahe Regelenergieanforderung für positive und negative Regelenergie zu simulieren.

Die dabei entscheidenden, charakterisierenden Parameter werden aus Abbildung 3.24 erkennbar und sind in Abbildung 3.25 beispielhaft eingetragen:

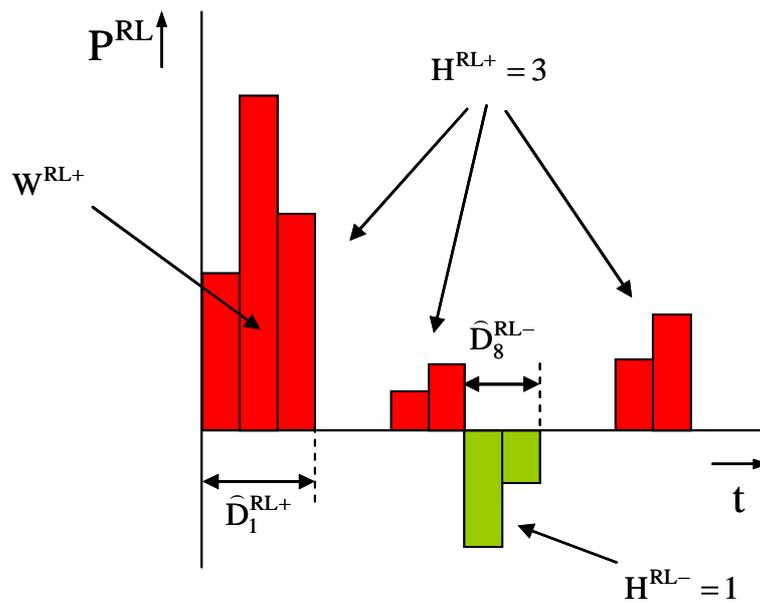
- Häufigkeit, mit der ein Regelleistungsabruf erfolgt:  $H^{RL}$
- Dauer eines Regelleistungsabrufs:  $\hat{D}^{RL}$
- Höhe der Regelleistung:  $P^{RL}$
- Zu erbringende Regelenergie:  $W^{RL}$



**Abbildung 3.24:** Ziel der Gangliniensimulation

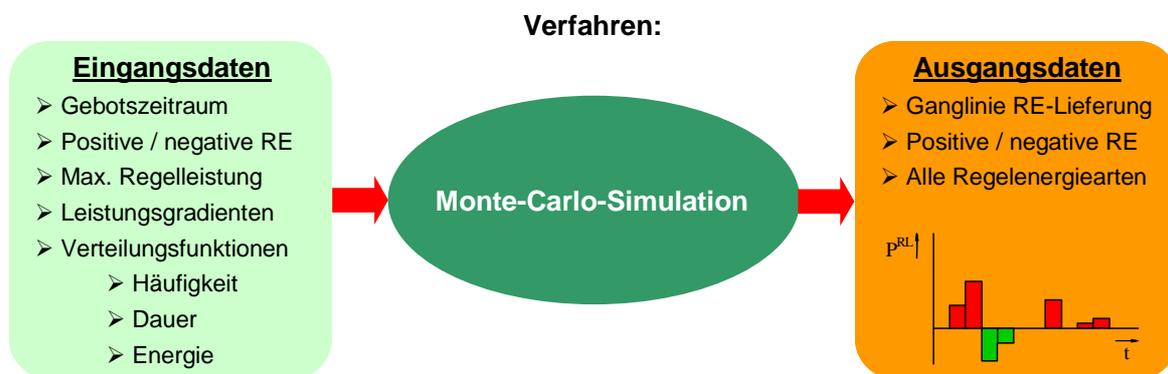
Darüber hinaus können diese Parameter für positive und negative Regelenergie einer Regelenergieart variieren, so dass eine getrennte Charakterisierung erforderlich ist. Aus der Abbildung 3.24 wird außerdem deutlich, dass die zeitdiskrete Betrachtung einer Betriebsplanung gerade in Bezug auf die Primär- und Sekundärregelenergie starke Vereinfachungen verglichen mit der Realität treffen muss, weil die minimalen Zeitschritte bei einer Tagesplanung in der Regel 15 Minuten nicht unterschreiten und damit zu groß für detailliertere Betrachtungen sind. Umso mehr ist es deswegen wichtig, die Charakteristik des Regelenergieeinsatzes möglichst gut nachzubilden.

Um aus einer Reihe von historischen Regelleistungsanforderungen eine Charakteristik abzuleiten, kann diese durch Verteilungsfunktionen der einzelnen charakteristischen Größen beschrieben werden. Dabei kann angenommen werden, dass sich die beschriebenen Größen ausreichend genau jeweils über eine Normalverteilung beschreiben lassen [35].



**Abbildung 3.25:** Beispiel zur Charakterisierung einer Regelleistungsganglinie

Zur Ermittlung der Ganglinie wird eine Monte-Carlo-Simulation verwendet, die unter Verwendung von Zufallszahlen eine zu definierende Zielfunktion optimiert [33]. Durch diese Vorgehensweise kann dafür gesorgt werden, dass zum einen eine zufällige Ganglinie ermittelt wird, zum anderen aber auch die charakteristischen Parameter, die das Verhalten der Regelenergieanforderung beschreiben, Berücksichtigung finden können. Dazu wird durch die Monte-Carlo-Simulation so lange eine Reihe von Regelleistungswerten gewürfelt, bis die durch die charakteristischen Daten vorgegebenen Randbedingungen erfüllt werden. Abbildung 3.26 zeigt die Konzeption der Simulation und die erforderlichen Eingangsdaten.



**Abbildung 3.26:** Verfahren zur Ermittlung einer zufälligen Regelleistungsganglinie

Zusätzlich zu den Parametern, die das stochastische Verhalten beschreiben, sind sowohl die maximale Regelleistung und der Zeitraum des Gebotes als auch der von der Regelenergieart abhängige maximale Leistungsgradient als Eingangswert der Simulation erforderlich. Die zu ermittelnde Ganglinie kann sowohl für positive oder negative Regelenergie bestimmt werden, als auch für positive und negative Regelenergie in einem gemeinsamen Gebotszeitraum.

Zum Aufbau einer Monte-Carlo-Simulation wird aus den gegebenen Daten die in Gleichung 3.76 formulierte Zielfunktion gebildet, die eine Bewertung der Lösungsgüte der aktuell ermittelten Ganglinie ermöglicht:

$$Z^{\text{MS}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{RL}} \cdot D_t = W^{\text{RL}} \quad (3.76)$$

Diese Zielfunktion wird für den jeweiligen Gebotszeitraum formuliert und wird jeweils für positive und negative Regelenergie getrennt aufgestellt. Als Kriterium für eine zufriedenstellende Ganglinie kann dann ein Abbruchkriterium angegeben werden, wobei die gewünschte Genauigkeit über die Faktoren  $v_1$  und  $v_2$  eingestellt werden kann:

$$E\{W^{\text{RL}}\} - v_1 \cdot \sigma^{W^{\text{RL}}} \leq W^{\text{RL}} \leq E\{W^{\text{RL}}\} + v_2 \cdot \sigma^{W^{\text{RL}}} \quad (3.77)$$

Bei der Bestimmung der Regelleistung für ein einzelnes Zeitintervall können die charakteristischen Daten einfließen und dadurch die Anzahl der Iterationen, die im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden müssen, wirkungsvoll reduziert werden. Allgemein gilt für den Erwartungswert der gewürfelten Regelleistung unter Annahme stochastischer Unabhängigkeit der Zufallsgrößen:

$$E\{P^{\text{RL}}\} = f\left(E\{W^{\text{RL}}\}, E\{H^{\text{RL}}\}, E\{\hat{D}^{\text{RL}}\}\right) = \frac{E\{W^{\text{RL}}\}}{E\{H^{\text{RL}}\} \cdot E\{\hat{D}^{\text{RL}}\}} \quad (3.78)$$

Zu diesem Zusammenhang lässt sich die resultierende Standardabweichung mit Gleichung 3.79 angeben:

$$\sigma^{P^{RL}} = \sqrt{\left(\frac{dP^{RL}}{dW^{RL}} \cdot \sigma^{W^{RL}}\right)^2 + \left(\frac{dP^{RL}}{dH^{RL}} \cdot \sigma^{H^{RL}}\right)^2 + \left(\frac{dP^{RL}}{d\hat{D}^{RL}} \cdot \sigma^{\hat{D}^{RL}}\right)^2} \quad (3.79)$$

Wobei sich für die einzelnen Terme der Gleichung 3.79 folgendes ergibt:

$$\frac{dP^{RL}}{dW^{RL}} = \frac{1}{H^{RL} \cdot \hat{D}^{RL}} \quad (3.80)$$

$$\frac{dP^{RL}}{dH^{RL}} = \frac{W^{RL}}{\hat{D}^{RL}} \cdot \frac{-1}{\left(H^{RL}\right)^2} \quad (3.81)$$

$$\frac{dP^{RL}}{d\hat{D}^{RL}} = \frac{W^{RL}}{H^{RL}} \cdot \frac{-1}{\left(\hat{D}^{RL}\right)^2} \quad (3.82)$$

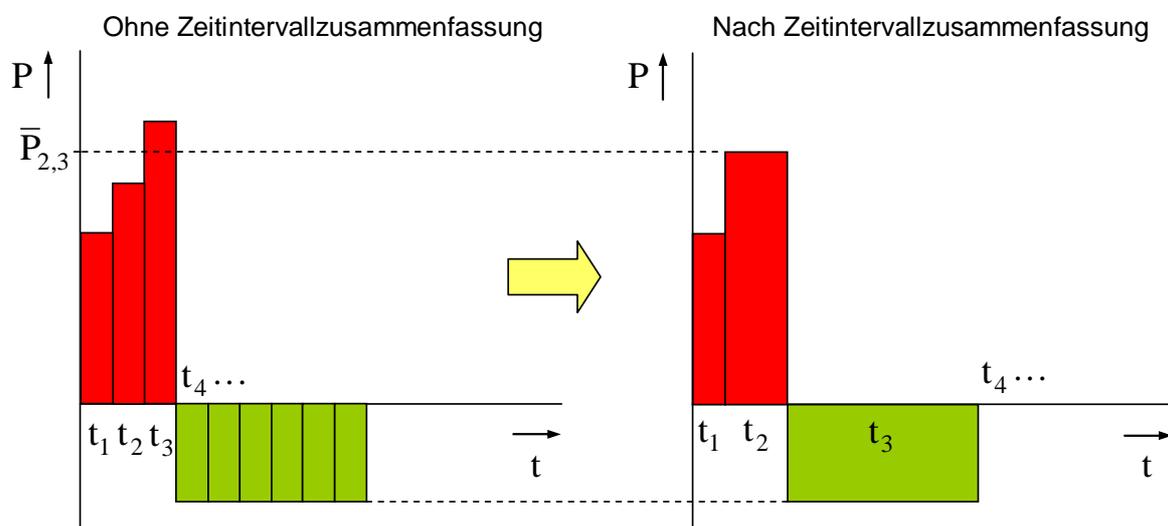
Damit lässt sich für die Regelleistung eine Zufallsvariable durch die Simulation ermitteln, die der berechneten Verteilung genügt. Dies erfolgt programmtechnisch auf Basis der Angaben aus [41] unter Verwendung zweier gleichverteilter, voneinander unabhängiger Zufallszahlen aus dem Intervall  $[0,1[$ , die in die Gleichung 3.83 eingesetzt die gewünschte Regelleistungsgröße für ein bestimmtes Zeitintervall ergeben:

$$P_t^{RL} = E\left\{P^{RL}\right\} + \sigma^{P^{RL}} \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln y_1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot y_2) \quad (3.83)$$

Die übrigen charakteristischen Größen werden dann verwendet, um den Lösungsraum für die Monte-Carlo-Simulation konvergenzfördernd weiter einzuschränken und die Zeitintervalle zu bestimmen, in denen eine Lieferung von Regelenergie eingeplant werden soll. Zunächst wird ein Wert für die Häufigkeit analog der Gleichung 3.83 der Normalverteilung genügend ermittelt. Diese Einsätze werden dann gleichverteilt im betrachteten Zeitraum definiert und jedem Einsatz ein ebenfalls normalverteilter Wert für die Dauer des Einsatzes zugeschrieben. Die Regelleistung wird dann nur für die auf diese Weise bestimmten Zeitintervalle wie oben beschrieben berechnet. Abschließend werden die ermittelten Regelleistungseinsätze durch Einsetzen in die Zielfunktion überprüft und entschieden, ob eine weitere Iteration erforderlich ist.

### 3.8.3 Monte-Carlo-Simulation

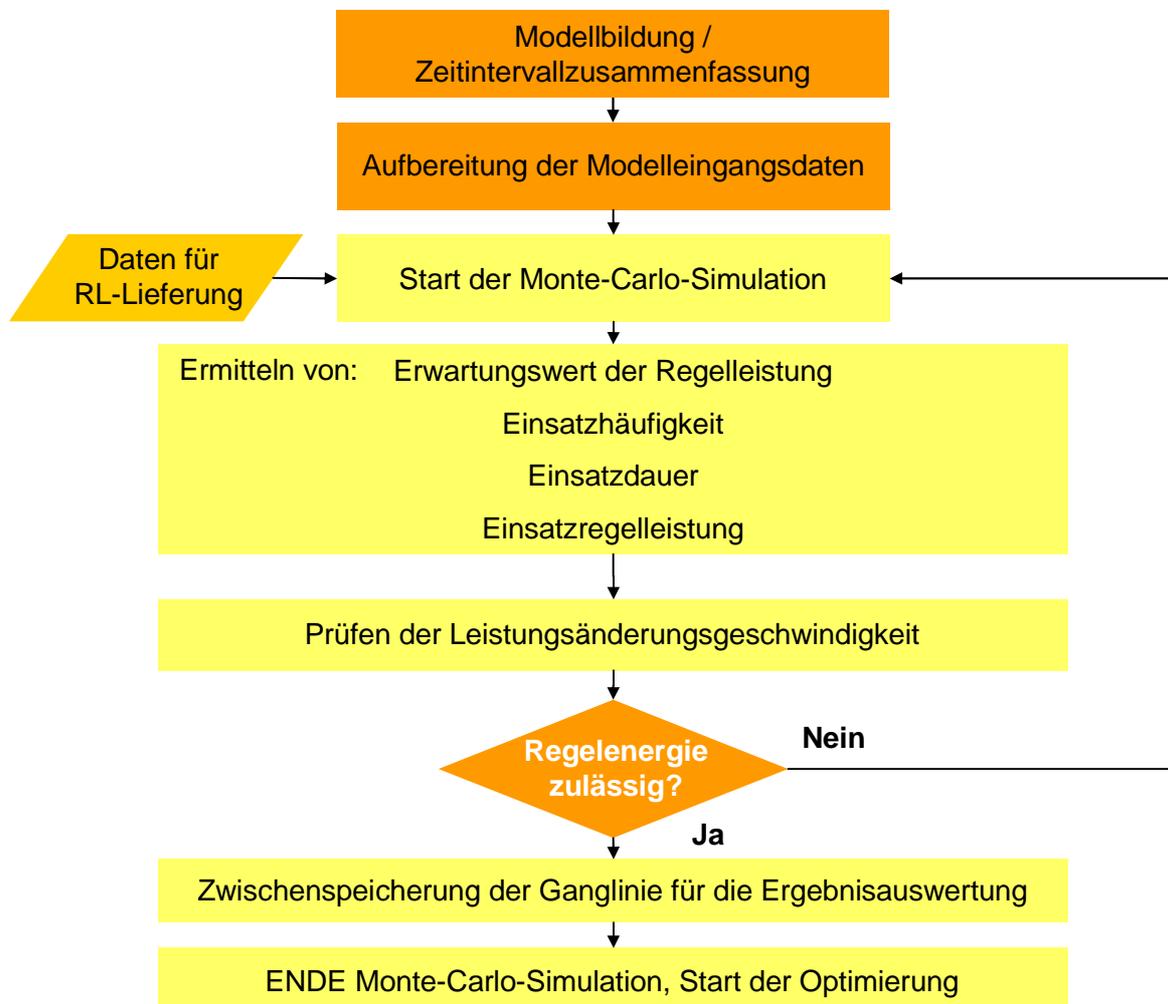
Neben der mathematischen Formulierung spielt die Integration dieser Teillösung in das Programmsystem eine entscheidende Rolle. Dazu ist zu berücksichtigen, dass bei der Modellbildung eines Betriebsplanungsproblems auf Basis der GGLP immer versucht wird, die Problemgröße möglichst klein und damit leichter optimierbar zu halten. In [37] wurde hierfür ein Verfahren zur Zeitintervallzusammenfassung entwickelt, bei dem Zeitintervalle mit ähnlichen Ganglinienwerten zu einem Zeitintervall größerer Dauer zusammengelegt werden. Abbildung 3.27 zeigt das Vorgehen dabei schematisch auf.



**Abbildung 3.27:** Beispiel für das Resultat einer Zeitintervallzusammenfassung

Wird die oben beschriebene Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, um eine Ganglinie zur Lieferung von Regelenergie zu generieren, dann spielen die Werte Häufigkeit und Dauer des Regelleistungseinsatzes bei der Erzeugung möglichst repräsentativer Ganglinien eine entscheidende Rolle, so dass die Durchführung einer Problemreduktion im Anschluss an das Einbinden der Regelleistungsganglinie diese Bemühungen wieder zerstören würde. Vor dem Einbinden der Regelleistungsganglinie in das Optimierungsproblem muss also die Problemreduktion in Form einer Zeitintervallzusammenfassung bereits erfolgt sein und die modifizierte Dauer der neuen Zeitintervalle bereits in den Berechnungen der Monte-Carlo-Simulation Berücksichtigung finden. Dadurch ist es allerdings gleichzeitig möglich geworden, das beschriebene Simulationsverfahren unabhängig vom Zeithorizont der Planungsaufgabe verwenden zu können, indem lediglich die Parametrierung der Simulation entsprechend angepasst wird.

