

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
FAKULTÄT FÜR ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIK
FACHGEBIET ENERGIEINFORMATIK

Implementierung eines verteilten Regelleistungsmarktes: Spieltheoretische und agentenbasierte Modellierung

Masterarbeit

vorgelegt von

Gesa Nadine Ohlendorf

Geboren am 09.06.1995 in Hannover

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Astrid Nieße
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach
Betreuer: Paul Hendrik Tiemann, M.Sc.

Hannover, den 25. Mai 2021

Aus der Dezentralisierung und Digitalisierung des elektrischen Energiesystems erwachsen neue Verantwortlichkeiten und Herausforderungen für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Systemdienstleistungen wie die Frequenzhaltung müssen einerseits zunehmend aus dem Verteilnetz erbracht werden, während andererseits neue Risiken für Blackouts durch Cyberangriffe entstehen. Die Aggregation dezentraler Flexibilitäten in verteilten Märkten könnte kleinen, verteilten Akteuren den Zugang zu den zentralen Regelreservemärkten erleichtern und gleichzeitig die Resilienz des Energiesystems erhöhen. Um sicherzugehen, dass verteilte Märkte kein neues Risiko für die Versorgungssicherheit durch unvorhergesehenes Agieren ihrer Akteure darstellen, kann das strategische Verhalten rationaler Marktteilnehmer in spieltheoretischen Modellen untersucht werden. Die vorliegende Arbeit liefert einen Durchstich der spieltheoretischen Modellierung eines verteilten, agentenbasierten Marktes zur Aggregation von Primärregelleistungsgeboten. Für einen beispielhaften Marktentwurf, der auf der Durchführung vollverteilter, verdeckter Auktionen auf einer Blockchain basiert, werden drei unterschiedliche spieltheoretische Modellierungen des strategischen Bieterverhaltens rationaler, nutzenbasierter Softwareagenten entwickelt. Der Fokus liegt hierbei in den ersten beiden Spielen vollständiger Information auf den Möglichkeiten, die hierarchische Anbindung an den Primärregelleistungsmarkt spieltheoretisch abzubilden, sowie in einem dritten Bayes-Spiel auf der Modellierung von Unsicherheiten. Für synthetische Szenarien werden Gleichgewichtsstrategien bestimmt, aus denen im qualitativen Vergleich der Modelle Aussagen über deren Eignung, das strategische Bieterverhalten abzubilden, abgeleitet werden.

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	vii
Formelzeichen	ix
1 Einleitung	1
1.1 Regelreservemärkte in Deutschland	2
1.1.1 Probleme des aktuellen Marktdesigns	5
1.1.2 Vision einer resilienten Regelreservebeschaffung	6
1.2 Anlass der spieltheoretischen Untersuchung	7
1.3 Zielformulierung	8
2 Methodik	11
2.1 Entwicklung des verteilten Marktdesigns	11
2.1.1 Wahl der Marktinfrastruktur	12
2.1.2 Festlegung der Auktionsregeln	18
2.2 Agentenentwurf	25
2.3 Wahl der Spielrepräsentation	28
2.4 Vorgehen bei der spieltheoretischen Modellierung	37
3 Spieltheoretische Modellierung	39
3.1 Modellierung 1	42
3.1.1 Spieldefinition	42
3.1.2 Implementierung	43
3.1.3 Hypothesen	48
3.1.4 Parametrierung	50
3.1.5 Ergebnisse und Abgleich mit den Hypothesen	52
3.2 Modellierung 2	53
3.2.1 Spieldefinition	54
3.2.2 Implementierung	55
3.2.3 Hypothesen	60
3.2.4 Parametrierung	62

3.2.5	Ergebnisse	67
3.2.6	Abgleich mit den Hypothesen	72
3.3	Modellierung 3	74
3.3.1	Spieldefinition	74
3.3.2	Implementierung	76
3.3.3	Hypothesen	77
3.3.4	Parametrierung	79
3.3.5	Ergebnisse und Abgleich mit den Hypothesen	81
4	Auswertung	85
4.1	Beantwortung der Forschungsfragen	85
4.2	Vergleich mit dem Agentenentwurf	89
5	Zusammenfassung und Ausblick	93
A	Zuschlagsvergabe am <i>FreqMatchMarket</i> im Regelbetrieb	97
B	Spielrepräsentation	99
C	Parametrierung: Konfigurationsdateien	103
C.1	Modellierung 1	104
C.2	Modellierung 2	107
C.3	Modellierung 3	114
	Abbildungsverzeichnis	115
	Tabellenverzeichnis	117
	Literaturverzeichnis	119

Abkürzungen

aFRR	Frequenzwiederherstellungsreserve mit automatischer Aktivierung (engl. automatic Frequency Restoration Reserve)
AGG	<i>Action-Graph Game</i>
AN	<i>Action-Node</i>
AO	<i>AuctionOpener</i>
AP	Arbeitspreis
BAGG	<i>Bayesian Action-Graph Game</i>
DER	verteilte Energieanlage (engl. Distributed Energy Resource)
EB GL	Leitlinie über den Systemausgleich im Elektrizitätsversorgungssystem (engl. Electricity Balancing Guideline)
EOA	<i>externally-owned Account</i>
ES-FN	<i>Extended-Sum-Function-Node</i>
FP	<i>FlexProvider</i>
FCR	Frequenzhaltungsreserve (engl. Frequency Containment Reserve)
FMM	<i>FreqMatchMarket</i>
FN	<i>Function-Node</i>
GCT	Handelsschluss (engl. Gate Closure Time)
GOT	Handelsstart (engl. Gate Opening Time)
LP	Leistungspreis
MAS	Multiagentensystem
mFRR	Frequenzwiederherstellungsreserve mit manueller Aktivierung (manual Frequency Restoration Reserve)
MOL	Merit-Order-Liste
NGG	Nash-Gleichgewicht
PQ	Präqualifikation
PV	Photovoltaik
RAM	Regelarbeitsmarkt
RLM	Regelleistungsmarkt
RRM	Regelreservemarkt
RRA	Regelreserveanbieter

ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
UP	Einheitspreis (engl. Uniform Price)
VNB	Verteilnetzbetreiber
WEA	Windenergieanlage

Formelzeichen

A	Aktionsraum/-menge
a	Aktion(sprofil)
BA	Menge der Gebotsleistungen
ba	Gebotsleistung in kW oder MW
ba'	Bezuschlagte Leistung in kW oder MW
ba_{min}	Mindestangebotsgröße in kW oder MW
BP	Menge der Gebotspreise
bp	Leistungspreis in ct/MW/h
bp_{max}	Maximalgebotspreis in ct/MW/h
bp_{min}	Mindestgebotspreis in ct/MW/h
C	Menge aller Konfigurationen
c	Konfiguration
cMW	Vorhaltungskosten in ct/MW/h
$cMWh$	Erbringungskosten in ct/MWh
d	Dauer einer Produktzeitscheibe in Stunden
E	Menge gerichteter Kanten
G	Spiel, <i>Action-Graph</i>
GK	Grenzkosten in ct/MW/h
i	Index Spieler (Agent)
j	Angebotsinkrement in kW oder MW
k	Auflösung der Gebotspreise in ct/MW/h

m	Knoten im <i>Action-Graphen</i>
N	Spielermenge
n	Anzahl Spieler
P	Apriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung über Typen im Bayes-Spiel
p	Zuschlagswahrscheinlichkeit
p_{call}	Abrufwahrscheinlichkeit
q	Präqualifizierte Leistung in kW oder MW
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
S	Strategieraum/-menge
s	Strategie(profil)
s^*	Gleichgewichtsstrategie(profil)
sa	Summe der Leistungen aller aggregierten Gebote kleiner gleich dem Einheitspreis in MW
$spba$	Summe der Leistungen aller grenzpreissetzenden Gebote am zentralen Regelleistungsmarkt in MW
t	Zeitslot
TA	Ausschreibungsmenge am zentralen Regelleistungsmarkt in MW
u	(Vektor der) Utility(funktionen)
UP	Einheitspreis am zentralen Regelleistungsmarkt in ct/MW/h
v	Menge der Nachbarn eines Knoten im <i>Action-Graphen</i>
\mathcal{A}	Menge der <i>Action-Nodes</i>
α	<i>Action-Node</i>
Θ	Typraum/-menge
θ	Typ(profil)
\mathcal{P}	Menge der <i>Function-Nodes</i>
ρ	<i>Function-Node</i>
τ	Anzahl Zeitslots, in die die Produktzeitscheibe unterteilt wird

1

Einleitung

Im Zuge der Energie- und Mobilitätswende dezentralisiert sich das elektrische Energiesystem. Haben traditionell vor allem fossile und atomare Großkraftwerke im Übertragungsnetz eine zuverlässige Stromversorgung sichergestellt, so kommt den unteren Netzebenen mit dem Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Zunahme von Energiespeichern und intelligenten Verbrauchern wachsende Bedeutung für die Systemstabilität zu [1, 2]. Die Digitalisierung ist dabei einerseits der Schlüssel zur Erschließung dezentraler Flexibilitäts-potentiale, stellt andererseits aber auch ein neues Risiko für Blackouts durch Cyberangriffe und Gleichzeitigkeitseffekte dar [3]. Vor diesem Hintergrund ist die gegenwärtige Beschaffung von Regelreserve in zentral durch die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) organisierten Einkaufsauktionen zu überdenken.

Der gegenwärtige Ansatz, kleinen, verteilten Energieanlagen (engl. Distributed Energy Resources, DERs) Zugang zu den Regelreservemärkten (RRM) zu gewähren, ist die Präqualifikation von Aggregatoren, die die Fahrweise vieler Anlagen über ein zentrales Leitsystem optimieren und deren gebündelte Flexibilität als ein großes virtuelles Kraftwerk vermarkten [4]. Sowohl die RRM als auch die Aggregatoren stellen in ihrer zentralen Struktur jedoch Single Points of Failure des elektrischen Energiesystems dar [3]. Fallen insbesondere die Server der RRM z.B. aufgrund eines Cyberangriffs aus, drohen großflächige Stromausfälle. Verteilte Märkte auf Verteilnetzebene, an denen durch Softwareagenten vermarktete DER-Flexibilitäten auktionsbasiert zu Geboten für die RRM aggregiert werden, könnten hingegen die cyber-physikalische Resilienz erhöhen, und im Fall eines Blackouts des Übertragungsnetzes weiterhin einen stabilen Inselnetzbetrieb gewährleisten.

Um sicherzustellen, dass die automatisierte Erhebung von Flexibilitäten in verteilten Auktionen kein neues Risiko für die Versorgungssicherheit darstellt, sondern zu dieser beiträgt, ist bei der Gestaltung solcher Märkte zu prüfen, ob Marktinfrastruktur und Auktionsregeln zu netzdienlichem Verhalten anreizen. Eine Möglichkeit, das durch das Marktdesign induzierte Bieterverhalten vor der praktischen Einführung eines Marktes zu überprüfen, bietet die spieltheoretische Modellierung [5]. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit Möglichkeiten, verteilte, agentenbasierte Märkte auf Verteilnetzebene zur Aggregati-

on von Regelleistungsgeboten für die deutschen [RRM](#) spieltheoretisch zu modellieren. Für ein potenzielles Marktdesign mit einem agentenbasierten Kontrollansatz sollen verschiedene spieltheoretische Modellierungen entwickelt und in exemplarischen Szenarien analysiert werden. Dieser spieltheoretische Durchstich soll als Grundlage dienen, um mit Methoden des *Market-Engineering* in weiteren Arbeiten begründete Marktmechanismen für verteilte (Regelreserve-)Märkte auf Verteilnetzebene zu entwickeln. Davon profitieren in erster Linie die Netzbetreiber als Marktveranstalter und die Bundesnetzagentur als Regulierungsbehörde, die die Modellierungen aus dieser Arbeit hierzu nutzen und erweitern könnten. Die vorgestellte Untersuchung ist darüber hinaus auch für potenzielle Marktakteure interessant. Sie können spieltheoretische Modelle verwenden, um abzuschätzen, unter welchen Umständen sich die Teilnahme für sie lohnt und welche Strategien sie ggf. anwenden sollten.

Im folgenden Kapitel wird die derzeitige Ausgestaltung der deutschen Regelreservemärkte näher untersucht und die Problemstellung sowie die Vision einer resilienten Regelreservebeschaffung mithilfe verteilter, agentenbasierter Märkte auf Verteilnetzebene konkretisiert. Auf dieser Grundlage werden Forschungsfragen formuliert. Das zweite Kapitel dient der Erklärung der Methodik. Hier werden zunächst Annahmen über die Marktinfrastruktur und die Regeln der verteilten Auktion getroffen. Für diese Marktdefinition wird ein agentenbasiertes Kontrollsystem entworfen und eine geeignete Spielrepräsentation ausgewählt. In [Kapitel 3](#) verzweigt die Erörterung in die Analyse dreier unterschiedlicher Modellierungen. Modellierungsspezifische Methoden und Annahmen werden hier eingeführt und getroffen. [Kapitel 4](#) führt die Ergebnisse der Abschnitte [3.1](#), [3.2](#) und [3.3](#) in einer gemeinsamen Auswertung wieder zusammen. In einem qualitativen Vergleich werden die spieltheoretischen Modellierungen zur Beantwortung der Forschungsfragen herangezogen, gefolgt von einem kritischen Vergleich mit dem agentenbasierten Entwurf aus [Kapitel 2](#). Die Arbeit schließt in [Kapitel 5](#) mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und einem Ausblick auf mögliche weitere Schritte.

1.1 REGELRESERVEMÄRKTE IN DEUTSCHLAND

Zur Gewährleistung eines stabilen Netzbetriebs müssen sich Einspeisung und Verbrauch im Stromnetz stets die Waage halten. Technisch spiegelt sich eine ausgeglichene Leistungsbilanz in einer Stromnetzfrequenz von 50 Hertz wider. Ist die Einspeisung größer (kleiner) als der Verbrauch, resultiert das in einer Überfrequenz (Unterfrequenz). Da im Stromnetz keine Energie gespeichert werden kann und sich Verbrauch und Einspeisung, auch durch die Zunahme fluktuierender Erzeuger wie Photovoltaik- und Windenergieanlagen, nicht exakt

vorhersagen lassen, überwachen die deutschen ÜNB die Leistungsbilanz und halten Regelreserve vor, um kurzfristige, nicht prognostizierte Abweichungen ausgleichen zu können. Fällt (steigt) die Netzfrequenz, so wird positive (negative) Regelreserve aktiviert, beispielsweise durch die Regelung der Wirkleistungseinspeisung von Regelreserve bereitstellenden Kraftwerken oder das Abschalten (Zuschalten) steuerbarer Lasten. [6]

Hinsichtlich des Aktivierungszeitpunkts wird zwischen drei Reservequalitäten differenziert, die entsprechend unterschiedliche technische Anforderungen an die Anbieter stellen: Primärregelreserve¹ (FCR), Sekundärregelreserve² (aFRR) und Minutenreserve³ (mFRR). Die FCR wird frequenzgesteuert innerhalb von maximal 30 Sekunden nach einem Störeneignis aktiviert. Sie dient dem Abfangen von Abweichungen und stabilisiert die Netzfrequenz in einem neuen Arbeitspunkt. Die aFRR führt die Netzfrequenz innerhalb von maximal fünf Minuten auf ihren Sollwert von 50 Hertz zurück und löst die FCR somit ab. Zur Verhinderung länger andauernder Abweichungen und um die aktivierte aFRR für eventuelle weitere Vorkommnisse wieder bereitzustellen, kann die mFRR die aFRR innerhalb von 15 Minuten ablösen. [6, 8]

Die Beschaffung von Regelleistung organisieren die deutschen ÜNB gemeinsam über die Internetplattform [regelleistung.net](https://www.regelleistung.net). An drei unabhängigen Märkten für FCR, aFRR und mFRR konkurrieren präqualifizierte Anbieter in Einkaufsauktionen⁴ um die Vorhaltung von Regelleistung, die mit einem Leistungspreis (LP) vergütet wird. Dazu schreiben die ÜNB ihren Bedarf an Regelleistung kalendertäglich für sechs Produktzeitscheiben à vier Stunden aus. Im Fall von aFRR und mFRR wird hierbei zwischen positiver und negativer Regelleistung differenziert, wohingegen FCR als symmetrisches Produkt gehandelt wird. Je Liefertag und je Regelleistungsprodukt finden somit sechs Auktionen statt, die ein (aFRR, mFRR) oder zwei Wochen (FCR) vor dem Stichtag (D-7 bzw. D-14) beginnen (Handelsstart, engl. Gate Opening Time/GOT) und am Vortag (D-1) enden (Handelsschluss, engl. Gate Closure Time/GCT). Ein Gebot umfasst die Angebotsleistung in MW sowie einen LP für die Regelleistungsvorhaltung. Der Zuschlag erfolgt in aufsteigender Reihenfolge der gebotenen LP bis zur Erfüllung der ausgeschriebenen Regelleistungsmenge. Während

¹gemäß der Leitlinie über den Systemausgleich im Elektrizitätsversorgungssystem (engl. Electricity Balancing Guideline, EB GL) [7] auch als *Frequenzhaltungsreserve* (engl. *Frequency Containment Reserve*, FCR) bezeichnet

²gemäß der EB GL [7] auch als *Frequenzwiederherstellungsreserve mit automatischer Aktivierung* (engl. *automatic Frequency Restoration Reserve*, aFRR) bezeichnet

³gemäß der EB GL [7] auch als *Frequenzwiederherstellungsreserve mit manueller Aktivierung* (manual Frequency Restoration Reserve, mFRR) bezeichnet

⁴Eine **Auktion** ist nach [9] eine „Marktinstitution mit einem eindeutigen Regelwerk, das die Zuteilung von Ressourcen und die Preise anhand von Geboten der Marktteilnehmer bestimmt.“ In einer **Einkaufsauktion** schreibt ein Käufer (hier der Zusammenschluss der ÜNB) einen Bedarf (an Regelleistung) aus, der mit dem Ziel der Preisminimierung unter mehreren konkurrierenden Anbietern versteigert wird [10].

erfolgreiche **FCR**-Gebote mit einem landesbezogenen⁵ Einheitspreis (engl. Uniform Price, **UP**) vergütet werden, der dem letzten bezuschlagten Gebotspreis entspricht, werden Zuschläge in den **aFRR**- und **mFRR**-Auktionen zum Gebotspreis erteilt. Die Aktivierung von **FCR** erfolgt parallel (*pro-rata*) und dezentral durch die bezuschlagten Bieter. Über lokale Netzfrequenzmessungen reagieren sie autonom auf Abweichungen größer $\pm 10\text{mHz}$. Bei Abweichungen von $\pm 200\text{mHz}$ muss die vollständige, d.h. 100%-ige Aktivierung der bezuschlagten Primärregelleistung innerhalb von 30 Sekunden erfolgen. Bei geringeren Frequenzabweichungen ist zu erbringende Leistung proportional reduziert, wobei die gleichen zeitlichen Anforderungen gelten. **Abbildung 1.1** stellt diese schematisch dar. Im Fall von **aFRR** und **mFRR** ist dem Regelleistungsmarkt (**RLM**) ein Regelarbeitsmarkt (**RAM**) nachgeschaltet, auf dem die Erbringung von Regelarbeit, die im Abrufsfall mit einem Arbeitspreis (**AP**) vergütet wird, separat bezuschlagt wird. [6, 8, 11, 12]

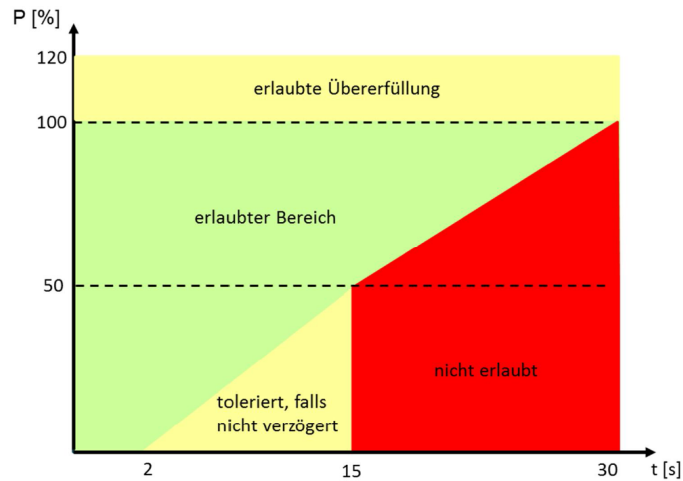


Abbildung 1.1: Zeitliche Anforderungen an den **FCR**-Abruf in Sekunden nach einer Frequenzabweichung [13]

Potenzielle Regelreserveanbieter (**RRA**) müssen für jede Regelreservequalität separat eine Präqualifikation (**PQ**) durchlaufen. Im Zuge dessen überprüft der Anschluss-**ÜNB**, dass die energiewirtschaftlichen, (IT-)technischen und administrativ-organisatorischen Anforderungen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit erfüllt sind. Bei erfolgreicher

⁵Der Auktions-Vergabealgorithmus verarbeitet den **FCR**-Bedarf jedes Landes unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen wie den nach **EB GL** geltenden Import- und Exportgrenzen für den Austausch von **FCR**. Die Einheitspreise werden für jedes Land separat ermittelt und fallen unterschiedlich aus, je nachdem, ob die Import- und Exportgrenzen erreicht wurden. [11] Der länderübergreifende Austausch wird hier der Vollständigkeit halber erwähnt. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Information, dass der Zuschlag nach aufsteigender **LP**-Merit-Order und die Bepreisung von **FCR** mit einem Einheitspreis erfolgt, unter Vernachlässigung der länderübergreifenden Nebenbedingungen ausreichen.

PQ schließen **RRA** und Anschluss-**ÜNB** einen Rahmenvertrag ab, in dem die vermarktbare Regelleistungsmenge festgehalten wird. Diese muss mindestens 1 MW betragen (Mindestangebotsgröße) und kontinuierlich über die Dauer einer Produktzeitscheibe erbracht werden können. [8, 13, 14]

1.1.1 Probleme des aktuellen Marktdesigns

Traditionell erfolgt die Bereitstellung von Regelleistung durch wenige, überwiegend konventionelle Kraftwerke aus dem Übertragungsnetz [15]. Im Zuge der Energie- und Mobilitätswende verlagern sich die Flexibilitäten zur Erbringung von Systemdienstleistungen jedoch in die unteren Netzebenen [2]. Zukünftig wird somit eine Vielzahl von dezentralen Energieerzeugungseinheiten, steuerbaren Lasten und Energiespeichern für die Vorhaltung und Erbringung von Regelleistung verantwortlich sein [15]. Um der steigenden Komplexität der Stromversorgung gerecht zu werden, wird das elektrische Energiesystem zunehmend digitalisiert und automatisiert [3]. Die gegenwärtige Ausgestaltung der deutschen Regelreservemärkten ist vor diesem Hintergrund zu überdenken. Dabei bestehen zwei zentrale Herausforderungen:

1. Die Teilnahme von kleinen und mittleren, verteilten Energieanlagen an den Regelreservemärkten ist erschwert [15].

Zum einen erfüllen viele **DERs** einzeln nicht die **PQ**-Bedingungen. Abgesehen von den (IT-)technischen Anforderungen ist das vor allem durch die Ausgestaltung der Einkaufsauktionen bedingt. So können viele Anlagen die Mindestangebotsgröße nicht erfüllen. Außerdem stellt die Dauer der Produktzeitscheibe, über die eine konstante, aber stufenlos anfahrbare Leistungsmenge geboten werden muss, eine Hürde dar. [15] Zum anderen wäre die direkte Integration von **DERs** in die systemweiten **RRM** und die damit einhergehende Zunahme an Akteuren mit hohen Kosten für die **ÜNB** verbunden. Diese müssten viel Rechenleistung vorhalten, um die gesteigerte Komplexität der Zuschlagsvergabe und den Kommunikations-Overhead zu bewältigen. [16]

2. Es entstehen neue Risiken für Blackouts durch Cyber-Angriffe [3].

Wie eingangs erwähnt, bieten die zentralen Leitsysteme von Aggregatoren, über die **DERs** bislang gebündelt als **RRA** präqualifiziert werden können, zentrale Angriffspunkte, über die böswillige Angreifer alle angeschlossenen Anlagen sabotieren könnten. Weiterhin stellen auch die **RRM** aufgrund ihrer Architektur, die auf der zentralen Instanz der **ÜNB** beruht, Single Points of Failure des elektrischen Energiesystems dar. Fällt das Übertragungsnetz z.B. aufgrund eines Cyber-Angriffs aus, können die Verteilnetzbetreiber (**VNB**) die Stromversorgung nicht eigenständig aufrechterhalten.

Würden die verteilten Flexibilitäten hingegen im Verteilnetz beschafft (und die technischen und regulatorischen Bedingungen entsprechend angepasst), könnten die **VNB** ihre Netze im Fall eines übergeordneten Blackouts als Inselnetz weiterbetreiben und den Systemwiederaufbau unterstützen. [3]

1.1.2 Vision einer resilienten Regelreservebeschaffung

Um (1) **DERs** den Zugang zu den **RRM** zu erleichtern und (2) gleichzeitig die Resilienz des Energiesystems zu erhöhen, wird für alle drei Regelreservequalitäten die Einführung verteilter Märkte zur Erhebung von Flexibilitäten auf Verteilnetzebene vorgeschlagen. Mit einer hierarchischen Anbindung an die deutschlandweiten **RRM** zielen diese auf die Erhöhung der Flexibilitätsbeschaffung aus **DERs** sowohl für das Übertragungs- als auch für das Verteilnetz ab. Im Regelbetrieb sollen **DERs**, die nur über einen Teil der Produktzeitscheibe und/oder weniger als 1 MW Leistung erbringen können, ihre Leistung auktionsbasiert⁶ zu Geboten für die zentralen **RRM** aggregieren. Im Fall eines Blackouts des Übertragungsnetzes liegen dem **VNB** durch diesen Mechanismus bereits die Informationen darüber vor, welche Flexibilitäten ein lokales Inselnetz effizient stützen könnten.

Die Idee der marktbasierter Nutzung von Flexibilität in Verteilnetzen steht im Einklang mit der aktuellen europäischen Gesetzgebung [17]. Während bisherige Arbeiten zu Flexibilitätsmärkten für **DERs** auf zentralen Strukturen beruhen [16, 18], sollen die hier vorgeschlagenen Märkte verteilt und somit resilient sein.

In dieser Arbeit soll im Speziellen ein verteilter **FCR**-Markt untersucht werden. Da bei der Beschaffung von **FCR** im Gegensatz zur **aFRR** und **mFRR** keine getrennte Auktion und Bepreisung von Vorhaltung und Erbringung erfolgt, wird die **FCR** aus Gründen der Einfachheit ausgewählt. Da dieser Markt Flexibilitäten aggregiert, die der Frequenzhaltung dienen, wird er im Folgenden *FreqMatchMarket* (**FMM**) genannt.

Um der Komplexität eines verteilten Systems gerecht zu werden und die Marktteilnahme potenziell für alle **DERs** aus dem Verteilnetz, also auch private Akteure, attraktiv zu machen, soll der Handel am **FMM** automatisiert zwischen rationalen, nutzenbasierten Softwareagenten stattfinden. Ein solcher Agent ist eine Software, die ihre Umgebung über Sensoren wahrnimmt und über Aktuatoren darauf einwirkt. Er agiert autonom und proaktiv, kann mit anderen Agenten kommunizieren und wählt, basierend auf seiner bisherigen Wahrnehmungsfolge und seinem intern abgebildeten Wissen über die Welt, immer die

⁶Im Einklang mit den deutschlandweiten **RRM** soll jede Gebotsaggregation am *FreqMatchMarket* (**FMM**) als Auktion durchgeführt werden. Diese wird in [Abschnitt 2.1.2](#) genauer beschrieben.

Aktion, die den erwarteten Wert seines Performanzmaßes⁷ maximiert. Ein Softwareagent am FMM vertritt die Interessen eines Marktakteurs. Er repräsentiert eine oder mehrere Komponenten des cyber-physikalischen Energiesystems wie z.B. einen Speicher und erlernt autonom Betriebsführungs- und Handelsstrategien, um die Flexibilität seiner Komponente(n) möglichst optimal zu vermarkten. Er befindet sich dabei in einer konkurrierenden Multi-Agenten-Umgebung und muss die Auswirkungen der Aktionen anderer Agenten auf seinen eigenen Nutzen berücksichtigen. [5, 19]

1.2 ANLASS DER SPIELTHEORETISCHEN UNTERSUCHUNG

In einem verteilten Markt besitzen Teilnehmer einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Versorgungssicherheit [20]. Die auktionenbasierte Erhebung von Flexibilität am FMM kann das Verteilnetz anfällig für börsenartige Risiken machen, die ihrerseits die unterbrechungsfreie Stromversorgung gefährden [20, 21]. Marktakteure könnten die Versorgungssicherheit mit risikobelasteten Bietstrategien oder gezielt zum eigenen Vorteil gefährden, um z.B. Informationen über andere Akteure zu sammeln oder den Preis für Vorhaltung und Erbringung von Regelleistung in die Höhe zu treiben [20, 21]. Insbesondere wenn dabei Gleichzeitigkeitseffekte auftreten, da die die Akteure repräsentierenden Softwareagenten automatisiert simultan agieren und z.B. viele DERs ab- oder zuschalten, werden ggf. destabilisierende Frequenzschwankungen ausgelöst [3]. Dabei beeinflusst das Design des Marktes maßgeblich das strategische Verhalten seiner Teilnehmer [22, 23].

Die Spieltheorie betrachtet strategische Interaktionen zwischen nutzenbasierten Akteuren und ermöglicht es, Aussagen über ihre Entscheidungen auf Basis der *Utility* mathematisch herzuleiten. Die *Utilityfunktion* (auch *Payoff*-, *Nutzen*- oder *Auszahlungsfunktion*) eines Spielers ist eine Abbildung von allen möglichen Endzuständen des Spiels auf eine reelle Zahl. *Individuell rationale Spieler* nach [24] wählen immer eine Strategie⁸, die die beste Antwort auf die Strategien der Gegenspieler ist. Sind die Strategien der Gegenspieler unbekannt, prognostizieren sie deren Verhalten und wählen eine Strategie, die die beste Antwort auf

⁷**Performanzmaß:** Erfolgsmaß, Bewertung einer gegebenen Sequenz von Umgebungszuständen und damit des Verhaltens des Agenten in seiner Umgebung [5]

⁸Eine **Strategie** s_i beschreibt für jede Entscheidungssituation des Spiels, welche Aktion $a_i \in A_i$ Spieler i wählt. Hierbei wird unterschieden zwischen *reinen Strategien*, bei denen ein Spieler in der gleichen Entscheidungssituation immer die gleiche Aktion spielt, und *gemischten Strategien*. Spielt ein Spieler eine gemischte Strategie, wählt er zufallsbasiert auf Grundlage einer festen Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Aktion aus. Die Gesamtheit aller Strategien, die Spieler i in einem Spiel zur Verfügung stehen, wird in der *Strategiemenge* S_i zusammengefasst. Das Resultat der Strategiewahlen aller Spieler, Vektor $s = (s_1, \dots, s_n) \in S$, wird *Strategieprofil* genannt, wobei der Strategieraum $S = (S_1 \times \dots \times S_n)$ die Kreuzmenge aller Strategieprofile ist. [5, 25, 26]

ihre Vermutungen über die Strategien der Gegenspieler ist, um ihre *erwartete Utility* zu maximieren. [24, 25]

Jedes Spiel mit einer endlichen Anzahl an Spielern und an Aktionsprofilen besitzt mindestens ein *Nash-Gleichgewicht* (NGG) [27]; ein Strategieprofil, von dem kein Spieler einen Anreiz hat abzuweichen, weil seine Strategie die beste Antwort auf die Strategiewahl aller anderen Spieler ist [5]. Unter der Annahme, dass nutzenbasierte Agenten im Laufe der Auktionen Gleichgewichtsstrategien erlernen, können anhand spieltheoretischer Modellierungen des FMM und der Bestimmung ihrer Gleichgewichte Aussagen über das strategische Verhalten der Marktteilnehmer bzw. der sie repräsentierenden Softwareagenten getroffen werden.

In der Literatur finden sich mehrere Untersuchungen zur Wahl der Preisregel [28, 29] und zur Preisentwicklung bzw. dem strategischen Bieterverhalten [28, 30, 31, 32] am Sekundärregelleistungsmarkt⁹. [28] nutzt hierzu eine spieltheoretische Modellierung der aFRR-Auktion und leitet die optimalen Bietfunktionen für das LP- und das AP-Gebot (für alle möglichen Kombinationen von Einheits- und Gebotspreisverfahren für LP und AP) aus der Formel für die erwartete Utility mathematisch her. Da die genannten Arbeiten Auktionen an den zentralen deutschen RRM betrachten, berücksichtigen sie aus offensichtlichen Gründen keine verteilten oder hierarchischen Aspekte. Die verteilte Infrastruktur und (im Regelbetrieb) die Weiterleitung des Auktionsergebnisses (d.h. der auktionsbasiert aggregierten Gebote) an die Einkaufsauktionen am deutschlandweiten RRM sind jedoch zentrale Merkmale der Auktion am FMM. Um das durch das Marktdesign induzierte Bieterverhalten am FMM untersuchen zu können, sollen in dieser Arbeit daher erste spieltheoretische Modelle der FCR-Auktion im Regelbetrieb entwickelt und deren Nash-Gleichgewichte für exemplarische Szenarien bestimmt werden. Hierzu wird zunächst ein potenzielles Marktdesign des FMM und ein agentenbasiertes Kontrollsystem entworfen.

1.3 ZIELFORMULIERUNG

Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit lautet:

Wie kann die verteilte, hierarchisch an den zentralen Regelleistungsmarkt für FCR angebundene Auktion am FMM spieltheoretisch modelliert werden, um Aussagen über das strategische Verhalten der durch rationale, nutzenbasierte Softwareagenten repräsentierten Bieter zu treffen?

⁹[29] behandelt neben der Preisregel auch die Wahl der Zuschlagsregel an den RRM für aFRR und mFRR. In [32] wird das strategische Bieterverhalten nicht nur für die aFRR-Auktion sondern an allen drei RRM simuliert.

Diese gliedert sich in die folgenden Teilfragen:

Teilfrage 1. *Welche strategisch relevanten Eigenschaften besitzt der **FMM** aufgrund seiner verteilten Struktur und wie können diese sinnvoll in einem spieltheoretischen Modell abgebildet werden?*

In klassischen Einkaufsauktionen wie der deutschlandweiten **FCR**-Auktion übernimmt ein zentraler Akteur (z.B. der **ÜNB**) die Rolle des kaufenden Auktionators. Dieser verfolgt das Ziel der Preisminimierung [10]. Die Rollen von Auktionator und Bieter sind dabei klar getrennt.

Die Auktion am **FMM** soll hingegen keinen zentralen Angriffspunkt besitzen. Der **VNB** kommt daher nicht als (einziger) Auktionator infrage. Stattdessen sollen mehrere Marktakteure entweder von vornherein *parallel* die Rolle des Auktionators übernehmen oder zumindest in der Lage sein, diese Rolle zu übernehmen, sollte der *aktive* Auktionator ausfallen. In dieser verteilten Auktion agiert der aktive Auktionator nicht als Käufer, sondern lediglich als Organisator der Gebotsaggregation und -weiterleitung an den übergeordneten **RLM**. Die Rollen von Auktionator(en) und Bieter sind nicht mehr zwangsläufig getrennt. Daher tut sich die Frage auf, ob

1. aus dieser verteilten Struktur neue Aspekte resultieren, die als Teil der Strategie untersucht werden sollten. Die Strategie eines Bieters am zentralen **RLM** umfasst die Entscheidung über eine Gebotsabgabe, bestehend aus Gebotsmenge und -preis für eine bestimmte Produktzeitscheibe. Am **FMM** könnte abhängig von seiner Implementierung auch die Entscheidung, die Rolle des Auktionators (nicht) zu übernehmen, Teil der für das Auktionsergebnis relevanten Strategie sein.
2. Bieter in der Rolle des Auktionators Informationen erlangen, die ihre Strategie beeinflussen.

Um das beantworten zu können, muss zunächst die Infrastruktur, über die die Agenten des **FMM** miteinander kommunizieren, genauer beschrieben werden (siehe [Abschnitt 2.1.1](#)). Sofern mindestens einer der beiden Punkte für die gewählte Infrastruktur zutrifft, sollten die Effekte auf das strategische Verhalten in der spieltheoretischen Modellierung abgebildet werden.

Teilfrage 2. *Wie kann die hierarchische Anbindung der **FMM**-Auktion an den zentralen Regelleistungsmarkt sinnvoll in einem spieltheoretischen Modell abgebildet werden?*

Im Regelbetrieb sollen am **FMM** auktionsbasiert Gebote für die deutschlandweite **FCR**-Auktion aggregiert werden. Während die Regeln der Auktion am **FMM** definieren, wie

verteilte Flexibilitäten zu **FCR**-Geboten aggregiert werden, findet die Zuschlagsvergabe, die in einem Kaufvertrag resultiert, am übergeordneten **RLM** statt. Der Nutzen einer Strategie ist somit nicht nur von den Auktionsregeln und dem Bieterverhalten am **FMM**, sondern auch von den Auktionsregeln und dem Bieterverhalten am deutschlandweiten **RLM** abhängig. Letzteres muss daher in der spieltheoretischen Modellierung berücksichtigt werden.

Zur Beantwortung von **Teilfrage 2** müssen zunächst die Regeln der **FMM**-Auktion und deren Anbindung an die übergeordnete **FCR**-Auktion definiert (siehe **Abschnitt 2.1.2**) und die am **FMM** agierenden Agenten beschrieben (siehe **Abschnitt 2.2**) werden.

Teilfrage 3. *Wie können Unsicherheiten über die Anlagenzustände und Kosten einzelner Akteure sinnvoll in einem spieltheoretischen Modell abgebildet werden?*

Anders als bei konventionellen Großkraftwerken, die vorrangig am deutschlandweiten **RLM** teilnehmen, unterliegen die Anlagenzustände und Kosten vieler **DERs** großen zeitlichen Schwankungen. Insbesondere die vermarktbare Leistung erneuerbarer Energien wie Photovoltaik- und Windenergieanlagen ist wetterbedingten Fluktuationen ausgesetzt. Aber auch die Lastgänge und Kosten anderer dezentraler Energieanlagen können z.B. mit dem Nutzerverhalten variieren. Am **FMM** unterliegt die vermarktbare Leistung einzelner Bieter und deren individuelle private Wertschätzung derselben daher Unsicherheiten.

Im Folgenden müssen zunächst die Marktinfrastruktur und Auktionsregeln entwickelt sowie die am **FMM** agierenden Softwareagenten, deren Interaktion spieltheoretisch modelliert werden soll, genauer beschrieben werden.

2 | Methodik

Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen dazu genutzt werden, mit Methoden des *Market-Engineering*¹ einen begründeten Marktmechanismus für den **FMM** zu entwickeln. Dabei wird die Infrastruktur des **FMM** im Rahmen dieser Arbeit nicht praktisch aufgesetzt. Ihre detaillierte Definition und Implementierung bleibt Aufgabe weiterer Arbeiten. Nichtsdestoweniger sind an dieser Stelle realistische Annahmen über die Marktinfrastruktur und die Auktionsregeln zu treffen, da diese wiederum das Verhalten der Softwareagenten und somit die spieltheoretische Modellierung beeinflussen.

2.1 ENTWICKLUNG DES VERTEILTEN MARKTDESIGNS

Bei der Wahl des Marktdesigns ist zu berücksichtigen, dass der **FMM** zwecks seiner Funktionalität den Marktteilnehmern bzw. den sie repräsentierenden Agenten unterschiedliche Anreize bieten sollte, insbesondere

1. im Sinne der Marktliquidität Anreize, am **FMM** teilzunehmen und sich dazu vom **VNB** als Teilnehmer präqualifizieren zu lassen.
2. Anreize, **FMM**-Auktionen zur Gebotsaggregation zu initiieren.
3. Anreize, die Zuständigkeit für die Zuschlagsvergabe zu übernehmen und diese ehrlich entsprechend der Zuschlagsregel, d.h. weder zum eigenen Vorteil noch anderweitig korrupt, durchzuführen.
4. Anreize, die Zuständigkeit für die Abgabe der aggregierten Gebote am zentralen Regelleistungsmarkt (**RLM**) zu übernehmen.
5. Anreize, **FCR** entsprechend dem erhaltenen Zuschlag zu erbringen.

¹Zum Beispiel mit Methoden des Mechanismus-Designs könnten Auktionsregeln ermittelt werden, die zum gewünschten, strategischen Verhalten im Sinne eines ökonomisch effizienten Auktionsergebnisses anreizen [22].

6. im Sinne der Versorgungssicherheit keine Anreize (oder Möglichkeiten), das System manipulativ auszunutzen.

Im Sinne der Markteffizienz [29] sollte außerdem gewährleistet sein, dass

7. die Anlagen mit den niedrigsten Kosten für die Vorhaltung und Erbringung von FCR bezuschlagt werden.

2.1.1 Wahl der Marktinfrastruktur

Bei zentralen Ansätzen übernimmt *ein* Akteur oder *eine* Plattform die Funktion des Auktionators. Bei einem verteilten Markt ohne zentrale Instanz müssen vor allem zwei Zuständigkeiten geklärt werden: Die Eröffnung und Bezuschlagung von Auktionen sowie die Abgabe aggregierter Gebote am übergelagerten RLM im Regelbetrieb (siehe Anreize 2-4). Für den FMM werden zwei Infrastrukturen in Erwägung gezogen: Ein vollverteilter Ansatz via Blockchain sowie ein dezentraler Ansatz, bei dem jeder der gleichberechtigten Agenten die Aufgabe der zentralen Instanz als sogenannter *AuctionOpener* (AO) übernehmen kann. Diese beiden Optionen werden im Folgenden erläutert und unter Berücksichtigung der sieben genannten Kriterien diskutiert, bevor eine Marktinfrastruktur für die weitere Arbeit ausgewählt wird.

Dezentraler Ansatz mit AuctionOpeners

Beim dezentralen Ansatz hat jeder Agent, der die Rechenleistung für die Zuschlagsvergabe vorhalten kann, die Möglichkeit, als AO Auktionen zur Aggregation eines FCR-Gebots zu initiieren. Dazu informiert er die anderen² Agenten über die Zeitscheibe, GCT und Lieferrichtung der Aggregation. Agenten, die Flexibilität als sogenannte *FlexProviders* (FPs) beitragen wollen, geben ihre Gebote direkt beim AO ab (alternativ könnten sie auch selbst eine konkurrierende Auktion für den gleichen Zeitraum eröffnen). Der AO sammelt die Gebote als Auktionator einer verdeckten Auktion und aggregiert daraus ein FCR-Gebot³ möglichst großer Leistung und niedrigen Preises, das er stellvertretend für den FMM als Bieter am übergelagerten RLM abgibt. Bei der Zuschlagsvergabe kann der AO auch seine eigene Flexibilität berücksichtigen, d.h. als FP an der selbst initiierten Auktion teilnehmen. Im Gegensatz zu den anderen FPs hat der AO dadurch den Vorteil,

²Der Einfachheit halber wird an dieser Stelle von einem vollvermaschten Multiagentensystem (MAS) ausgegangen, bei dem der Initiator alle anderen Agenten direkt über eine Produkteröffnung informiert. Die Overlay-Topologie des MAS könnte durchaus anders gewählt werden, wodurch nicht zwingend alle Agenten (zeitgleich) über Produkteröffnungen informiert würden.

³Oder mehrere 1 MW-Gebote dennoch entsprechend der Merit-Order, siehe Annahme 5 in Abschnitt 2.1.2

alle eingegangenen Gebote zu kennen und sich nach **GCT** mit diesem Wissen für den besten Gebotspreis entscheiden zu können. Die Tatsache, dass der **AO** sein Gebot zum spätesten Zeitpunkt abgeben kann, bietet für ihn außerdem den Vorteil einer besseren Datenbasis. Denn je näher der Erbringungszeitpunkt liegt, desto genauer sind Vorhersagen über etwaige Unsicherheiten, z.B. über die tatsächlich zur Verfügung stehende Flexibilität (beeinflusst durch Wetter und/oder Verbraucherverhalten) oder die Opportunitätskosten (beeinflusst durch die Entwicklungen auf Regelleistungs- und alternativen Märkten). Gehen beim **AO** keine Gebote ein, mit denen er seine eigene Flexibilität gewinnbringend aggregieren kann, könnte er sich des Weiteren auf Grundlage dieses Wissens bis kurz vor **GCT** dazu entscheiden, seine Flexibilität als **FP** in der Auktion eines anderen **AO** zu bieten (oder diese auf die Auktionen mehrerer **AOs** aufzuteilen).

Mit Blick auf die eingangs in **Abschnitt 2.1** genannten Anreize, die der **FMM** den Marktteilnehmern bieten sollte, scheint Anreiz 2 trotz der Rechenleistung, die **AOs** für die Zuschlagsvergabe vorhalten müssen, gegeben zu sein. Insbesondere Akteure mit niedrigen Grenzkosten und Akteure, deren Gewinn durch die Teilnahme am **FMM** starken Unsicherheiten unterliegt, können vom Informationsvorsprung, den sie in der Funktion des **AO** erlangen, profitieren.

Um Vertrauen in den **AO** und damit in den **FMM** herzustellen, veröffentlichen alle **AOs** zum Zeitpunkt der Gebotsabgabe am **RLM** anonymisiert die aggregierten Gebote. So kann jeder Marktteilnehmer überprüfen, ob sein Gebot aufgrund des Gebotspreises rechtmäßig (nicht) zu einem Gebot aggregiert wurde. Anreiz 3 und 4 sind somit für die **AOs** gegeben, sofern sie das Vertrauen der **FPs** für zukünftige Auktionen nicht verspielen möchten. Dennoch bietet die Rolle des **AOs** möglicherweise einbringliche Spielräume für Marktmanipulationen und korruptes Verhalten (6). Dies wäre bei der Wahl dieses Ansatzes im Zuge dieser Arbeit zu untersuchen.

Anreiz 2 führt außerdem zu der Frage, ob aufgrund der genannten Vorteile nicht jeder Akteur des **FMM**, der zu einer bestimmten Produktzeitscheibe Flexibilität vermarkten möchte, seine eigene Auktion initiieren würde. Bietet jeder nur in seiner eigenen Auktion, werden am **FMM** keine Regelleistungsgebote aggregiert. Bieten **AOs** zum letztmöglichen Zeitpunkt auf die Auktionen anderer **AOs**, wenn bei ihnen bis dahin keine Gebote eingegangen sind, können zwar ggf. Regelleistungsgebote aggregiert werden; die Aggregation wird i.A. aber wesentlich ineffizienter sein als bei zentralen Ansätzen. Verteilte Flexibilitäten, die in einem zentralen System zu einem Gebot aggregiert würden, werden so u.U. nicht aggregiert, da sie an den Auktionen unterschiedlicher **AOs** teilgenommen haben. Die Möglichkeit, nicht bezuschlagt zu werden, und zwar nicht, weil der Gebotspreis über dem Markträumungspreis des **RLM** liegt, sondern weil das eigene Gebot nur aufgrund der dezen-

tralen Architektur des **FMM** nicht zu einem Gebot für den **RLM** aggregiert werden konnte, senkt die Markteffizienz (7) ebenso wie den Anreiz, überhaupt am **FMM** teilzunehmen (1).

Abhilfe schaffen könnte die Idee, über eine verteilte Auslosung via Blockchain die **AOs** zu bestimmen. Dann stellt sich sofort die Frage, ob eine Blockchain nicht auch für die Abwicklung der verteilten Auktion genutzt werden könnte.

Vollverteilter Ansatz via Blockchain

Via Blockchain ist die Implementierung eines vollverteilten und somit resilienten Marktes mit nur einer vollverteilten, verdeckten Auktion je Zeitscheibe und Lieferrichtung möglich. In [33] wurde eine verdeckte Erstpreisauktion mithilfe eines *Smart Contracts*⁴ auf der Ethereum-Blockchain implementiert. In Anlehnung daran könnte auch eine verdeckte Beschaffungsauktion am **FMM** wie folgt umgesetzt werden:

Da es sich beim Verteilnetz um eine kritische Infrastruktur handelt, ist die Blockchain zugangsbeschränkt. Der **VNB** übernimmt die **PQ** potenzieller Akteure für den **FMM** und stellt ihnen öffentliche Blockchainadressen (in Ethereum sogenannte *externally-owned Accounts* (**EOAs**) [34]) aus.

Die Regeln der Auktion, wie **GCT**, Mindestangebotsgröße, Zuschlags- und Preisregel, sind im Smart Contract kodiert. Eine Auktion wird ausgelöst, wenn ein **EOA** eine Transaktion an den Smart Contract adressiert. Mit dieser Transaktion werden Lieferrichtung und **RLM**-Produktzeitscheibe übergeben. Der Smart Contract wird daraufhin automatisch in jedem Netzwerkknoten unabhängig ausgeführt. Bieter versehen ihr Gebot mit einem *Salt*⁵ und verschlüsseln es mit einer stark kollisionsresistenten Hashfunktion⁶. Dann senden sie den Hash als Transaktion an den Smart Contract. Zu diesem Zeitpunkt bleibt das tatsächliche Gebot verdeckt; das verschlüsselte Gebot und die zugehörige Adresse des **EOA** sind aber innerhalb der Blockchain öffentlich. Die Anzahl abgegebener Gebote ist daher beobachtbar. Nach **GCT** veröffentlichen alle Bieter ihr Gebot und ihren Salt. Der Smart Contract überprüft die Authentizität der veröffentlichten Gebote, d.h. ob diese mit den vor **GCT** verdeckt abgegebenen Geboten übereinstimmen, mithilfe der Hashfunktion und berechnet das aggregierte Gebot. [33]

⁴**Smart Contract:** Ausführbarer Programmcode, der auf der Blockchain verteilt gespeichert und (durch eine Transaktion ausgelöst) ausgeführt wird; ermöglicht Abkommen zwischen konkurrierenden Parteien ohne Beteiligung eines Intermediärs (*Trusted Third Party*) [33]

⁵**Salt:** Geheime Zeichenfolge, mit der das Gebot verkettet wird, bevor es in die Hashfunktion gegeben wird [33]

⁶**Stark kollisionsresistente Hashfunktion:** Abbildung einer Eingabe beliebiger Bitlänge auf eine Ausgabe fester Bitlänge (*Hash*), wobei es praktisch unmöglich ist, ein Paar unterschiedlicher Eingaben zu finden, die auf den gleichen Hash abgebildet werden (*Kollision*) [35]

Zur Validierung von Transaktionen kann der *Proof of Stake*-Konsensmechanismus verwendet werden. Akteure, die große präqualifizierte Leistungsmengen als **FCR** an den Markt bringen wollen, haben ein entsprechend großes Interesse daran, dass das Netzwerk funktioniert. Die Auswahl, wer der Blockchain den nächsten Block hinzufügt, kann daher über eine Gewichtung der Anteile der Teilnehmer an der präqualifizierten Leistung des **FMM** in Kombination mit einem Zufallsverfahren erfolgen [36].

Auf diese Weise kann auch die Zuständigkeit für die Eröffnung von Auktionen sowie für die Abgabe des aggregierten Gebots am **RLM** geklärt werden. Beispielsweise könnte die Erzeugung des Blocks, mit dem das aggregierte Gebot verifiziert wird, einen **EOA** dazu verpflichten, dieses Gebot auch stellvertretend für den **FMM** am **RLM** abzugeben.

Die Kontoführung muss nicht über die Blockchain laufen. Da die Abrechnung zwischen Netzbetreibern und Lieferanten weder transparent sein muss noch zeitkritisch ist, kann dabei auf bisherige Verfahren zurückgegriffen werden.

Der **VNB** übernimmt in diesem Ansatz eine externe Kontrollfunktion. Da ihm bekannt ist, welche Akteure sich hinter den öffentlichen Adressen befinden, gibt es einen Anreiz, sich nicht manipulativ zu verhalten (6). Denn Akteuren, die ihr Gebot und ihren Salt nicht veröffentlichen (3), oder Akteuren, die nicht die bezuschlagte **FCR** erbringen (5), könnte der Ausschluss aus dem **FMM** und eine Klage wegen Gefährdung der Netzstabilität durch den **VNB** drohen.

Je höher die Leistung, die ein Teilnehmer am **FMM** vermarkten möchte, desto größer sind auch die Anreize für die Eröffnung von Auktionen (2) und die Abgabe aggregierter Gebote am **RLM** (4), um die Funktion des Marktes zu gewährleisten (siehe oben).

Der blockchainbasierte Ansatz bietet außerdem die einer Blockchain inhärenten und weitere Vorteile, die die Infrastruktur aus Sicht des Marktdesigners, aber auch die Teilnahme am **FMM** (1), attraktiv machen:

- **Resilienz:** Ein Intermediär ist für die Konsensfindung nicht erforderlich [33]. Der **VNB** stellt zwar eine Autorität dar, die Teilnehmer präqualifiziert und **EOAs** ausstellt. Um die Funktion des **FMM** aufrechtzuerhalten, muss der **VNB** jedoch nicht in den Marktprozess eingreifen. Fällt er zeitweilig, z.B. aufgrund eines Cyber-Angriffs aus, laufen Auktionen und die Abgabe aggregierter Gebote am **RLM** autonom weiter.
- **Transparenz:** Der Gebotsverlauf ist für alle Teilnehmer öffentlich und überprüfbar [33].
- **Integrität:** Bieter können Gebote nicht verändern (weder eigene noch die der anderen) [33].
- **Nachweisbarkeit:** Bieter können ihr Gebot nicht dementieren [33]. Sie könnten

zwar darauf verzichten, nach **GCT** ihren Salt bekanntzugeben, in dieser Arbeit wird jedoch angenommen, dass sie das aus genannten Gründen nicht tun.

- **Transaktionsdatenschutz:** Gebote werden von **EOAs** mit öffentlichen Adressen abgegeben; der Name und die tatsächliche Adresse des Bieters bleiben aber (außer für den **VNB**) geheim [33]. Würde jeder Akteur dauerhaft den gleichen Account nutzen, könnte die Gebotshistorie eines Nutzers bzw. seines Pseudonyms im Zeitverlauf nachvollzogen werden. Auch das lässt sich verhindern, wenn der **VNB** genug Adressen ausstellt, dass Akteure für jedes Gebot eine neue Adresse nutzen können.
- **Fairness:** Zu keinem Zeitpunkt haben einzelne Marktteilnehmer infrastrukturbedingt⁷ Vorteile gegenüber anderen (wie z.B. eine bessere Datengrundlage oder Kenntnis über die Gebote anderer).
- **Markteffizienz:** Die der Blockchain inhärente Resilienz erlaubt es, nur eine Auktion je Lieferrichtung und Zeitscheibe durchzuführen. Es bestehen außerdem keine Anreize, mehrere Auktionen je Lieferrichtung und Zeitscheibe zu eröffnen. Dies führt zu den gleichen, optimalen Aggregationen wie in zentralen Auktionen (7)⁸.

Da Transaktionen von allen Knoten einer Blockchain ausgeführt und verifiziert werden, sind Auktionen in blockchainbasierten Systemen im Vergleich zu zentralen Ansätzen und auch zum dezentralen Ansatz mit **AOs** rechen- und zeitintensiv [33]. Es stellt sich daher die Frage, ob der blockchainbasierte Ansatz die zeitlichen Anforderungen des **FMM** erfüllt. Bis zur **GCT** des **RLM** müssen Auktionen am **FMM** abgeschlossen und aggregierte Gebote am **RLM** eingegangen sein.

Jede Auktionseröffnung, alle Gebotsabgaben, die Veröffentlichungen der Gebote und Salts sowie die Veröffentlichungen der Auktionsergebnisse stellen Transaktionen dar, die durch das gesamte Netz propagiert werden müssen. Der Transaktionsdurchsatz einer Blockchain hängt vor allem vom Konsensmechanismus zur Validierung von Transaktionen ab [36]. In [33] wurde mit dem Ethereum-Testnetzwerk *Ropsten* für die vier Grundauktionsarten⁹ eine effektive durchschnittliche Transaktionszeit (Transaktionsverarbeitung, Validierung und Aufnahme in einen neuen Block) von 10 Sekunden erreicht. Die öffentliche Ethereum-Blockchain verwendet den zeit- und energieintensiven *Proof of Work*-Konsensmechanismus.