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen lässt sich schließlich der Ablauf des Verfahrens zur Generation von Regelleistungsganglinien festlegen und in Abbildung 3.28 darstellen:



**Abbildung 3.28:** Monte-Carlo-Simulation zur Ermittlung einer Regelleistungsganglinie

Die Monte-Carlo-Simulation findet damit am Ende der Modellbildung statt, nachdem insbesondere die Zeitintervallzusammenfassung durchgeführt wurde. Dazu werden die charakteristischen Daten der Regelenergieanforderung für verschiedene Zeiträume des Betrachtungshorizontes in einem iterativen Prozess verarbeitet. Das "Würfeln" von Ganglinienwerten, Einsatzzeitpunkten und Dauer der Einsätze wird unter strikter Trennung von positiver und negativer Regelleistung so lange durchgeführt, bis das Abbruchkriterium aus Gleichung 3.77 erfüllt ist.

Zusätzlich wird vor dem Test auf die Einhaltung von Gleichung 3.77 geprüft, ob die vertraglich vorgegebene Leistungsänderungsgeschwindigkeit, die von der Regelleistungsart abhängt, durch die generierte Ganglinie nicht verletzt wird, d.h. der Leistungssprung zwischen zwei Zeitintervallen nicht unzulässig groß ausfällt. Ist dies der Fall, dann wird die Regelleistung dieses Zeitintervalls entsprechend angepasst. Eine ähnliche Prüfung wird während des Ablaufs auch im Hinblick auf die Kollision von Einsatzzeitpunkten und Einsatzdauer durchgeführt und gegebenenfalls werden neue Werte für diese Parameter gewürfelt, bis alle Randbedingungen eingehalten werden.

Die im Rahmen der Simulation gefundene und in der Optimierung verwendete Ganglinie wird dann für die Ergebnisauswertung zwischengespeichert und kann nach Ablauf des Verfahrens hinsichtlich ihrer Güte untersucht werden.

Auf Basis dieser Vorgehensweise hat sich gezeigt, dass bei sinnvoller Wahl der Eingangsparameter innerhalb von wenigen Iterationen eine passende Regelleistungsganglinie gefunden werden kann, und somit die Rechenzeit zur Bearbeitung des gesamten Optimierungsproblems nicht maßgeblich größer wird.

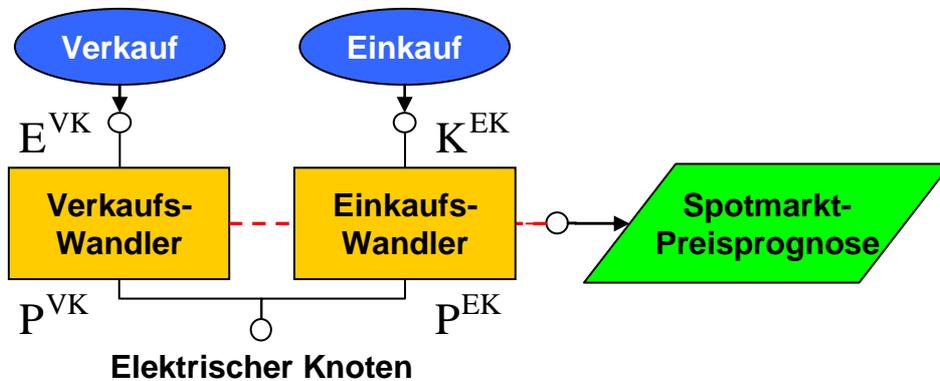
## **3.9 Spezielle Modellierungen**

### **3.9.1 Lieferung und Bezug von Fahrplanenergie**

Die bisher beschriebenen mathematischen Modelle bilden das Grundgerüst für die Integration der Regelennergie in die Betriebsoptimierung. Darauf aufbauend werden im Folgenden spezielle Modellierungen vorgestellt, die zur Abbildung von Erzeugungssystemen zur Regelennergiebereitstellung erforderlich sind.

Die Lieferung und der Bezug von Fahrplanenergie stellen eine wichtige Möglichkeit für den Betreiber eines Erzeugungssystems dar, um seinen Deckungsbeitrag zu maximieren. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Produkte, die sowohl an der Strombörse als auch frei am Markt gehandelt werden können und deren finanzielle Bewertung auch im Rahmen einer Optimierung stattfinden kann. Bei der hier betrachteten kurzfristigen Betriebsplanung ist jedoch der Preis für elektrische Energie am Spotmarkt die entscheidende Vergleichsgröße gegenüber der eigenen Erzeugung. Längerfristige Geschäfte und deren Auswirkung auf die Betriebsplanung werden in den längerfristigen Planungsrechnungen ana-

lysiert und im Vorfeld der kurzfristigen Betriebsoptimierung in die Eingangsdaten eingepflegt [30]. Deshalb ist es sinnvoll, das in Abbildung 3.30 gezeigte Modell zur Integration des kurzfristigen Energiehandels in die Planungsrechnung aufzustellen:



**Abbildung 3.29:** Modellierung des kurzfristigen Energiehandels

Über zwei Quellen wird jeweils der Einkauf und Verkauf von elektrischer Energie am Spotmarkt abgebildet. Da als Prognose für den Verlauf des Spotmarktpreises in der Regel eine Ganglinie vorliegt, wird die Modellierung der Erlöse bzw. Kosten des Handels am Spotmarkt um zwei Wandler ergänzt, deren Kennlinien in Abhängigkeit des Wertes der Prognoseganglinie während der Modellbildung verändert werden können. Die Gleichungen 3.84 bis 3.90 zeigen die mathematische Modellbildung für den allgemeinen, nicht konvexen Zusammenhang:

$$P_{u,t}^{EK} = \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} \cdot \tilde{P}_{u,t,s}^{EK} \tag{3.84}$$

$$K_{u,t}^{EK} = \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} \cdot \tilde{K}_{u,t,s}^{EK} \quad \text{mit} \quad \tilde{K}_{u,t,s}^{EK} = K_t^{MP} \cdot \tilde{P}_{u,t,s}^{EK} \tag{3.85}$$

$$\text{mit} \quad \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} - B_{u,t}^{EK} = 1, \quad \{\lambda_{u,t,s} | s = 1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \tag{3.86}$$

Analog erfolgt die Modellierung für den Verkauf, wobei hier zusätzlich ein marktüblicher Preisabschlag gegenüber dem Einkaufspreis vorgenommen wird.

$$P_{u,t}^{VK} = \sum_{s=1}^S \delta_{u,t,s} \cdot \tilde{P}_{u,t,s}^{VK} \quad (3.87)$$

$$E_{u,t}^{VK} = \sum_{s=1}^S \delta_{u,t,s} \cdot \tilde{E}_{u,t,s}^{VK} \quad \text{mit} \quad \tilde{E}_{u,t,s}^{VK} = -c^{PA} \cdot K_t^{MP} \cdot \tilde{P}_{u,t,s}^{EK} \quad (3.88)$$

$$\text{mit} \quad \sum_{s=1}^S \delta_{u,t,s} - B_{u,t}^{VK} = 1, \quad \{\delta_{u,t,s} | s = 1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \quad (3.89)$$

Für den allgemeinen Fall, dass die Preisdifferenz zwischen Einkaufs- und Verkaufspreis auch zu 0 werden kann, bewirkt Gleichung 3.90, dass Einkauf und Verkauf nicht gleichzeitig vorgenommen werden können.

$$B_{u,t}^{EK} + B_{u,t}^{VK} \leq 1 \quad (3.90)$$

Mit dem vorgestellten Modell ist es auf einfache Weise möglich, die Erzeugung durch eigene Anlagen finanziell dem Einkauf oder Verkauf zum aktuellen Spotmarktpreis gegenüberzustellen und darüber hinaus auch entscheiden zu können, ob die Beteiligung am Regelenenergiemarkt zur Maximierung des Deckungsbeitrags im Vergleich zu den daraus resultierenden Einschränkungen bei einer Spotmarkt-beteiligung sinnvoll ist.

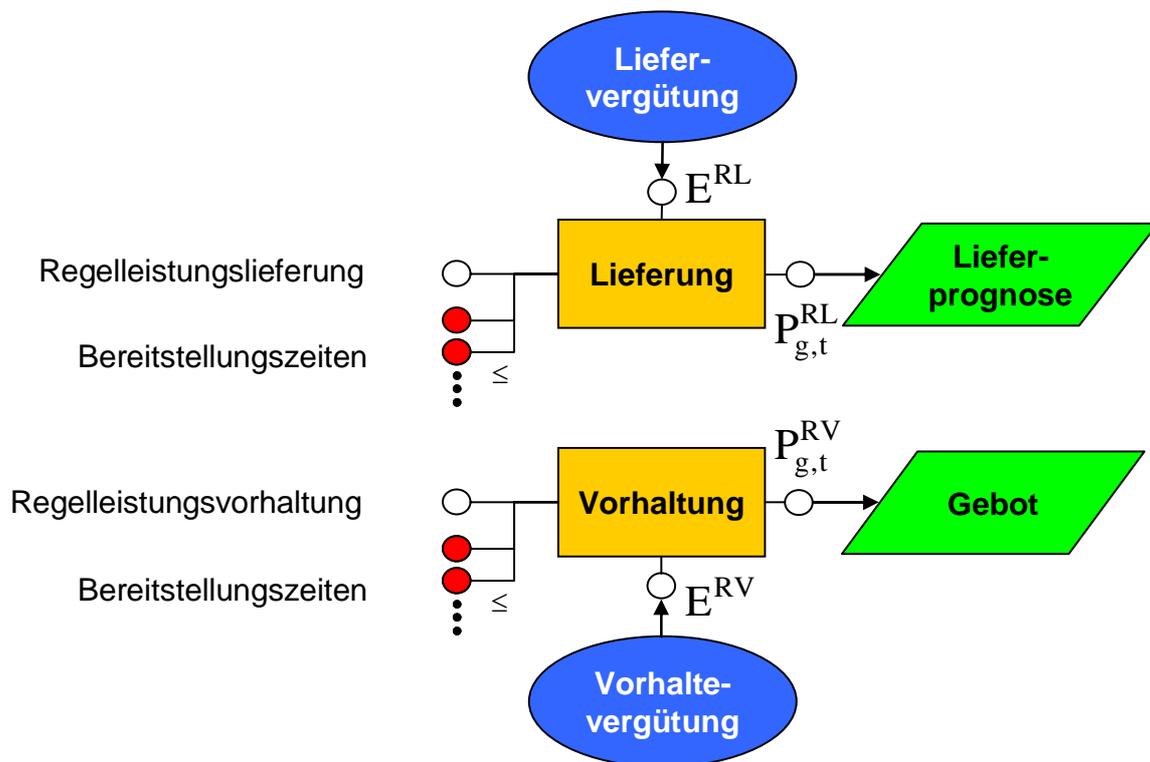
### 3.9.2 Gebotserstellung für Regelenergie

In Ergänzung zur Modellierung des kurzfristigen Energiehandels ist auch für die Gebotserstellung für den Regelenenergiemarkt eine spezielle Modellierung einzuführen. Diese muss gewährleisten, dass sowohl die Vorhaltung und die Lieferung von Regelenergie in die Betriebsoptimierung eingeführt werden als auch eine Abbildung der Restriktionen der Leistungsänderungsgeschwindigkeit bzw. der maximalen Bereitstellungszeit vorgenommen werden kann. Für die Vorhaltung und Lieferung von Regelenergie müssen entsprechende Erlöse aus Arbeits- und Leistungspreisen in den Deckungsbeitrag der Betriebsoptimierung einfließen.

Das Modell in Abbildung 3.30 stellt die Modellierung eines Gebotes für eine beliebige Regelenergieart für positive oder negative Regelenergie dar und erfüllt die oben aufgeführten Anforderungen. Die zu liefernde und die vorzuhaltende Regelenergie werden über

zwei Ganglinien in das System eingeführt, wobei die Ganglinie für die Lieferung von Regelernergie nach dem in Kapitel 3.8.2 beschriebenen Monte-Carlo-Simulationsverfahren zufällig ermittelt wird. Die Ganglinie für die Vorhaltung beschreibt zeitintervallbezogen die Leistung des Gebotes. Die Wandler für Lieferung und Vorhaltung bewirken die Integration der Ganglinienwerte in das mathematische Modell zur Abbildung der folgenden Zusammenhänge:

- Bestimmung einer Vergütung für zu liefernde und vorzuhaltende Regelernergie über die jeweils angeschlossene Quelle
- Eintragen der Regelleistungen in eine Vorhaltebilanz und in eine Lieferbilanz für Regelernergie, in die auch alle an der Bereitstellung von Regelernergie potentiell beteiligten Anlagen eingetragen werden
- Umsetzung der vorzuhaltenden bzw. zu liefernden Regelleistung in einen Wert für die maximal zulässige Bereitstellungszeit



**Abbildung 3.30:** Modellierung eines Regelernergiegebotes

Die Gleichungen 3.91 bis 3.95 beschreiben die mathematische Formulierung, die aus dem Modell nach Abbildung 3.30 folgt, wiederum für den allgemeinen nicht konvexen Fall für die Vorhaltung von Regelenergie, wobei die Formulierung für die Lieferung von Regelenergie analog lautet.

$$\sum_{u=1}^U P_{u,t}^{RV} = P_t^{RV} = \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} \cdot \tilde{P}_{u,t,s}^{RV} = P_{g,t}^{RV} \quad (3.91)$$

$$E_{u,t}^{RV} = \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} \cdot \tilde{E}_{u,t,s}^{RV} \quad \text{mit} \quad \tilde{E}_{u,t,s}^{RV} = -E_t^{GE} \cdot \tilde{P}_{u,t,s}^{RV} \quad (3.92)$$

$$\text{mit} \quad \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} - B_{u,t}^{RV} = 1, \quad \{\lambda_{u,t,s} | s=1, \dots, S\} \in \text{SOS2} \quad (3.93)$$

Darüber hinaus ist nach Gleichung 3.47 für jede an der Bereitstellung beteiligte Anlage eine Bilanzgleichung für die Abbildung der maximal zulässigen Bereitstellungszeit erforderlich, so dass Gleichung 3.94 formuliert werden muss:

$$t_{u,t}^{BE} \leq t^{BE,MAX} = \frac{P_t^{RV}}{\left. \frac{d\bar{P}}{dt^{BE}} \right|_{RV,MIN}} = \sum_{s=1}^S \lambda_{u,t,s} \cdot \frac{\tilde{P}_{u,t,s}^{RV}}{\left. \frac{d\bar{P}}{dt^{BE}} \right|_{RV,MIN}} \quad (3.94)$$

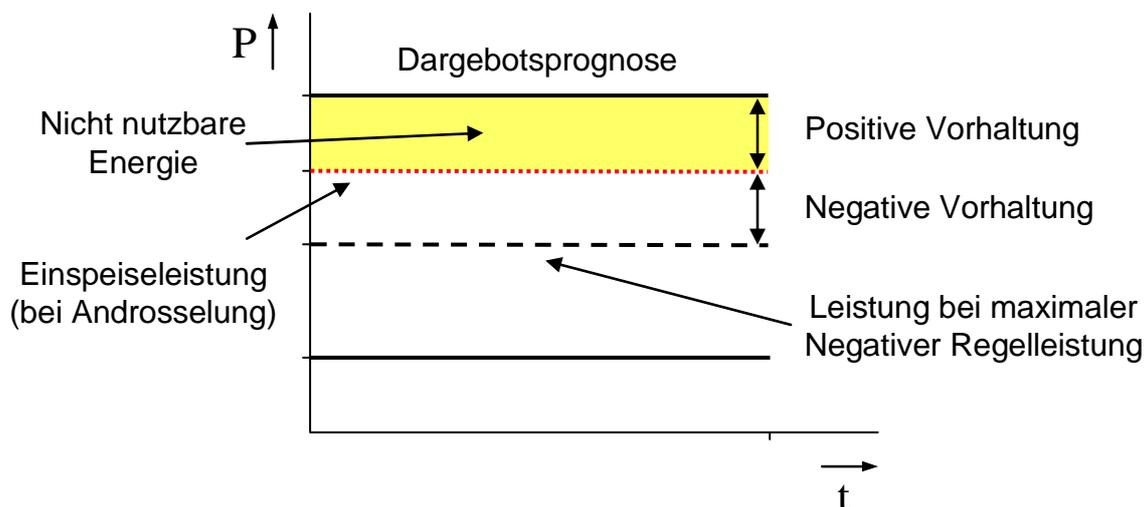
Je nach Art der Regelleistung, für die ein Gebot abgegeben werden soll, kann das Modell aus Abbildung 3.30 variiert werden. Bei der Primärregelung, bei der die zu liefernde Energie nicht gesondert vergütet wird, kann beispielsweise die entsprechende Quelle weggelassen werden. Ist eine anlagenspezifische Bereitstellungszeit gefordert, wie dies bei hydraulischen Anlagen der Fall sein kann, müssen lediglich die Stützstellen der entsprechenden Achse des Vorhalte- bzw. Lieferwandlers angepasst werden.

### 3.9.3 Dargebotsabhängige Regelenergiebereitstellung

Die Bereitstellung insbesondere von positiver Regelleistung durch dargebotsabhängige Erzeugungsanlagen erfordert durch die Mindererzeugung auf Grund der Androsselung der Erzeugungsanlage immer einen Verzicht auf einen Teil von Erlösen. Dies hat insbesondere deshalb starke Auswirkungen auf den Deckungsbeitrag, weil dargebotsabhängige Er-

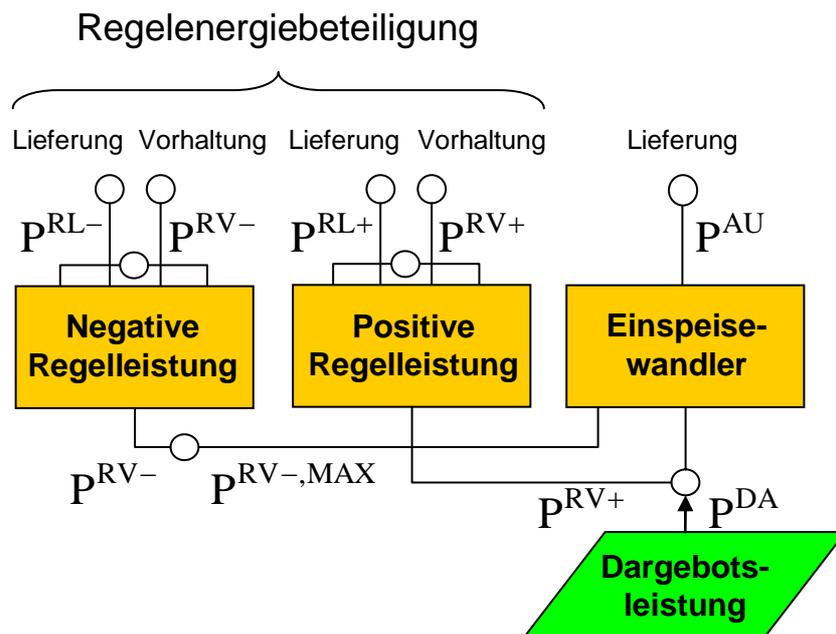
zeugungsanlagen keinen Brennstoff benötigen, die arbeitsabhängigen Kosten damit sehr klein sind. Demgegenüber stehen die Erlöse aus dem Regelenergiegebot, die in die Zielfunktion der Betriebsoptimierung eingehen. Durch die Bereitstellung von negativer Regelenergie entstehen keine negativen Auswirkungen auf die Zielfunktion, hier wird lediglich der Erlös aus der Regelenergiebereitstellung zusätzlich erzielt.