⁷Abhängig von der Topologie und der Datenleitung sind Vor- bzw. Nachteile bzgl. der Datengrundlage für einzelne Akteure denkbar, diese würden aber beim dezentralen Ansatz mit **AOs** ebenfalls auftreten und sind im Vergleich zu den Vorteilen, die ein **AO** im ersten Ansatz hat, vernachlässigbar.

⁸Die Markteffizienz wird darüber hinaus stark durch die Regeln der Auktion, wie Zuschlags- und Preisregel, beeinflusst, die in **Abschnitt 2.1.2** gewählt werden.

⁹**Vier Grundauktionsarten:** Englische Auktion, Holländische Auktion, verdeckte Erstpreisauktion und Vickrey-Auktion

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Infrastrukturüberlegungen

	<i>AuctionOpeners</i>	Blockchain
Resilienz	n>1 AOs benötigt damit kein Single Point of Failure (fallen AOs aus, gehen deren aggregierte Gebote trotzdem verloren)	Inhärent
Effizienz	I.A. nicht effizient, da n parallele Auktionen ¹⁰	Optimale Aggregation, da nur 1 Auktion ¹⁰
Verbindlichkeit	Umsetzung noch unklar	Gebote verteilt nachweisbar
Zuständigkeit	n AOs, u.U. verteilt ausgelost via Blockchain	Verteilte Auslosung über Konsensmechanismus
Offenheit der Gebote	Verdeckte Auktion außer für AOs (Wissensvorsprung bzgl. der eigenen Auktion)	Verdeckte Auktion Anzahl Gebote beobachtbar
Transparenz	Anonymisierte Veröffentlichung bezuschlagter Gebote Keine Anonymität AOs gegenüber	Inhärent Pseudonymisierte Veröffentlichung aller Gebote
Latenzen	V.a. abhängig von der Rechenleistung des AO	V.a. abhängig vom Konsensmechanismus

In privaten und konsortialen Blockchains wie dem FMM können schnellere Konsensmechanismen wie der *Proof of Stake* Verwendung finden, die geringere Sicherheitsanforderungen erfüllen. [36, 37] Andererseits ist die Zuschlagsregel der Beschaffungsauktion am FMM rechenintensiver als bei den Grundauktionsarten (siehe Abschnitt 2.1.2). Außerdem laufen am FMM i.A. mindestens zwei Auktionen zeitgleich (eine je Lieferrichtung je Zeitscheibe, siehe ebenfalls Abschnitt 2.1.2).

Da eine FMM-Auktion beliebig früh und somit abhängig von der Geschwindigkeit der Blockchain rechtzeitig vor dem Lieferzeitpunkt gestartet und abgeschlossen werden kann, kann der blockchainbasierte Ansatz theoretisch immer die zeitlichen Anforderungen des FMM erfüllen. Je früher Gebote am FMM abgegeben werden müssen, desto unattraktiver ist jedoch die Marktteilnahme (1) aufgrund der schlechteren Datenbasis.

Derzeit findet die Markträumung für FCR am zentralen RLM einen Tag im Voraus statt [6]. Es wird daher davon ausgegangen, dass die zusätzliche Laufzeit einer Auktion auf der Blockchain aktuell nicht negativ ins Gewicht fällt. Perspektivisch könnten sich die Zeitscheiben und der Zeitraum zwischen GCT und Lieferzeitpunkt weiter verkürzen. Da im Zuge der

¹⁰ Je Produktzeitscheibe und Lieferrichtung

Literaturrecherche einige aktuelle Arbeiten zu blockchainbasierten Auktionen mit Blick auf die Zeit- und Recheneffizienz gefunden wurden ([33, 38, 39, 40]), wird jedoch angenommen, dass sich auch die Blockchaintechnologie entsprechend weiterentwickeln wird, sodass die Latenzen potenzielle Akteure auch dann nicht von der Teilnahme am blockchainbasierten FMM abhalten würden (siehe [Annahme 1](#)).

[Tabelle 2.1](#) fasst die Infrastrukturüberlegungen zusammen. Aufgrund der genannten Vorteile des blockchainbasierten Ansatzes wird eine in weiteren Arbeiten genauer zu definierende Blockchain als Infrastruktur für den FMM angenommen. Zusammenfassend wird die folgende Annahme getroffen:

Annahme 1. *Es gibt eine Blockchainimplementierung, die alle (zukünftigen) Anforderungen des FMM erfüllt. Mit dieser Blockchain ist es insbesondere möglich, ein resilientes verteiltes System aufzusetzen, das (1) die unfairen Vorteile sonst notwendiger AOs eliminiert, das (2) ausreichend Vertrauen der einzelnen Akteure zueinander für die Verwendung eines zeit- und recheneffizienten Konsensverfahrens schafft, und mit dem (3) verdeckte FMM-Auktionen (wie in [Abschnitt 2.1.2](#) definiert) in einer für Marktteilnehmer attraktiven Geschwindigkeit durchgeführt werden können.*

Mit der Wahl einer solchen Blockchain als Marktinfrastruktur ist [Teilfrage 1](#) bereits teilweise beantwortet. Während der erste, dezentrale Ansatz den AOs einen strategisch relevanten Informationsvorsprung verschafft hätte, implementiert die Blockchain eine verdeckte Auktion. Die Zuständigkeit für die Aufgaben des fehlenden zentralen Auktionators wird über den *Proof of Stake*-Konsensmechanismus geklärt und ist daher für die Untersuchung des strategischen Bieterverhaltens nicht von Relevanz.

Die verteilte Auktion am FMM unterscheidet sich jedoch insofern von einer zentralen Auktion mit externem Auktionator, als dass (1) die Anzahl Gebote beobachtbar ist und (2) zwangsläufig alle (und nicht nur alle bezuschlagten) Gebote nach Handelsschluss veröffentlicht werden. Ob und wie diese Eigenschaft in einer spieltheoretischen Modellierung des FMM abgebildet werden sollte und kann, ist bei der Wahl der Spielrepräsentation ([Abschnitt 2.3](#)) zu entscheiden.

Aufbauend auf dieser Marktinfrastruktur werden im Folgenden Annahmen über die Regeln der verdeckten Auktion am FMM getroffen.

2.1.2 Festlegung der Auktionsregeln

[Tabelle 2.2](#) gibt einen Überblick über die Regeln der FMM-Auktion in Bezug auf die FCR-Auktion am übergeordneten RLM, für die im Regelbetrieb Gebote aggregiert werden. Wesentliche Merkmale werden nachfolgend erläutert.

Tabelle 2.2: Überblick über die FCR- und FMM-Auktion nach [6] und eigener Definition

	FCR	FMM
Zugangsvoraussetzungen	PQ durch ÜNB	PQ durch VNB
Häufigkeit der Auktion	täglich GOT: D-14, GCT: D-1	beliebig, potenziell alle 4 Stunden
Produktzeitscheiben	6 x 4 Stunden	$6 \times n \times \frac{4}{n}$ Stunden (n: Anzahl Zeitslots je Produktzeitscheibe)
Lieferrichtung	positiv oder negativ (2 Produkte) ¹¹	positiv oder negativ (2 Aggregationen)
Bietmechanismus	one-shot	one-shot
Offenheit der Gebote	verdeckt anonymisierte Veröffentlichung bezuschlagter Gebote nach Zuschlag	verdeckt ¹² pseudonymisierte Veröffentlichung aller Gebote nach Gate Closure
Gebotskomponenten	(un-)teilbare Gebotshöhe (MW), LP (ct/MW/h)	je Zeitslot: teilbare Gebotshöhe (kW), LP (ct/MW/h)
Ausschreibung	1413 MW ¹³	-
Mindestangebotsgröße	1 MW	10 kW
Angebotsinkrement	1 MW	1 kW
Zuschlagsvergabe	Merit-Order der LP	n-mal Merit-Order der LP bis 1 MW ¹⁴
Preisregel	Einheitspreis LP	Einheitspreis LP über alle n Zeitslots je 1-MW-Gebot ¹⁴
Aktivierungsstrategie	Pro-rata	Pro-rata

¹¹Im Zuge dieser Arbeit getroffene Annahme 3, bisher ein symmetrisches Produkt [6]

¹²Anzahl Gebote beobachtbar, siehe auch Annahme 7

¹³Stand 22.11.2020, <https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tenders/?productTypes=PRL>

¹⁴Mehrere 1-MW-Gebote mit dem gleichen Gebotspreis werden zu einem größeren, teilbaren multi-MW-Gebot aggregiert.

Um zwischen Geboten, die **FMM**-Teilnehmer am **FMM** abgeben, und Geboten, die am **FMM** aggregiert und in der zentralen **FCR**-Auktion abgegeben werden, zu unterscheiden, wird im Folgenden von *internen Geboten* und *aggregierten* oder *MW-Geboten* gesprochen. Gebote, die in der zentralen **FCR**-Auktion eingehen, werden (unabhängig davon, ob sie am **FMM** aggregiert oder von einem zentralen Akteur abgegeben werden) auch *FCR-Gebote* genannt.

Zugangsvoraussetzungen

Annahme 2. *Akteure des **FMM** sind als **RRA** für die Teilnahme am **FMM** präqualifiziert. Der **FMM** ist wiederum durch den **ÜNB** als **RRA** für die Teilnahme am zentralen deutschen **RLM** für **FCR** präqualifiziert.*

Da die Details der praktischen Umsetzung des **FMM** nicht im Fokus dieser Arbeit stehen, wird die technische Ausstattung der Marktteilnehmer des **FMM** sowie die **PQ** des **FMM** als **RRA** für **FCR** vorausgesetzt. Insbesondere erfolgt an jedem Netzanschlusspunkt eine lokale Frequenzmessung, die die autonome, dezentrale Aktivierung von **FCR** bei Frequenzabweichungen sicherstellt, und das in **Abbildung 1.1** dargestellte Zeitverhalten wird von jeder Reserveeinheit oder -gruppe erfüllt. Da positive und negative **FCR** am **FMM** separat beschafft werden (siehe **Annahme 3**), reagieren die Akteure je nach Zuschlag unterschiedlich auf positive und negative Frequenzabweichungen. Die Bereitstellung von Regelenergie ist außerdem durch die Netzbetreiber zuverlässig nachvollziehbar.

Häufigkeit der Auktion

Auktionen auf der Blockchain werden autonom durch die Marktteilnehmer bzw. durch Softwareagenten über deren **EOAs** initiiert. Es gibt daher keine Festlegung für die Häufigkeit und Startzeit der Auktionen am **FMM**. Alle vier Stunden endet jedoch potenziell eine Auktion je Lieferrichtung rechtzeitig¹⁵ vor Handelsschluss des übergeordneten **RLM**, um die aggregierten Gebote zu bestimmen und am **RLM** abzugeben.

Produktzeitscheiben

Viele **DERs** können nicht über die gesamte Produktzeitscheibe der zentralen **FCR**-Auktion (von derzeit vier Stunden) eine konstante, aber stufenlos anfahrbare Leistungsmenge vor-

¹⁵ Abhängig von der Latenz der Blockchain endet eine Auktion zum spätestmöglichen Zeitpunkt vor dem Handelsschluss am **RLM**.

halten. Um diesen Anlagen den Zugang zum **FMM** zu gewähren und somit die Liquidität des Marktes zu erhöhen, wird die Produktzeitscheibe der zentralen Auktion am **FMM** in mehrere, kürzere Zeitslots aufgeteilt. Für jeden Zeitslot können Teilgebote unterschiedlicher Leistungsmengen und -preise abgegeben werden. Die Zeitslots könnten theoretisch beliebig kurz sein (bspw. 16 Zeitslots à 15 Minuten), wobei sich die Komplexität der Zuschlagsvergabe mit der Anzahl Zeitslots erhöht.

Lieferrichtung

Annahme 3. *Am zentralen deutschen **RLM** wird zukünftig auch **FCR** als asymmetrisches Produkt, d.h. positive und negative Primärregelreserve separat, gehandelt.*

Da **aFRR** und **mFRR** am zentralen Markt bereits als asymmetrische Produkte gehandelt werden, ist **Annahme 3** plausibel¹⁶. Diese wird getroffen, um die Zuschlagsregel des **FMM** zu vereinfachen. Potenzielle Restriktionen durch Netzengpässe¹⁷ müssen zwar von den Netzbetreibern berücksichtigt werden. Positive und negative Gebote können so jedoch unabhängig voneinander aggregiert werden, was potenziell die Markteffizienz und -liquidität erhöht. Zudem öffnet sich der **FMM** damit für Akteure, die **FCR** nur in einer Lieferrichtung anbieten können. Dies kann zu einer höheren Marktliquidität führen.

Gebotskomponenten

Ein internes Gebot setzt sich bei einer Unterteilung der Produktzeitscheibe in n Zeitslots à $4/n$ Stunden aus n Teilgebotsen mit unterschiedlichen Gebotsmengen und Leistungspreisen zusammen. Die Gebotsmenge eines Teilgebots kann auch 0 kW betragen, wenn ein Akteur ein Gebot für mindestens einen, aber nicht für alle n Zeitslots machen möchte.

Die Gebots- sowie die resultierenden Zuschlagspreise werden im Folgenden unabhängig von Leistungsmenge und Zeitraum normiert in Cent pro MW und Stunde angegeben.

Annahme 4. *Die am **FMM** abgegebenen, internen Gebote sind beliebig und in jedem Zeitslot voneinander unabhängig teilbar.*

¹⁶Es ist denkbar, dass **Annahme 3** eine separate Vergütung der Erbringung von **FCR** über ein Regelarbeitsentgelt sowie im weiteren Verlauf auch die Einführung eines Regelarbeitsmarktes für **FCR** nach sich ziehen könnte, wie es seit 03.11.2020 bei **aFRR** und **mFRR** der Fall ist [41]. Das wird hier allerdings nicht angenommen.

¹⁷Möglicherweise verkompliziert der **FCR**-Abruf in unterschiedlichen Lieferrichtungen von unterschiedlichen Knotenpunkten den Netzbetrieb.

Die flexible Leistungsanpassung ist technisch plausibel, denn Anlagen, die **FCR** erbringen, müssen in der Lage sein, bei Abruf frequenzgesteuert fast stufenlos zu regeln. **Annahme 4** hat jedoch finanzielle Folgen für die Bieter, die für die Regelleistungsvorhaltung in bezuschlagter Höhe vergütet werden. So könnte es beispielsweise einen Akteur geben, für den die Regelleistungsvorhaltung nur rentabel ist, wenn er einen Zuschlag für drei aufeinanderfolgende Stunden mit einer gewissen Mindestleistung erhält. Die Feststellung und Kommunikation solcher Abhängigkeiten bedürften komplexerer Flexibilitätsmodelle und Gebotsformate sowie einer komplexeren Zuschlagsregel. Der Fokus dieser Arbeit liegt nicht auf der Flexibilitätsmodellierung. Daher wird an dieser Stelle vereinfachend festgehalten, dass sich nicht alle Prozesse für die Vermarktung von **FCR** in dieser Auktion eignen.

Ausschreibung

Annahme 5. *Die Abgabe mehrerer aggregierter Gebote pro Produktzeitscheibe am zentralen deutschen **RLM** für **FCR** durch den **FMM** ist erlaubt.*

Bislang ist die Abgabe mehrerer Gebote durch *einen* Akteur an den zentralen deutschen **RLM** nicht erlaubt [11]. Dies ist insofern nachvollziehbar, als dass ein Bieter durch die Abgabe mehrerer gestaffelter Gebote den Einheitspreis absichtlich in die Höhe treiben könnte. Ein aggregiertes Gebot des **FMM** setzt sich jedoch i.A. aus den internen Geboten mehrerer, in ihrer Kostenstruktur potenziell sehr unterschiedlicher Akteure zusammen. Um die niedrigen Grenzkosten günstiger Akteure an den übergeordneten **RLM** weiterzugeben, sollen am **FMM** nicht ein maximal großes Gebot sondern mehrere MW-Gebote unterschiedlicher Preise aggregiert werden. Dies erhöht die Chancen auf einen Zuschlag für Akteure mit niedrigen Grenzkosten und steigert damit sowohl den Anreiz zur **FMM**-Teilnahme als auch die Markteffizienz insgesamt. Da der **FMM** für den **VNB** transparent ist (vgl. **Abschnitt 2.1.1**), kann dieser sicherstellen, dass jeder Agent des **FMM** wiederum nur ein Gebot je Produktzeitscheibe abgibt.

Zuschlags- und Preisregel

Zuschlags- und Preisregel gelten im Regel- wie im Inselnetzbetrieb des **FMM** gleichermaßen. Aufgrund der hierarchischen Verknüpfung des **FMM** mit der zentralen **FCR**-Auktion haben sie im Regelbetrieb, der hier betrachtet wird, allerdings eine andere Funktion.

Die **Zuschlagsregel** des **FMM** bestimmt im Regelbetrieb, welche internen Gebote zu welchen MW-Geboten für die zentrale **FCR**-Auktion aggregiert und im Falle eines dortigen

Zuschlags¹⁸ auch intern bezuschlagt werden. Im Sinne einer hohen Markteffizienz erfolgt die Zuschlagsvergabe am **FMM** in aufsteigender Reihenfolge der Leistungspreise (Merit-Order). **Annahme 4** vereinfacht die Zuschlagsregel insofern, als dass alle internen Gebote hierbei beliebig geteilt werden können und keine Abhängigkeiten zwischen den Teilgeboten eines Akteurs in unterschiedlichen Zeitslots betrachtet werden müssen. Im Fall von Preisgleichheit werden interne Gebote gleichmäßig anteilig bezuschlagt.

Aggregiert werden interne Gebote aufbauend auf **Annahme 5** zu i. A. mehreren 1-MW-Geboten. Mehrere aggregierte 1-MW-Gebote mit dem gleichen Preis (siehe Preisregel) werden allerdings als ein größeres, teilbares multi-MW-Gebot am zentralen **RLM** abgegeben. Manche internen Gebote werden bereits bei der Gebotsaggregation nicht oder nur anteilig berücksichtigt oder auf mehrere aggregierte Gebote aufgeteilt.

Am übergeordneten **RLM** werden Gebote in 1-MW-Schritten bezuschlagt [11]. So werden aggregierte 1-MW-Gebote bei der dortigen Zuschlagsvergabe nie geteilt. Wenn multi-MW-Gebote am zentralen **RLM** grenzpreissetzend sind und anteilig bezuschlagt werden, werden die internen Gebote (wie bei der Gebotsaggregation) entsprechend der Merit-Order je Zeitslot ganz, anteilig oder gar nicht bezuschlagt (siehe auch **Abbildung 3.3** in **Abschnitt 3.2.2**).

Die **Preisregel** des **FMM** bestimmt im Regelbetrieb, (1) wie der Gebotspreis aggregierter Gebote ermittelt und (2) wie die Zahlung vom übergeordneten **RLM** im Zuschlagsfall auf die beteiligten Bieter des **FMM** verteilt wird. Im Einklang mit dem deutschlandweiten **RLM** für **FCR** wird am **FMM** die Einheitspreisregel angewandt. Das bedeutet, der Gebotspreis jedes aggregierten Gebots entspricht dem Preis des teuersten internen Gebots, das in diesem aggregiert wird. Nach der Markträumung am zentralen **RLM** wird allen **FMM**-Akteuren, die an bezuschlagten aggregierten Geboten beteiligt sind, intern der Zuschlag entsprechend ihrer Beteiligung am aggregierten Gebot erteilt und dieser mit dem für alle gleichen zentralen **UP** vergütet.

Die Erbringung von Regelleistung im Fall einer Frequenzabweichung wird nicht zusätzlich vergütet. Stellt der **VNB** jedoch fest, dass einzelne Akteure des **FMM** Regelleistung bei Frequenzabweichungen nicht wie bezuschlagt erbringen, bestraft er diese mit einer Pönale (z.B. finanzieller Art oder mit dem Ausschluss aus dem **FMM**), die in weiteren Arbeiten genauer zu definieren ist.

¹⁸Über die Bezuschlagung der aggregierten Gebote entscheidet die Markträumung am zentralen deutschen **RLM** für **FCR**. Die Auszahlung der **FMM**-Teilnehmer hängt im Regelbetrieb daher nicht nur von Zuschlags- und Preisregel sowie dem Verhalten der anderen Akteure am **FMM**, sondern ebenso von Zuschlags- und Preisregel sowie dem Verhalten der anderen Akteure an der übergeordneten **FCR**-Auktion ab.

Abbildung 2.1 illustriert die Zuschlags- und Preisregel des FMM anhand einer Gebotsaggregation. Der detaillierte Ablauf von Gebotsaggregation, -abgabe und -bezuschlagung ist in Algorithmus 3 in Anhang A beschrieben.

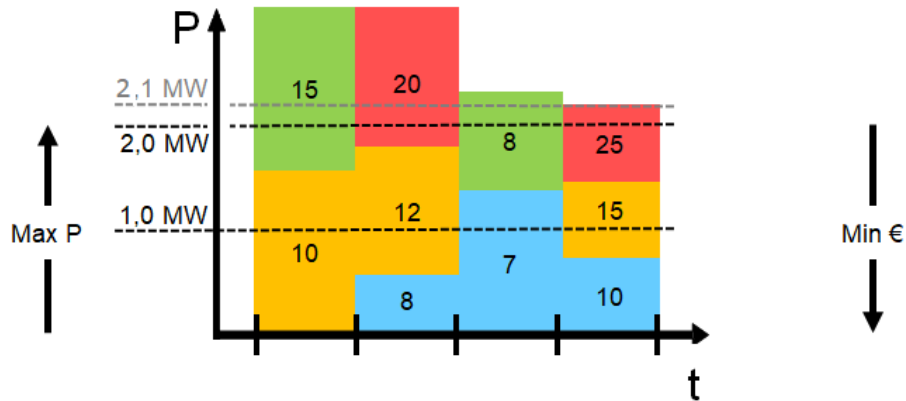


Abbildung 2.1: Eigene Darstellung einer Gebotsaggregation am FMM mit vier Bietern *rot*, *gelb*, *grün* und *blau*. x-Achse: Unterteilung der Produktzeitscheibe in vier Zeitslots, y-Achse: Gebotsmenge, Beschriftung der Blöcke: Gebotspreis in ct/MW/h. Aggregiert werden zwei 1 MW-Gebote zum Preis von 15 und 25 ct/MW/h. Ob (und falls ja, zu welchem Preis) diese 1 MW-Gebote bezuschlagt und somit die Gebote der Bieter *rot*, *gelb*, *grün* und *blau* (anteilig) bezuschlagt werden, hängt vom resultierenden UP in der übergeordneten FCR-Auktion ab. Wird der zentrale FCR-Markt beispielsweise zu einem UP von 20 ct/MW/h geräumt, erhält der FMM einen Zuschlag über 1 MW und eine Auszahlung über $1 \text{ MW} \cdot 4 \text{ h} \cdot 20 \text{ ct/MW/h} = 80 \text{ ct}$. Am FMM wird dieser Zuschlag wie folgt auf die internen Gebote umgelegt: *Rot* und *grün* erhalten keinen Zuschlag, da das einzige MW-Gebot, an dem sie beteiligt waren, zum Preis von 25 ct/MW/h nicht bezuschlagt wurde. Die internen Gebote von *gelb* und *blau*, die (anteilig) an der Aggregation des zentral bezuschlagten 1-MW-Gebots beteiligt sind, werden entsprechend intern bezuschlagt und unabhängig vom Abruf mit 20 ct/MW/h vergütet. *Gelb* erhält so $(1+0,5+0+0,25) \text{ MW} \cdot \text{h} \cdot 20 \text{ ct/MW/h} = 35 \text{ ct}$ insgesamt, *blau* erhält $(0+0,5+1+0,75) \text{ MW} \cdot \text{h} \cdot 20 \text{ ct/MW/h} = 45 \text{ ct}$.

Wie eingangs erläutert, soll der Handel am FMM automatisiert zwischen rationalen, nutzenbasierten Softwareagenten stattfinden, die autonom und proaktiv agieren. Nachdem die Infrastruktur, über die die Agenten miteinander interagieren, und die Regeln, nach der die Auktion abläuft, in Abschnitt 2.1 definiert wurden, können diese Agenten spezifiziert werden.

2.2 AGENTENENTWURF

Um die strategische Interaktion der Agenten am **FMM** auf Basis der Utility spieltheoretisch zu untersuchen, müssen zunächst die Ziele, die die Agenten am **FMM** verfolgen, ihre Sicht auf die problembezogene Umgebung und ihr Handlungsspielraum bestimmt werden.

Das agentenbasierte Kontrollsystem besteht aus mehreren **nutzenbasierten Softwareagenten**, die jeweils die Interessen eines Marktakteurs vertreten. Je nach Art und Anzahl der Anlagen, deren Flexibilität dieser Akteur am **FMM** vermarktet, steuert jeder Agent eine oder mehrere realweltliche Komponenten wie z.B. eine Windenergieanlage (**WEA**) oder das Zusammenspiel von **PV**-Anlage und Batteriespeicher in einem Haushalt. Abhängig von den Eigenschaften und Parametern seiner Anlage(n) sowie den Präferenzen der Eigentümer muss jeder Agent bei der Wahl seiner Gebotsstrategie unterschiedliche, ggf. fluktuierende Grenzkosten und Umgebungsinformationen berücksichtigen [42]. So ist beispielsweise die vermarktbar Flexibilität einer **WEA** wetterabhängig, und ihre Vorhaltungskosten für negative Regelleistung gehen gegen null. Die vermarktbar Flexibilität einer Elektroautobatterie ist hingegen nicht direkt vom Wetter, aber vom Nutzerverhalten abhängig. Bei der Wahl des Gebotspreises muss außerdem die zyklische Batteriealterung bei der Erbringung von Regelarbeit berücksichtigt werden. Alle Agenten verfolgen das **Ziel**, die Flexibilität ihrer Anlage(n) in der **FMM**-Auktion mit maximalem Profit zu vermarkten. Das **Performanzmaß** ist der Gewinn, der dabei erzielt wird, d.h. die Zuschlagszahlungen abzüglich der Vorhaltungs- und Erbringungskosten sowie eventueller Strafzahlungen oder entgangener zukünftiger Gewinne im Falle eines Ausschlusses aus dem **FMM**, falls Regelleistung nicht wie bezuschlagt erbracht werden kann (Pönale). Die Zeitspanne, über die ein Agent die Gewinnmaximierung anstrebt (z.B. kurzfristig je Auktion oder auch über Monate und Jahre), ist vom Anlagentyp und den Präferenzen des Eigentümers abhängig.

Die Agenten interagieren wie beschrieben mit den realweltlichen Komponenten, deren Flexibilität sie vermarkten, sowie indirekt miteinander über die Blockchain. Dabei kennt jeder Agent nur den **VNB** und die wechselnden **EOAs** der anderen Agenten am **FMM**. Über die Abgabe aggregierter Gebote interagieren sie zudem indirekt mit der Gesamtheit der Bieter in der übergeordneten **FCR**-Auktion und dem **ÜNB** über die Internetplattform **regelleistung.net**. Die **Wahrnehmungssequenz** umfasst die während einer Auktion eingehenden verschlüsselten Gebote und die zugehörigen **EOAs**, alle (bezuschlagten ebenso wie nicht bezuschlagten) Gebote vergangener **FMM**-Auktionen, bezuschlagte Gebote vergangener Auktionen am übergelagerten **RLM** sowie private, anlagenspezifische und ggf. öffentlich zugängliche Informationen wie z.B. den Wetterbericht. Aufgrund des ständigen Wechsels der **EOAs** lässt sich einzelnen Agenten allerdings keine individuelle Gebotshistorie

zuordnen. Dennoch versucht jeder Agent, aus seiner Wahrnehmungssequenz Rückschlüsse auf die Komponenten und Strategien der anderen Agenten und der Akteure am **RLM** zu ziehen, um das zukünftige Bieterverhalten abzuschätzen. Dazu verfolgen die Agenten den Zustand ihrer Umgebung über ihre aktuelle Wahrnehmung hinaus. In einem differenzierten, internen **Weltmodell** speichern sie Informationen über vergangene Zustände, die Entwicklung der Umgebung und den bisherigen, durchschnittlichen Nutzen der eigenen Aktionen. Sie besitzen zudem ein abstrahiertes Modell der eigenen Anlage(n). Aus diesem internen Wissen prognostizieren sie, abhängig von unterschiedlichen Kontextinformationen wie z.B. der Wettervorhersage, dem Wochentag, dem aktuellen Zustand der eigenen Anlage(n) und historischen Daten, die Lastkurve der eigenen Anlage(n), aus der über ein Flexibilitätsmodell wiederum die vermarktbare Flexibilität ermittelt wird, sowie das Verhalten der anderen Agenten. In wiederholten **FMM**-Auktionen erlernen die Agenten so autonom Betriebsführungs- und Gebotsstrategien, die ihre *erwartete* Utility, d.h. den erwarteten Gewinn, maximieren. Die **Utilityfunktion** eines Agenten ist dabei eine Internalisierung seines Performanzmaßes [5]. Die tatsächliche, resultierende Utility eines Gebots ist abhängig vom wirklich eintretenden Umgebungszustand, d.h. dem Handeln der anderen Agenten sowie der Flexibilität der eigenen Komponente(n) zum Zeitpunkt der Regelleistungsvorhaltung und -erbringung.

Die für den Agentenentwurf zentrale Spezifikation der *Task Environment*¹⁹ lässt sich mithilfe der *PEAS*-Beschreibung (*P*erformance, *E*nvironment, *A*ctuators, *S*ensors [5]) wie folgt zusammenfassen:

- **Performanzmaß:** Finanzieller Gewinn (Zuschlagszahlung abzüglich der Vorhaltungs- und Erbringungskosten und eventueller Pönalen)
- **Umgebung:** Die Umgebung besteht aus Komponenten der physischen Welt (eine oder mehrere Anlagen) und anderen Agenten am **FMM** (Multiagentensystem). Sie ist nur teilweise beobachtbar, kompetitiv und entwickelt sich sequentiell. Sie ändert sich auch unabhängig von den Aktionen des Agenten dynamisch und kontinuierlich. Auch wenn die Auktionsregeln klar definiert sind, ist die Umgebung zunächst doch unbekannt, da die Identitäten der anderen Agenten und ihre physischen Komponenten unbekannt sind. Die Umgebung entwickelt sich aus Sicht der Agenten zunächst nichtdeterministisch. Sie müssen erst lernen, wie sich die Umgebung verhält und wie sie in dieser gute Entscheidungen treffen. Dann nehmen sie die Entwicklung der Umgebung als ggf. stochastisch wahr.

¹⁹ **Task Environment:** Problembezogene Spezifikation von Performanzmaß, Umgebung, Aktuatoren und Sensoren (PEAS) eines Agenten; erster Schritt beim Entwurf eines Agenten [5]

- **Aktuatoren:** Die Agenten agieren autonom in ihrer Umgebung. Je nach Marktakteur steuern sie andere DERs über anlagenspezifische Aktuatoren. Darüber hinaus besitzen alle Agenten des FMM eine Schnittstelle zur Blockchain, über die sie mit wechselnden EOAs Transaktionen versenden. U.a. eröffnen sie hierüber proaktiv neue Auktionen und reichen ihre Gebote ein (vgl. Abschnitt 2.1.1). Ein Gebot setzt sich aus einer Leistungsmenge $ba_{i,t}$ und einem Leistungspreis $bp_{i,t}$ je Zeitslot t zusammen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Leistungsmengen wählt ein Agent i dabei aus einer durch das Angebotsinkrement j (vgl. Tabelle 2.2) diskretisierten und durch die Mindestangebotsgröße ba_{min} (vgl. Tabelle 2.2) nach unten und durch seine präqualifizierte Leistung q_i nach oben beschränkten Menge der theoretisch möglichen Gebotsleistungen BA (Gleichung 2.1); die Leistungspreise wählt er aus einer diskretisierten und beschränkten²⁰ Menge der theoretisch möglichen Gebotspreise BP (Gleichung 2.2).

$$BA := \{0\} \cup \{ba_{min}, ba_{min} + j, ba_{min} + 2j, \dots, q_i\} \quad (2.1)$$

$$BP := \{bp_{min}, bp_{min} + k, bp_{min} + 2k, \dots, bp_{max}\} \quad (2.2)$$

- **Sensoren:** Alle Agenten messen die lokale Netzfrequenz und verarbeiten Transaktionen der Blockchain. Hierüber erhalten sie u.a. Informationen über Zuschläge. Je nach Marktakteur erhalten sie außerdem Werte von unterschiedlichen Anlagen sowie relevante Kontextinformationen wie z.B. Wetterdaten als Input.

Aus diesem Agentenentwurf lassen sich spieltheoretische Modelle der Auktion am FMM ableiten. Das strategische Bieterverhalten, d.h. die Interaktion der Agenten über die Blockchain, soll als Spiel modelliert und analysiert werden. Die Interaktion mit der physischen Umgebung soll hingegen nicht explizit modelliert werden, sondern die Randbedingungen hierfür vorgeben. Über die ggf. variierenden Anlagenzustände und Grenzkosten begrenzen die realweltlichen Komponenten und die Präferenzen ihrer Eigentümer den Handlungsspielraum (vermarktbar Anlagenflexibilität) und bestimmen die Utility unterschiedlicher Auktionsergebnisse (Vorhaltungs- und Erbringungskosten). Inwiefern die indirekte Interaktion mit dem Auktionsgeschehen am übergeordneten RLM (Teilfrage 2) sowie Unsicherheiten der die Randbedingungen vorgebenden physischen Umgebung (Teilfrage 3) dabei abgebildet werden können, wird Teil der weiteren Untersuchung sein.

Bevor die spieltheoretische Modellierung erfolgen kann, muss zunächst über eine geeignete Spielrepräsentation entschieden werden. Dieser Agentenentwurf wird in Kapitel 4 zum Vergleich mit der spieltheoretischen Modellierung herangezogen.

²⁰Digitale Gebote sind immer quantisiert. Es wird angenommen, dass die Netzbetreiber einen Mindest- (bp_{min}) und Maximalwert (bp_{max}) sowie eine Auflösung der Gebotspreise in k ct/MW/h vorgeben.

2.3 WAHL DER SPIELREPRÄSENTATION

Bei der spieltheoretischen Modellierung besteht ein Zielkonflikt zwischen Genauigkeit und Komplexität, d.h. dem benötigten Speicherplatz und der benötigten Rechenleistung zur Darstellung und Lösung eines Modells. Gesucht wird eine möglichst effiziente Modellierung der verteilten Auktion am [FMM](#), die nicht unbedingt alle Aspekte des agentenbasierten Kontrollsystems, aber alle strategisch relevanten Aspekte der Interaktion der nutzenbasierten Agenten wiedergibt.

Ein Spiel soll *eine* [FMM](#)-Auktion modellieren, d.h. mit der Eröffnung²¹ der Auktion beginnen und mit dem Handelsschluss und der Zuschlagsvergabe am übergeordneten, deutschlandweiten [RLM](#) enden. Ein solches Basisspiel findet je Lieferichtung ggf. unregelmäßig, aber potenziell alle vier Stunden statt (vgl. *Häufigkeit der Auktion* in [Abschnitt 2.1.2](#)). Der Einfachheit halber soll diese Auktionswiederholung in dieser Arbeit zunächst als eine Folge statischer, voneinander unabhängiger Spiele analysiert werden. Dies stellt eine Vereinfachung dar, die folgender impliziter Annahme entspricht:

Annahme 6. *Die Bieter versuchen, ihren kurzfristigen Gewinn je Auktion zu maximieren. Auswirkungen ihres Verhaltens auf Gewinne in potenziellen, zukünftigen Auktionen, berücksichtigen sie bei der Wahl ihres Gebots nicht.*

In statisch wiederholten Spielen lassen sich Informationen über vorangegangene Auktionen nicht abbilden. Die Tatsache, dass am [FMM](#) infrastrukturbedingt alle (und nicht nur alle bezuschlagten) Gebote nach Handelsschluss unter Pseudonymen veröffentlicht werden (vgl. [Abschnitt 2.1.1](#)), kann daher in der spieltheoretischen Modellierung, für die im Folgenden eine geeignete Repräsentation ausgewählt werden soll, nicht berücksichtigt werden.

Normalform- oder Extensivformspiel

Bei der Wahl der Spielform kann im Wesentlichen zwischen der Normalform und der Extensivform unterschieden werden. Während die Extensivform auch die Abfolge der Spielzüge und den Informationsstand der Spieler über das Handeln der anderen berücksichtigt, beschränkt sich die Normalform auf die Aktionsmengen (Handlungsspielraum) jedes Spielers und die Utility als Funktion des Spielausgangs, d.h. der gewählten Aktionen aller Spieler.

²¹Die Zuständigkeit für die Aufgaben des fehlenden zentralen Auktionators wird über den *Proof of Stake*-Konsensmechanismus der Blockchain geklärt und ist daher für die Untersuchung des strategischen Bieterverhaltens nicht von Relevanz (vgl. [Abschnitt 2.1.1](#)).

Eine Situation, in der kein Spieler zum Zeitpunkt seines Zuges Informationen über die Züge der Gegenspieler hat, ist entscheidungstheoretisch äquivalent zu einer Situation, in der alle Spieler zeitgleich bieten. In diesem Fall ist die zeitliche Reihenfolge der Züge irrelevant und die Analyse des Spiels in Extensivform bietet keinen Erkenntnisgewinn gegenüber der Analyse in Normalform. [10, 43]

Am **FMM** finden verdeckte Auktionen auf einer Blockchain statt (vgl. **Abschnitt 2.1.1**). Keinem der Agenten sind zum Zeitpunkt seiner Gebotsabgabe die Gebote der anderen Agenten bekannt. Dies legt die Darstellung in Normalform nahe. Die verschlüsselte Form der Gebote und die zugehörigen Adressen der **EOAs** sind jedoch beobachtbar. Da angenommen wird, dass sich jeder Agent für jedes Gebot einen neuen **EOA** vom **VNB** ausstellen lässt, können die Agenten aus der Sichtbarkeit der **EOAs** keinen Nutzen ziehen. Die im Spielverlauf beobachtbare Information reduziert sich auf die Anzahl abgegebener Gebote. Diese in einem Extensivformspiel abzubilden, ist für die spieltheoretische Analyse des **FMM** dann sinnvoll und notwendig, wenn das Bieterverhalten dadurch signifikant beeinflusst wird. Nach den folgenden Überlegungen ist das nicht der Fall:

1. **Die Beobachtbarkeit der Anzahl Gebote ist eingeschränkt.** Da die Prognosen über etwaige Unsicherheiten, wie z.B. die wetterbedingt fluktuierende Anlagenflexibilität, genauer sind, je näher der Erbringungszeitpunkt liegt, haben alle Agenten einen Anreiz, ihr Gebot zum letztmöglichen Zeitpunkt abzugeben. Auch wenn das nicht exakt zeitgleich passiert, ist aufgrund von Latenzen innerhalb der Blockchain anzunehmen, dass Agenten zum Zeitpunkt ihrer Gebotsabgabe (wenn überhaupt) nur einen Bruchteil der Anzahl Gebote kennen.
2. **Das Ziehen von Rückschlüssen auf das Bieterverhalten ist rechen- und somit kostenintensiv.** Die Erkennung eventueller Muster und Zusammenhänge zwischen der beobachtbaren Anzahl Gebote und dem Spielausgang bedarf (1) der Investition hoher Rechenleistungen und (2) einer ausreichenden Anzahl an Auktionswiederholungen, bei denen andere, dem beobachtenden Agenten ggf. nicht ersichtliche Einflussfaktoren identisch sind. Ob solche Muster entsprechend erkennbar wären und sich hieraus ein finanzieller Vorteil ziehen ließe, der die Investitionskosten übersteigt, ist fraglich. Es wird angenommen, dass die Granularität der Gebotspreise, die ein Agent aus der beobachtbaren Anzahl Gebote abzuleiten versucht, insbesondere bei einer hohen Marktliquidität kleiner ist als die Ungenauigkeit seiner Abschätzungen.

Zusammenfassend wird **Annahme 7** getroffen:

Annahme 7. *Die Beobachtbarkeit der Anzahl Gebote hat keinen signifikanten Einfluss auf das Bieterverhalten. Die Betrachtung des **FMM** als Normalformspiel ist daher für die Analyse des Bieterverhaltens ausreichend.*

Unter den Annahmen 1 und 7 kann die Auktion am FMM wie eine zentrale, verdeckte Auktion betrachtet werden. Der FMM besitzt somit keine strategisch relevanten Eigenschaften, die aus seiner verteilten Marktstruktur resultieren und in der spieltheoretischen Modellierung einer statisch wiederholten Auktion abzubilden sind. Teilfrage 1 ist daher für das gewählte Setting nicht weiter zu beleuchten.

Definition 1. Normalformspiel [25]

Ein Normalformspiel ist ein Tupel $G = (N, A, u)$, mit

- N : endliche Menge aus n Spielern;
- $A = (A_1 \times \dots \times A_n)$: Aktionsraum, wobei A_i die endliche Menge der dem Spieler i zur Verfügung stehenden Aktionen ist. Jeder Vektor $a = (a_1, \dots, a_n) \in A$ ist ein sogenanntes Aktionsprofil;
- $u = (u_1, \dots, u_n)$: Vektor der Utilityfunktionen, wobei $u_i : A \mapsto \mathbb{R}$ die Utilityfunktion (auch: Auszahlungs- oder Payofffunktion) für Spieler i ist.

Schreibweise

Eine übliche Schreibweise für Normalformspiele mit n Spielern ist die Darstellung als **n-dimensionale Auszahlungsmatrix**. Die Koordinaten einer Zelle stehen dabei für einen möglichen Spielausgang, ein Aktionsprofil $a \in A$. In der Zelle sind die Auszahlungen aller Spieler für dieses Aktionsprofil eingetragen, beginnend mit Spieler 1. Während die Matrixdarstellung zur Veranschaulichung und Analyse kleiner Spiele sehr gut geeignet ist, ist die Größe der Spiele, die in dieser Form rechnerisch analysierbar sind, begrenzt. Der Speicherplatzbedarf, d.h. die Anzahl der zu speichernden Utilitywerte, wächst exponentiell mit der Anzahl Spieler n und der Anzahl Aktionen je Aktionsmenge $A_i \in A$. In gleicher Weise skaliert auch die Laufzeit von Algorithmen, die auf dieser Darstellung Nash-Gleichgewichte berechnen. [25, 44]

Alternativ können beliebige Normalformspiele auch als **Action-Graph Game (AGG)**²² angegeben werden. Ein solcher Graph besitzt einen *Action-Node* (AN) genannten Knoten je individueller Aktion der Aktionsmenge A und Utilityfunktion. Das bedeutet, dass identische Aktionen, die von unterschiedlichen Spielern mit identischen Utilityfunktionen gespielt werden können, in einem gemeinsamen AN zusammengefasst werden. ANs können

²²Zur Visualisierung der folgenden Ausführungen finden sich in den Abbildungen B.2 und B.3 in Anhang B beispielhaft der *Action-Graph* sowie die .game-Datei des Normalformspiels *Schere-Stein-Papier* in AGG-Darstellung.

wiederum über *Function-Nodes* (FNs) genannte Knoten zusammengefasst werden. Im einfachsten Fall ist ein FN ein *einfacher Aggregator*²³, der die Konfiguration seiner Nachbarn aufsummiert. Nachbarn eines ANs sind die Knoten, deren Aktionen Einfluss auf seine Utility haben.

Definition 2. Action-Graph [44]

Ein Action-Graph $G = (\mathcal{A} \cup \mathcal{P}, E)$ ist ein gerichteter Graph, mit

- $\mathcal{A} \cup \mathcal{P}$: Menge von Knoten, wobei $\mathcal{A} \cap \mathcal{P} = \{\}$, mit
 - \mathcal{A} : Menge der Action-Nodes. Jeder Knoten $\alpha \in \mathcal{A}$ ist eine Aktion und $\mathcal{A} = \bigcup_{i \in N} A_i$ die Menge individueller Aktionen aller Spieler $i \in N$ mit Aktionsmenge A_i ;
 - \mathcal{P} : Menge der Function-Nodes. Dabei gilt, dass die Einschränkung von G auf die Knoten \mathcal{P} azyklisch ist und dass für jeden Funktionsknoten $\rho \in \mathcal{P}$ ein Knoten $m \in \mathcal{A} \cup \mathcal{P}$ existiert, sodass $(\rho, m) \in E$;
- E : Menge gerichteter Kanten, wobei Schleifen (α, α) erlaubt sind. m' ist ein Nachbar von m , wenn es eine Kante von m' nach m gibt, d.h. $(m', m) \in E$. Die Nachbarschaft von m , bezeichnet als $v(m)$, sei die Menge der Nachbarn von m , d.h. $v(m) \equiv \{m' \in \mathcal{A} \cup \mathcal{P} \mid (m', m) \in E\}$.

Definition 3. Konfiguration [44]

Gegeben sei ein Action-Graph $(\mathcal{A} \cup \mathcal{P}, E)$ und ein Aktionsraum A . Eine Konfiguration c ist ein Tupel aus $|\mathcal{A}| + |\mathcal{P}|$ nichtnegativen Ganzzahlen $(c(m))_{m \in \mathcal{A} \cup \mathcal{P}}$, wobei es ein Aktionsprofil $a \in A$ gibt, das c hervorruft. Ist m ein Action-Node, so gibt $c(m)$ die Anzahl Spieler an, die die Aktion $m \in \mathcal{A}$ gewählt haben, und $C^{(m)}$ bezeichne die Menge der Konfigurationen über die Nachbarschaft von m $v(m)$, in denen mindestens ein Spieler m spielt. Ist $m \in \mathcal{P}$ ein Function-Node, so ist $c(m)$ als deterministische Funktion $f^m(c^{(m)})$ der Konfiguration seiner Nachbarnknoten $v(m)$ definiert, und $C^{(m)}$ bezeichne die Menge der Konfigurationen über $v(m)$. C bezeichne die Menge aller Konfigurationen.

Ein AN ist i.A. (ggf. indirekt über einen FN) auch mit sich selbst, aber nicht zwingend mit *allen* ANs benachbart. Anders als in der Matrixdarstellung werden die Utilities nicht für jeden Spieler und jedes mögliche Aktionsprofil $a \in A$ separat, sondern für jeden AN $\alpha \in \mathcal{A}$ für jede mögliche Konfiguration seiner Nachbarschaft $c^{(\alpha)} \in C^{(\alpha)}$ gespeichert. [44]

²³**Einfacher Aggregator:** Ein FN $\rho \in \mathcal{P}$ ist ein einfacher Aggregator, wenn jeder seiner Nachbarn $v(\rho)$ ein AN ist und f^ρ die Summationsfunktion ist: $f^\rho(c^{(\rho)}) = \sum_{m \in v(\rho)} c(m)$ [44].

Definition 4. Action-Graph Game mit Function-Nodes [44]

Ein Action-Graph Game mit Function-Nodes ist ein Tupel $(N, A, \mathcal{P}, G, f, u)$, mit

- N : Menge der Spieler;
- $A = (A_1 \times \dots \times A_n)$: Aktionsraum, wobei A_i die endliche Menge der Spieler i zur Verfügung stehenden Aktionen ist. Jeder Vektor $a = (a_1, \dots, a_n) \in A$ ist ein sogenanntes Aktionsprofil;
- \mathcal{P} : endliche Menge von Function-Nodes;
- $G = (\mathcal{A} \cup \mathcal{P}, E)$: Action-Graph, wobei $\mathcal{A} = \bigcup_{i \in N} A_i$ die Menge individueller Aktionen ist. Dabei gilt, dass die Einschränkung von G auf die Knoten aus \mathcal{P} azyklisch ist und für jeden Function-Node $\rho \in \mathcal{P}$ ein Knoten $m \in \mathcal{A} \cup \mathcal{P}$ existiert, sodass $(\rho, m) \in E$;
- f : Tupel $(f^\rho)_{\rho \in \mathcal{P}}$, wobei jede Funktion $f^\rho : C^{(\rho)} \mapsto \mathbb{R}$ eine beliebige Abbildung von Nachbarn von ρ auf reelle Zahlen ist;
- u : Tupel $(u^\alpha)_{\alpha \in \mathcal{A}}$, wobei jede Funktion $u^\alpha : C^{(\alpha)} \mapsto \mathbb{R}$ die Utilityfunktion für Aktion α ist.

Die Anzahl Utilitywerte, die in einer AGG-Darstellung gespeichert sind, ist dadurch immer kleiner oder gleich der Anzahl Utilitywerte in der analogen Auszahlungsmatrix²⁴. Unter anderem²⁵ bei folgenden Spieleigenschaften sind AGGs kompakter als Auszahlungsmatrizen: [44]

- **Anonymität:** Die Utility eines Spielers hängt vom aggregierten Verhalten anderer Spieler ab, aber nicht von deren Identität. [44] Die Anzahl zu speichernder Utilitywerte ist geringer als die der Auszahlungsmatrix, sobald Spieler überlappende Aktionsmengen besitzen, die in gemeinsamen ANs oder über FNs zusammengefasst werden.
- **Kontextspezifische Unabhängigkeit:** Die Utility einer Aktion hängt nicht von allen anderen Aktionen ab. [44] Die Nachbarschaft des zugehörigen ANs enthält entsprechend nicht alle ANs. Da Utilities nur für alle möglichen Konfigurationen der Nachbarschaft des ANs gespeichert werden, werden die Utilities für weniger Aktionskombinationen gespeichert als in der Auszahlungsmatrix.

²⁴Siehe auch Abbildungen B.1 und B.3 im Anhang: Für sehr kleine Spiele wie *Schere-Stein-Papier* lohnt sich die Darstellung und Analyse als AGG gegenüber der Auszahlungsmatrix aufgrund der über die Utilities hinausgehenden Darstellung des *Actions-Graphs* (vgl. Abbildung B.3) noch nicht. Wird die Anzahl Spieler größer, so wächst der Speicherplatzbedarf des AGGs polynomiell (die Anzahl möglicher Konfigurationen nimmt zu); der Speicherplatz der Auszahlungsmatrix wächst hingegen exponentiell mit n . [44]

²⁵Es gibt weitere Spieleigenschaften, für die AGGs den Speicherplatzbedarf weiter verringern und die Berechnung von Nash-Gleichgewichten beschleunigen. An dieser Stelle werden nur die für die Modellierung des FMM wichtigsten Aspekte erläutert. Die ausführliche Abhandlung zu AGGs findet sich in [44].

Eine kompaktere Spieldarstellung ermöglicht eine effizientere Berechnung von Nash-Gleichgewichten (NGG). Für ein AGG, in dem alle FNs *contribution-independent* nach Definition 5 sind, lässt sich die erwartete Utility eines Spielers für eine beliebige gemischte Strategie mit einem Polynomialzeitalgorithmus bestimmen. Die Berechnung der erwarteten Utility ist ein zentraler Schritt bei der Bestimmung von NGG. So können existierende Methoden zur Berechnung von NGG aus Auszahlungsmatrizen unter der Verwendung von AGG-Darstellungen und dieses Polynomialzeitalgorithmus exponentiell beschleunigt werden. Die AGG-Darstellung ermöglicht es so, komplexe Spiele zu modellieren und zu analysieren, die in Matrixschreibweise ggf. exponentiell mehr Speicherplatz benötigen würden und einer rechnerischen Analyse nicht zugänglich wären. [44]

Definition 5. Contribution-Independent Function-Node (FN) [44]

Ein Function-Node ρ in einem AGG nach Definition 4 ist *contribution-independent*, wenn

- die Nachbarn von ρ Action-Nodes sind: $v(\rho) \subseteq \mathcal{A}$.
- es einen kommutativen und assoziativen Operator $*$ gibt, und eine Ganzzahl w_α für alle $\alpha \in v(\rho)$, sodass für ein gegebenes Aktionsprofil $a = (a_1, \dots, a_n)$, $c(\rho) = \prod_{i \in N: a_i \in v(\rho)} w_{a_i}$.
- die Laufzeit jeder $*$ -Operation durch ein Polynom in n , $|\mathcal{A}|$ und $|\mathcal{P}|$ beschränkt ist. Außerdem wächst der Speicherplatzbedarf von $*$ polynomiell in n , $|\mathcal{A}|$ und $|\mathcal{P}|$.

Wird die Auktion am FMM als AGG repräsentiert, so können Anonymität und kontextspezifische Unabhängigkeit wie folgt genutzt werden:

- **Anonymität:** Der Markträumungspreis (und somit die Zuschlagsvergabe) hängt von den Geboten der anderen Agenten bzw. den daraus resultierenden aggregierten Gebotspreisen ab. Dabei ist irrelevant, welcher Agent genau welches Gebot abgegeben hat. Aufgrund der Blockchainimplementierung sind dem Agenten, der die Zuständigkeit für die Gebotsaggregation und -abgabe übernimmt, die Identitäten der Bieter nicht einmal bekannt (siehe Abschnitt 2.1.1).
- **Kontextspezifische Unabhängigkeit:** Entscheiden sich Agenten, in einer Auktion kein Gebot abzugeben, beträgt ihre Auszahlung unabhängig vom Verhalten der anderen immer 0 Cent. Der AN für die Aktion *kein Gebot* hat daher keine Nachbarn; es muss nur ein Utilitywert für diesen AN abgelegt werden.²⁶

²⁶Abhängig von der Modellierung des FMM kann es noch mehr Fälle kontextspezifischer Unabhängigkeit geben. Siehe hierzu Abschnitt 3.1.

Es existieren einige Softwarepakete zur Erzeugung^{27 28 29} und Analyse^{28 30} von AGGs. Der frei verfügbare Source Code von *GAMUT* [45], einem in Java programmierten Generator für Instanzen unterschiedlicher Basisspielklassen, lässt sich um neue Spielklassen erweitern. *GAMUT* ist kommandozeilenbasiert, und Instanzen der Basisspielklassen können über unterschiedliche Optionen ausgewählt und parametrisiert werden (siehe auch [Abschnitt 3.1.2](#)). Auf diese Weise definierte AGGs werden als *.game*-Datei, eine Textdatei im AGG-Format³¹, ausgegeben.

Mit *AGGSolver* und *GAMBIT* stehen zwei Solver zur Verfügung, die *.game*-Dateien im AGG-Format einlesen können und unter Verwendung des beschleunigten Algorithmus zur Bestimmung der erwarteten Utility unterschiedliche Algorithmen zum Finden von Nash-Gleichgewichten in reinen und gemischten Strategien bereitstellen.