Für die Betriebsoptimierung kann von dem Vorliegen einer Prognose der dargebotsabhängigen Erzeugung ausgegangen werden, auf deren Basis ermittelt werden kann, ob Regelenergiebereitstellung oder maximale Energieerzeugung wirtschaftlich sind. Abbildung 3.31 verdeutlicht den Zusammenhang für einen allgemeinen Fall. Dabei verhalten sich die in Kapitel 2.4.2 angesprochenen Laufwasser- und Windkraftanlagen prinzipiell aus Sicht der Betriebsoptimierung gleich.



**Abbildung 3.31:** Auswirkungen einer Regelenergievorhaltung auf dargebotsabhängige Erzeugungsanlagen

Bei der Modellierung der dargebotsabhängigen Anlagen kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass insbesondere die Restriktionen der Leistungsänderungsgeschwindigkeit bzw. Bereitstellungszeit von diesem Anlagentyp immer eingehalten werden können. Die angesprochenen Windkraftanlagen, wie auch Laufwasserkraftwerke können ihre Leistungen meist sehr schnell anpassen, so dass diese Restriktionen nicht in die Modellierung integriert werden müssen. Es ergibt sich dann das allgemeine Modell aus Abbildung 3.32:



**Abbildung 3.32:** Modellierung einer Regelenergiebereitstellung durch dargebotsabhängige Erzeugungsanlagen

Die Gleichungen 3.95 bis 3.98 zeigen die mathematische Formulierung zu dem Modell aus Abbildung 3.32:

$$P_{u,t}^{RV+} = P_{ga,t}^{DA} - P_{u,t}^{AU} \quad (3.95)$$

$$P_{u,t}^{RL+} \leq P_{u,t}^{RV+} \quad (3.96)$$

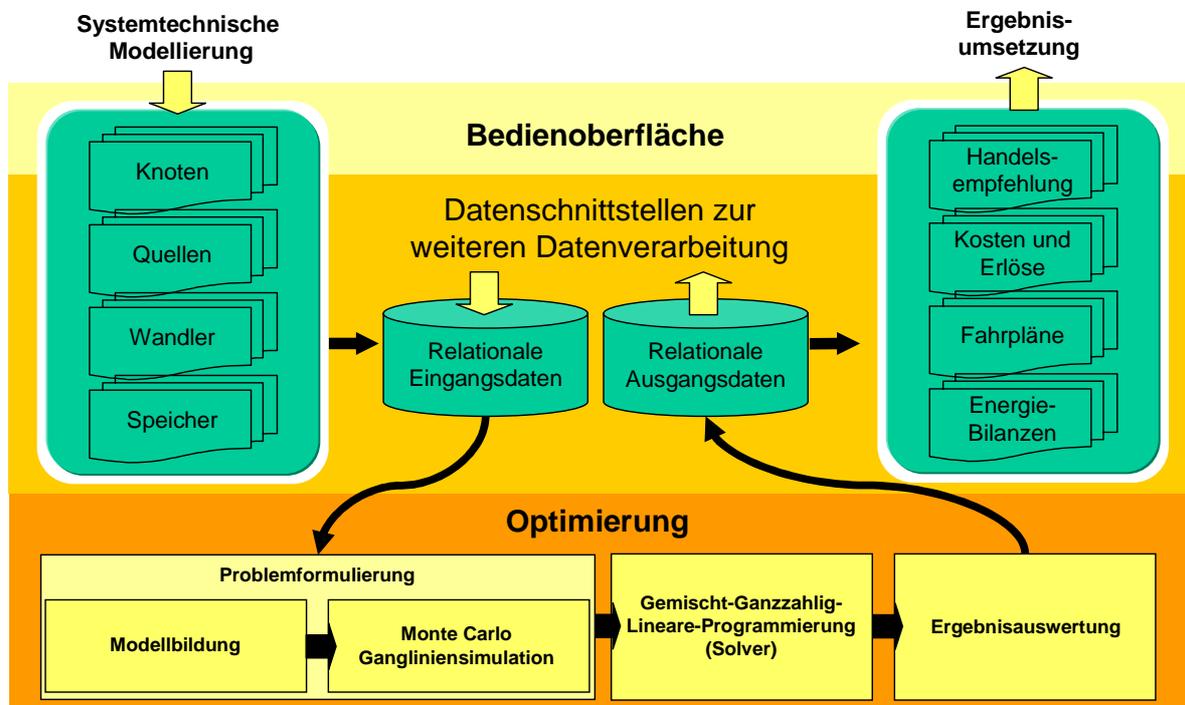
$$P_{u,t}^{RV-} \leq P_{u,t}^{RV-,MAX} = P_{u,t}^{AU} - P_{u,t}^{AU,MIN} \quad (3.97)$$

$$P_{u,t}^{RL-} \leq P_{u,t}^{RV-} \quad (3.98)$$

### 3.10 Verfahren zur Betriebsoptimierung

Die vorgestellten mathematischen Modelle zur Integration der Regelenergie in die Betriebsoptimierung von Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung lassen sich in ein Programmsystem implementieren, das im Rahmen der vorhergehenden Arbeiten [24, 29,

37, 54] entwickelt wurde. Abbildung 3.33 zeigt den Aufbau des Programmsystems schematisch.



**Abbildung 3.33:** Aufbau des vorgestellten Programmsystems

Die Steuerung der Betriebsplanung beginnt mit der Aufbereitung der realen Systemdaten durch den Anwender, wie dies eingangs des Kapitels erläutert wurde. Dabei wird das Optimierungsproblem auf Basis der systemtechnischen Modellierung aus den Systemdaten aufgebaut und über eine Bedienoberfläche eingegeben, die mit geringem Aufwand an die Weiterentwicklungen der Betriebsoptimierung angepasst werden kann.

Die Beschreibung der neuen Modellierungsmöglichkeiten zur Integration der Regelernergie in die Betriebsoptimierung erfolgt aufbauend auf den bestehenden Datenstrukturen, so dass eine Datenkompatibilität zu historischen Datensätzen gewährleistet ist. Die Datenhaltung erfolgt relational, sowohl für die Eingabe- als auch die Ergebnisdaten, so dass der Anwender die Vorteile von redundanzfreier Datenhaltung und Datenkonsistenz nutzen kann, um eine effektive und fehlerfreie Systemdatenpflege zu betreiben. Des Weiteren bietet diese Datenstruktur die Möglichkeit, Bedienoberfläche und Systemsteuerung in andere kommerzielle Datenbanksysteme und Betriebsführungswerkzeuge mit geringem Aufwand zu integrieren. Der Datenaustausch zwischen den Modulen des Programmsys-

tems erfolgt dabei auf Basis von ASCII-Dateien, die eine hohe Datenkompatibilität auch für den Zugriff durch Fremdanwendungen, wie z.B. Tabellenkalkulationen und weitere Office-Anwendungen bieten.

Im Rahmen der Problemformulierung werden die Modellierungsdaten aufbereitet und die mathematische Modellbildung durchgeführt. Ziel dabei ist es, eine ASCII-Datei im MPS-Format zu erzeugen, die eine Beschreibung des geschlossen zu lösenden Gleichungssystems beinhaltet. Das MPS-Format wird von vielen gängigen GGLP-Solvern zur Problembeschreibung verwendet und bietet somit die Möglichkeit, den Solver mit geringem Aufwand gegen ein anderes Produkt auszutauschen. Im Rahmen der Problemaufbereitung wird auch die Monte-Carlo-basierte Simulation der Regelleistungsganglinien durchgeführt, die zur repräsentativen Abbildung des stochastischen Auftretens der Regelenergieanforderung dient.

Die anschließende Optimierung mit einem GGLP-Solver erfolgt auf Basis des Solvers CPLEX der Firma ILOG, der sich in vielfältigem kommerziellem Einsatz bewährt hat.

Das Ergebnis der Optimierung wird dann durch die Ergebnisaufbereitung analysiert und dabei für den Anwender ein praktikabel handhabbarer Datensatz generiert, der in der ebenfalls relationalen Ausgabe hinterlegt wird.

Mit der Integration der vorgestellten mathematischen Modelle in das Programmsystem steht ein Betriebsoptimierungswerkzeug zur Verfügung, das dem Erzeugungssystembetreiber wichtige Erkenntnisse über die optimale Betriebsplanung unter Berücksichtigung von Regelenergie liefern kann. Alle Schnittstellen und Modellkonzepte sind so allgemein gehalten, dass sowohl eine anhaltende Weiterentwicklung auf Basis neuer Anforderungen der Energiemärkte möglich ist, als auch eine flexible Integration in verschiedenste andere kommerzielle Werkzeuge bewerkstelligt werden kann.

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Untersuchungsziele

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und im Kapitel 3 vorgestellten Modelle zur Betriebsoptimierung wurden bereits während der Entwicklung in zahlreichen Testrechnungen verifiziert. Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse für eine kurzfristige Betriebsoptimierung sollen darüber hinaus zusammenfassend die Funktionsfähigkeit des Verfahrens folgendermaßen aufzeigen:

- Anwendung der Modellbildung auf ein realitätsnahes Testerzeugungssystem
- Analyse der Ergebnisse im Hinblick auf ihre Plausibilität
- Vorstellen der Entscheidungsfindung zur Abgabe eines Regelenergiegebotes

Dazu wird zunächst ein Testerzeugungssystem vorgestellt, dessen Systemdaten in Anlehnung an existierende Erzeugungssysteme definiert worden sind, wobei die hier verwendete Zusammenstellung der Anlagen- und Vertragstypen frei gewählt ist, um alle neuen mathematischen Modelle gleichzeitig integrieren zu können.

Das Betriebsoptimierungsverfahren maximiert den Deckungsbeitrag des Erzeugungssystems unter Berücksichtigung potentieller Gebote für positive und negative Primär- und Sekundärregelenergie, Minuten- und Stundenreserve. Um das Betriebsoptimierungsverfahren zu testen, erfolgt die Untersuchung an dieser Stelle exemplarisch anhand von Geboten für Sekundärregelenergie, weil dabei die höchsten Anforderungen an die Modellbildung gestellt werden und zugleich alle Möglichkeiten der Modellbildung ausgeschöpft werden. Dies sind im Einzelnen:

- Modellierung der Vergütung von Leistungs- und Arbeitspreis für das Sekundärregelenergiegebot
- Die Abbildung einer Regelenergie, die mehrmals im Planungszeitraum abgerufen wird, so dass die zu liefernde Regelenergie eine wesentliche Auswirkung auf das Ergebnis der Betriebsoptimierung hat
- Die Berücksichtigung der maximalen Bereitstellungszeit in der Modellierung

## 4.2 Aufbau des Testerzeugungssystems

Das verwendete Testsystem ist in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt. Es handelt sich um ein Erzeugungssystem zur Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie. Die thermische Energie kann sowohl aus einer Erzeugungsanlage mit Kraft-Wärme-Kopplung gewonnen werden als auch über eine rein thermische Erzeugungsanlage. Zur Bereitstellung von elektrischer Energie ist neben dem Prozess mit Kraft-Wärme-Kopplung auch eine Erzeugung durch eine Kondensationsanlage sowie die dargebotsabhängige Einspeisung von Windenergie vorgesehen. Es werden die Brennstoffe Kohle und Erdgas zur Energiegewinnung verwendet. Zum Ausgleich elektrischer Leistungsspitzen steht ein Pumpspeicherkraftwerk zur Verfügung. Der Erzeugungssystembetreiber kann darüber hinaus sowohl am Markt für Fahrplanenergie als auch am Regelenenergiemarkt teilnehmen. Die Bereitstellung von Regelenenergie kann entweder von eigenen Erzeugungsanlagen oder durch den Bezug von Regelenenergie von Kooperationspartnern gewährleistet werden. Dem Erzeugungssystembetreiber stehen zur Optimierung seines Deckungsbeitrags Erzeugungsanlagen mit insgesamt 644 MW elektrischer und 615 MW thermischer Erzeugungsleistung zur Verfügung.

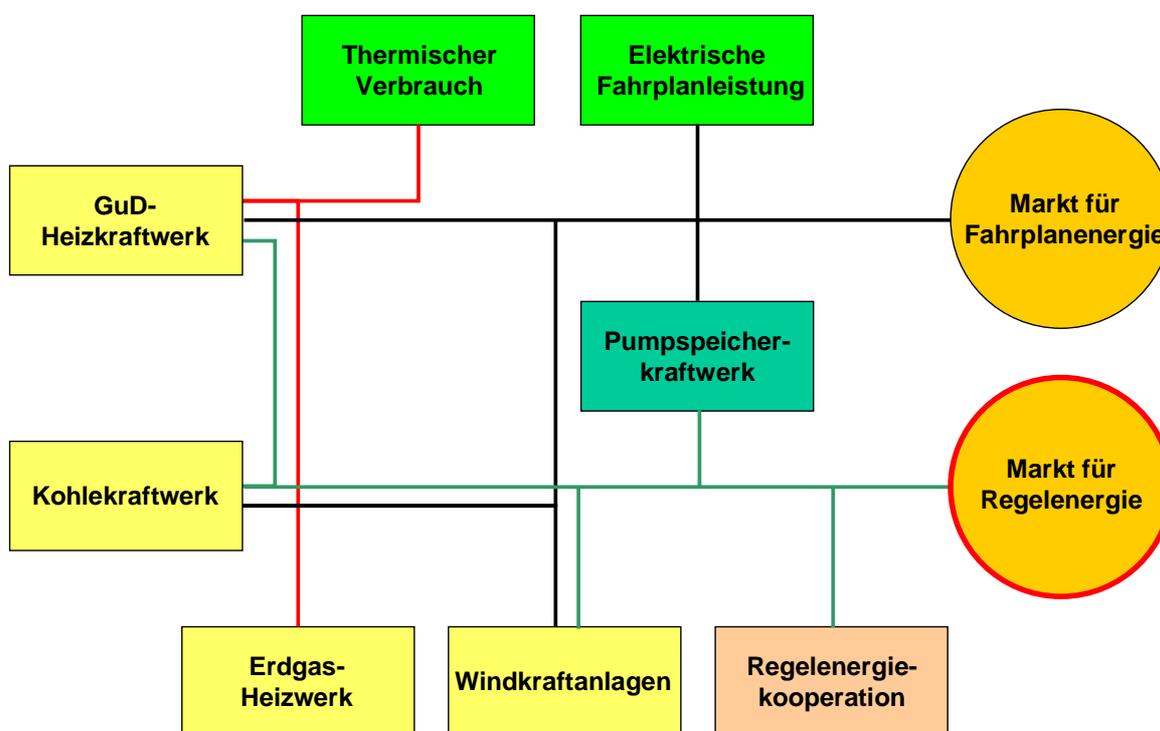
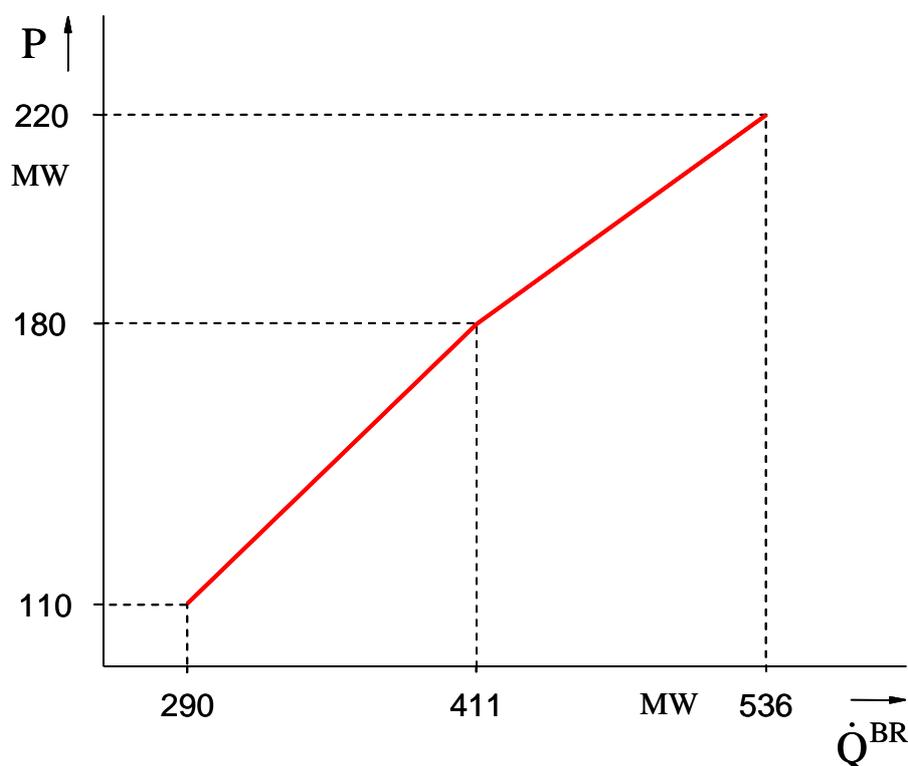


Abbildung 4.1: Aufbau des betrachteten Testerzeugungssystems

Die Komponenten des Testerzeugungssystems sind im Einzelnen:

### Kohlekraftwerk

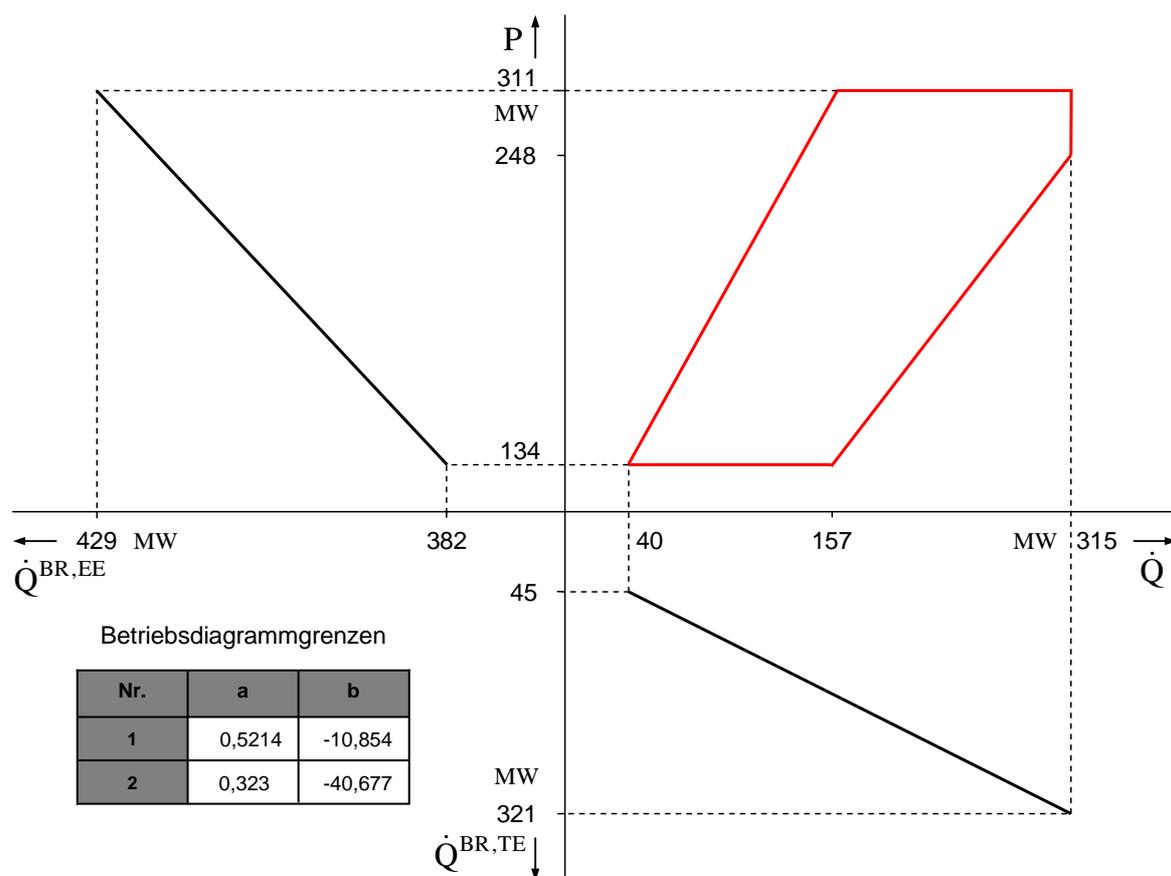
Das steinkohlebetriebene Dampfkraftwerk hat eine installierte Leistung von 220 MW, die in einem reinen Kondensationsprozess gewonnen wird. Die Erzeugungsanlage hat je nach Betriebspunkt einen Wirkungsgrad zwischen 37 % und 43,7 % und ist in der Lage, alle Arten von positiver und negativer Regelernergie bereitzustellen. Abbildung 4.2 zeigt das zugehörige Brennstoffverbrauchsdiagramm.



**Abbildung 4.2:** Brennstoffverbrauchsdiagramm des modellierten Kohlekraftwerks

### GuD-Heizkraftwerk

Die mit Erdgas betriebene GuD-Anlage kann sowohl thermische als auch elektrische Energie erzeugen. Dazu besteht über den Abhitzeessel der Gasturbine und einer nachgeschalteten Entnahme-Kondensations-Dampfturbine die Möglichkeit zur Auskopplung thermischer Energie. Die gekoppelte Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie kann über das in Abbildung 4.3 dargestellte Betriebsdiagramm beschrieben werden.



**Abbildung 4.3:** Betriebsdiagramm des GuD-Heizkraftwerks

Die Anlage hat einen Wirkungsgrad zwischen 28,3 % bei rein elektrischer Erzeugung, d.h. bei ausschließlichem Betrieb der Gasturbine und 83,5 % bei maximaler thermischer und elektrischer Auskopplung, wenn Abhitzeessel und Entnahme-Kondensationsturbine eingesetzt werden. In diesem Fall werden 311 MW elektrische und 315 MW thermische Leistung bereitgestellt. Die Anlage ist in der Lage, alle Arten von positiver und negativer Regenergie bereitzustellen.

### Erdgas-Heizwerk

Zur Deckung des thermischen Verbrauchs steht zusätzlich zur GuD-Anlage ein erdgasbetriebenes Heizwerk zur Verfügung, das mit einem Wirkungsgrad zwischen 81 % und 90 % und einer als linear angenommenen Brennstoffverbrauchskennlinie arbeitet. Mit einer Leistung zwischen 30 MW und 300 MW kann das Heizwerk den geforderten Wärmebedarf alleine decken.

## Windkraftanlagen

Der Erzeugungssystembetreiber verfügt zusätzlich zu den konventionellen Erzeugungsanlagen über mehrere Windkraftanlagen mit einer Spitzenleistung von insgesamt 13 MW elektrischer Leistung. Es wird davon ausgegangen, dass eine Prognose für die Windenergieerzeugung in Form einer Ganglinie vorliegt. Durch Androsselung der Windkraftanlagen kann ein Beitrag zur Vorhaltung von Regelenergie geleistet werden. Die eingespeiste elektrische Energie wird mit 55 €/MWh vergütet, wie es durch das EEG vorgegeben wird. Ein unmittelbarer Beitrag zur Regelenergiebereitstellung oder Lieferung ist für die Sekundärregelenergie wegen des schwankenden Winddargebots in Anlehnung an Abbildung 2.7 nicht vorgesehen.

## Pumpspeicherkraftwerk

Zur Flexibilisierung des Anlagenbetriebes verfügt das Erzeugungssystem über ein Pumpspeicherkraftwerk. Die elektrische Ein- und Ausspeicherleistung liegt bei je 100 MW und der Speicher verfügt über einen nutzbaren Inhalt von 1500 MWh. Es ist angenommen, dass Pumpen und Turbinen jeweils so eingesetzt werden können, dass die Anlage einen Leistungsbereich von 0 bis 100 MW Ein- bzw. Ausspeicherleistung abdecken kann, wie dies in Abbildung 2.9 gezeigt ist. Die Bilanzierung des Speicherinhalts erfolgt tageszyklisch, d.h. am Ende des Tages soll der Ausgangsfüllstand wieder erreicht sein. Das Pumpspeicherkraftwerk kann je nach Betriebsweise alle Arten von positiver und negativer Regelenergie bereitstellen.

## Energiebezüge

Zur Versorgung der Erzeugungsanlagen mit Brennstoff sind verschiedene Energiebezugsverträge vorhanden, deren Konditionen in Tabelle 4.1 gezeigt sind.

Bezugsvertrag	Bezugspreis	Minimalmenge	Maximalmenge
	€/MWh	MWh/Tag	MWh/Tag
Kohle	13	5500	9000
Erdgas (GuD)	16	0	14500
Erdgas (Heizwerk)	8,3	0	500

**Tabelle 4.1:** Planungsdaten für Energiebezüge

Die minimalen und maximalen Einsatzmengen resultieren jeweils aus den längerfristigen Planungsrechnungen und gehen, entsprechend umgerechnet auf einen Tag, in die hier betrachtete Planungsrechnung ein.

### Energielieferungen

Der Erzeugungssystembetreiber hat Lieferungen sowohl für thermische als auch für elektrische Energie zu erfüllen, die jeweils in Form von Ganglinien vorliegen. Die Verbrauchsganglinien resultieren dabei aus den Ergebnissen langfristiger Planungsrechnungen, auf deren Basis längerfristige Lieferverträge abgeschlossen wurden. Für die hier betrachtete kurzfristige Betriebsoptimierung wirken diese Lieferungen als vorgegebene Fahrpläne, die über eine täglich aktualisierte Prognose in die Planungsrechnung einfließen. Der Beitrag dieser Lieferungen zum Deckungsbeitrag wird über die folgenden Vergütungen realisiert:

Energielieferung	Vergütung	Minimalleistung	Maximalleistung
	€/MWh	MW	MW
Thermische Energie	12	126	215
Elektrische Energie	35	77	223

**Tabelle 4.2:** Planungsdaten für Energielieferungen

### Fahrplanenergiemarkt

Fahrplan- und Regelenergiemarkt müssen als konkurrierende Märkte für den Erzeugungssystembetreiber in die Betriebsoptimierung integriert werden. Eine Übersicht innerhalb welcher Bandbreite die Vergütungen liegen, die in Form einer Prognoseganglinie in das Optimierungsmodell integriert werden, zeigt die Tabelle 4.3.

Energiehandel am Spotmarkt	Erlös/Kosten	Minimalpreis	Maximalpreis
	in % der Preisprognose	€/MWh	€/MWh
Verkauf (Erlös)	100	18,6	43,6
Einkauf (Kosten)	103	19,2	44,9

**Tabelle 4.3:** Planungsdaten für den Fahrplanenergiemarkt

In Kapitel 3.9.1 wird das entsprechende Modell zur Abbildung des täglichen Energiehandels am Spotmarkt eingeführt. Der Erzeugungssystembetreiber hat dabei die Möglichkeit elektrische Energie zu verkaufen oder auch zu beziehen. Letzteres wäre beispielsweise sinnvoll, um Spitzenleistungen längerfristiger Lieferverpflichtungen für elektrische Energie abzudecken.

### Regelenergiemarkt

Für den Regelenergiemarkt wird das in Kapitel 3.9.2 eingeführte Gebotsmodell verwendet. Damit lässt sich ein potentiell Gebot zur Bereitstellung von Regelenergie abbilden und im Rahmen der Betriebsplanung entscheiden, ob das gewählte Gebot wirtschaftlich ist. Die Planungsdaten für das zu Grunde gelegte Gebot sind dabei an die von den Übertragungsnetzbetreibern veröffentlichten Ausschreibungsergebnisse angepasst und in Tabelle 4.4 zusammengefasst [20, 47]. Die Gebote für positive und negative Regelenergie werden jeweils für den Zeitraum 03:30 bis 17:15 abgegeben.

Gebot für Sekundärregelenergie	Gebotsleistung	Vergütung für Vorhaltung	Vergütung für Lieferung
	MW	€/MW	€/MWh
Positiv	100	15	140
Negativ	100	10,8	11,6

**Tabelle 4.4:** Planungsdaten für den Regelenergiemarkt

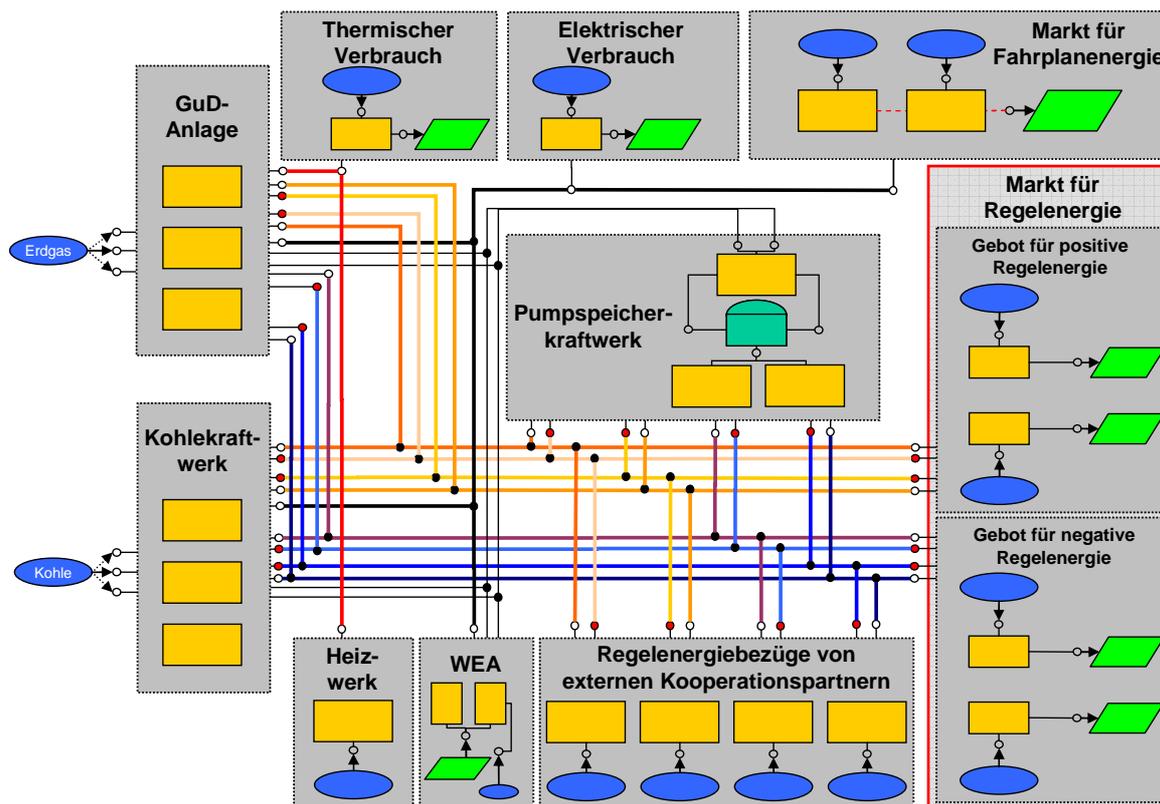
### Regelenergiekooperation

Der Erzeugungssystembetreiber hat die Möglichkeit, zusätzlich zu seinen eigenen Erzeugungsanlagen auch Kooperationspartner in die Bereitstellung von Sekundärregelenergie zu integrieren. Diesen muss für ihre Dienstleistung eine Vergütung gezahlt werden, die in dem hier untersuchten Szenario wie folgt angenommen wird:

Beitrag zur Regelenergie durch Kooperationspartner	Maximale Gebotsleistung	Vergütung für Vorhaltung	Vergütung für Lieferung
	MW	€/MW	€/MWh
Positiv	21	13,6	42,9
Negativ	27	6	6,8

**Tabelle 4.5:** Planungsdaten für die Regelenergiekooperation

Einen Überblick über die Modellierung des Gesamtsystems gibt Abbildung 4.4. Darin sind auch die notwendigen Verknüpfungen zur Repräsentation der Regelenenergie erkennbar. Es ist eine strenge Trennung der Produkte, elektrische Energie, thermische Energie und Regelenenergie sowie die Unterteilung in positive und negative Vorhaltung bzw. Lieferung von Regelenenergie erforderlich. Die Modellierung des Regelenenergiemarktes ist entsprechend in je ein Gebotsmodell für positive und negative Regelenenergie getrennt.



**Abbildung 4.4:** Betrachtetes Testsystem zur Verifikation des Verfahrens

### 4.3 Ergebnisse der kurzfristigen Betriebsoptimierung

Die Untersuchung des modellierten Erzeugungssystems gliedert sich in zwei Teile, wie dies nach dem in Abbildung 2.6 vorgestellten Ablaufplan vorgeschlagen wird.

Zunächst wird ein Basisszenario optimiert, in dem bis auf die Modellierung der Gebotsabgabe für Regelenenergie alle Handlungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Die dann vorliegende Lösung ist gleichzeitig für den Fall die optimale Betriebsweise, wenn das später ermittelte Gebot für Regelenenergie am Markt nicht zum Zuge kommt. Der Erzeugungssys-

tembetreiber bekommt darüber hinaus die Möglichkeit, das Basisszenario im Hinblick auf mögliche Spielräume für die Erstellung von Regelenergiegeboten zu untersuchen. Nicht zuletzt wird eine Aussage darüber getroffen, wie hoch der erwartete Deckungsbeitrag ohne die Berücksichtigung potentieller Regelenergiegebote ist.

Als zweites wird ein Szenario optimiert, in dem die oben beschriebenen Regelenergiegebote für positive und negative Sekundärregelenergie enthalten sind. Auf Basis einer Lieferganglinie für Regelenergie wird ermittelt, ob das untersuchte Gebot wirtschaftlich ist. Der Erzeugungssystembetreiber erhält gleichzeitig eine optimale Zusammensetzung der Vorhalteleistung aus den beteiligten Erzeugungsanlagen. Ein wiederholtes Optimieren mit anderen Regelleistungsganglinien ermöglicht eine Aussage über die Qualität der getroffenen Entscheidungen.

Der betrachtete Planungshorizont ist in beiden Fällen ein in 96 äquidistante Zeitintervalle aufgeteilter Tag. Die Anzahl der Zeitintervalle wurde so groß gewählt, damit die Charakteristik des schnell variierenden Regelenergieabrufs möglichst repräsentativ in die Betriebsoptimierung eingebracht werden kann.

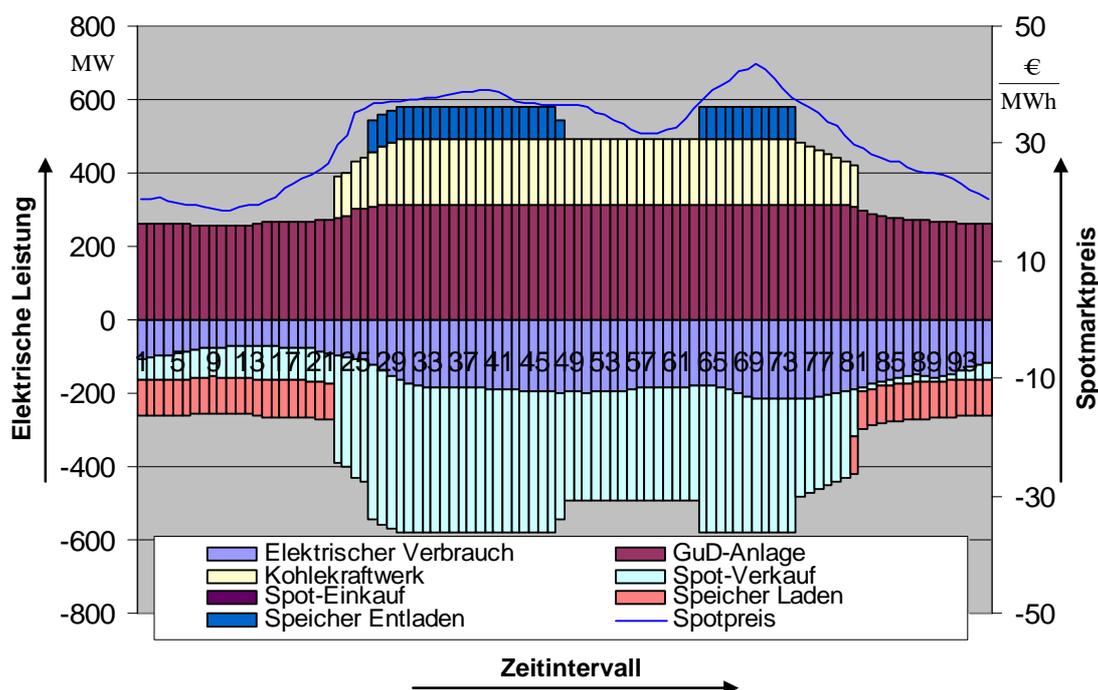
In Kombination mit der Einführung von neuen mathematischen Modellen zur Abbildung der Regelenergie erfolgt damit ein starker Anstieg der Komplexität des Planungsproblems, was in der Regel zu einem nichtlinearen Ansteigen der Rechenzeit führt. Deswegen ist bei den heute in der Betriebsoptimierung üblicherweise verwendeten PC-Systemen vor allem eine sorgfältige Abwägung zu modellierender Eigenschaften der Erzeugungsanlagen erforderlich, um die Rechenzeit in akzeptablen Grenzen zu halten.

Bei der in dieser Arbeit gewählten Modellierung konnte, je nach Variation des Szenarios, trotzdem eine Rechenzeit von 10 bis 30 min auf einem Pentium IV Rechner mit 1,7 GHz erzielt werden. Pauschale Aussagen zur erforderlichen Rechenzeit können daraus allerdings nicht abgeleitet werden, weil der Verlauf einer GGLP-basierten Optimierung sehr stark vom zu optimierenden Problem abhängt.

### **4.3.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung von Regelenergie**

Die Grundlage der Analyse ist die Bilanz der elektrischen Erzeugung, die in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Es ist ein bevorzugter Einsatz der GuD-Anlage zu erkennen, der ab dem 23. Zeitintervall von einer elektrischen Erzeugung durch das Kohlekraftwerk begleitet

wird. Offensichtlich wird zu diesem Zeitpunkt die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit der Erzeugung auf Kohlebasis, gemessen am steigenden Spotmarktpreis, durchbrochen und ein Verkauf von elektrischer Energie initiiert, der neben der Deckung des elektrischen Verbrauchs einen hohen Stellenwert einnimmt. Die GuD-Anlage wird trotz des teureren Brennstoffs bevorzugt eingesetzt, weil die Anlage im Kraft-Wärme-Koppelnden Betrieb einen hohen Wirkungsgrad erzielt. Daraus resultiert auch der in Abbildung 4.6 dargestellte fast ausschließliche Einsatz der GuD-Anlage zur Deckung der thermischen Last.



**Abbildung 4.5:** Bilanz der elektrischen Erzeugung, Basisszenario

Das Erdgas-Heizwerk wird auf Grund seines niedrigen Bezugspreises nur während der thermischen Spitzenlasten zusätzlich eingesetzt, um die geringe Menge preiswert zur Verfügung stehenden Heizwerk-Erdgases auszunutzen. Dabei wird gleichzeitig ein Teil der Wärmeerzeugung der GuD-Anlage verdrängt, weil die Mindestleistung des Heizwerks bei 30 MW liegt.

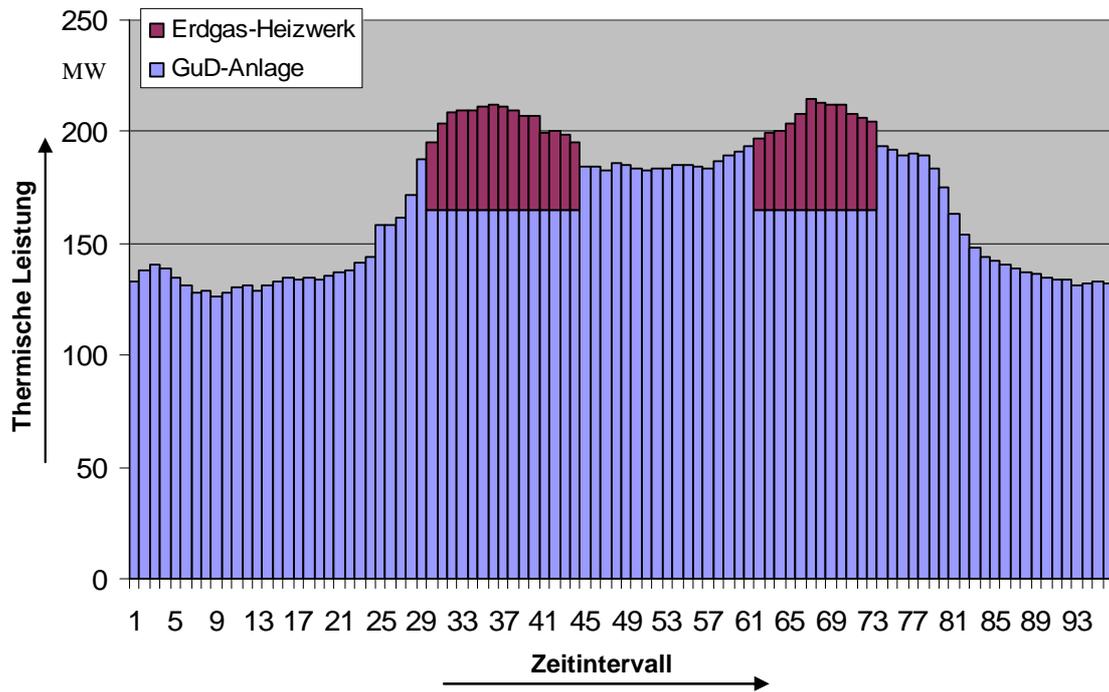


Abbildung 4.6: Bilanz der thermischen Erzeugung, Basisszenario

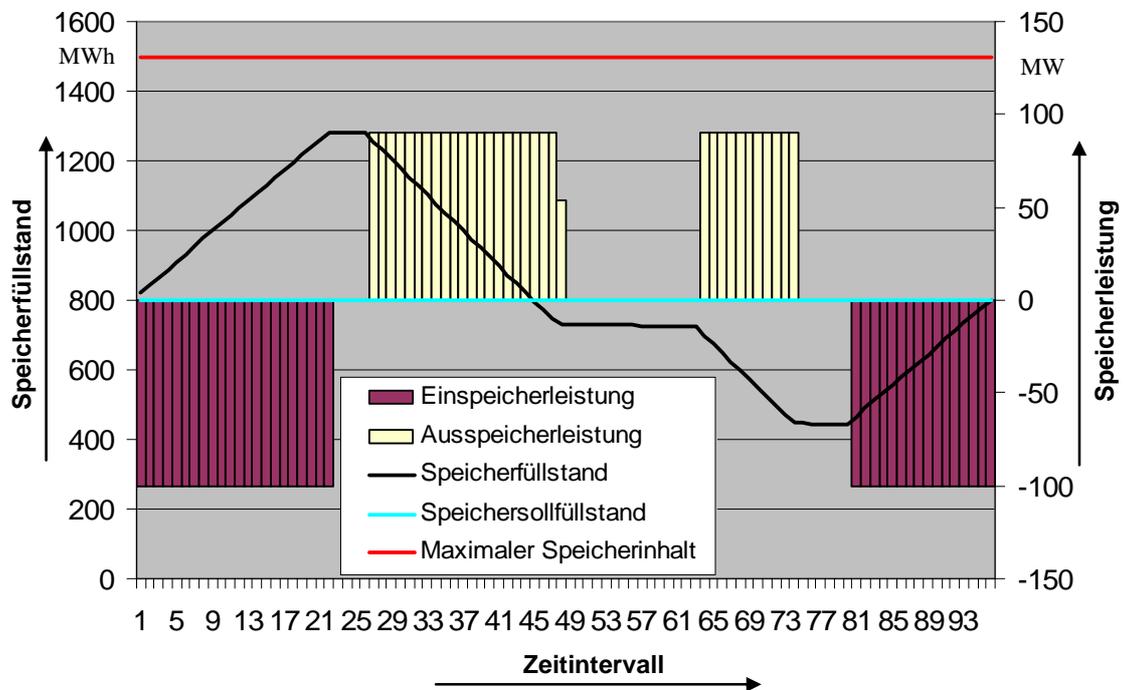


Abbildung 4.7: Bewirtschaftung des Pumpspeichers, Basisszenario

Abbildung 4.8 zeigt die durch die Windkraftanlagen eingespeiste elektrische Leistung, die in Abbildung 4.5 nicht mitbilanziert ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Windleistungsganglinie direkt an den EEG-Bilanzkreis weitergegeben wird und diese dementsprechend nicht für die Deckung des Bedarfs des Erzeugungssystembetreibers zur Verfügung steht. Darüber hinaus sei die Zwangsabnahme von EEG-Energie bereits von der elektrischen Fahrplanleistung, den der Erzeugungssystembetreiber zu decken hat, subtrahiert worden. Die Vergütung für den eingespeisten Strom wird in den Deckungsbeitrag einbezogen.

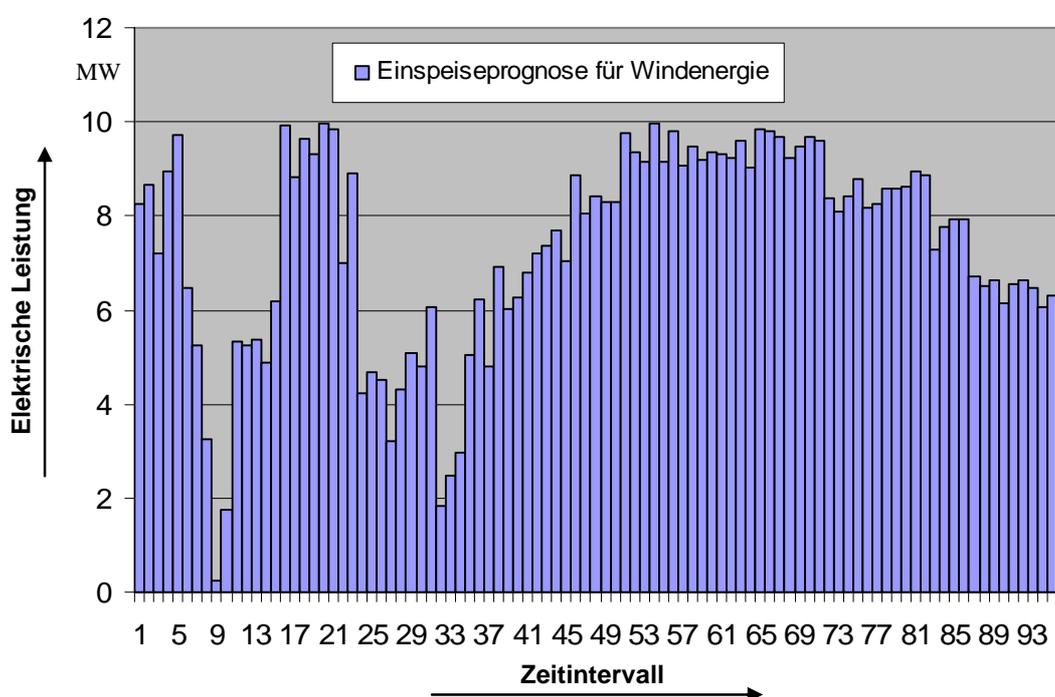
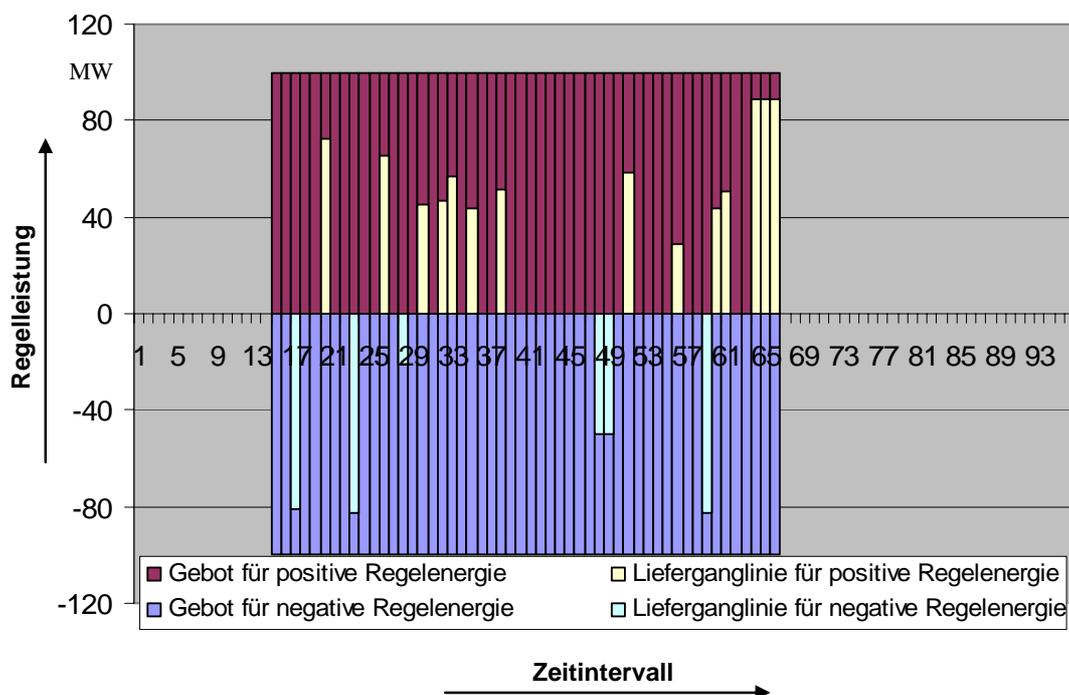


Abbildung 4.8: Einspeiseprognose für Windenergie

### 4.3.2 Ergebnisse mit Berücksichtigung von Regelenergie

Als zweites Szenario wird eine Betriebsoptimierung unter Berücksichtigung eines Gebotes für positive und negative Sekundärregelenergie untersucht. Die Gebotsleistungen und der Gebotszeitraum sind in Abbildung 4.9 eingetragen. Die weiteren Gebotsparameter sind angenommen, wie in Tabelle 4.4 definiert. Darüber hinaus sind die zufällig bestimmten Regelleistungsganglinien getrennt nach positiver und negativer Regelleistung aufgetragen. Im Gebotszeitraum werden dadurch 207 MWh positive und 91 MWh negative Regelener-

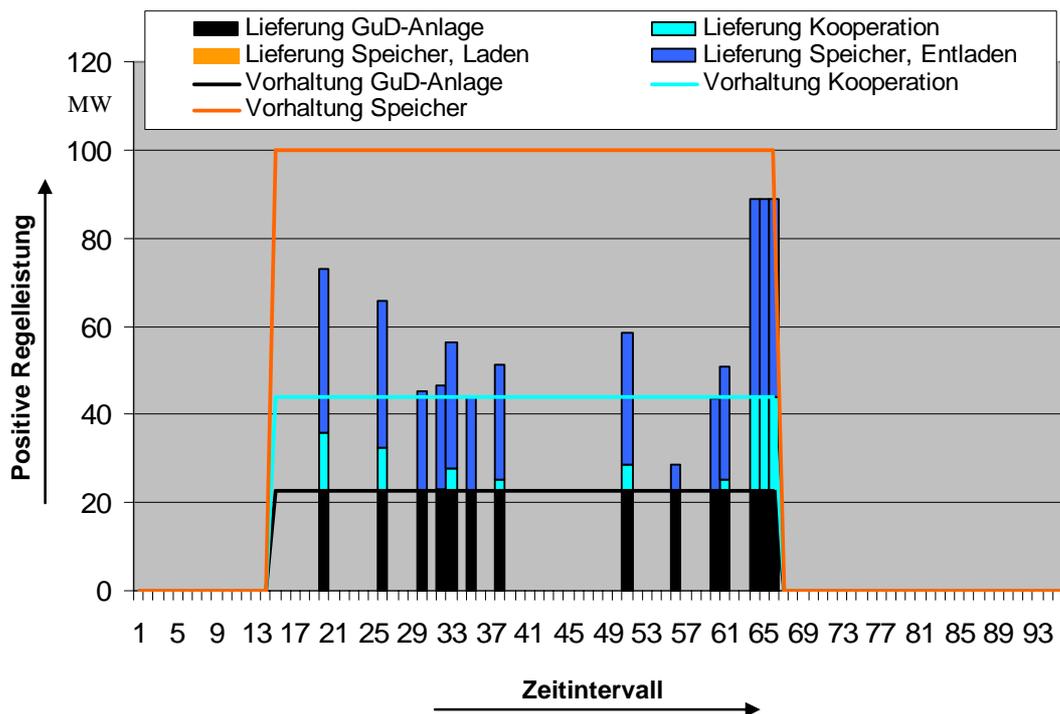
gie vom Erzeugungssystembetreiber abgerufen. Die Einsatzdauer variiert zwischen 15 und 45 Minuten, wobei es für das Ergebnis der Betriebsoptimierung keine Rolle spielt, ob sich ein längerer Einsatz aus mehreren unmittelbar nacheinander erfolgenden Teileinsätzen zusammensetzt oder ob es sich um einen einzelnen Aufruf handelt.



**Abbildung 4.9:** Gebotsleistungen und Werte der zufälligen Regelleistungsganglinie

Die Betriebsoptimierung ermittelt daraufhin, dass die abgegebenen Gebote wirtschaftlich sind und es wird anhand der Abbildungen 4.9 und 4.10 deutlich, wie die Deckung der gebotenen Regellenergien erfolgen soll.