(Un)vollständige Information

Dem Konzept der spieltheoretischen Modellierung und Analyse von Gleichgewichtsstrategien liegt die Annahme zugrunde, dass den Spielern die Definition des Spiels bekannt ist, d.h. im Fall eines Normalformspiels die Menge der Spieler, ihre jeweiligen Aktionsmengen und Utilityfunktionen [43]. Am FMM sind die Identitäten der Marktteilnehmer jedoch nur dem VNB bekannt (vgl. [Abschnitt 2.1](#)). Die Agenten treten miteinander unter wechselnden Pseudonymen (EOAs) in Kontakt. Die spieltheoretische Modellierung des FMM stellt daher eine Vereinfachung dar bzw. setzt die folgende Annahme voraus:

Annahme 8. *Es ist den Agenten am FMM trotz der Pseudonymität der Blockchain mit wechselnden EOAs möglich, einen Lernprozess zu durchlaufen, an dessen Ende sie das Verhalten der Gegenspieler, d.h. deren potenzielle Aktionen und Präferenzen, abschätzen und Gleichgewichtsstrategien spielen können. Zu dem Zeitpunkt, zu dem die spieltheoretische Analyse ansetzt, ist dieser Lernprozess bereits abgeschlossen.*

Normalformspiele modellieren **Spiele vollständiger Information**, in denen die Aktionsmengen und insbesondere auch die Utilityfunktionen aller Spieler, d.h. deren Wertschätzung für unterschiedliche Spielausgänge, sicher bekannt sind. Wird die FMM-Auktion als Spiel vollständiger Information modelliert, gilt implizit die Annahme, dass die individuellen Eigenschaften wie die Anlagenzustände und Kosten aller Marktakteure feste, bekannte Werte sind. Unsicherheiten über die Aktionsmengen und Utilityfunktionen der Gegenspieler werden hier nicht abgebildet. So kann im Prinzip jeder Spieler das optimale Verhalten seiner Gegenspieler berechnen, um seine eigene optimale Strategie zu wählen. [43]

²⁷ <http://agg.cs.ubc.ca/gamut.jar>, AGG Generators in GAMUT, Abruf: 01.12.2020

²⁸ McKelvey, Richard D., McLennan, Andrew M., and Turocy, Theodore L. (2016). Gambit: Software Tools for Game Theory, Version 16.0.1. <http://www.gambit-project.org>, Abruf: 01.12.2020

²⁹ <http://agg.cs.ubc.ca/aggui.jar>, AGG Graphical User Interface (AGGUI), Abruf: 01.12.2020

³⁰ <http://agg.cs.ubc.ca/AGGSolver.zip>, Action-Graph Game Solver (AGG/BAGG Solver), Version 3.1, Abruf: 30.11.2020

³¹ <http://agg.cs.ubc.ca/AGGFORMAT.txt>, Abruf: 01.12.2020

Definition 6. Bayes-Spiel [25, 46]

Ein Bayes-Spiel ist ein 5-Tupel (N, A, Θ, P, u) , mit

- N : Menge der Spieler;
- $A = (A_1 \times \dots \times A_n)$: Aktionsraum, wobei A_i die Menge der Spieler i zur Verfügung stehenden Aktionen ist;
- $\Theta = (\Theta_1 \times \dots \times \Theta_n)$: Typraum, wobei Θ_i die Menge der für Spieler i denkbaren Typen (auch: Informationszustände) ist und jeder Vektor $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n) \in \Theta$ ein sogenanntes Typprofil ist;
- $P : \Theta \rightarrow [0, 1]$: Apriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung über Typen;
- $u = (u_1, \dots, u_n)$: Vektor der Utilityfunktionen, wobei $u_i : A \times \Theta \mapsto \mathbb{R}$ die Utilityfunktion für Spieler i ist.

In **Spiele unvollständiger Information** besitzen Spieler hingegen private Eigenschaften, die ihren Gegenspielern nicht bekannt sind. Situationen, in denen Unsicherheit darüber herrscht, welches Spiel gerade gespielt wird, in denen aber eine Wahrscheinlichkeitsabschätzung über die möglichen privaten Charakteristika der Gegenspieler besteht, können nach [47] als **Bayes-Spiel** definiert werden. Ein Bayes-Spiel erweitert die Normalformrepräsentation um einen Typraum und eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über diesen und macht die Auszahlungsfunktionen auch von der Typkombination abhängig. Der Typ umfasst die Informationen, die nicht allen Spielern bekannt und für die Entscheidungsfindung eines Spielers relevant sind, wie seine vermarktbarbare Leistung und seine Wertschätzung derselben. Gleichwohl ist die Definition des Bayes-Spiels (N, A, Θ, P, u) allen Spielern grundsätzlich bekannt, d.h. insbesondere auch Θ , die Kreuzmenge der prinzipiell für alle Spieler möglichen Typen sowie die Apriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung P . Auch hier gilt also [Annahme 8](#), wobei nicht alle Eigenschaften der Gegenspieler, sondern nur die Mengen aller *möglicher* Eigenschaften und deren Wahrscheinlichkeiten erlernt werden. P beziffert das Allgemeinwissen, das alle Spieler zu Beginn des Spiels über die Häufigkeit der Typen in Θ haben (sog. *Common prior*). Ausgehend von dieser gemeinsamen Wahrscheinlichkeitseinschätzung stellt jeder Spieler basierend auf den eigenen privaten Informationen unterschiedliche Aposteriori-Vermutungen (sog. *beliefs*) über die Typen der anderen Spieler an. Im Bayes-Spiel versuchen rationale Spieler, ihre erwartete Utility zu maximieren, indem sie eine Strategie wählen, die die beste Antwort auf ihre Vermutungen über die Strategien und nun auch die Typen der Gegenspieler ist. [25, 43, 48]

Bayes-Spiele mit voneinander unabhängigen Typwahrscheinlichkeiten lassen sich in einer Erweiterung der [AGG](#)-Darstellung als *Bayesian Action-Graph Game* (**BAGG**)³² kompakt repräsentieren und effizient berechnen. **BAGGs** basieren ebenso wie **AGGs** auf einem

³²Zur Visualisierung der folgenden Ausführungen finden sich in den Abbildungen [B.4](#) und [B.5](#) in [Anhang B](#) der *Action-Graph* sowie die .game-Datei eines beispielhaften Bayes-Spiels in [BAGG](#)-Darstellung.

Action-Graphen nach [Definition 2](#), wobei die Menge der möglichen Aktionen eines Spielers (d.h. die ANs, die er im Graphen belegen kann) durch seinen Typ beschränkt ist. Ihm stehen typabhängig nur Aktionen aus einer Teilmenge seiner Aktionsmenge, der *Typ-Aktionsmenge* $A_{i,\theta_i} \subseteq \mathcal{A}$, zur Verfügung. Diese Teilmengen können sich sowohl für mehrere Typen eines Spielers als auch spielerübergreifend teilweise oder vollständig überschneiden. Als BAGGs können Bayes-Spiele unter Ausnutzung von Anonymitätsstrukturen (wenn Aktionen aus unterschiedlichen Typ-Aktionsmengen sich einen AN teilen) und kontextspezifischer, d.h. in diesem Fall aktions- und typspezifischer Unabhängigkeit (wenn die Utility einer Aktion nicht von allen anderen Aktionen bzw. Typen abhängt) kompakt repräsentiert und effizient gelöst werden. [46]

AGGSolver und GAMBIT können auch .game-Dateien im BAGG-Format³³ einlesen und deren Bayes-Nash-Gleichgewichte ermitteln. Die Abbildungen [B.4](#) und [B.5](#) zeigen beispielhaft den *Action-Graphen* und die .game-Datei eines Bayes-Spiels mit zwei Spielern, zwei Typen und drei Aktionen.

Definition 7. Bayesian Action-Graph Game [46]

Ein Bayesian Action-Graph Game ist ein Tupel $(N, \Theta, P, \{A_{i,\theta_i}\}_{i \in N, \theta_i \in \Theta_i}, \mathcal{P}, G, f, u)$, mit

- N : Menge der Spieler;
- $\Theta = (\Theta_1 \times \dots \times \Theta_n)$: Menge der Typprofile;
- P : Typverteilung dargestellt als Bayes'sches Netz;
- $A_{i,\theta_i} \subseteq \mathcal{A}$: Typ-Aktionsmenge (Menge der dem Spieler $i \in N$ zur Verfügung stehenden Aktionen gegeben den Typ $\theta_i \in \Theta_i$);
- \mathcal{P} : endliche Menge von Function-Nodes;
- $G = (\mathcal{A} \cup \mathcal{P}, E)$: Action-Graph, wobei $\mathcal{A} = \bigcup_{i \in N} \bigcup_{\theta_i \in \Theta_i} A_{i,\theta_i}$ die Menge individueller Aktionen ist. Dabei gilt, dass die Einschränkung von G auf die Knoten aus \mathcal{P} azyklisch ist und für jeden Function-Node $p \in \mathcal{P}$ ein Knoten $m \in \mathcal{A} \cup \mathcal{P}$ existiert, sodass $(p, m) \in E$;
- f : Tupel $(f^p)_{p \in \mathcal{P}}$, wobei jede Funktion $f^p : C^{(p)} \mapsto \mathbb{R}$ eine beliebige Abbildung von Nachbarn von p auf reelle Zahlen ist;
- u : Tupel $(u^\alpha)_{\alpha \in \mathcal{A}}$, wobei jede Funktion $u^\alpha : C^{(\alpha)} \mapsto \mathbb{R}$ die Utilityfunktion für Aktion α ist.

In diesem Abschnitt wurden zwei potenziell kompakte und effizient lösbare Spielrepräsentationen identifiziert: *Action-Graph Games* zur Modellierung von Spielen vollständiger Information und *Bayesian Action-Graph Games*, mit denen Spiele mit Unsicherheiten über stochastisch auftretende, private Spielereigenschaften mit voneinander unabhängigen Wahrscheinlichkeiten modelliert werden können. Unter Verwendung dieser sollen im Folgenden verschiedene Spiele entwickelt und analysiert werden.

³³ <http://agg.cs.ubc.ca/BAGGFORMAT.txt>, Abruf: 01.12.2020

2.4 VORGEHEN BEI DER SPIELTHEORETISCHEN MODELLIERUNG

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, gibt es unter den getroffenen Annahmen keine strategisch relevanten Eigenschaften, die zur Beantwortung von [Teilfrage 1](#) zu modellieren sind. Zur Beantwortung der verbleibenden Teilfragen [2](#) und [3](#) verzweigt die Erörterung in [Kapitel 3](#) in die Modellierungen dreier Spiele (un-)vollständiger Information in (B)AGG-Darstellung. Speziell für die jeweiligen Modellierungen relevante Methodik wird in den einzelnen Abschnitten eingeführt, wobei diese aufeinander aufbauen. Das Arbeitsprogramm, das sich aus den methodischen Vorüberlegungen ergibt, sieht wie folgt aus:

- In *GAMUT*³⁴ existierende Methoden werden so angepasst und erweitert, dass Parametrierungsoptionen nicht nur über die Kommandozeile, sondern auch aus einer *.txt*-Datei eingelesen werden können. So soll die Fehleranfälligkeit der ggf. sehr umfangreichen Parametrierung von Spielinstanzen reduziert werden.
- Der Source Code³⁴ sieht noch nicht die Verwendung von *FNs* vor. Daher wird *GAMUT* um eine Klasse *FunctionNode* erweitert und u.a. die bisherige Methode zur Berechnung aller möglichen Konfigurationen der Nachbarschaften aller *ANs* im *Action-Graphen* so angepasst, dass sie auch *einfache Aggregatoren* und *Extended-Sum-Function-Nodes*³⁵ als Nachbarn eines *AN* akzeptiert und verarbeiten kann.
- Für jede der drei spieltheoretischen Modellierungen
 - wird das Normalformspiel bzw. das Bayes-Spiel definiert und hinsichtlich seiner Vereinfachungen sowie seiner Modellierbarkeit als (B)AGG untersucht.
 - wird *GAMUT* um eine Basisspielklasse erweitert, die die Parametrierungsoptionen verarbeitet und entsprechende (B)AGG-Instanzen erzeugt.
 - werden Hypothesen über die Gleichgewichtsstrategien aufgestellt und Modellparametrierungen zur Überprüfung dieser gewählt.
 - werden mit *GAMBIT* Nash-Gleichgewichte bestimmt und mit den Hypothesen abgeglichen.

Die Ergebnisse der drei Modellierungen werden im Anschluss in [Kapitel 4](#) zur Beantwortung der Forschungsfragen in qualitativen Vergleichen einander gegenübergestellt.

³⁴<http://agg.cs.ubc.ca/gamut.jar>, AGG Generators in GAMUT, Abruf: 01.12.2020

³⁵siehe [Abschnitt 3.1.2](#)

3

Spieltheoretische Modellierung

Im Folgenden werden drei Möglichkeiten, eine verteilte Auktion am **FMM** im Regelbetrieb spieltheoretisch zu modellieren, untersucht. Zunächst sollen in **Abschnitt 3.1** und **4.2** zwei Basisspiele vollständiger Information entwickelt werden, die die hierarchische Anbindung an den zentralen **RLM** auf unterschiedliche Art und Weise abbilden und in einem qualitativen Vergleich in **Kapitel 4** zur Beantwortung von **Teilfrage 2** herangezogen werden können. Dazu wird die **FCR**-Auktion am deutschlandweiten **RLM** in **Modellierung 1** durch einen festen **UP** substituiert. Diese Modellierung wird in **Abschnitt 3.2** um die Akteure des **RLM** erweitert. Dazu werden diese zusätzlich zu den Agenten des **FMM** in **Modellierung 2** explizit als Spieler modelliert. Anschließend, in **Modellierung 3**, werden zur Beantwortung von **Teilfrage 3** Unsicherheiten über die Flexibilitäten und Grenzkosten der Gegenspieler in einem Bayes-Spiel berücksichtigt.

Übergreifend für alle drei Modellierungen werden vorab weitere Annahmen getroffen:

Annahme 9. *Die positiven und negativen Auktionen zur Aggregation von **FCR**-Geboten am **FMM** werden als voneinander unabhängig betrachtet und lassen sich daher separat untersuchen.*

Es handelt sich dabei um eine Vereinfachung, die auf der **Annahme 3** aus **Abschnitt 2.1.2** aufbaut, dass **FCR** am **RLM** als asymmetrisches Produkt gehandelt wird. **Annahme 9** steht im Einklang mit der Literatur zu **aFRR**-Märkten, an denen bereits eine solche Produktdifferenzierung unternommen wird. Die getrennte spieltheoretische Untersuchung der positiven und negativen **aFRR**-Auktion findet sich z.B. in [28] und in [31]. In dieser Arbeit werden Auktionen zur Aggregation positiver **FCR**-Gebote betrachtet.

Annahme 10. *Alle Bieter (am **FMM** ebenso wie in der deutschlandweiten **FCR**-Auktion) können zum Zeitpunkt der Gebotsabgabe ihre eigenen Anlagenzustände (vermarktbarbare Leistung) und Kosten für den Erbringungszeitraum antizipieren.*

Annahme 11. *Die Akteure bieten niemals eine höhere Leistung, als sie erbringen können.*

Die Annahmen 10 und 11 stellen Vereinfachungen dar, die vorgenommen werden, um den Sonderfall, dass bezuschlagte Leistung nicht erbracht werden kann, vernachlässigen zu können. Unsicherheiten über Anlagenzustände und Kosten können unter Annahme 10 nur die Gegenspieler betreffen und werden im Bayes-Spiel in Modellierung 3 betrachtet.

Annahme 12. *Die Frequenzabweichungen sind in allen Zeitslots einer Produktzeitscheibe im Durchschnitt gleich hoch.*

Annahme 13. *Alle Bieter (am FMM ebenso wie in der deutschlandweiten FCR-Auktion) können antizipieren, wie viel der bezuschlagten Regelleistung je Zeitslot des Erbringungszeitraums abgerufen wird.*

Der Abruf bezuschlagter Regelleistung ist von den Frequenzabweichungen im Erbringungszeitraum einen Tag nach Handelsschluss abhängig (vgl. Abschnitt 1.1) und bestimmt die tatsächlich anfallenden Erbringungskosten, die negativ in die Utility der Bieter eingehen (vgl. Abschnitt 2.2). Die Annahmen 12 und 13 vereinfachen die spieltheoretische Modellierung der Auktion am FMM insofern, als dass die zum Zeitpunkt der Gebotsabgabe unsicheren Frequenzabweichungen als eine feste Abrufwahrscheinlichkeit $p_{call} \in]0, 1]$ für die gesamte Produktzeitscheibe in die Utilityfunktionen eingehen können, wobei ein Wert von 1 bedeutet, dass die bezuschlagte Leistung über alle bezuschlagten Zeitslots zu 100% abgerufen wird.

Aus den Annahmen 10, 12 und 13 folgt, dass Bieter ihre Grenzkosten antizipieren können. Diese setzen sich aus Vorhaltungs- und Erbringungskosten zusammen und berechnen sich (im Fall von Bietern am FMM je Zeitlot t) durch:

$$GK_{i,t} = cMW_{i,t} + cMWh_{i,t} \cdot p_{call} \quad (3.1)$$

$GK_{i,t}$ Grenzkosten von i im Zeitslot t in ct/MW/h

$cMW_{i,t}$ Vorhaltungskosten von i für in Zeitslot t bezuschlagte Regelleistung in ct/MW/h

$cMWh_{i,t}$ Erbringungskosten von i für in Zeitslot t abgerufene Regelleistung in ct/MWh

p_{call} Wahrscheinlichkeit, dass die bezuschlagte Leistung vollständig abgerufen wird:
 $p_{call} \in]0, 1]$

Die strategische Relevanz der Unterteilung der Produktzeitscheibe in Zeitslots ist insbesondere hinsichtlich der Wahl der Preisregel am FMM interessant. Unter der vorliegenden Preisregel, die den UP nicht je Zeitslot, sondern je Produktzeitscheibe bildet (vgl. Abschnitt 2.1.2), wäre z.B. zu untersuchen, ob Anreize bestehen, auch bei über die Produktzeitscheibe konstanten Flexibilitäten und Kosten preislich gestaffelte Gebote abzugeben,

um den **UP** in die Höhe zu treiben. Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist es jedoch nicht, einen begründeten Marktmechanismus für den **FMM** zu entwickeln, sondern die Möglichkeiten der spieltheoretischen Betrachtung eines verteilten, hierarchisch an den **RLM** angebotenen Marktes zu untersuchen, auf die Arbeiten zur begründeten Entwicklung eines Marktmechanismus aufbauen können. Im Vergleich verschiedener Modellierungsansätze sollen Aussagen über die aus den Modellierungsentscheidungen hervorgehende Aussagekraft und Grenzen eines Modells getroffen werden. Die Unterteilung der Produktzeitscheibe in τ Zeitslots lässt sich dabei durch die Zusammensetzung eines Gebots (Aktion) aus τ Teilgebots und der Utility als Summe aus τ Teilutilities abbilden. Sie stellt daher keine Herausforderung bei der spieltheoretischen Modellierung dar.

Die folgenden Modellierungen bieten alle die Möglichkeit, Akteure am **FMM** mit je Zeitslot unterschiedlichen Grenzkosten, vermarktbar Leistungen, Gebotspreisen und -mengen zu parametrieren. Da (1) die Unterteilung der Produktzeitscheibe in Zeitslots zur Beantwortung der Forschungsfragen nicht von Relevanz ist und (2) die vermarktbar Flexibilitäten und Grenzkosten keine strategisch relevanten, durch die Akteure steuerbaren Werte, sondern Randbedingungen sind, werden in dieser Arbeit der Einfachheit halber Nash-Gleichgewichte nur in Szenarien mit leistungsbegrenzten¹ Akteuren untersucht, deren vermarktbar Flexibilitäten und Grenzkosten über eine Produktzeitscheibe konstant² sind und die keine preislich gestaffelten Gebote abgeben. Da die alternative Vermarktung von Flexibilität auf dem Intraday-Markt nur durch feste Opportunitätskosten als (Teil der) Vorhaltungskosten in das Spiel einfließt, steigt die Utility proportional zur am **FMM** bezuschlagten Leistung. Es lässt sich daher weiterhin annehmen, dass leistungsbegrenzte Spieler in Nash-Gleichgewichten in jedem Zeitslot die gleiche Leistung, die sie maximal erbringen können (vgl. Annahmen 10 bis 13), bieten. Die Hypothesen werden vor diesem Hintergrund formuliert.

¹Da die (Nicht-)Bezuschlagung eines Teilgebots für einen leistungsbegrenzten Akteur keine Auswirkung auf die ihm in späteren Zeitslots zur Verfügung stehende Leistung hat, steht die Betrachtung leistungs- und nicht energiebegrenzter Akteure zudem im Einklang mit [Annahme 4](#).

²Auch in [Modellierung 3](#), die Unsicherheiten über Anlagenzustände und Kosten der Gegenspieler abbildet, variieren die unsicheren, möglichen vermarktbar Leistungen und Grenzkosten nicht innerhalb einer Produktzeitscheibe.

3.1 MODELLIERUNG 1

Der **FMM** wird zunächst als Spiel vollständiger Information modelliert, wobei die hierarchische Anbindung an den übergeordneten **RLM** durch einen festen **UP** abgebildet wird.

3.1.1 Spieldefinition

Entsprechend der formalen **Definition** eines Normalformspiels wird das Basisspiel definiert:

Definition 8. Der **FMM als Normalformspiel vollständiger Information**

Gegeben seien der Einheitspreis UP und die Abrufwahrscheinlichkeit p_{call} . Das Spiel ist ein Tupel $G = (N, A, u)$ mit

- N : endliche Menge der Akteure (Spieler), die vom **VNB** für die Teilnahme am **FMM** präqualifiziert sind;
- $A = (A_1 \times \dots \times A_n)$: Aktionsraum, wobei A_i die endliche, diskrete Menge der dem Spieler i zur Verfügung stehenden Gebote ist. Ein Gebot $a_i \in A_i$ setzt sich aus einer Leistungsmenge $ba_{i,t}$ und einem Leistungspreis $bp_{i,t}$ je Zeitslot $t \in [1, \tau]$ zusammen;
- $u = (u_1, \dots, u_n)$: Vektor der Utilityfunktionen, wobei sich die Utility $u_i : A \mapsto \mathbb{R}$ von Spieler i berechnet durch:

$$u_i(a) = \frac{d}{\tau} \cdot \sum_{t=1}^{\tau} ba'_{i,t}(a, UP) \cdot (UP - cMW_{i,t} - cMWh_{i,t} \cdot p_{call}) \quad (3.2)$$

- a Vektor der gewählten Aktionen aller Spieler
(Aktionsprofil $a = (a_1, \dots, a_n) \in A$)
- UP Einheitspreis der **FCR**-Auktion am übergeordneten **RLM** in $ct/MW/h$
- d Dauer einer Produktzeitscheibe in Stunden (zurzeit 4 Stunden [6])
- τ Anzahl Zeitslots, in die die Produktzeitscheibe unterteilt wird
- $ba'_{i,t}(a)$ Bezuschlagte Leistung von Spieler i in Zeitslot t :
 $ba'_{i,t}(a, UP) \leq ba_{i,t} \in a_i \in A_i$ in MW
- $cMW_{i,t}$ Vorhaltungskosten von i für in Zeitslot t bezuschlagte Regelleistung in $ct/MW/h$
- $cMWh_{i,t}$ Erbringungskosten von i für in Zeitslot t abgerufene Regelleistung in ct/MWh
- p_{call} Wahrscheinlichkeit, dass die bezuschlagte Leistung vollständig abgerufen wird: $p_{call} \in]0, 1]$

Diese Modellierung enthält mehrere Vereinfachungen:

1. Die Akteure der übergeordneten **FCR**-Auktion sind nicht Teil der Menge N . Die Bezuschlagung und Vergütung eines Bieters am **FMM** hängt, wie in [Abschnitt 2.1.2](#) beschrieben, jedoch auch vom dortigen Bieterverhalten ab. Dieses wird durch die exogene Variable UP substituiert. Das entspricht folgenden impliziten Modellannahmen:

Annahme 14. *Das Verhalten der durch Softwareagenten repräsentierten Akteure des **FMM** beeinflusst den UP nicht.*

Annahme 15. *Die Softwareagenten können den UP antizipieren.*

2. Es wird vernachlässigt, dass aggregierte Gebote, die zum markträumenden UP in der übergeordneten **FCR**-Auktion abgegeben werden, dort bei Übererfüllung der ausgeschriebenen Leistungsmenge ggf. nicht oder nur anteilig bezuschlagt werden. Da die Bieter der übergeordneten **FCR**-Auktion und deren Aktionsmengen (mögliche Gebote) nicht Teil des Modells sind, wird der Fall der Preisgleichheit nicht korrekt abgebildet. In dieser Modellierung werden alle aggregierten Gebote, deren Gebotspreise den UP nicht übersteigen, mit dem UP bepreist und voll bezuschlagt.

Daraus folgt, dass die Gebotsaggregationen im Detail nicht relevant sind für die Analyse von Instanzen des in [Definition 8](#) definierten Basisspiels. Zur Bestimmung der Utilities für jede Aktion und jedes mögliche Aktionsprofil genügt die Aggregation aller **FMM**-Teilgebote mit Preisen kleiner gleich dem UP , während teurere Teilgebote ebenso wie die Aktion *kein Gebot* unabhängig vom vorliegenden Aktionsprofil die Utility 0 erhalten.

3.1.2 Implementierung

Kommandozeilenparameter

GAMUT wird, wie in [Abschnitt 2.4](#) beschrieben, u.a. um eine Basisspielklasse *FMMGame* und die Möglichkeit, Parameter auch aus einer Konfigurationsdatei auszulesen, erweitert. Die Kommandozeilenparameter sind in dieser Datei wie in der Kommandozeile anzugeben, wobei Zeilen, die mit dem Zeichen `#` beginnen, als Kommentare behandelt werden. Eine Instanz des in [Definition 8](#) definierten Basisspiels kann z.B. durch die Ausführung der *gamut.jar*-Datei mit der folgenden Kommandozeile

```
java -jar gamut.jar -g FMMGame -up_rlm 40 -p_call 0.5 -f_config
    "C:\Users\FMM_Config.txt" -output SpecialOutput
```

und einer Konfigurationsdatei³ erzeugt werden. Die bisher in *GAMUT* verfügbaren Basisspielklassen und ihre globalen und spielspezifischen Kommandos finden sich in⁴ [49]. Die folgenden Parameteroptionen sind demgegenüber neu und erwarten als Argumente:

- **f_config**: Dateipfad der Konfigurationsdatei (String)
- **up_rlm**: Einheitspreis der FCR-Auktion am übergeordneten RLM in ct/MW/h (Integer)
- **p_call**: Wahrscheinlichkeit, dass die bezuschlagte Leistung vollständig abgerufen wird (Double, $0 \leq p_call \leq 1$)
- **num_tSlots**: Anzahl Slots, in die die Produktzeitscheibe⁵ unterteilt wird (Integer, $num_tSlots > 1$)
- **playerclasses**: Erwartet eine öffnende eckige Klammer, auf die Parameteroptionen für Spielerklassen (je Spielerklasse ebenfalls in eckige Klammern eingeschlossen) folgen, so lange, bis alle öffnenden eckigen Klammern wieder geschlossen sind. Eine Spielerklasse bezeichnet hier eine Menge von Spielern mit dem gleichen Aktionsraum und den gleichen Vorhaltungs- und Erbringungskosten. So können die Parameter für mehrere Spieler ggf. kompakt übergeben werden. Je Spielerklasse werden die folgenden Parameteroptionen erwartet:
 - **num_players**: Anzahl Spieler der Spielerklasse (Integer, $num_players \geq 1$)
 - **MW_cost**: Vorhaltungskosten für bezuschlagte Regelleistung in ct/MW/h (Integer) je Zeitslot; erwartet nach einer öffnenden eckigen Klammer **num_tSlots** mit Kommas getrennte Ganzzahlen, gefolgt von einer schließenden eckigen Klammer
 - **MWh_cost**: Erbringungskosten für abgerufene Regelleistung in ct/MWh (Integer) je Zeitslot; erwartet nach einer öffnenden eckigen Klammer **num_tSlots** mit Kommas getrennte Ganzzahlen, gefolgt von einer schließenden eckigen Klammer
 - **actions**: Erwartet nach einer öffnenden eckigen Klammer so lange mit Leerzeichen getrennte Aktionen, die jeweils aus $2 \cdot num_tSlots$ mit Kommas getrennten Ganzzahlen bestehen, bis eine schließende eckige Klammer folgt. Je Zeitslot t ist in einer Aktion erst die Leistungsmenge $ba_{i,t}$ in kW und dann der Leistungspreis $bp_{i,t}$ in ct/MW/h anzugeben.

³Im [Anhang C](#) finden sich zwei Konfigurationsdateien zur Erzeugung einer Instanz der Basisspielklasse *FMMGame* mit *GAMUT* in den Abbildungen [C.1](#) und [C.2](#).

⁴Kommandos speziell für die [AGG](#)-Erweiterung von *GAMUT* finden sich unter http://agg.cs.ubc.ca/gamut_AGG_README.txt.

⁵Die Länge der Produktzeitscheibe (zurzeit vier Stunden) ist im Code festgelegt.