Abbildung 4.10 zeigt, dass die GuD-Anlage, die Regellenergiekooperation und der Pumpspeicher zur Deckung des Gebotes für positive Sekundärregelenergie eingeplant werden, wobei der Pumpspeicher mit über 50 MW bereitgestellter Regelleistung den größten Anteil am Gebot abdeckt. Die Balken darunter zeigen an, wie die in Abbildung 4.9 aufgetragene positive Regelleistungsganglinie durch die Erzeugungsanlagen gedeckt werden würde. Die Regellenergiekooperation wird dabei möglichst wenig eingesetzt, weil die Verwendung der systemeigenen Anlagen 140 €/MWh für den eigenen Deckungsbeitrag erlöst und die Kosten für die Eigenerzeugung deutlich darunter liegen.



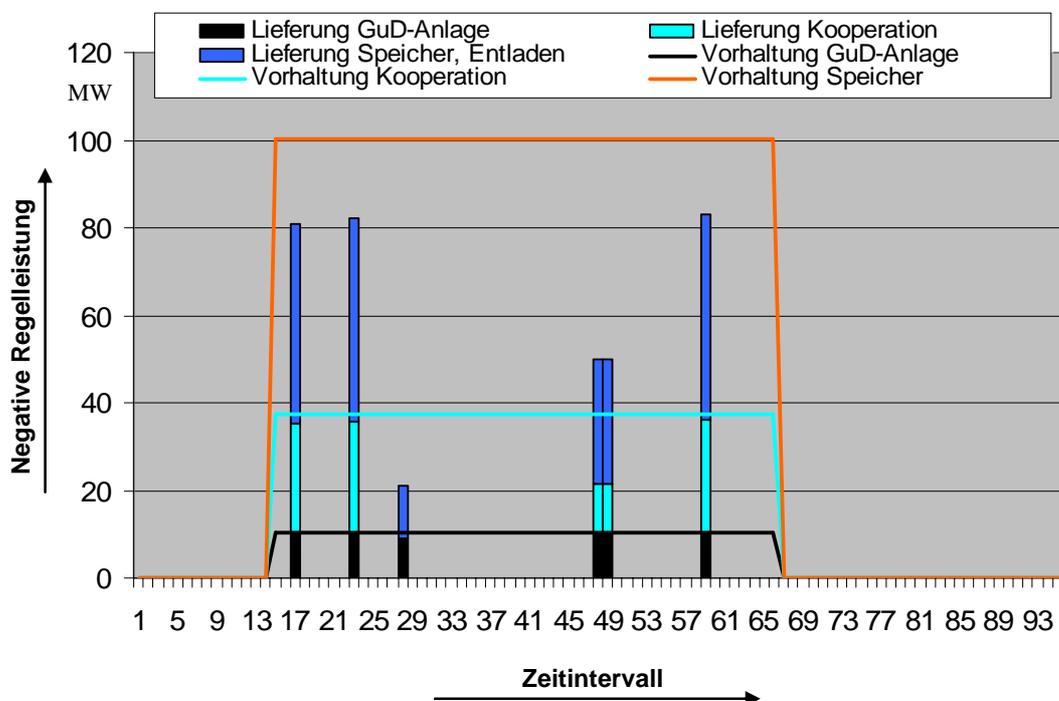
**Abbildung 4.10:** Bilanz für positive Regelernergie

Abbildung 4.11 zeigt das analoge Ergebnis für das negative Sekundärregelenergiegebot. Die Zusammensetzung der bereitstellenden Anlagen ist weitgehend gleich geblieben, der Pumpspeicher übernimmt einen noch größeren Anteil an der Regelernergiebereitstellung während die GuD-Anlage einen kleineren Anteil abdeckt.

Auch für die Lieferung von negativer Regelernergie wird eine Beteiligung anhand der Regelleistungsganglinie ermittelt. Durch die Reduktion der Brennstoffmengen bei Lieferung negativer Regelernergie, wird die Regelernergiekooperation wiederum nur dann eingesetzt, wenn die Regelleistungslieferung zu groß für die Bereitstellung durch Pumpspeicher und GuD-Anlage wird.

Die zulässige Bereitstellungszeit von 5 min stellt für positive und negative Regelernergie bei dieser Aufteilung der bereitgestellten Regelleistung keine problematische Größe dar. Die größte Bereitstellungszeit benötigt die GuD-Anlage, die mit 7,5 MW/min Leistungsänderungsgeschwindigkeit sogar bis zu 37,5 MW Regelleistung bereitstellen könnte. Die Bereitstellung durch die Kooperation und den Pumpspeicher wird mit den zur Verfügung stehenden 12,5 MW/min und den niedrig angesetzten 20 MW/min jeweils nicht bis an ihre Grenzen ausgenutzt. Bei der Lieferung der angenommenen Regelleistung zeigt sich dage-

gen in den Abbildungen 4.10 und 4.11, dass der Speicher wegen dieser Restriktion kleinere Regelleistungsanforderungen nicht alleine decken kann, sondern eine gemeinsame Deckung durch alle Regelenergie vorhaltenden Anlagen erfolgt.

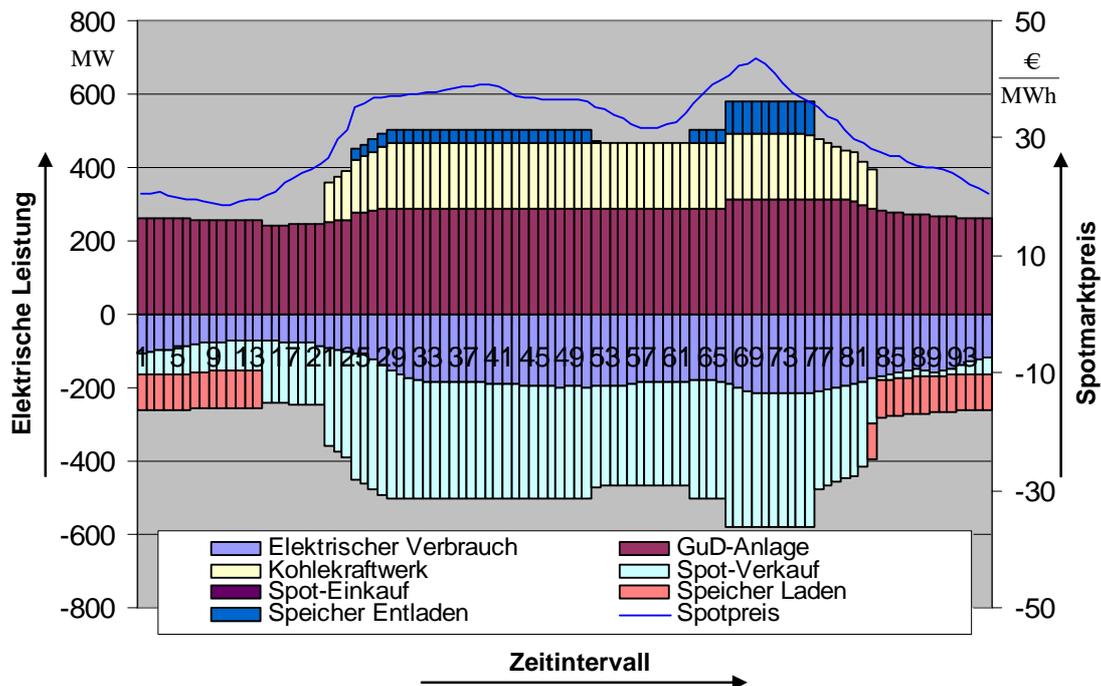


**Abbildung 4.11:** Bilanz für negative Regelenergie

Für den Erzeugungssystembetreiber ist nach der Feststellung der Wirtschaftlichkeit des potentiellen Gebotes vor allem die Frage zu beantworten, wie sich die Betriebsweise der Anlagen unter diesen neuen Randbedingungen verglichen mit dem Basisfall ändert. Dazu ist als erstes die Bilanz für die elektrische Erzeugung wichtig, die in Abbildung 4.12 dargestellt ist.

An der prinzipiellen Betriebsweise hat sich gegenüber dem Basisszenario nichts geändert. Nach wie vor wird die GuD-Anlage zur Abdeckung der grundlegenden elektrischen Erzeugung eingesetzt und im 23. Zeitintervall steuert das Kohlekraftwerk einen Teil elektrischer Erzeugung für den Verkauf am Fahrplanenergiemarkt bei. Der Erzeugungssystembetreiber muss demnach keine großen Umstellungen im Anlagenbetrieb durchführen, um zusätzlich Regelenergie bereitstellen zu können.

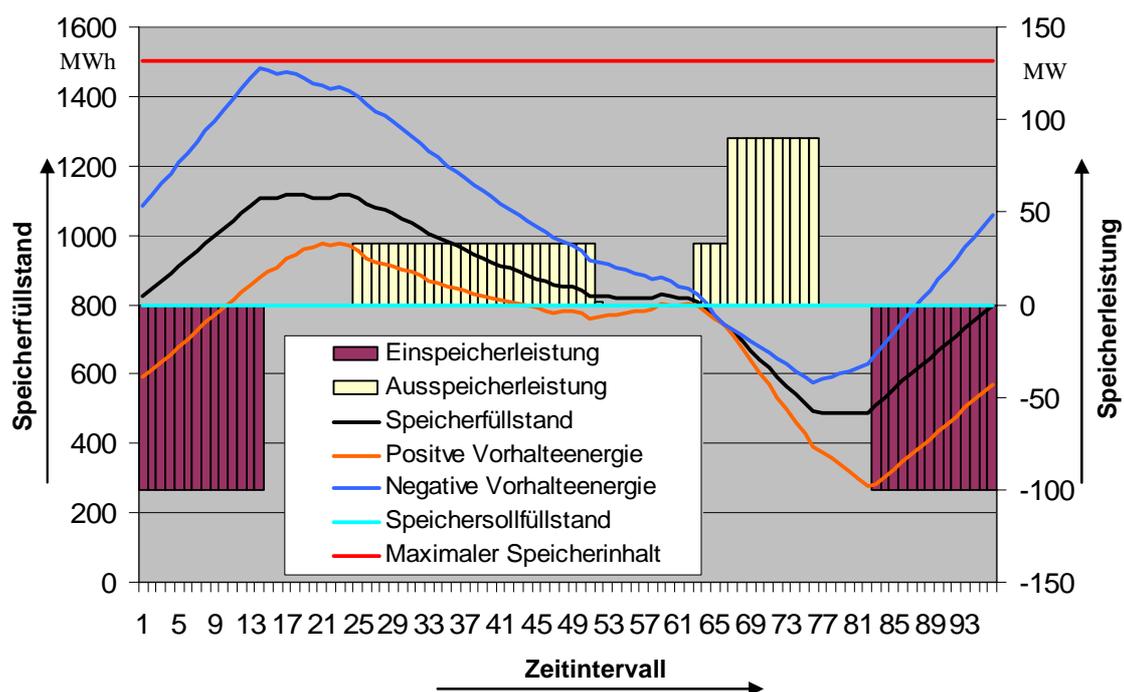
Wichtigste Änderung in der Betriebsweise ist die Reduktion der Leistung der GuD-Anlage, die gegenüber dem Basisszenario vor allem während des Gebotszeitraums zur Vorhaltung von positiver Regelenergie eingesetzt wird. Dementsprechend reduziert sich auch die am Fahrplanmarkt verkaufte elektrische Energie, was die unmittelbare Konkurrenz von Fahrplan- und Regelenergiemarkt deutlich macht.



**Abbildung 4.12:** Bilanz der elektrischen Erzeugung, Szenario mit Regelenergie

Der Pumpspeicher wird nach wie vor dafür eingesetzt, um im Niedrigpreis- und Niedrigverbrauchs-Zeitraum elektrische Energie aufzunehmen und zu Hochpreiszeiten für einen Verkauf am Fahrplanmarkt abzugeben. Der Umfang der Speicherung und die abgegebene Leistung während des Gebotszeitraums werden jedoch durch die Bereitstellung von Regelenergie deutlich eingeschränkt. Abbildung 4.13 zeigt dazu die Vorgänge, die im Pumpspeicher beim Szenario mit Berücksichtigung von Regelenergie ablaufen. Deutlich sind die Auswirkungen der Bilanzierung von vorzuhaltenden Energiemengen für positive und negative Regelenergie zu erkennen. Das Speichervolumen wird im Gegensatz zum Basis-szenario nur noch bis zu 1100 MWh bzw. 490 MWh ausgenutzt. Für die maximale Aufnahme von negativer Regelenergie wird nahezu das maximale Speichervermögen benötigt und für den Fall der maximalen Lieferung von positiver Regelenergie wird der Speicher

weit entladen. Der Speicherinhalt selbst wird zyklisch bilanziert, wie dies auch im Basis-szenario der Fall war. Die Bilanzierung der Regelenergievorhaltung wird so durchgeführt, dass mit Ablauf des Gebotszeitraums die Vorhaltebilanz ausgeglichen wird. Ab dem 67. Zeitintervall wird die Vorhalteenergie für positive und negative Regelenergie gleichermaßen wiederaufgebaut. Abbildung 4.14 verdeutlicht die zur Vorhaltung von Regelenergie vorgesehenen Energien noch einmal unabhängig vom aktuellen Speicherinhalt.



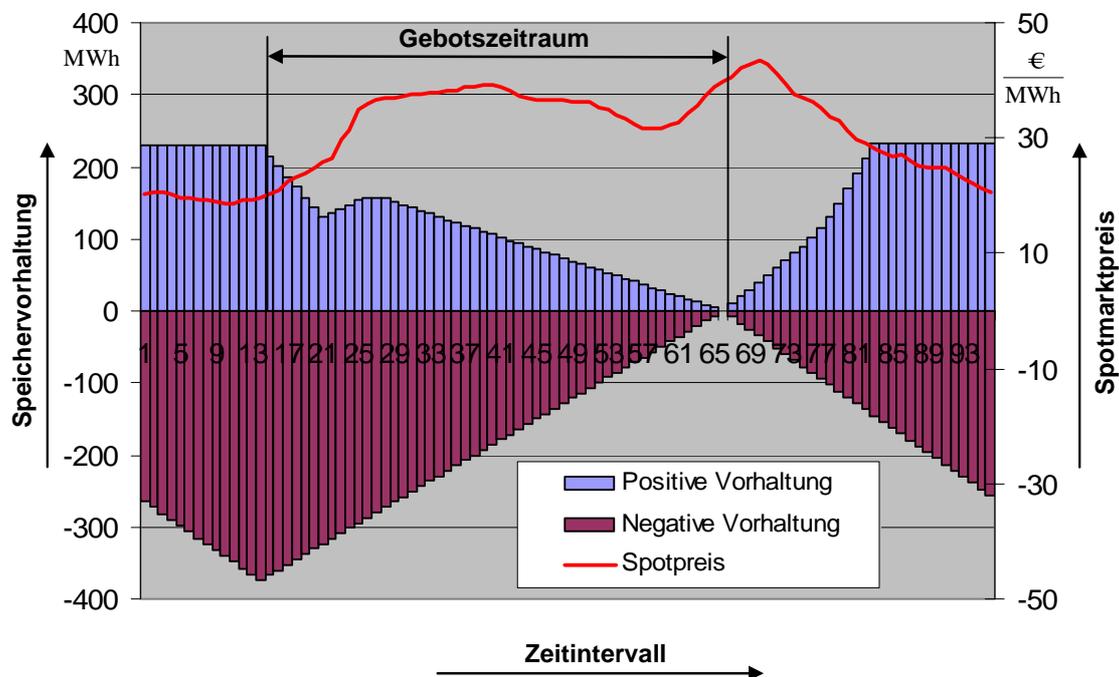
**Abbildung 4.13:** Bewirtschaftung des Pumpspeichers bei Bereitstellung von Regelenergie

In Kombination mit Abbildung 4.15, aus der hervorgeht, dass GuD-Anlage und Kohlekraftwerk für das Auffüllen der Vorhaltebilanzen des Speichers verantwortlich sind, lässt sich die Bilanzierung nachvollziehen:

Das Kohlekraftwerk ist nur während der Hochpreiszeiten eingeschaltet und kann auch nur dann zum Ausgleich der Vorhaltebilanz für die positive Regelenergie, die durch den Pumpspeicher bereitgestellt wird, beitragen. Abbildung 4.14 zeigt, dass zu Beginn des Gebotszeitraums die Vorhalteenergie stark abgebaut wird, bis das Kohlekraftwerk im 23. Zeitintervall eingeschaltet wird und damit einen Beitrag zum Ausgleich der Vorhaltebilanz liefern kann, wie dies in Abbildung 4.15 dargestellt ist. Mit Ablauf des Gebotszeitraums stellt das Kohlekraftwerk eine weitere potentielle Leistungssteigerung bereit, um die Vor-

haltebilanz weiter aufzufüllen, bevor es im 84. Zeitintervall wegen fallender Spotmarktpreise wieder ausgeschaltet wird.

Die Möglichkeit, die Windenergie zum Auffüllen der Vorhaltebilanz für positive Regelernergie zu verwenden, erweist sich in diesem Szenario als nicht wirtschaftlich, weil der Verzicht auf die Einspeisevergütung nicht wirtschaftlich wäre. Szenarien ohne Einspeisevergütung und mit niedrigen Preisen am Fahrplanenergiemarkt zeigen dagegen, dass ein wirtschaftlicher Einsatz von Windkraftanlagen zur Bereitstellung von Regelernergie möglich ist.



**Abbildung 4.14:** Bilanzierung der Regelernergievorhaltung für den Pumpspeicher

Die GuD-Anlage stellt über den gesamten Betrachtungszeitraum gleichmäßig ca. 38 MW Leistungsreduktion bereit, mit der ein Ausgleich für die vom Pumpspeicher optional aufgenommene negative Regelernergie durchgeführt werden kann. Dies ist möglich, weil die GuD-Anlage über den gesamten Zeitraum nach Abbildung 4.12 mit einer hohen elektrischen Erzeugung eingeplant ist, die im Bedarfsfall problemlos reduziert werden könnte.