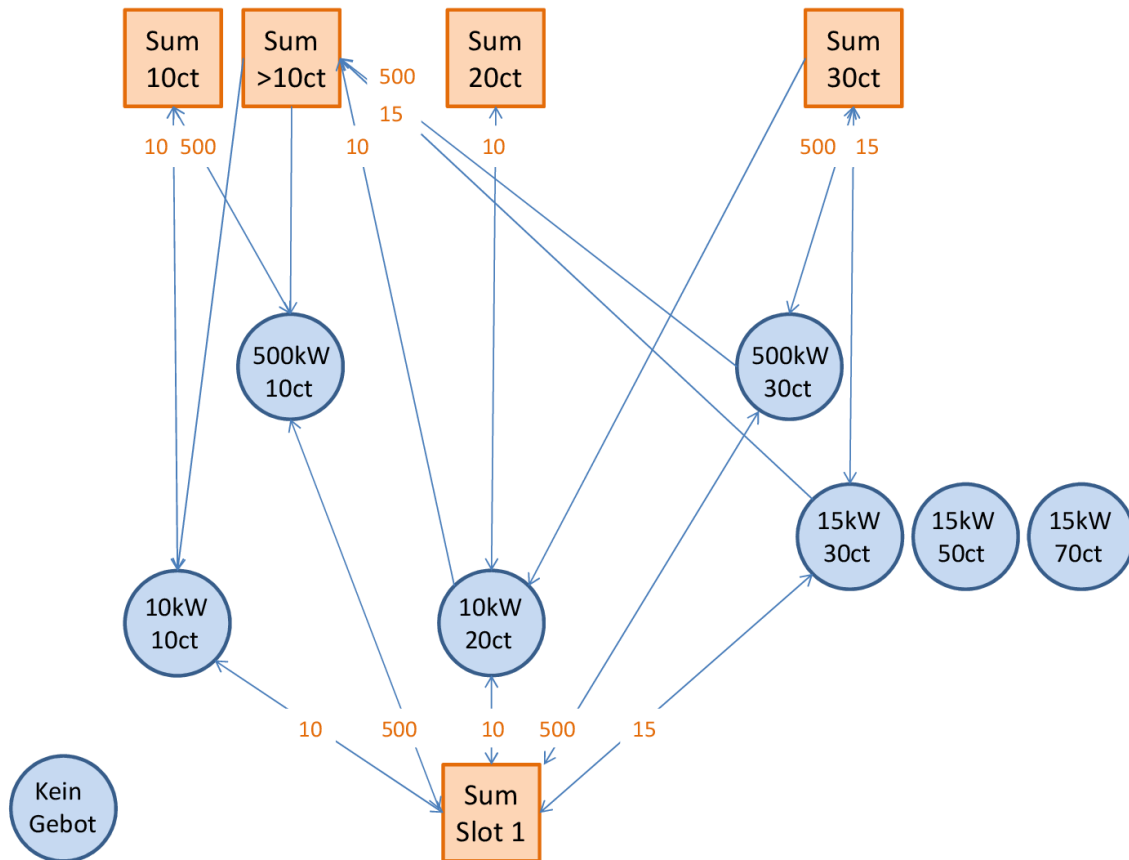


Abbildung 3.1: Graphische Darstellung des *Action-Graph Games* für eine Instanz des in [Definition 8](#) definierten Basisspiels mit⁶ $\tau = 1$ und $UP = 40$ ct/MW/h. Die Kreise repräsentieren *Action-Nodes*, die Quadrate *Extended-Sum-Function-Nodes* (*Extended-Sum-Function-Nodes* (ES-FNs)). Die eingehenden Kanten der ES-FNs sind mit ihren Gewichten beschriftet. Alle Preise sind in ct/MW/h, alle Leistungen und Gewichte in kW angegeben. Der Übersichtlichkeit halber sind die ANs v.u.n.o. nach aufsteigender Leistung und v.l.n.r. nach aufsteigenden Preisen sortiert.

Infolge eines solchen Aufrufs werden zunächst die Parameter eingelesen und die Klasse *FMMGame* initialisiert, bevor der *Action-Graph* erzeugt und die Utilities für alle ANs und alle möglichen Konfigurationen berechnet werden.

Im Zuge der Initialisierung der *FMMGame*-Klasse werden die Anzahl ANs und die Anzahl FNs sowie die Anzahl Spieler und deren Aktionsmengen bzw. zugehörige ANs bestimmt. Dabei werden identische Aktionen von Spielern mit identischen Utilityfunktionen (d.h. mit identischen Argumenten für `MW_cost` und `MWh_cost`) auch dann in einem AN zusam-

⁶Am *FMM* sollen Flexibilitäten für die gesamte Produktzeitscheibe aus mehreren, kürzeren Zeitslots $\tau > 1$ aggregiert werden. Die Wahl von $\tau = 1$ dient hier nur der Übersichtlichkeit.

mengefasst, wenn sie in unterschiedlichen **playerclasses** angegeben sind. Der **AN** *kein Gebot* wird, sofern vorhanden, mit dem Index 0 angelegt. Diesem werden unabhängig von den Leistungspreisen, Vorhaltungs- und Erbringungskosten die Aktionen zugeordnet, deren Leistung für alle Zeitslots 0 kW beträgt.

Der Aufbau des *Action-Graphs*, auf dem die Berechnung der Utilities erfolgt, wird im Folgenden genauer beschrieben.

Der Action-Graph

Der *Action-Graph* der in **Definition 8** definierten Basisspielklasse enthält einen **AN** je individueller Aktion⁷ und Utilityfunktion⁸, wobei eine Menge von Akteuren mit den gleichen Erbringungs- und Vorhaltungskosten die gleiche Utilityfunktion besitzt. Sogenannte *Extended-Sum-Function-Nodes (ES-FNs)*, die je Zeitslot t eine mit den Teilgebotsmengen $ba_{AN,t}$ gewichtete Summe der Konfiguration ihrer Nachbar-**ANs** bilden, verbinden die **ANs**. **Abbildung 3.1** zeigt beispielhaft die graphische Repräsentation eines **AGG** für ein Spiel mit nur einem Zeitslot und $UP = 40$ ct/MW/h.

Da alle Teilgebote teurer als der **UP** nicht bezuschlagt werden, sind sie für die Zuschlagsvergabe aller anderen Teilgebote irrelevant. Dies ist ein Fall kontextspezifischer Unabhängigkeit. **ANs**, die nur Teilgebote teurer als der **UP** umfassen, haben gar keine Nachbarn, ebenso wie der **AN** für die Aktion *kein Gebot*. Alle anderen **ANs** haben Nachbarn für alle Zeitslots $t \in [1, \tau]$, in denen ihr Teilgebotspreis den **UP** nicht übersteigt. Ihre Utility hängt davon ab, ob

1. am **FMM** über die gesamte Produktzeitscheibe, d.h. über alle τ Zeitslots, mindestens 1 MW aus Teilgeboten zu Preisen kleiner gleich dem **UP** aggregiert wird, und falls ja, ob
2. die eigenen Teilgebote darin aggregiert werden. Dabei gibt es je Zeitslot drei Optionen:
 - a) Das Teilgebot $(ba_{AN,t}, bp_{AN,t})$ des **AN** liegt voll im *Überhang*⁹ und wird daher nicht bezuschlagt. Die Utility für diesen Zeitslot t ist 0.
 - b) Das Teilgebot $(ba_{AN,t}, bp_{AN,t})$ des **AN** ist für diesen Zeitslot t intern preisgebend. Dieses und die Teilgebote aller weiteren **ANs** mit dem gleichen Teilgebotspreis $bp_{AN,t}$ werden anteilig bezuschlagt.
 - c) Der *Überhang* wird vollständig durch **ANs** mit teureren Teilgeboten abgedeckt. Das Teilgebot $(ba_{AN,t}, bp_{AN,t})$ wird daher vollständig mit dem **UP** bezuschlagt.

⁷Eine Aktion (bzw. ein **AN**) umfasst nach **Definition 8** ein Gebot bestehend aus τ Teilgeboten.

⁸Ausnahme: Die Aktion *kein Gebot* wird (sofern vorhanden) *unabhängig* von der Utilityfunktion für alle Spieler in einem gemeinsamen **AN** mit Index 0 abgebildet, da die Utility hierfür immer 0 beträgt.

⁹**Überhang**: Rest, der nicht über die gesamte Produktzeitscheibe zu einem vollen MW aggregiert wird, entsprechend der in **Abschnitt 2.1.2** definierten Zuschlagsregel

Ein AN hat daher je Zeitslot $t \in [1, \tau]$, für den ein Teilgebot mit $bp_{AN,t} \leq UP$ abgegeben wird, i.A.¹⁰ zwei Nachbarn:

1. Einen ES-FN, der die mit $ba_{AN,t}$ gewichteten Konfiguration aller ANs mit teureren Teilgeboten $bp_{AN,t} \leq UP$ aufsummiert (siehe z.B. *Sum>10ct* in [Abbildung 3.1](#)).
2. Einen ES-FN, der die mit $ba_{AN,t}$ gewichteten Konfiguration aller ANs mit gleich teuren Teilgeboten (inklusive dem eigenen Teilgebot) aufsummiert (siehe z.B. *Sum10ct* in [Abbildung 3.1](#)).

Jeder AN, der in mindestens einem Zeitslot $t \in [1, \tau]$ ein Teilgebot mit $bp_{AN,t} \leq UP$ umfasst, besitzt darüber hinaus τ weitere ES-FNs als Nachbarn, die jeweils alle Teilgebote eines Zeitslots aufsummieren. Aus deren Konfiguration lässt sich die über die gesamte Produktzeitscheibe aggregierte Leistungsmenge und der Überhang je Zeitslot bestimmen (siehe z.B. *Sum Slot 1* in [Abbildung 3.1](#)).

Algorithm 1 Generation of the Action Graph for the FMM Normal-form Game

Input: UP [ct/MW/h], number of time slots τ , bid amounts $ba_{i,t}$ [MW], prices $bp_{i,t}$ [ct/MW/h], provision costs [ct/MW/h] and delivery costs [ct/MWh] for each player i and time slot $t \in [1, \tau]$

Output: Action Graph

- 1: Create an action node (AN) for each individual bid and utility function (that is for every individual combination of bid amounts, bid prices, provision costs and delivery costs)
 - 2: **for all** time slots $t \in [1, \tau]$ **do**
 - 3: Create an *overall sum* extended sum function node (ES-FN)
 - 4: **for all** time slots $t \in [1, \tau]$ **do**
 - 5: Create a descending merit order list *MOL* of all ANs' bids with $bp_{AN,t} \leq UP$
 - 6: **for all** bid prices $p \in MOL$ **do**
 - 7: Create a *more expensive sum* ES-FN¹¹
 - 8: Add edges weighted by $ba_{AN,t}$ from all ANs with $UP \geq bp_{AN,t} > p$ to the *more expensive sum* ES-FN
 - 9: Create a *same price sum* ES-FN
 - 10: **for all** ANs with bid price $bp_{AN,t} == p$ **do**
 - 11: Add edge to (weighted by $ba_{AN,t}$) and from *same price sum* ES-FN
 - 12: Add edge from *more expensive sum* ES-FN
 - 13: Add edge to this time slot's *overall sum* ES-FN weighted by $ba_{AN,t}$
 - 14: Add edges from all τ *overall sum* ES-FNs
-

¹⁰Je Zeitslot haben die ANs mit den teuersten Teilgeboten $bp_{AN,t} \leq UP$ keinen FN als Nachbarn, der teurere Teilgebote aufsummiert.

¹¹Der Sonderfall, dass für den teuersten sowie den zweitteuersten Gebotspreis je Zeitslot ein *more expensive sum* FN zwar angelegt werden kann, aber nicht muss (und in der Implementierung auch nicht angelegt wird), weil es im ersten Fall keine teureren Teilgebote kleiner gleich dem UP gibt und im zweiten Fall der *same price sum* FN des teuersten Gebotspreises wiederverwendet werden kann, wird hier der Übersichtlichkeit halber vernachlässigt.

Der detaillierte Ablauf der Generierung des *Action-Graphs* ist in [Algorithmus 1](#) beschrieben. Entsprechend [Definition 5](#) werden hierbei keine [FNs](#) in Reihe geschaltet. Das resultierende [AGG](#) ist *contribution-independent*.

3.1.3 Hypothesen

Bei Einkaufsauktionen mit homogenen Gütern, in denen Gebote nach der Einheitspreisregel mit dem Preis des ersten nicht bezuschlagten Gebots bepreist werden, haben Bieter einen Anreiz, ihren Indifferenzpreis, d.h. ihre Grenzkosten, zu bieten. Entspricht der [UP](#) hingegen dem letzten bezuschlagten Gebotspreis, besteht die Wahrscheinlichkeit, als Bieter einen Zuschlag zum Gebotspreis zu erhalten. Es gibt daher einen Anreiz, die eigenen Grenzkosten zu überbieten. Die Höhe dieser Marge ist von der individuellen Risikoaversion¹² sowie der Einschätzung des Wettbewerbs, d.h. der Anzahl Gebote und der Granularität der Gebotspreise, abhängig. [[23](#), [50](#)]

Im Regelbetrieb verursacht die hierarchische Verknüpfung der [FMM](#)-Auktion mit der [FCR](#)-Auktion allerdings eine Inhomogenität der Güter. Die intern ausgeschriebenen *Güter* sind hierbei Aggregationen in 1- oder multi-MW-Geboten. Da die einzelnen aggregierten Gebote sich in ihrem Gebotspreis und damit ihrer Zuschlagswahrscheinlichkeit in der übergeordneten [FCR](#)-Auktion unterscheiden, ist die Aggregation in einem günstigeren MW-Gebot wertvoller als die in einem teureren MW-Gebot. Indem Bieter ihre Grenzpreise unterbieten, können sie die Wahrscheinlichkeit erhöhen, (1) überhaupt oder (2) in einem günstigeren MW-Gebot aggregiert zu werden und so eine niedrigere Position in der Merit-Order am übergeordneten [RLM](#) zu erreichen, ohne notwendigerweise den [UP](#) zu senken¹³ (siehe auch [Abbildung 3.2](#)). Dabei ist der Anreiz, den Grenzpreis zu unterbieten, umso höher, je höher die erwartete Marge dafür ausfällt. Das bedeutet, der Anreiz ist umso höher,

1. je größer die Granularität der aggregierten Gebotspreise ist, die wiederum von der Liquidität und der Diversität der Kostenstruktur der Akteure am [FMM](#) abhängt, und
2. je größer die Wahrscheinlichkeit ist, dass der [UP](#) über den Grenzkosten eines Bieters liegt.

¹²In dieser Arbeit werden risikoneutrale Spieler betrachtet.

¹³Ähnliche Erkenntnisse zum Bieterverhalten in Einheitspreisauktionen mit inhomogenen Gütern liefert die theoretische Analyse der [aFRR](#)-Auktion in [[28](#)]. Die Inhomogenität entsteht dort aus der Tatsache, dass dem [RLM](#) für [aFRR](#) ein [RAM](#) nachgeschaltet ist. Die [FCR](#)-Auktion am zentralen deutschen [RLM](#) ohne nachgeschalteten [RAM](#) ist hingegen eine Einheitspreisauktion mit homogenen Gütern.

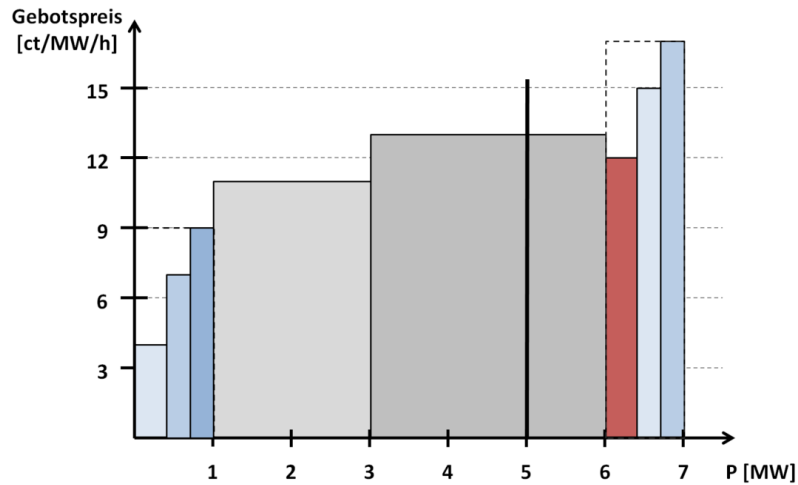


Abbildung 3.2: Beispielhafte Merit-Order-Liste zur Veranschaulichung der Inhomogenität am **FMM**: Dargestellt ist die Merit-Order-Liste (**MOL**) in der **FCR**-Auktion. In blau und rot sind die intern am **FMM** eingegangenen Gebote¹⁴ dargestellt, die zu einem 1-MW-Gebot à 9 ct/MW/h und einem 1-MW-Gebot à 17 ct/MW/h aggregiert werden. Die Ausschreibungsmenge beträgt 5 MW. Der zentrale **RLM** wird zum Einheitspreis von 13 ct/MW/h geräumt. Angenommen, ein Akteur X (rot) am **FMM** hat Grenzkosten von 12 ct/MW/h und das rote Gebot (400 kW zum Grenzkostenpreis) abgegeben. In dieser Situation erhält er keinen Zuschlag, der **UP** liegt aber über seinen Grenzkosten. Hätte Akteur X seine Grenzkosten unterboten und z.B. 400 kW zu 8 ct/MW/h geboten, so wäre sein Gebot (in einer sonst unveränderten Situation) anteilig mit 300 kW zu 8 ct/MW/h aggregiert und mit 13 ct/MW/h bezuschlagt worden. (Das dunkelblaue, interne Gebot über 300 kW zu 9 ct/MW/h wäre aus der ersten Aggregation verdrängt worden, 100 kW würden aber weiterhin erst im zweiten MW-Gebot des **FMM** zu 17 ct/MW/h aggregiert und erhielten keinen Zuschlag). Hätte Akteur X seine Grenzkosten noch weiter unterboten und z.B. 400 kW zu 5 ct/MW/h geboten, so wäre (in einer sonst unveränderten Situation) seine volle Gebotsleistung zu 6 ct/MW/h aggregiert und mit 13 ct/MW/h bezuschlagt worden.

Im Extremfall von **Definition 8** ist der **UP** eine exogene Variable und nicht über das Bieterverhalten am **FMM** beeinflussbar. Alle Spieler, deren Grenzkosten unterhalb des **UP** liegen, machen im Falle eines Zuschlags Gewinn. Werden sie allerdings in einem Gebot teurer als der **UP** oder gar nicht aggregiert, erhalten sie keinen Zuschlag.

¹⁴Die Unterteilung der Produktzeitscheibe in mehrere Zeitslots wird in dieser Abbildung nicht abgebildet. Die Teilgebote der dargestellten internen Gebote sind in allen Zeitslots identisch.

Im Hinblick auf die Bietstrategien in diesem Spiel werden vor diesem Hintergrund zwei Hypothesen formuliert, die mit der Analyse konkreter Spielparametrierungen überprüft werden sollen:

Hypothese 1. *Sofern die Summe der maximalen Gebotsleistungen aller Spieler mit Grenzkosten kleiner gleich dem gegebenen UP in einem Zeitslot kein Vielfaches von 1 MW ergibt, bieten diese Spieler ihre maximale Leistung zum minimalen Gebotspreis (reine Strategie). Andernfalls bieten die Spieler mit Grenzkosten kleiner gleich dem UP ihre maximale Leistung zu einem beliebigen Gebotspreis kleiner gleich dem UP (reine oder gemischte Strategie).*

Hypothese 2. *Alle Spieler mit Grenzkosten größer als der UP spielen eine beliebige reine oder gemischte Strategie, bei der sie immer eine Aktion wählen, die garantiert keinen Zuschlag erhält. Das heißt sie geben entweder kein Gebot ab oder Gebote mit beliebigen Gebotspreisen teurer als der UP .*

Die erste Hypothese ist insofern bemerkenswert, als dass in der Konsequenz die Markteffizienz für Spieler mit Grenzkosten kleiner gleich dem UP nicht gewährleistet ist.

3.1.4 Parametrierung

Um diese Hypothesen zu überprüfen, reicht es aus, synthetische Szenarien zu betrachten. Ob Spieler ihre Grenzkosten bieten, über- oder unterbieten, lässt sich unabhängig von realen Daten für Grenzkosten und Lastgänge qualitativ untersuchen. Es werden daher zwei Szenarien mit folgenden Eigenschaften entworfen:

- **Anzahl Zeitslots:** 2
- **Abrufwahrscheinlichkeit:** 0,5
- **Anzahl Spieler:** 3+1 (Drei Spieler mit Grenzkosten günstiger als der UP , ein Spieler mit Grenzkosten teurer als der UP)
- **Aktionen je Spieler:** Jeder Spieler hat drei von seinen eigenen Grenzkosten abhängige Gebotspreise zur Auswahl: die Möglichkeit, Leistung (1) zu 0 ct/MW/h zu bieten, (2) zu seinen Grenzkosten zu bieten, oder (3) seine Grenzkosten zu überbieten zu einem Preis knapp unterhalb der Grenzkosten des nächstteureren Spielers (bzw. den UP falls die Grenzkosten des nächstteureren Spielers teurer als der UP sind). Jedem Spieler mehr als eine Gebotsmenge zur Auswahl zu stellen, ist in diesem Spiel nicht sinnvoll. Denn solange die Spieler leistungsbegrenzt sind und die alternative Vermarktung von Flexibilität auf dem Intraday-Markt nur durch feste Opportunitätskosten als (Teil der) Vorhaltungskosten in das Spiel einfließt, steigt die Utility

proportional zur bezuschlagten Leistungsmenge am **FMM**. Spieler werden somit zwischen zwei Aktionen mit gleichen Gebotspreisen, aber unterschiedlichen -mengen immer die mit der höheren Gebotsmenge auswählen.

Jedem Spieler steht jeweils nur eine Gebotsmenge zur Auswahl, die der maximalen Leistung entspricht, die er im Fall einer vollständigen Bezuschlagung erbringen kann. Dabei werden die Flexibilitäten der Spieler im ersten Szenario so gewählt, dass die Gesamtleistung aller Spieler mit Grenzkosten kleiner gleich dem **UP** kein Vielfaches von 1 MW ist (Spiel 1.1). Im zweiten Szenario beträgt die Gesamtleistung aller Spieler mit Grenzkosten kleiner gleich dem **UP** genau 1 MW (Spiel 1.2).

Insgesamt wählen alle Spieler in beiden Spielen also jeweils zwischen drei Aktionen (einer Gebotsmenge zu drei unterschiedlichen Gebotspreisen).

Die Konfigurationsdateien der beiden Spiele finden sich in **Anhang C** in den Abbildungen **C.1** und **C.2**.

Tabelle 3.1: Nash-Gleichgewichte für Spiel 1.1 mit **UP**=20ct/MW/h

	Spieler 1 400kW, GK=3			Spieler 2 500kW, GK=7			Spieler 3 300kW, GK=9			Spieler 4 250kW, GK=22		
AN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
BP	0	GK	6	0	GK	8	0	GK	20	0	GK	24
NGG	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
U	22,67	13,6	13,6	21,67	15,6	15,6	11	4,4	4,4	-1,38	0	0
NGG	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
U	22,67	13,6	13,6	21,67	15,6	15,6	11	4,4	4,4	-1,38	0	0

Tabelle 3.2: Nash-Gleichgewichte für Spiel 1.2 mit **UP**=20ct/MW/h

	Spieler 1 400kW, GK=3			Spieler 2 300kW, GK=7			Spieler 3 300kW, GK=9			Spieler 4 250kW, GK=22		
AN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
BP	0	GK	6	0	GK	8	0	GK	20	0	GK	24
NGG	*			*			*			0	*	
U	27,2			15,6			13,2			<0	0	

AN: Action-Node; **BP:** Gebotspreis [ct/MW/h]; **GK:** Grenzkosten [ct/MW/h];
NGG: Konfiguration der **ANs** im Nash-Gleichgewicht; **U:** Utility [ct]

3.1.5 Ergebnisse und Abgleich mit den Hypothesen

Die beiden Spiele werden mit *GAMUT* als Instanzen der neu implementierten Spielklasse *FMMGame* generiert. Zur Bestimmung der Nash-Gleichgewichte (NGG) werden *gambit-enumpure* und *gambit-enumpoly* verwendet. Diese beiden Algorithmen werden aus den in *GAMBIT* und *AGGSolver* zur Verfügung stehenden Verfahren ausgewählt, da sie *alle* reinen (*gambit-enumpure*) bzw. gemischten (*gambit-enumpoly*) Gleichgewichte bestimmen. Beide Programme lesen die *.game*-Dateien über die Kommandozeile ein und geben eine Liste der berechneten Gleichgewichte als Zeilen von durch Kommas getrennten Wahrscheinlichkeiten der Belegung der ANs in der Reihenfolge ihrer Indizes aus¹⁵. *gambit-enumpure* und *gambit-enumpoly* liefern für beide Spiele jeweils die gleichen, in den Tabellen 3.1 und 3.2 dargestellten Ergebnisse.

Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den Hypothesen. In Spiel 1.1 bestehen Gleichgewichtsstrategien für *Spieler 1, 2* und *3* wie erwartet darin, Gebote zum niedrigsten Preis von hier 0 ct/MW/h abzugeben. Die beiden NGG unterscheiden sich nur in der Aktionswahl von *Spieler 4*, der indifferent gegenüber seinen Aktionen mit Gebotspreisen teurer dem UP ist.

Mehrere NGG in reinen Strategien, in denen Spieler indifferent gegenüber einigen ihrer Aktionen sind und die zum gleichen Auktionsergebnis führen, werden ab Tabelle 3.2 in einer Zeile zusammengefasst. Die vereinten Gleichgewichtsstrategien werden mit dem Zeichen * gekennzeichnet. Die verbleibenden Zeilen werden im Folgenden als *echt unterschiedliche* Nash-Gleichgewichte (NGG) bezeichnet.

Das einzige NGG dieser Art in Spiel 1.2 fasst z.B. $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 = 54$ NGG in reinen Strategien zusammen. *Spieler 1, 2* und *3* erhalten den vollen Zuschlag, egal zu welchem Preis kleiner gleich dem UP sie ihr Gebot abgeben. Gegenüber den ihnen hier zur Verfügung stehenden Aktionen sind sie daher indifferent. *Spieler 4* verhält sich unverändert.

Aufgrund der Indifferenz aller Spieler gegenüber der Aktion 2 und 3 von *Spieler 4* (ANs 10 und 11) in beiden Spielen gibt es theoretisch unendlich viele weitere gemischte Strategien zwischen diesen beiden reinen Gleichgewichtsstrategien für *Spieler 4*. Gleiches gilt in Spiel 1.2 zudem für die Strategien von *Spieler 1, 2* und *3*. Zum Beispiel könnte *Spieler 1* in Spiel 1.2 auch jede seiner drei Aktionen mit der Wahrscheinlichkeit $1/3$ spielen oder Aktion 1 mit $2/3$ und Aktion 2 und 3 mit jeweils $1/6$ Wahrscheinlichkeit, ohne dass sich am Spielausgang etwas ändern würde. Solche *entarteten* gemischten Gleichgewichte gibt *gambit-enumpoly* nicht aus¹⁵.

¹⁵Weitere Informationen zu diesen und weiteren Kommandozeilen-Tools in *GAMBIT* finden sich unter <https://gambitproject.readthedocs.io/en/latest/tools.html>.

3.2 MODELLIERUNG 2

Modellierung 1 bildet das Bieterverhalten und die Zuschlagsvergabe am **RLM** nicht ab. Wechselwirkungen zwischen dem strategischen Verhalten der Akteure am **RLM** und **FMM** und der Einfluss aggregierter Gebote auf den **UP**, der nicht zuletzt vor dem Hintergrund der am **FMM** vorliegenden Inhomogenität interessant sein kann, können damit nicht untersucht werden. Alternativ wird das Spiel daher nun weiter gefasst, und auch die direkten Bieter in der **FCR**-Auktion am **RLM** werden explizit modelliert. Abweichend von den geltenden *Regelungen zu den Auktionsbedingungen für Frequenzhaltungsreserve* [11] werden bezüglich der Zuschlagsvergabe in der übergeordneten **FCR**-Auktion die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen:

Annahme 16. *Alle am übergeordneten **RLM** für **FCR** eingehenden Gebote sind in 1 MW-Schritten teilbar.*

Nach den geltenden Regelungen ist neben der Abgabe teilbarer Gebote auch die „Abgabe unteilbarer Gebote mit einer maximalen Gebotsgröße von 25 MW“ [11] erlaubt. **Annahme 16** wird getroffen, um die zentrale Zuschlagsvergabe zu vereinfachen. Die Bezuschlagung teilbarer Gebote in 1-MW-Schritten stimmt mit den geltenden Regelungen überein [11].

Annahme 17. *Die Bezuschlagung von Geboten am übergeordneten **RLM** für **FCR** erfolgt bei Gleichheit der Leistungspreise nach dem Zufallsprinzip.*

Nach den geltenden Regelungen erfolgt „die Bezuschlagung von Angeboten im Rahmen der **FCR**-Auktion (...) bei Gleichheit der Leistungspreise nach dem Zeitpunkt des Angebotseingangs“ [11]. In einem vergleichbaren Entschluss der Bundesnetzagentur über die Annahme von Geboten auf dem Sekundärregelleistungsmarkt wird jedoch eine stichhaltige Argumentation gegen das „Hilfskriterium des frühesten Eingangsstempels“ geführt, und der Zufall als „sachgerechtes und neutrales Kriterium“ für die Bezuschlagung bei Gleichheit der Leistungspreise beschlossen [12]. **Annahme 17** wird getroffen, da (1) die in [12] angeführten Argumente auch auf die Primärregelreserve übertragen werden können und (2) eine zufällige Bezuschlagung bei Preisgleichheit in der Utilityfunktion des Normalformspiels durch eine vom Aktionsprofil abhängige Zuschlagswahrscheinlichkeit abgebildet werden kann (siehe auch **Gleichung 3.4** und **Algorithmus 2**).

Die Kriterien der zentralen Zuschlagsvergabe, die über den Leistungspreis und die Regelung bei Preisgleichheit hinausgehen (siehe auch Anhang VI in [8]), werden vernachlässigt.

Da es sich bei der **FCR**-Auktion am übergeordneten **RLM** um eine verdeckte Einkaufsauktion in zentraler Struktur mit dem **ÜNB** als nicht mitbietendem Auktionator handelt (vgl. **Abschnitt 1.1**), ist die Normalformdarstellung für die Betrachtung dieses Spiels weiterhin geeignet (vgl. **Abschnitt 2.3**). Es wird des Weiteren **Annahme 18** getroffen:

Annahme 18. *Auch die Akteure des übergeordneten **RLM** werden in der **FCR**-Auktion durch rationale, nutzenbasierte Softwareagenten vertreten oder verhalten sich wie solche.*

Somit können auch die Akteure des übergeordneten **RLM** als rationale Spieler in einem Normalformspiel modelliert werden.

3.2.1 Spieldefinition

Definition 9. *FMM und RLM als Normalformspiel vollständiger Information*
Gegeben seien die Ausschreibungsmenge TA und die Abrufwahrscheinlichkeit p_{call} . Das Spiel ist ein Tupel $G = (N, A, u)$ mit

- $N = N_{RLM} \cup N_{FMM}$: endliche Menge der Spieler, wobei $N_{RLM} \cap N_{FMM} = \{\}$, mit
 - N_{RLM} : Menge der Akteure, die vom **ÜNB** für die Teilnahme am zentralen **FCR**-Markt präqualifiziert sind, außer dem **FMM**;
 - N_{FMM} : Menge der Akteure, die vom **VNB** für die Teilnahme am **FMM** präqualifiziert sind;
- $A = A_{RLM} \cup A_{FMM}$: Aktionsraum, wobei $A_{RLM} \cap A_{FMM} = \{\}$, mit
 - $A_{RLM} = (A_1 \times \dots \times A_{n_{RLM}})$, wobei $A_i \in A_{RLM}$ die endliche, diskrete Menge der Spieler $i \in N_{RLM}$ zur Verfügung stehenden **RLM**-Gebote ist. Ein **RLM**-Gebot $a_i \in A_i$ besteht aus einer Leistungsmenge und einem Leistungspreis (ba_i, bp_i) ;
 - $A_{FMM} = (A_{n_{RLM}+1} \times \dots \times A_n)$, wobei $A_i \in A_{FMM}$ die endliche, diskrete Menge der Spieler $i \in N_{FMM}$ zur Verfügung stehenden **FMM**-Gebote ist. Ein **FMM**-Gebot $a_i \in A_i$ setzt sich aus einer Leistungsmenge $ba_{i,t}$ und einem Leistungspreis $bp_{i,t}$ je Zeitslot t zusammen;
- $u = (u_1, \dots, u_n)$: Vektor der Utilityfunktionen, wobei sich die Utility $u_i : A \mapsto \mathbb{R}$ von Spieler i berechnet durch:

$$u_i(a) = \begin{cases} d \cdot ba'_i(a, TA) \cdot (UP(a, TA) - cMW_i - cMWh_i \cdot p_{call}) & i \in N_{RLM} \\ \frac{d}{\tau} \cdot \sum_{t=1}^{\tau} ba'_{i,t}(a, TA) \cdot (UP(a, TA) - cMW_{i,t} - cMWh_{i,t} \cdot p_{call}) & i \in N_{FMM} \end{cases} \quad (3.3)$$

a	Vektor der gewählten Aktionen aller Spieler (Aktionsprofil $a = (a_1, \dots, a_n) \in A$)
TA	Ausschreibungsmenge (Tender Amount) in der <i>FCR</i> -Auktion am übergeordneten <i>RLM</i> in MW
d	Dauer einer Produktzeitscheibe in Stunden (zurzeit 4 Stunden [6])
τ	Anzahl Zeitslots, in die die Produktzeitscheibe am <i>FMM</i> unterteilt wird
$ba'_i(a)$	Bezuschlagte Leistung von Spieler $i \in N_{RLM}$: $ba'_i(a, TA) \leq ba_i \in a_i \in A_i$ in MW
$ba'_{i,t}(a)$	Bezuschlagte Leistung von Spieler $i \in N_{FMM}$ in Zeitslot t : $ba'_{i,t}(a, TA) \leq ba_{i,t} \in a_i \in A_i$ [MW]
UP	Einheitspreis der <i>FCR</i> -Auktion am übergeordneten <i>RLM</i> in ct/MW/h
cMW_i	Vorhaltungskosten von Spieler $i \in N_{RLM}$ für bezuschlagte Regelleistung in ct/MW/h
$cMWh_i$	Erbringungskosten von Spieler $i \in N_{RLM}$ für abgerufene Regelleistung in ct/MWh
$cMW_{i,t}$	Vorhaltungskosten von Spieler $i \in N_{FMM}$ für in Zeitslot t bezuschlagte Regelleistung in ct/MW/h
$cMWh_{i,t}$	Erbringungskosten von Spieler $i \in N_{FMM}$ für in Zeitslot t abgerufene Regelleistung in ct/MWh
p_{call}	Wahrscheinlichkeit, dass die bezuschlagte Leistung vollständig abgerufen wird: $p_{call} \in]0, 1]$

3.2.2 Implementierung

Aufbauend auf den in [Abschnitt 3.1.2](#) beschriebenen Erweiterungen von *GAMUT* wird eine weitere Spielklasse *FMMRLMGame* implementiert, die Parameter verarbeitet und basierend auf einer *Action-Graph*-Repräsentation entsprechende *AGG*-Instanzen des in [Definition 9](#) definierten Basisspiels erzeugt.

Kommandozeilenparameter

Eine Instanz des in [Definition 9](#) definierten Basisspiels kann z.B. durch die Ausführung der *gamut.jar*-Datei mit der folgenden Kommandozeile

```
java -jar gamut.jar -g FMMRLMGame -f_config "C:\Users\FMM-RLM_Config.txt"
-output SpecialOutput
```

und einer Konfigurationsdatei¹⁶ erzeugt werden. Gegenüber [Abschnitt 3.1.2](#) sind die folgenden Parameteroptionen neu und erwarten als Argumente:

- `rlm_tendAmount`: Ausschreibungsmenge in der [FCR](#)-Auktion am übergeordneten [RLM](#) in MW (Integer)
- `FMMplayerclasses`, `RLMplayerclasses`: analog zur Option `playerclasses` beim *FMMGame* (siehe [Abschnitt 3.1.2](#)) für Akteure des [FMM](#) bzw. des übergeordneten [RLM](#). Da Akteure am [RLM](#) Leistung konstant über die gesamte Produktzeitscheibe anbieten müssen, erwarten die inneren Parameteroptionen `MW_cost` und `MWh_cost` für [RLM](#)-Spielerklassen allerdings jeweils nur eine Ganzzahl für Vorhaltungs- und Erbringungskosten; und `actions` erwartet für [RLM](#)-Spielerklassen nur zwei mit Kommas getrennte Ganzzahlen (Gebotsmenge ba_i in kW und Leistungspreis bp_i in ct/MW/h für die gesamte Produktzeitscheibe). Außerdem müssen die Gebotsmengen von [RLM](#)-Spielerklassen Vielfache von 1 MW, d.h. 1000 kW, sein. Für [FMM](#)-Spielerklassen werden wie gehabt `2-num_tSlots` mit Kommas getrennte Ganzzahlen erwartet. Bei der Wahl der Aktionen und der Ausschreibungsmenge wird außerdem erwartet, dass die angegebene Ausschreibungsmenge für alle möglichen Aktionsprofile erfüllt werden kann.

Infolge eines solchen Aufrufs werden zunächst die Parameter eingelesen und die *FMMRLMGame*-Klasse wird initialisiert. Dann wird der *Action-Graph* erzeugt und die Utilities für alle [ANs](#) und alle möglichen Konfigurationen werden berechnet. Die Parameter des *Action-Graphs* werden hierbei wie in [Abschnitt 3.1.2](#) bestimmt, wobei erst [RLM](#)- und dann [FMM](#)-Spieler angelegt werden. Der Aufbau des *Action-Graphs*, der sich signifikant von dem aus [Abschnitt 3.1.2](#) unterscheidet, wird im Folgenden genauer beschrieben.

Der Action-Graph

Wie der *Action-Graph* des Basisspiels nach [Definition 8](#) enthält auch der *Action-Graph* für das Basisspiel nach [Definition 9](#) einen *Action-Node* ([AN](#)) je individueller Aktion und Utilityfunktion¹⁷. [RLM](#)- und [FMM](#)-Spielern werden hierbei separate [ANs](#) zugewiesen, da [RLM](#)- und interne [FMM](#)-Gebote bei der Bestimmung des [UP](#) und bei der Berechnung der Utilities getrennt ausgewertet werden müssen. *Kein Gebot* ist die einzige Aktion, für die [FMM](#)- und [RLM](#)-Spieler sich einen [AN](#) teilen. Die [ANs](#) werden über *Sum-FNs*, d.h. einfache Aggregatoren, zusammengefasst, wenn sie sich nur in ihrer Utilityfunktion unterscheiden,

¹⁶Im [Anhang C](#) finden sich Konfigurationsdateien zur Erzeugung einer Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMGame* mit *GAMUT* in den Abbildungen [C.3](#) bis [C.8](#).

¹⁷Die Aktion *kein Gebot* wird (sofern vorhanden) unabhängig von der Utilityfunktion für alle Spieler in einer gemeinsamen [AN](#) mit Index 0 abgebildet, da die Utility hierfür immer 0 beträgt.

ihre Aktion aber übereinstimmt. Zwecks Erzeugung der *.game*-Datei im **AGG**-Format müssen die Utilities für alle **ANs** und alle möglichen Konfigurationen ihrer Nachbarschaften bestimmt werden. Die Utility für die Wahl einer Aktion, d.h. eines **AN**, hängt vom **UP** und der Zuschlagsmenge ab. Der **UP** ist in diesem Spiel keine exogene Variable, sondern berechnet sich aus der Ausschreibungsmenge und dem jeweiligen Aktionsprofil. Anders als in **Abschnitt 3.1** ist die detaillierte Betrachtung der **FMM**-Gebotsaggregationen daher zwingend erforderlich. Kontextspezifische Unabhängigkeit liegt hier nur noch für die Aktion *kein Gebot* vor, deren **AN**, sofern vorhanden, weiterhin weder Nachbarn hat, noch Nachbar eines anderen **AN** ist. Alle anderen **ANs** haben alle **FNs** sowie die nicht über **FNs** aggregierten **ANs**¹⁸ inklusive sich selbst als Nachbarn.

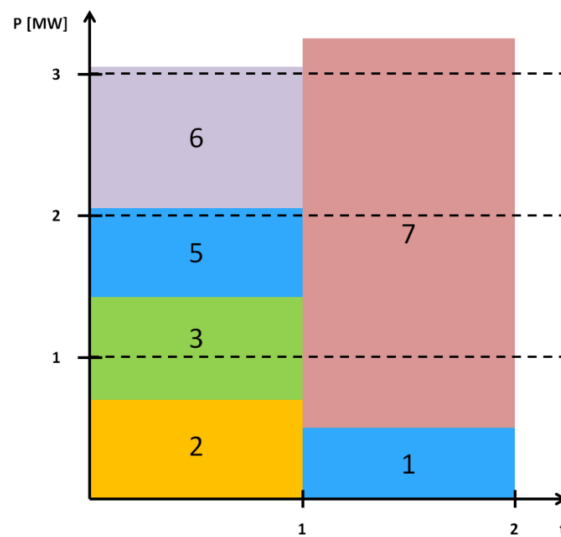


Abbildung 3.3: Eigene Darstellung einer Multi-MW-Gebotsaggregation am **FMM** mit fünf Bietern *blau, gelb, grün, rot* und *violett*. y-Achse: Gebotsmenge [MW], x-Achse: Unterteilung der Produktzeitscheibe in zwei Zeitslots, Beschriftung der Blöcke: Gebotspreis in ct/MW/h. Aggregiert wird ein 3-MW-Gebot zum Preis von 7 ct/MW/h, wobei das Teilgebot von *violett* in Zeitslot 1 und das Teilgebot von *rot* in Zeitslot 2 nur anteilig aggregiert wird (siehe auch Zuschlagsregel in **Abschnitt 2.1.2**). Wird die **FCR**-Auktion am **RLM** nun zum Preis von 7 ct/MW/h geräumt, ist dieses Gebot gebotspreissetzend. Liegt ein Überhang vor, so wird das 3-MW-Gebot (abhängig von der noch offenen Ausschreibungsmenge und weiteren Geboten, die zu 7 ct/MW/h abgegeben werden) zufällig gar nicht oder mit 1 MW, 2 MW oder 3 MW bezuschlagt. Wird der Zuschlag über 3 MW erteilt, so erhalten alle internen Gebote einen Zuschlag über die volle aggregierte Gebotsleistung zum **UP** von 7 ct/MW/h. Erhält das aggregierte 3-MW-Gebot hingegen nur einen Zuschlag über 1 MW, so werden intern nur das Gebot von *gelb* in Zeitslot 1 und das Gebot von *blau* in Zeitslot 2 voll bezuschlagt. Die Gebote von *grün* (Zeitslot 1) und *rot* (Zeitslot 2) werden intern jeweils anteilig bezuschlagt. Alle anderen Teilgebote werden intern nicht bezuschlagt.

¹⁸außer dem **AN** für die Aktion *kein Gebot*, sofern vorhanden

Die Utilityberechnung

Die Berechnung der Utilities erfolgt je **AN** und je Konfiguration seiner Nachbarschaft nacheinander. Hierzu erfolgt zunächst die Berechnung des **UP**. Die Belegungen der Nachbarknoten werden ausgewertet und zwei separate Merit-Order-Listen (**MOL**) für die Gebote von **FMM**- und **RLM**-Spielern angelegt. Diese werden in aufsteigender Reihenfolge der Preise parallel abgearbeitet. Für jeden Preis wird überprüft, ob der **FMM** zu diesem ein Gebot aggregiert. Die Leistungen aggregierter **FMM**-Gebote und direkter Gebote der **RLM**-Spieler werden so der Reihe nach aufsummiert, bis die Ausschreibungsmenge (über)erfüllt ist. Der **UP** entspricht dem Preis des teuersten Gebots, das hierzu aufsummiert wird.

Dann wird die Utility des **AN** für diese Konfiguration berechnet. Hierbei muss zwischen **RLM**- und **FMM**-**ANs** unterschieden werden.

Die in **RLM**-**ANs** abgebildeten Gebote werden voll bezuschlagt, wenn (1) der Gebotspreis günstiger als der **UP** ist oder (2) dem **UP** entspricht und die Ausschreibungsmenge nicht übererfüllt ist. Entspricht der Gebotspreis hingegen dem **UP** und der Markt wird mit Überhang geräumt, entscheidet der Zufall, welche der grenzpreissetzenden Gebote bezuschlagt werden (siehe **Annahme 17**). Dabei wird jedes Megawatt der grenzpreissetzenden Gebote einzeln bezuschlagt (vgl. **Annahmen 4** und **16**). Diese zufällige Zuschlagsvergabe verhält sich wie ein Urnenmodell ohne Zurücklegen und ohne Reihenfolge, d.h. wie ein Zufallsexperiment, dem die hypergeometrische Verteilung zugrundeliegt [51]. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein grenzpreissetzendes Gebot über ba MW einen Zuschlag über genau $x \in [0, ba]$ MW erhält, wenn am **RLM** insgesamt $spba$ MW zum **UP** geboten werden, berechnet sich mithilfe der Dichtefunktion der hypergeometrischen Verteilung durch:

$$p(x) = \frac{\binom{ba}{x} \cdot \binom{spba-ba}{spba-(sa-TA)-x}}{\binom{spba}{spba-(sa-TA)}} \quad (3.4)$$

$p(x)$ Wahrscheinlichkeit für einen Zuschlag von genau $x \in [0, ba]$ MW

ba *Bid amount*, Gebotsmenge dieses grenzpreissetzenden Gebots [MW]

$spba$ *Same price bid amount*, Summe der Leistungen aller grenzpreissetzenden Gebote am zentralen Markt [MW]

$sa - TA$ Überhang (aggregierte Gebote zu Preisen kleiner gleich dem **UP** minus Ausschreibungsmenge, siehe auch **Algorithmus 2**)

Die durchschnittlich erwartete Utility für einen Zuschlag über x MW mit Wahrscheinlichkeit $p(x)$ ist gleich der Utility für eine anteilige Bezuschlagung von $ba \cdot p(x)$ MW. Daher geht die zufällige Zuschlagsvergabe bei Preisgleichheit als erwartete Zuschlagsmenge in die

Algorithm 2 Generation of the FMM-RLM Action-Graph Game

Input: Call for bids ta [MW], number of time slots τ , bid amounts $ba_{i,t}$ [kW], bid prices $bp_{i,t}$ [ct/MW/h], provision costs $cMW_{i,t}$ [ct/MW/h] and delivery costs $cMWh_{i,t}$ [ct/MWh] for each FMM player $i \in N_{FMM}$ and time slot $t \in \tau$, bid amounts ba_i [kW], bid prices bp_i [ct/MW/h], provision costs cMW_i [ct/MW/h] and delivery costs $cMWh_i$ [ct/MWh] for each RLM player $i \in N_{RLM}$

Output: Action Graph, utilities for each action node (AN) and possible configuration over its neighborhood

▷ Generate Action Graph

- 1: Create an AN for each individual bid (that is for every individual combination of bid amounts, bid prices, provision costs and delivery costs)
- 2: **for all** groups of ANs that share the same bid amounts and bid prices **do**
- 3: Create a *simple aggregator* function node (FN) $thisFN$
- 4: Add edges from all ANs in this group to $thisFN$
- 5: Add edges from $thisFN$ to all ANs
- 6: **for all** ANs $thisAN$ **do**
- 7: **if** $thisAN$ is not aggregated by any FN **then**
- 8: Add edges from $thisAN$ to all ANs including itself
- ▷ Calculate utilities
- 9: **for all** ANs $thisAN$ **do**
- 10: **for all** configurations over its neighborhood **do** ▷ Calculate UP
- 11: Evaluate neighbor nodes' configuration to create MOLs MOL_{FMM} , MOL_{RLM}
- 12: Init sum of bid amounts $sa := 0$ and uniform price $UP := -1$
- 13: **for all** bid prices $p \in MOL_{FMM} \cup MOL_{RLM}$ in ascending order **do**
- 14: Sum up aggregated bid amount of FMM per time slot
- 15: **if** FMM has aggregated a bid of m MW over all time slots **then**
- 16: $sa := sa + m$
- 17: Update aggregated bid amount of FMM (subtract m in each time slot)
- 18: $sa := sa + MOL_{RLM}(p)$
- 19: $UP := p$ ▷ Update UP
- 20: **if** $sa \geq ta$ **then** ▷ Check whether call for bids is (over)fulfilled
- 21: **break**
- 22: Init accepted bid amount $bacc := 0$ ▷ Calculate tender accept and utility¹⁹
- 23: **if** ($bp_{this} \leq UP$) **then**
- 24: **if** ($(bp_{this} == UP) \ \&\& \ (sa > ta)$) **then**
- 25: $x := 1$
- 26: **while** $x \leq ba_{this}$ **do**
- 27: Calculate $p(x)$ (probability for tender accept of x MW, see eq. 3.4)
- 28: $bacc += p(x) \cdot x$
- 29: **else** $bacc := ba_{this}$
- 30: Calculate utility($bacc$, UP , cMW_{thisAN} , $cMWh_{thisAN}$)

¹⁹Die Utilityberechnung ist hier der Übersichtlichkeit halber für RLM-ANs dargestellt. Falls $thisAN$ ein Gebot eines FMM-Spielers abbildet, werden die Zuschläge am RLM für jedes aggregierte Gebot, an dem $thisAN$ beteiligt ist, separat berechnet und für jeden Zeitslot $t \in \tau$ separat auf das interne Gebot umgelegt (siehe auch Abbildung 3.3). Diese Teilutilities werden je Zeitslot und aggregiertem Gebot aufsummiert. ba_{this} und bp_{this} bezeichnen in diesem Fall nicht die Gebotsmenge und den Gebotspreis

Utilityfunktion ein (siehe auch Zeile 28 in [Algorithmus 2](#)). Ist der Gebotspreis eines **RLM-AN** teurer als der **UP**, so wird kein Zuschlag erteilt, und die Utility ist 0.

Die Bezuschlagung *aggregierter* Gebote des **FMM** am **RLM** verläuft analog. Zur Berechnung der Utility eines in einem **FMM-AN** abgebildeten internen Gebots muss die übergeordnete Zuschlagsvergabe allerdings auf das interne Gebot umgelegt werden. Dabei kann das interne Gebot an mehreren aggregierten Geboten beteiligt sein. Daher wird für jedes dieser aggregierten Gebote der *aggregierte* Gebotspreis mit dem **UP** verglichen, um den Zuschlag am **RLM** und daraus wiederum den resultierenden internen Zuschlag am **FMM** zu bestimmen. Wird das in einem **FMM-AN** abgebildete interne Gebot in einem grenzpreissetzenden multi-MW-Gebot aggregiert und wird der **RLM** mit Überhang geräumt, so werden anteilige Zuschläge intern entsprechend der **MOL** je Zeitslot umgelegt (siehe auch [Abbildung 3.3](#)). Die Utility des in einem **FMM-AN** abgebildeten internen Gebots insgesamt wird aus der Summe der Utilities dieser Teilzuschläge für alle aggregierten Gebote, an denen es beteiligt ist, aufsummiert.

Die Generierung des *Action-Graphs* und die Berechnung der erwarteten Utilities für alle **ANs** und alle möglichen Konfigurationen ihrer Nachbarschaften ist in [Algorithmus 2](#) zusammengefasst.

3.2.3 Hypothesen

In [Abschnitt 3.1.3](#) wurde erläutert, dass bei der Gebotsaggregation am **FMM** aufgrund der hierarchischen Verknüpfung an die deutschlandweite **FCR**-Auktion eine Inhomogenität vorliegt, die Anreize bietet, die Grenzkosten ggf. zu unterbieten. Die Akteure des übergeordneten **RLM**, die direkt an der Einkaufsauktion mit homogenen Gütern teilnehmen und in dieser Modellierung ebenfalls betrachtet werden, sind von diesem Effekt nicht betroffen. In einer solchen Situation wäre daher zunächst folgendes Bieterverhalten zu erwarten:

- **FMM-Akteure** überbieten ihre Grenzkosten, sofern eine ausreichend hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass sie intern gebotspreissetzend werden und dieses Gebot in der **FCR**-Auktion mindestens grenzpreissetzend wird. Andernfalls unterbieten sie ihre Grenzkosten, insbesondere wenn (1) die Kostenstruktur der **FMM**-Akteure sehr heterogen ist, (2) die präqualifizierte Leistungsmenge des **FMM** in Summe kein Vielfaches von 1 MW ist und/oder (3) die Wahrscheinlichkeit besteht, dass aggregierte Gebote in der **FCR**-Auktion nur zufällig, anteilig oder gar nicht bezuschlagt werden. Das Verhalten der **FMM**-Akteure (d.h. ab welchem Wert die Wahrscheinlichkeit, den

von *thisAN*, sondern jeweils vom aggregierten Gebot; und die Vorhaltungs- und Erbringungskosten sind ggf. für unterschiedliche Zeitslots andere ($cMW_{thisAN,t}$, $cMWh_{thisAN,t}$).

Gebotspreis eines grenzpreissetzenden oder teureren aggregierten Gebots zu setzen, *ausreichend hoch* ist, um die eigenen Grenzkosten zu überbieten) hängt stark von der Leistungs-Kosten-Struktur am **FMM** sowie dem Verhältnis dieser zur Leistungs-Kosten-Struktur am übergeordneten **RLM** ab.

- **RLM-Akteure** bieten in einer homogenen Einheitspreisauktion ihre Grenzkosten oder überbieten diese (bis knapp unterhalb der Grenzkosten des nach Grenzkosten nächstteureren Spielers), sofern eine positive Wahrscheinlichkeit besteht, grenzpreissetzend zu werden.

Da es sich bei **Definition 9** um ein Spiel vollständiger Information handelt, ist allen Spielern sicher bekannt, wer die anderen Spieler sind und welche Aktionsmengen und Utilityfunktionen diese besitzen. Somit ist jederzeit bekannt, welcher Spieler zu welchem Preis grenzpreissetzend würde, wenn sowohl **FMM**- als auch **RLM**-Spieler ihre maximale Leistung zu ihren Grenzkosten böten. Der dann resultierende Markträumungspreis wird im Folgenden als der *fiktive UP* bezeichnet.

Für diesen Spezialfall der vollständigen Information werden die folgenden Hypothesen zu Gleichgewichtsstrategien formuliert, die in der Analyse unterschiedlicher Spielparametrisierungen überprüft werden sollen:

Hypothese 3. *Alle **FMM**-Spieler, deren Grenzkosten günstiger als der fiktive **UP** sind, verhalten sich analog zu **Hypothese 1** in **Abschnitt 3.1.3**. Sie bieten ihre maximale Leistung zum minimalen Preis, sofern (1) die Summe der maximalen Leistungen aller Spieler mit Grenzkosten günstiger als der fiktive **UP** kein Vielfaches von 1 MW ergibt oder (2) die Wahrscheinlichkeit besteht, dass ein aggregiertes Gebot des **FMM** grenzpreissetzend und dabei nur zufällig und/oder anteilig bezuschlagt wird. Andernfalls bieten sie ihre maximale Leistung zu einem beliebigen Preis günstiger als der fiktive **UP**.*

Hypothese 3 weicht insofern von **Hypothese 1** ab, als dass zu erwarten ist, dass **FMM**-Spieler mit Grenzkosten günstiger als der fiktive **UP** einen Gebotspreis kleiner (und nicht kleiner *gleich*) dem fiktiven **UP** wählen, da diese Modellierung die im grenzpreissetzenden Fall ggf. zufällige und/oder anteilige Bezuschlagung am **RLM** berücksichtigt.

Hypothese 4. *Alle **FMM**-Spieler, deren Grenzkosten mindestens dem fiktiven **UP** entsprechen, bieten ihre maximale Leistung zu einem Preis oberhalb ihrer Grenzkosten, aber unterhalb der Grenzkosten des nach Grenzkosten nächstteureren Spielers (dies kann sowohl ein **FMM**- als auch ein **RLM**-Spieler sein).*

Hypothese 5. *Alle **RLM**-Spieler, deren Grenzkosten unterhalb des fiktiven **UP** liegen, bieten ihre maximale Leistung zu einem beliebigen Preis unterhalb des fiktiven **UP**.*

Hypothese 5 ist insofern von der Definition als Spiel vollständiger Information beeinflusst, als dass, da keine Unsicherheit über die Grenzkosten und Leistungen der Gegenspieler besteht, die darin ebenfalls enthaltene Strategie, die eigenen Grenzkosten zu unterbieten, kein Risiko darstellt, sofern auch die Hypothesen 4 und 6 gelten.