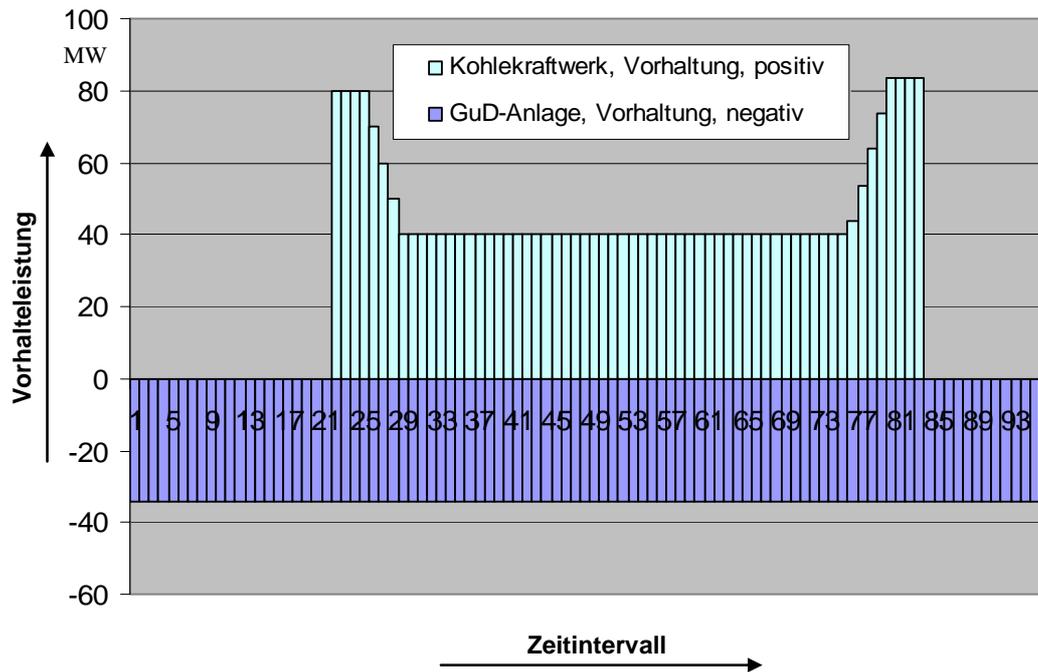


Abbildung 4.15: Vorhaltung von Erzeugungskapazität zum Ausgleich der Vorhaltebilanz

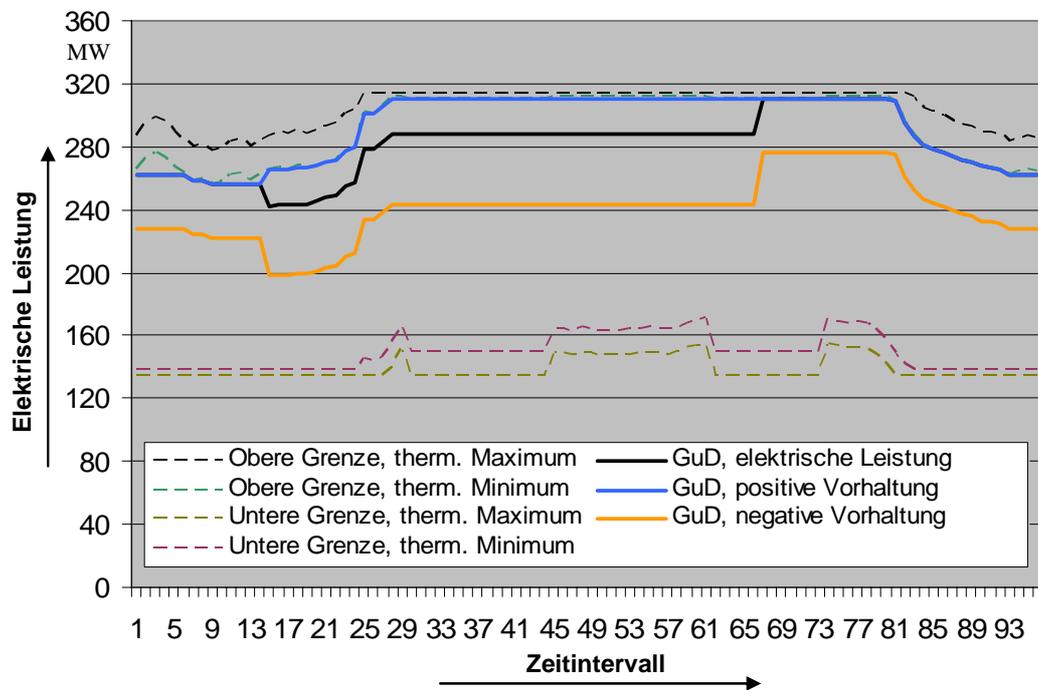
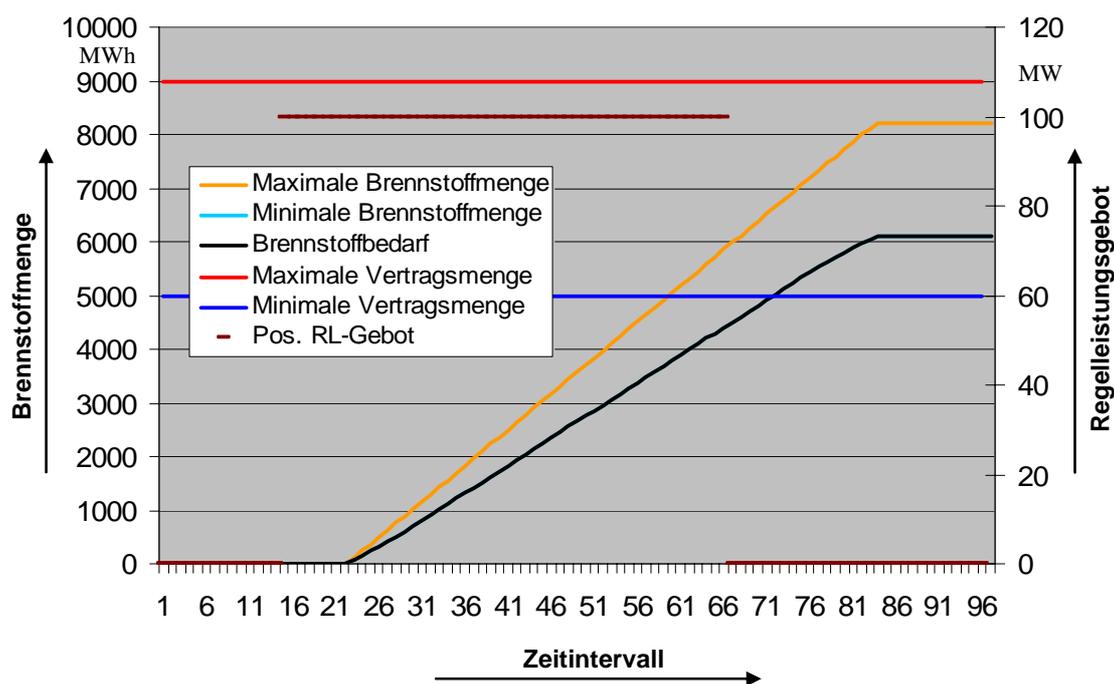


Abbildung 4.16: Einhalten der Betriebsdiagrammgrenzen durch die GuD-Anlage

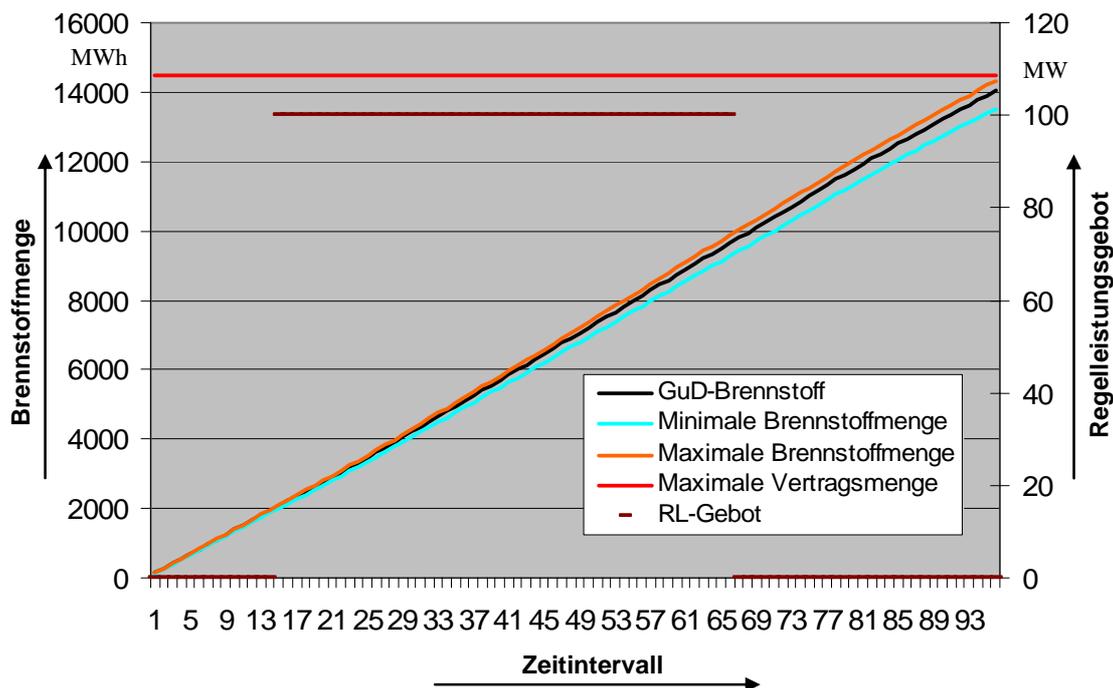
In Abbildung 4.14 ergibt sich das Resultat, nämlich ein Auffüllen der Vorhaltebilanz außerhalb des Gebotszeitraums. Während des Gebotszeitraums ist die vom Pumpspeicher eingeplante negative Regelleistung von 62 MW deutlich größer als die eingeplante Leistungsreduktion der GuD-Anlage, so dass die Vorhaltebilanz in diesem Zeitraum abgebaut wird.

Abbildung 4.16 zeigt, dass die Vorhalteleistungen für die Bereitstellung positiver Regelleistung und negativer Leistung zum Ausgleich der Vorhaltebilanz des Pumpspeichers erbracht werden können, ohne die Betriebsdiagrammgrenzen zu verletzen. Dargestellt sind die oberen und unteren Grenzen für eine Lieferung elektrischer Energie unter Berücksichtigung der thermischen Auskopplung.

Die folgenden Abbildungen 4.17 und 4.18 zeigen die Auswirkungen der Bereitstellung von Regelleistung auf die Brennstoffbezugsverträge für Kohle und Erdgas.



**Abbildung 4.17:** Einhalten der Bezugsvertragsgrenzen für Kohle



**Abbildung 4.18:** Einhalten der Bezugsvertragsgrenzen für Erdgas

Die Kennlinie für den Brennstoffverbrauch beinhaltet neben dem Leistungsbeitrag zur Fahrplanenergie auch die Beiträge zu positiver und negativer Regelenergie. Die Kennlinien für die maximal und minimal bereitzustellenden Brennstoffe zeigen, dass die Bezugsvertragsrestriktionen auch im Fall des maximalen Regelenergieabrufs, positiv wie negativ eingehalten werden. Der Kohlebezugsvertrag wird dabei ausschließlich für die Bereitstellung positiver Regelenergie eingesetzt, wogegen der Erdgasbezugsvertrag für positive und negative Regelenergiebereitstellung eingesetzt wird. Vor allem für die Vorhaltung von positiver Regelenergie ist deutlich zu erkennen, welche Abweichungen von der ursprünglich geplanten Brennstoffmenge auftreten können. Dabei wirkt sich insbesondere aus, dass die vom Kohlekraftwerk vorgehaltene Leistung zum Bilanzausgleich im Vergleich zu der tatsächlichen Erzeugung relativ groß ist und darüber hinaus das Kohlekraftwerk einen relativ schlechten Wirkungsgrad hat. Bei der GuD-Anlage und deren guten Wirkungsgrad bzw. hoher Erzeugungsleistung fallen die vorgehaltenen Leistungen entsprechend weniger ins Gewicht.

Nach der Analyse der Betriebsoptimierungsergebnisse, die unter Berücksichtigung von Regelenergie ermittelt wurden, stellt sich die Frage, wie robust das gewonnene Ergebnis

gegenüber Änderungen der zufällig generierten Regelleistungsganglinien ist. Um darüber eine Aussage zu gewinnen kann der Erzeugungssystembetreiber weitere Szenarien mit neuen Regelleistungsganglinien optimieren und die erzielten Ergebnisse vergleichen. Exemplarisch ergibt sich für den hier betrachteten Fall das Ergebnis aus Tabelle 4.6:

Optimierungsrechnung	Zielfunktionswert	Zu liefernde Regelenergie		Gebotsabgabe wirtschaftlich?
		Positive Regelenergie	Negative Regelenergie	
	€	MWh	MWh	Ja/Nein
Basisszenario	57804	-	-	-
A	92388	176,41	78,00	Ja
B	98051	203,38	65,20	Ja
C	85018	158,67	57,40	Ja
D	87289	174,20	60,00	Ja
E	88124	145,51	80,21	Ja
F	96542	203,01	91,60	Ja
Durchschnitt:		176,86	72,07	Ja

**Tabelle 4.6:** Optimierungsergebnisse mit verschiedenen Regelleistungsganglinien

Anhand der Ergebnisse dieser 6 Optimierungsrechnungen mit verschiedenen, zufälligen Regelleistungsganglinien kann der Erzeugungssystembetreiber entscheiden, ob er das Gebot am Regelenergiemarkt abgeben möchte. Alle 6 Rechnungen haben die Wirtschaftlichkeit des Gebotes auch unter wechselnden Umständen gezeigt. Darüber hinaus ist die Wirtschaftlichkeit sowohl bei dem Szenario F mit hohen als auch bei Szenario C mit niedrigen zu liefernden Regelenergien gegeben. Für die Kombinationen von hoher bzw. niedriger Lieferung von Regelenergie sind mit den Szenarien B und E ebenfalls Nachweise für die Wirtschaftlichkeit erbracht worden. Schließlich zeigt auch die deutliche Verbesserung des Zielfunktionswert zwischen Basisszenario und den Regelenergieszenarien, dass die Abgabe des betrachteten Sekundärregelenergiegebotes für den Erzeugungssystembetreiber sinnvoll ist.

## 5 Zusammenfassung

Die Liberalisierung der elektrischen Energieversorgung hat in den letzten Jahren zu gravierenden Umwälzungen in der Energiewirtschaft geführt. Vor allem die Entflechtung (Unbundling) von Netzbetrieb und Energieerzeugung, die vormals in vertikal integrierten Versorgungsunternehmen gemeinsam organisiert wurden, hat zu einem Aufbrechen der monopolartigen Strukturen der Energiewirtschaft geführt und die Entwicklung eines Marktes für elektrische Energie ermöglicht.

Gleichzeitig bedeutet die Entflechtung für den Übertragungsnetzbetreiber, dass er für die Bereitstellung der Systemdienstleistung Regelenenergie, die er weiterhin zu organisieren hat, keine eigenen Erzeugungsanlagen mehr zur Verfügung hat. Stattdessen muss er Regelenenergie in einem diskriminierungsfreien Ausschreibungsverfahren von Erzeugungssystembetreibern beschaffen, die sich über eine Gebotsabgabe am Regelenenergiemarkt beteiligen.

Für den Erzeugungsanlagenbetreiber bietet sich dadurch die Chance, neben der Nutzung des Marktes für Fahrplanenergie auch den Markt für Regelenenergie mit dem Ziel der Erwirtschaftung eines maximalen Deckungsbeitrags in seine Betriebsoptimierung einzubeziehen. Vor allem für Erzeugungssysteme, die über Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung verfügen, bietet der Regelenenergiemarkt zusätzliche Möglichkeiten, die flexibel einsetzbaren Anlagen noch besser auszunutzen. Ist die freie Kapazität der eigenen Erzeugungsanlagen für eine Gebotsabgabe nicht groß genug, bietet sich darüber hinaus an, im Rahmen einer Kooperation mit weiteren Erzeugungssystembetreibern am Regelenenergiemarkt als "virtuelles Regelkraftwerk" aufzutreten und damit kleinere Teilleistungen zu einem gemeinsamen Gebot zu bündeln.

Die Komplexität der daraus für den Betreiber eines Erzeugungssystems resultierenden Betriebsoptimierungsaufgabe ist so groß, dass der Einsatz computergestützter, mathematischer Optimierungsverfahren nötig ist, um die Chancen der Energiemärkte bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller technischen, betrieblichen, vertraglichen und umweltrelevanten Randbedingungen nutzen zu können. Insbesondere die charakteristischen Eigenschaften der Regelenenergie und die restriktiven Bedingungen des Regelenenergiemarktes stellen eine Herausforderung für die Optimierung dar, die bisher nicht umfassend in einem geschlossenen Optimierungsverfahren gelöst wurde.

Diese Arbeit hat deshalb zum Ziel, eine geschlossene Betriebsoptimierung auf Basis der Gemischt-Ganzzahlig-Linearen-Programmierung (GGLP) für den Betreiber von Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung zu ermöglichen, bei der vor allem die Untersuchung potentieller Gebote für den Regelenenergiemarkt im Mittelpunkt steht. Die Betriebsoptimierung wird dazu wegen des in sehr kurzfristigen Zeiträumen variierenden Einsatzes von Regelenergie und unter Annahme zukünftig kürzer werdender Ausschreibungszeiträume primär auf den Zeithorizont "heute für morgen" ausgerichtet.

Das entwickelte Verfahren basiert auf Teilergebnissen, die im Rahmen vorhergehender Arbeiten zur Betriebsplanung von Erzeugungssystemen erarbeitet wurden und integriert darüber hinaus insbesondere die stochastisch erfolgenden Abrufe von Regelenergie, deren Dauer, Energiemenge und Höhe nicht prognostizierbar sind, in die Betriebsoptimierung des Erzeugungssystembetreibers. Dazu müssen zwei grundlegend neue Anforderungen durch die Modellbildung des Planungsproblems erfüllt werden:

- Berücksichtigung der dem Erzeugungssystembetreiber durch den unvermeidbar suboptimalen Anlagenbetrieb entstehenden Kosten, die durch das Vorhalten von Regelenergie verursacht werden sowie der Erlöse aus der Regelenergiebereitstellung.
- Berücksichtigung der dem Erzeugungssystembetreiber durch die Lieferung von Regelenergie entstehenden Kosten und Erlöse

Gleichzeitig wird durch die Vorhaltung und Lieferung von Regelenergie eine Reihe von Nebenbedingungen beeinflusst, deren Einhaltung auch bei der maximal möglichen Anforderung von Regelenergie gewährleistet werden muss.

Ausgangspunkt der Entwicklungen zur Lösung dieser Aufgabenstellung ist eine universelle Problemformulierung auf Basis von fünf Grundelementen, Knoten, Quelle, Wandler, Speicher und Ganglinie, zur Beschreibung eines beliebigen Erzeugungssystems deren Modellierungseigenschaften im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt wurden. Aus dieser Problemformulierung erzeugt das Optimierungswerkzeug ein mathematisches Gleichungssystem, das zur Optimierung unter Einsatz eines GGLP-Solvers erforderlich ist. Die notwendigen Schnittstellen des Verfahrens sind relational gehalten und können deswegen unmittelbar in ergänzende Software, z.B. in Datenbanken, eingebunden werden.

Die Konzeption der Integration der Regelenergie in die Modellierung der Betriebsoptimierung ist darauf aufbauend so ausgerichtet, dass mit dem Verfahren positive und negative Primär- und Sekundärregelenergie sowie Minuten- und Stundenreserve auf Grundlage einer allgemein gehaltenen Modellierung abgebildet werden können, indem lediglich die entsprechenden Parametrierungen angepasst werden müssen.

Zur Berücksichtigung der durch die Lieferung von Regelenergie entstehenden Kosten und Erlöse wird auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation anhand von charakteristischen Daten historischer Regelenergielieferungen eine zufällige Lieferganglinie für Regelenergie ermittelt. Damit ist es möglich, über einen repräsentativen Regelenergiebedarf dessen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems in die Planungsaufgabe zu integrieren und auf diese Weise Fahrplan- und Regelenergiemarkt als konkurrierende Möglichkeiten für den Erzeugungssystembetreiber in einer Betriebsoptimierung abzubilden.

Der Erzeugungssystembetreiber erhält als Ergebnis eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit des untersuchten Regelenergiegebotes und Informationen darüber, wie die Bereitstellung der Regelenergie durch seine Erzeugungsanlagen optimal bewerkstelligt werden kann. Während der Optimierung wird dazu für jede an der Bereitstellung von Regelenergie potentiell beteiligte Anlage ermittelt, ob und wie sie an der Vorhaltung von Regelenergie beteiligt ist, welche Regelenergie sie zur Lieferung beiträgt und ob die zugeordneten Restriktionen auch im Fall des maximalen Abrufs der vorgehaltenen Regelenergie eingehalten werden. Zur Verifikation des Ergebnisses, das auf Basis einer zufällig angenommenen Regelleistungsganglinie ermittelt wurde, können mehrere Szenarien mit neu ermittelten Regelleistungsganglinien optimiert und vom Erzeugungsanlagenbetreiber ausgewertet werden.

Die während der Entwicklung durchgeführten und in dieser Arbeit exemplarisch vorgestellten Untersuchungen an Testszenarien haben die Funktionsfähigkeit und Einsatzfähigkeit des Verfahrens am Beispiel von Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung aufgezeigt, so dass mit dem entwickelten Verfahren die beschriebene Aufgabenstellung einer Betriebsoptimierung aus Sicht des Erzeugungsanlagenbetreibers unter besonderer Berücksichtigung der Chancen am Regelenergiemarkt erfüllbar ist. Das Verfahren bietet darüber hinaus eine hohe Flexibilität bei der Problemformulierung und der Anpassungsfähigkeit an neue Randbedingungen des Regelenergiemarktes und qualifiziert sich somit für den praktischen Einsatz.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Albers, K.; Hoffmann, J.; Roeßgen, F.: Marktplatz für Regelenergie in Deutschland - Entwicklungen und Perspektive. VDE Kongress 2002 "Net-Worlds - Leben und Arbeiten in vernetzten Welten", Dresden (2002), VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, S. 309-314
- [2] Albers, K.; Stelzner, P.: Ein Verfahren zur Prognose von Lastganglinien für unterschiedliche Einsatzbereiche. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 92 (1993), H. 6, S. 282-287
- [3] Albers, K.; Stelzner, P.: Regelenergiebeschaffung durch den Übertragungsnetzbetreiber. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 51 (2001), H. 11, S. 704-709
- [4] Beale, E. M. L.: Introduction to Optimization. Wiley, Chichester, 1988
- [5] Blöchinger, L.; Güssow, J.: Praktische Einsatzmöglichkeiten mehrstufiger stochastischer Optimierung im Portfoliomanagement. VDI-GET-Fachtagung "Optimierung in der Energiewirtschaft", Stuttgart (2005), VDI-Berichte Nr. 1908, VDI-Verlag, Düsseldorf (2005), S. 53-64
- [6] Borderke, S.; Gross, J.; Neus, H.; Haubrich, H.-J.: Portfoliooptimierung eines hydrothermischen Kraftwerksparks am Termin-, Spot- und Regelenergiemarkt. Internationaler ETG-Kongress 2003 "Energietechnik für die Zukunft", Hamburg (2003), ETG-Fachbericht 94, VDE-Verlag, Berlin/Offenbach (2003), S. 299-306
- [7] Brand, H.; Weber, C.: Stochastische Optimierung im liberalisierten Energiemarkt - Wechselwirkungen zwischen Kraftwerkeinsatz, Stromhandel und Vertragsbewirtschaftung. VDI-GET-Fachtagung "Optimierung in der Energieversorgung", Veitshöchheim (2001), VDI-Berichte Nr. 1627, VDI-Verlag, Düsseldorf (2001), S. 173-195
- [8] Brenner, A.; Utich, R.; Weingartner, S.: Entwicklungsstand und Marktpotential eines H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Dampferzeugers zur Primärregelung. In: VGB-Kraftwerkstechnik, Jg. 77 (1997), H. 1, S. 14-17

- [9] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harry Deutsch, Frankfurt am Main, 1995
- [10] Büchner, J.; Türkucar, T.: Optionen zur Weiterentwicklung der Regelenenergiemärkte in Deutschland. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 104 (2005), H. 1-2, S. 45-57
- [11] Brunekreeft, G.; Tweleemann, S.: Institutionelle Reformen und Versorgungssicherheit - Status Quo und Perspektiven der deutschen Stromwirtschaft. In: ZfE-Zeitschrift für Energiewirtschaft, Jg. 28 (2004), H. 3, S. 163-174
- [12] Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung GmbH, Regelmarkt - Gutachten zu Marktgestaltung, Beschaffungskosten und Abrechnung von Regelleistung und Regelenenergie durch die deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Aachen und Berlin, 31.10.2003, <http://www.bet-aachen.de/>, 07.10.2005
- [13] Busse, L.; Sindelar, R.: Sekundenleistungsreserve und Wärmeverbrauch bei verschiedenen Betriebsarten von Dampfturbinen. In: VGB-Kraftwerkstechnik, Jg. 69 (1989), H. 9, S. 892-895
- [14] Chen, J.; Lee, F. N.; Breipohl, A. M.; Adapa, R.: Scheduling Direct Load Control to Minimize System Operational Cost. In: IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10 (1995), No. 4, pp. 1994-2001
- [15] Choueiki, M. H.; Mount-Campbell, C. A.; Ahalt, S. C.: Building a "Quasi-Optimal" Neural Network to Solve the Short-Term Load Forecasting Problem. In: IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12 (1997), No. 4, pp. 1432-1439
- [16] Conrad, T.: Modellierung des elektrischen Verhaltens von steuerbaren Betriebsmitteln in der Lastführung. In: Elektrie, Jg. 47 (1993), H. 8, S. 296-301
- [17] Deutsche Bundesregierung: Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzzugangsverordnung - StromNZV). BGBl I 2005, S. 2243-2251, Bonn, 28.07.2005
- [18] Deutscher Bundestag: Zweites Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts. BGBl I 2005, S. 1970-2018, Bonn, 12.07.2005

- [19] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW): Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2005 nach Energieträgern. DIW, Berlin, 2006, [http://ag-energiebilanzen.de/daten/BRD\\_Stromerzeugung1990-2005.pdf](http://ag-energiebilanzen.de/daten/BRD_Stromerzeugung1990-2005.pdf), 21.02.2006
- [20] EON Energie AG: Ausschreibungsergebnisse für Primär-, Sekundär- und Minutenreserve. <http://www.eon-netz.com/>, 06.10.2005
- [21] European Transmission System Operators (ETSO): Current State of Balance Management in Europe. ETSO, Brussels, 2003, <http://www.etso-net.org/>, 04.10.2005
- [22] Gaul, A. J.: Wirtschaftlich optimale Laststeuerung mit evolutionären Strategien. Universität Dortmund, Dissertation, 1997
- [23] Graf, F.-R.: Regelzonenübergreifender Einsatz von Regelenergie: Erfahrungen aus der Abwicklung. DVG/VDN-Fachtagung "Regelenergiemarkt in Deutschland", Berlin (2001), <http://www.vdn-berlin.de>, 07.10.2005
- [24] Hackländer, P.: Integrierte Betriebsplanung von Gasversorgungssystemen. Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2002
- [25] Hauser, M. : Koordinierung der kurz- und mittelfristigen Einsatzoptimierung in integrierten Energieversorgungssystemen. Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation, 1997
- [26] Hauser, M.; Maubach, K.-D.; Verstege, J.: Planungsinstrument zur Optimierung des Anlagen- und Energieeinsatzes. In: etz, Jg. 116 (1995), H. 12, S. 8-15
- [27] Hoffmann, S.: Anwendung von KI-Methoden für die Energiebeschaffungsoptimierung zur Ermittlung von Einschaltentscheidungen. Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Diplomarbeit, 2002 (unveröffentlicht)
- [28] Holst, A.; Prillwitz, F.; Weber, H.: Netzregelverhalten von Windkraftanlagen. GMA/ETG-Fachtagung "Sichere und zuverlässige Systemführung von Kraftwerk und Netz im Zeichen der Deregulierung", München (2003), VDI-Berichte Nr. 1747, VDI-Verlag, Düsseldorf (2003), S. 107-121
- [29] Illerhaus, S. W.: Optimale Betriebsplanung industrieller Energieversorgungssysteme. Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation, 2000

- [30] Illerhaus, S. W.; Verstege, J.; Günzel, H.: Bewertung von Spotgeschäften im Strommarkt - Beispiele aus der praktischen Anwendung. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 98 (1999), H. 1/2, S. 41-44
- [31] Illerhaus, S. W.; Verstege, J. F.: Optimal Operation of CHP-Based Industrial Power Systems in Liberalized Energy Markets. IEEE Power Tech 1999, Budapest, Hungary (1999), Paper BPT99-352-13
- [32] Jennert, O.: Maximumrechner mit intelligenter Mustererkennung. VDI-GET-Fachtagung "Betriebsmanagementsysteme in der Energiewirtschaft" Würzburg (1997), VDI-Berichte Nr. 1310, VDI-Verlag, Düsseldorf (1997), S. 373-382
- [33] Karch, R.; Neumann, M.; Scientific Computing. Wien, 21.06.2005, <http://www.exp.univie.ac.at/~sc/index.html>, 10.11.2005
- [34] Kehlhofer, R.; Kunze, N.; Lehmann, J.; Schüller, K.-H.: Gasturbinenkraftwerke, Kombikraftwerke, Heizkraftwerke und Industriekraftwerke. Technischer Verlag Resch, Köln, 1992
- [35] Kleinekorte, K.; Graf, F.-R.: Bereitstellung von Systemdienstleistungen - Regelenergie und Ausgleichsenergie. Internationale Fachtagung der ETG des VDE, ÖVE, und SEV, Friedrichshafen (2001)
- [36] Kresse, H. M.; Münch, C.: Auktion im Stundentakt - Ein Marktkonzept für Regelenergieprodukte. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 100 (2001), H. 1-2, S. 30-33
- [37] Maubach, K.-D.: Mittelfristige Energieeinsatzoptimierung in Versorgungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung. Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation, 1994
- [38] Menzel, H.-B.; Moser, A.: Börsliche Regelenergiemärkte. FGE-Tagung "Markt und Netze", Aachen (2003), Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 96, Klinkenberg-Verlag, Aachen (2003), S. 56-63
- [39] Müller-Kirchenbauer, J.; Zander, W.: Marktplatz Regelenergie - Nutzen, Voraussetzungen und Ausgestaltung eines börslichen Regelenergiemarktes in Deutschland und Zentraleuropa. Internationaler ETG-Kongress 2003 "Energietechnik für die

- Zukunft", Hamburg (2003), ETG-Fachbericht 94, VDE-Verlag, Berlin/Offenbach (2003), S. 271-279
- [40] Ng, K.-H.; Sheblé, G. B.: Direct Load Control - A Profit-Based Load Management Using Linear Programming. In: IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13 (1998), No. 2, pp. 688-695
- [41] Nissen, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen. Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 1996
- [42] Piller, W.; Rudolph, M.: Kraft-Wärme-Kopplung - zur Theorie und Praxis der Kostenrechnung. VWEW-Verlag, Frankfurt/Main, 1991
- [43] Pfeiffer, R.: Einsatz von Energiespeichern aus Sicht der kurzfristigen Betriebsplanungen in integrierten Energieversorgungssystemen. Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation, 1997
- [44] Parlament und Rat der Europäischen Union: Richtlinie 96/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates betreffend gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt. ABl. EG Nr. L 027, S. 20, Brüssel, 30.01.1997
- [45] Parlament und Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2003/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Aufhebung der Richtlinie 96/92/EG. ABl. EG Nr. L 176, S. 37, Brüssel, 17.07.2003
- [46] Prillwitz, F.; Holst, A.; Weber, H.: Primärregelung mit Windkraftanlagen. ETG-Workshop "Neue dezentrale Versorgungsstrukturen", Frankfurt am Main (2003)
- [47] RWE Transportnetz Strom: Beschaffung von Regelleistung und -energie in Deutschland. <http://www.rwe.com/>, 18.11.2003
- [48] Roggenbau, M.; Graf, F.-R.; Landeck, E. U.; Reiners, P.: Kooperation der Übertragungsnetzbetreiber zur Minutenreservehaltung. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 50 (2000), H. 9, S. 665-670
- [49] Schmiege, M.: Aspekte der Netzintegration und des Regelverhaltens von Windenergie. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 102 (2003), H. 12, S. 46-51

- [50] Schmitt, A.: Multikriterielle Optimierung von Systemdienstleistungen für Energieübertragungssysteme. Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2003
- [51] Schmitt, A.: Optimale Beschaffung von Regelreserve und weiteren Systemdienstleistungen. Internationaler ETG-Kongress 2003 "Energietechnik für die Zukunft", Hamburg (2003), ETG-Fachbericht 94, VDE-Verlag, Berlin/Offenbach (2003), S. 289-298
- [52] Schmitt, A.; Hackländer, P.; Wulff, T.; Verstege, J.: Einsatzplanung von Regelkraftwerken und Angebotsermittlung für Regelleistungsmärkte. Internationaler ETG-Kongress 2003 "Energietechnik für die Zukunft", Hamburg (2003), ETG-Fachbericht 94, VDE-Verlag, Berlin/Offenbach (2003), S. 307-314
- [53] Schmitz, P.; Schönlein, A.: Lineare und linearisierbare Optimierungsmodelle sowie ihre ADV-gestützte Lösung. Vieweg, Braunschweig, 1978
- [54] Seeger, T.: Tageseinsatzoptimierung in Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung. Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation, 1991
- [55] Sindelar, R.: Ein Konzept für die Leistungsregelung eines kohlegefeuerten Kraftwerksblockes. In: VGB-Kraftwerkstechnik, Jg. 64 (1984), H. 7, S. 589-598
- [56] Strese, J.: Das virtuelle Regelkraftwerk. In: emw, (2003), H.6. , S.17-19
- [57] Tegethoff, W.: Die Entwicklung des deutschen Energiewirtschaftsrechts bis zur Neuordnung im Jahre 1998 - Vergängliches und Bleibendes. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97 (1998), H. 13, S. 9-17
- [58] Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE): Operation Handbook. UCTE, Brussels, 24.06.2004, <http://www.ucte.org/>, 04.10.2005
- [59] Verband der Elektrizitätswirtschaft (VDEW): EDV-Optimierung des Kraftwerkseinsatzes - Definitionen, Anforderungen, Verfahren. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 89 (1990), H. 15, S. 848-854

- [60] Verband der Netzbetreiber (VDN): Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie und über Prinzipien der Netznutzung. VDN, Berlin, 2001
- [61] Verband der Netzbetreiber (VDN): Transmission Code 2003. VDN, Berlin, 2003
- [62] Verband der Netzbetreiber (VDN): Distribution Code 2003. VDN, Berlin, 2003
- [63] Wang, J; Redondo, N. E.; Galiana, F. D.: Demand-Side Reserve Offers in Joint Energy/Reserve Electricity Markets. In: IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18 (2003), No. 4, pp. 1300-1306
- [64] Werner, T.: Evolutionsstrategien zur kurzfristigen Einsatzoptimierung hydrothermischer Kraftwerkssysteme. Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation, 1998
- [65] Wiedmann, K.-P.; Langerfeldt, M.: Verschärftes Unbundling in der deutschen Energiewirtschaft. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 54 (2004), H. 3 S. 158-165
- [66] Wu, C.; Chen, N.: Frequency-Based Method for Fast-Response Reserve Dispatch in Isolated Power Systems, In: IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution, Vol. 151 (2004), No. 1, pp. 73-77
- [67] Wulff, T.; Verstege, J.: Bewertung von Regelenergieangeboten im Rahmen der Betriebsplanung von Erzeugungsanlagen. VDI-GET-Fachtagung "Optimierung in der Energiewirtschaft", Stuttgart (2005), VDI-Berichte Nr. 1908, VDI-Verlag, Düsseldorf (2005), S. 237-248
- [68] Wulff, T.; Verstege, J.: Modellierung des Emissionshandels für die Optimierung von Erzeugungssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung. Internationaler ETG-Kongress 2005 "Emissionshandel - Herausforderung für die Europäische Energiewirtschaft", Dresden (2005), ETG-Fachbericht 103, VDE-Verlag, Berlin/Offenbach (2005), S. 255-262
- [69] Wulff, T.; Verstege, J. F.: Assessment of Control Energy Bidding by MILP-based Short Term Planning of Generation Systems. IEEE Power Tech 2005, St. Petersburg, Russia (2005), Paper 42