Hypothese 6. *Alle RLM-Spieler, deren Grenzkosten mindestens dem fiktiven UP entsprechen, bieten ihre maximale Leistung zu einem Preis oberhalb ihrer Grenzkosten, aber unterhalb der Grenzkosten des nach Grenzkosten nächstteureren RLM-Spielers oder des nach Grenzkosten nächstteureren, möglichen aggregierten FMM-Gebots (je nachdem, welcher Preis günstiger ist).*

3.2.4 Parametrierung

Wie auch in [Abschnitt 3.1](#) lässt sich unabhängig von realen Daten qualitativ untersuchen, ob FMM- und RLM-Akteure abhängig von den an den beiden Märkten vorliegenden Leistungs-Kosten-Strukturen und ihren eigenen Kosten und Flexibilitäten ihre Grenzkosten bieten, über- oder unterbieten. Zur Überprüfung der Hypothesen werden daher mehrere synthetische Szenarien entworfen, die in den folgenden Eigenschaften übereinstimmen:

- **Anzahl Zeitslots:** 2
- **Abrufwahrscheinlichkeit:** 0,5
- **Ausschreibungsmenge:** 10 MW
- **Anzahl RLM-Spieler²⁰:** 3
- **Anzahl FMM-Spieler:** $\geq 3+1$ (Mindestens drei Spieler mit Grenzkosten unterhalb des fiktiven UP, ein Spieler mit Grenzkosten oberhalb des fiktiven UP)
- **Aktionen je Spieler:** Jeder Spieler hat drei bis vier von seinen Grenzkosten abhängige Gebotspreise zur Auswahl²⁰: die Möglichkeit, Leistung (1) zu 0 ct/MW/h zu bieten, (2) zu seinen Grenzkosten zu bieten, oder (3/4) seine Grenzkosten zu überbieten zu einem Preis knapp unter den Grenzkosten des nächstteureren RLM- und/oder FMM-Spielers. Jedem Spieler steht jeweils nur eine Gebotsmenge zur Auswahl, die der maximalen Leistung entspricht, die er im Fall einer vollständigen Bezuschlagung erbringen kann. Insgesamt kann somit jeder Spieler zwischen drei bis vier Aktionen (einer Gebotsmenge zu drei bis vier unterschiedlichen -preisen) wählen. Dabei werden

²⁰Vorgriff: Ab Spiel 2.3 wird das günstigste 1-MW-Gebot des FMM, das von FMM-Spielern aggregiert wird, deren Grenzkosten günstiger als die Grenzkosten aller RLM-Spieler sind, der Übersichtlichkeit halber z.T. als ein zusätzlicher RLM-Spieler modelliert, der immer 1 MW zu 0 ct/MW/h bietet.

die Gebotsmengen so gewählt, dass die **RLM**-Spieler in Summe die Ausschreibungsmenge von 10 MW ohne den **FMM** erbringen können. Die aggregierte Leistung des **FMM** ist hingegen kleiner als 10 MW.

Die Anzahl und Aktionen (d.h. Flexibilität und Grenzkosten) der **FMM**-Spieler werden in diesem Rahmen variiert, um sechs unterschiedliche Szenarien zu analysieren. Die Konfigurationsdateien der Spiele 2.1 bis 2.6 finden sich in **Anhang C** in den Abbildungen **C.3** bis **C.8**. Die **MOL** der Grenzkosten sind in den Abbildungen **5.6** bis **5.11** dargestellt. Die gewählten Parametrierungen werden im Folgenden kurz erläutert.

Die **Spiele 2.1 und 2.2** erweitern die Szenarien aus den Spielen 1.1 und 1.2 um drei **RLM**-Spieler mit teureren Grenzkosten. Deren Leistungen werden so gewählt, dass der **FMM** durch seine Marktteilnahme keinen Einfluss auf den fiktiven **UP** nimmt.

In den Spielen 2.3 bis 2.6 werden dem Szenario aus Spiel 2.1 weitere **FMM**-Spieler hinzugefügt, deren Preisspanne sich mit der der **RLM**-Spieler überschneidet. Der **FMM** kann in diesen Szenarien mindestens 2 MW aggregieren und daher direkt (wenn ein **FMM**-Gebot grenzpreissetzend wird) oder indirekt (wenn *RLM-Spieler 3* durch zwei günstigere, aggregierte 1-MW-Gebote aus dem bezuschlagten Bereich der Merit-Order-Liste (**MOL**)²¹ verdrängt wird) auf den **UP** Einfluss nehmen.

Die im ersten 1-MW-Gebot des **FMM** aggregierte Leistung der *FMM-Spieler 1, 2 und 3* aus Spiel 2.1 wird in den Spielen 2.3 bis 2.5 der Übersichtlichkeit halber in einem neuen *RLM-Spieler 0* zusammengefasst, dessen einzige Aktion darin besteht, 1 MW zu 0 ct/MW/h zu bieten. Der Überhang von 200 kW wird dem nach Grenzkosten teuersten **FMM**-Spieler dieser Gebotsaggregation, *FMM-Spieler 3*, zugewiesen.

In **Spiel 2.3** gibt es zwei potenziell gebots- und grenzpreissetzende *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* mit identischer Flexibilität und Grenzkosten (siehe **Abbildung 3.6**). Die Leistung eines der beiden Spieler reicht zur Gebotsaggregation aus.

In **Spiel 2.4** werden die Gebotsmengen der **FMM**-Spieler so gewählt, dass die Flexibilität *beider* potenziell gebotspreissetzenden *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* zur Gebotsaggregation benötigt wird (siehe **Abbildung 3.7**).

Spiel 2.5 ist eine weitere Anpassung von Spiel 2.3. Die Leistungen der *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* werden von jeweils 400 kW auf jeweils 700 kW erhöht, sodass der **FMM** insgesamt 3 MW aggregieren kann. In der **MOL** der Grenzkosten wird so nicht nur *RLM-Spieler 3* aus dem bezuschlagten Bereich der **MOL**²¹ verdrängt, sondern das potenziell grenzpreissetzende 3-MW-Gebot wird nur anteilig bezuschlagt (siehe **Abbildung 3.8**).

²¹Hier wird immer von der **MOL** der Grenzkosten ausgegangen. Ob die **MOL** der tatsächlich am übergeordneten **RLM** eingehenden Gebote hiermit übereinstimmt, bleibt zu untersuchen (siehe Ergebnisse in **Abschnitt 3.2.5**).

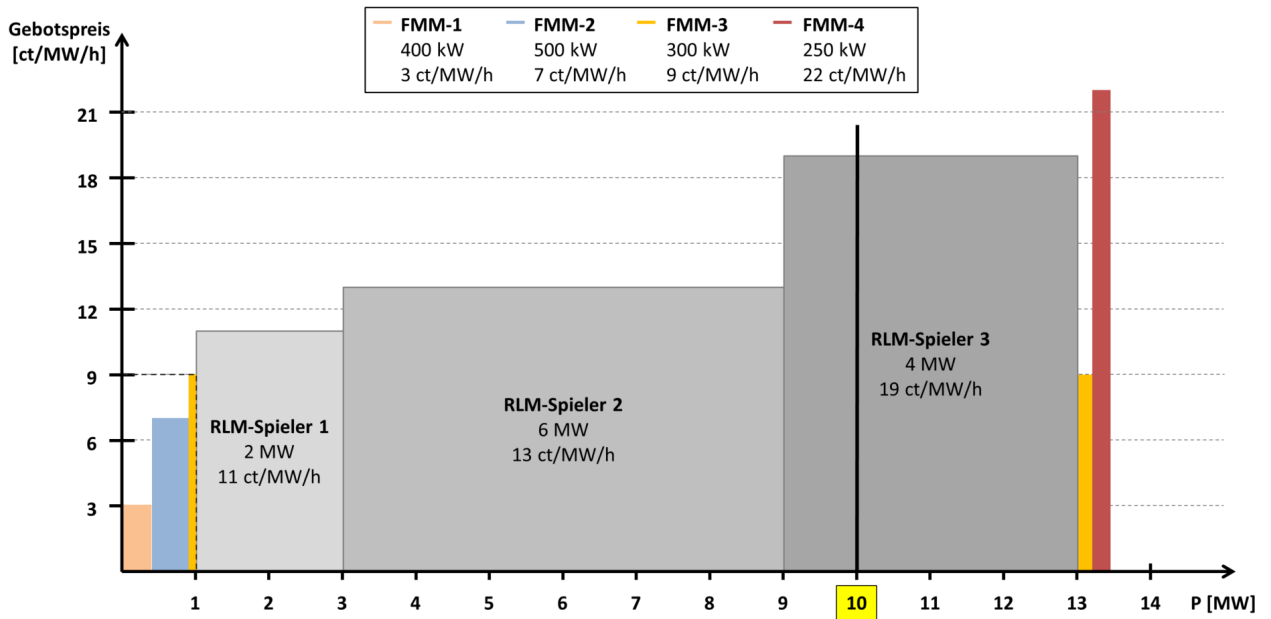


Abbildung 3.4: MOL der Grenzkosten in Spiel 2.1, fiktiver $UP=19\text{ct/MW/h}$

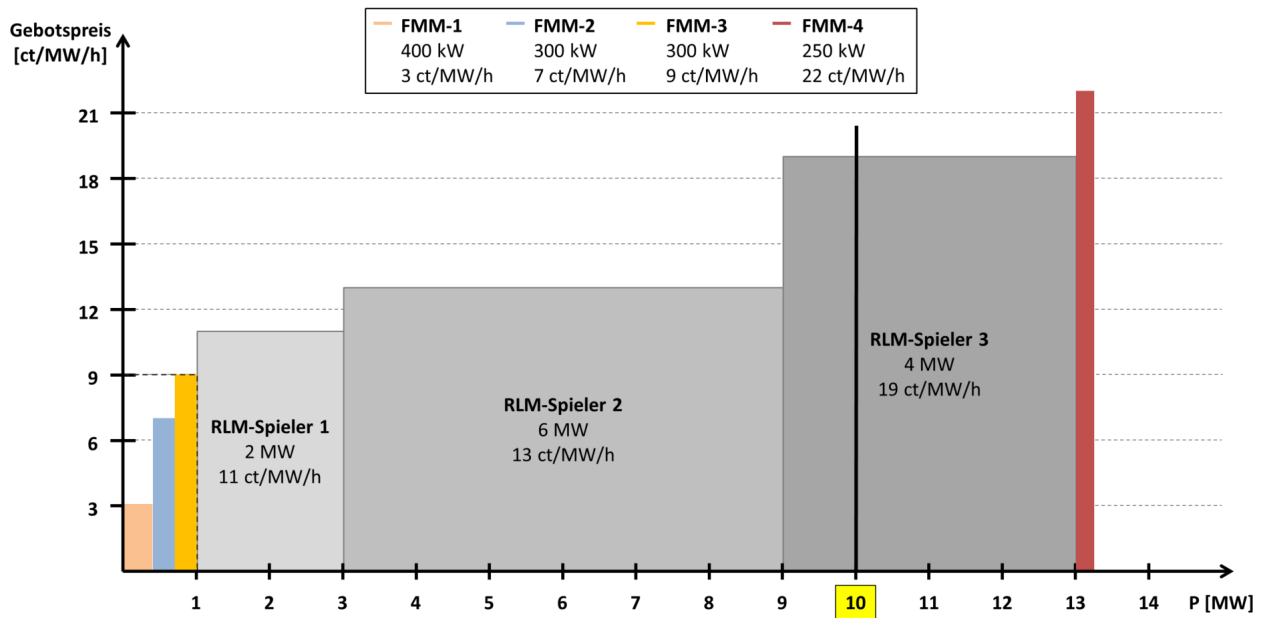


Abbildung 3.5: MOL der Grenzkosten in Spiel 2.2, fiktiver $UP=19\text{ct/MW/h}$

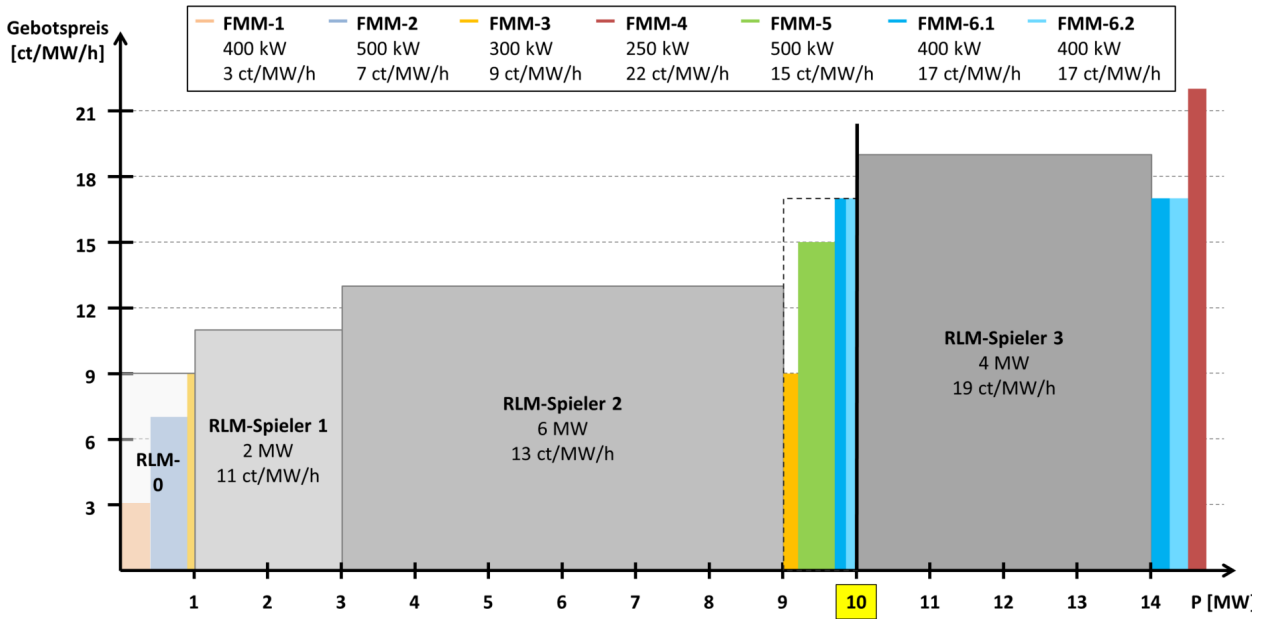


Abbildung 3.6: MOL der Grenzkosten in Spiel 2.3, fiktiver UP=17ct/MW/h

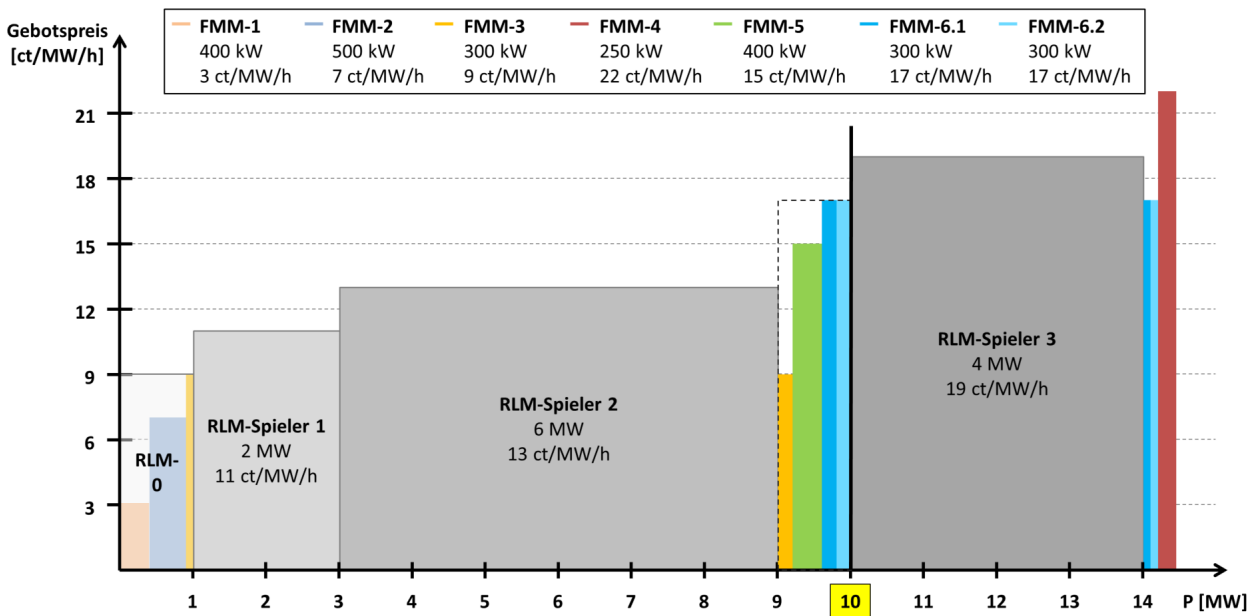
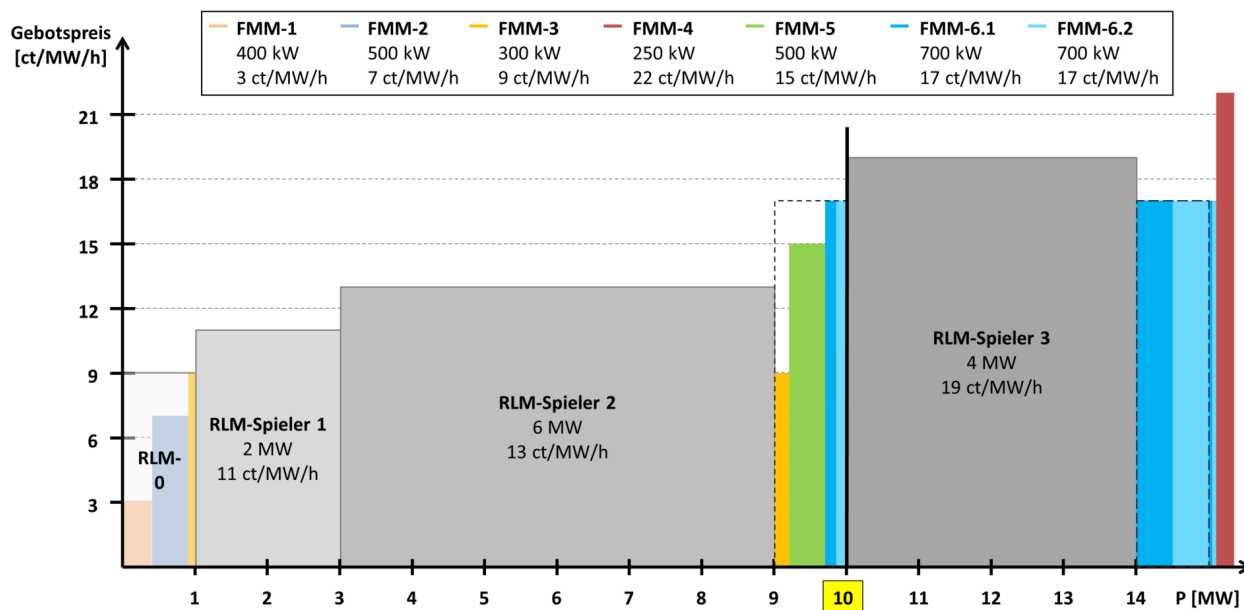
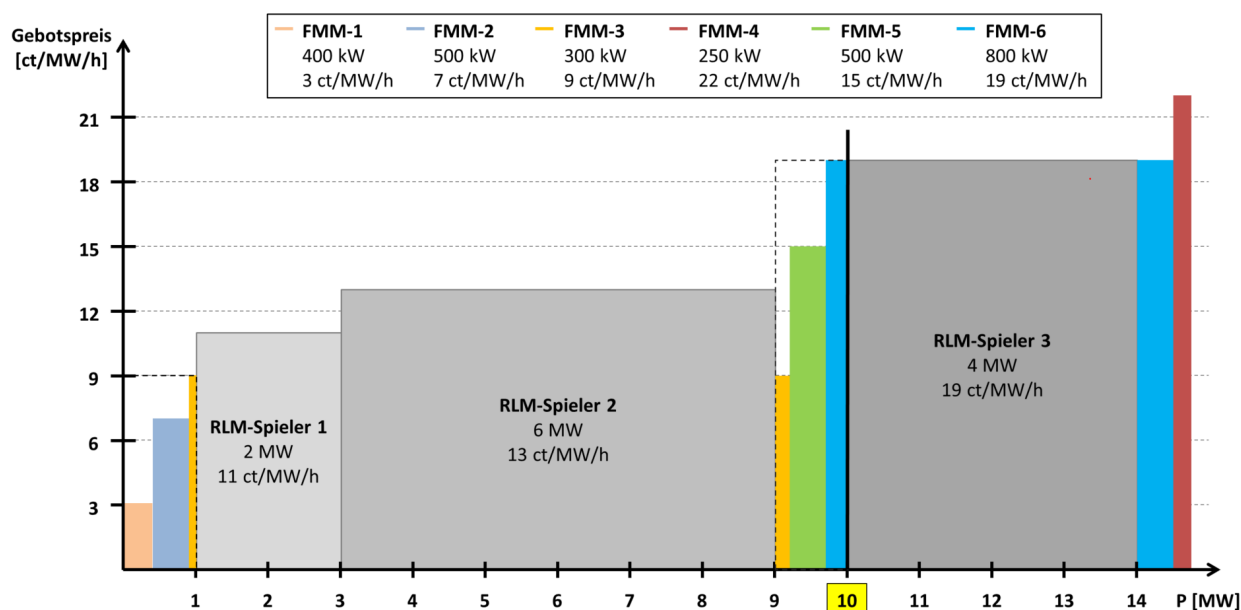


Abbildung 3.7: MOL der Grenzkosten in Spiel 2.4, fiktiver UP=17ct/MW/h

Abbildung 3.8: MOL der Grenzkosten in Spiel 2.5, fiktiver $UP=17\text{ct/MW/h}$ Abbildung 3.9: MOL der Grenzkosten in Spiel 2.6, fiktiver $UP=19\text{ct/MW/h}$

Im letzten **Spiel 2.6** wird das Szenario aus Spiel 2.3 so angepasst, dass die Grenzkosten der potenziell gebotspreissetzenden *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* mit den Grenzkosten von *RLM-Spieler 3* übereinstimmen (siehe [Abbildung 3.9](#)). In der MOL der Grenzkosten wird *RLM-Spieler 3* in diesem Szenario nicht mehr zwingend durch den *FMM* aus dem bezuschlagten Bereich der MOL²¹ verdrängt, sondern *RLM-Spieler 3* oder der *FMM* wer-

den aufgrund von Preisgleichheit mit der Wahrscheinlichkeit $4/5$ bzw. $1/5$ zufällig mit dem grenzpreissetzenden Megawatt bezuschlagt. Der Übersichtlichkeit halber werden die potenziell gebotspreissetzenden *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* hier in einem *FMM-Spieler 6* mit doppelter Leistung zusammengefasst. Um die Auswirkungen der Inhomogenität bei zufälliger Bezuschlagung aufgrund von Preisgleichheit auswerten zu können, werden die in Spiel 2.3 bis 2.5 in *RLM-Spieler 0* zusammengefassten *FMM-Spieler 1, 2* und *3* im Detail betrachtet.

3.2.5 Ergebnisse

Mit *GAMUT* werden aus den Konfigurationsdateien der in [Abschnitt 3.2.4](#) parametrisierten Spiele Instanzen der neu implementierten Spielklasse *FMMRLMGame* generiert. Wie in [Abschnitt 3.1](#) werden die Nash-Gleichgewichte mit den Algorithmen *gambit-enumpure* und *gambit-enumpoly* bestimmt. Beide Algorithmen liefern für die Spiele 2.1 bis 2.6 wie in [Abschnitt 3.1.4](#) die gleichen Ergebnisse. Diese sind in den Tabellen [3.3](#) bis [3.8](#) dargestellt.

Die Gleichgewichtsstrategien der *FMM-Spieler* stimmen in **Spiel 2.1** und **2.2** nahezu vollständig mit denen aus [Modellierung 1](#) überein. Die einzige Abweichung besteht darin, dass die Abgabe eines Gebots zum **UP** in Spiel 2.2 für *FMM-Spieler* mit Grenzkosten unterhalb des **UP** keine Gleichgewichtsstrategie ist (wie in [Hypothese 3](#) erwartet, siehe *FMM-Spieler 3* in [Tabelle 3.4](#) im Vergleich zu [Tabelle 3.2](#)). Die Gleichgewichtsstrategien der *RLM-Spieler* sind in Spiel 2.1 und Spiel 2.2 identisch. Der in der **MOL** der Grenzkosten grenzpreissetzende *RLM-Spieler 3* überbietet seine Grenzkosten von 19ct/MW/h maximal und wird tatsächlich grenzpreissetzend ($UP = 20ct/MW/h$). Die günstigeren *RLM-Spieler* geben ein beliebiges Gebot kleiner dem **UP** ab. Das aggregierte Gebot des *FMM* sowie die *RLM-Spieler 1* und *2* werden voll bezuschlagt. Das grenzpreissetzende Gebot von *RLM-Spieler 3* wird mit 1 MW anteilig bezuschlagt.

Spiel 2.3 besitzt zwei echt unterschiedliche Nash-Gleichgewichte (**NGG**)²². In **NGG 1** ist der *FMM* grenzpreissetzend und beeinflusst den **UP** somit direkt. In **NGG 2** ist der nach Grenzkosten zweit teuerste *RLM-Spieler 2* grenzpreissetzend. Der *FMM* beeinflusst den **UP** in diesem **NGG** indirekt, da die Leistung des teureren, zuvor grenzpreissetzenden *RLM-Spielers 3* nun nicht mehr zur Erfüllung der Ausschreibungsmenge benötigt wird. Die grenzpreissetzenden Spieler überbieten in beiden **NGG** ihre Grenzkosten bis knapp unterhalb der Grenzkosten von *RLM-Spieler 3*. Es resultiert ein **UP** von 18ct/MW/h.

²²**NGG 1** fasst $3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 = 432$, **NGG 2** fasst $3 \cdot 2 \cdot 2 = 12$ Nash-Gleichgewichte in reinen Strategien zusammen.

Tabelle 3.3: Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.1 mit Ausschreibungsmenge 10 MW und Abrufwahrscheinlichkeit 0,5

	RLM-Spieler 1 2MW, GK=11			RLM-Spieler 2 6MW, GK=13			RLM-Spieler 3 4MW, GK=19			FMM-Spieler 1 400kW, GK=3			FMM-Spieler 2 500kW, GK=7			FMM-Spieler 3 300kW, GK=9			FMM-Spieler 4 250kW, GK=22				
AN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	
BP	0	GK	12	0	GK	18	0	GK	20	0	GK	6	0	GK	8	0	GK	10	20	0	GK	24	
NGG	*			*			0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	*		

Tabelle 3.4: Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.2 mit Ausschreibungsmenge 10 MW und Abrufwahrscheinlichkeit 0,5

	RLM-Spieler 1 2MW, GK=11			RLM-Spieler 2 6MW, GK=13			RLM-Spieler 3 4MW, GK=19			FMM-Spieler 1 400kW, GK=3			FMM-Spieler 2 300kW, GK=7			FMM-Spieler 3 300kW, GK=9			FMM-Spieler 4 250kW, GK=22				
AN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	
BP	0	GK	12	0	GK	18	0	GK	20	0	GK	6	0	GK	8	0	GK	10	20	0	GK	24	
NGG	*			*			0	0	1	*			*			*			0	0	*		

Tabelle 3.5: Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.3 mit Ausschreibungsmenge 10 MW und Abrufwahrscheinlichkeit 0,5

	RLM-0 1MW GK=9			RLM-1 2MW GK=11			RLM-2 6MW GK=13			RLM-3 4MW GK=19			FMM-3 200kW GK=9			FMM- 5 500kW GK=15			FMM-6.1 400kW GK=17			FMM-6.2 400kW GK=17			FMM- 4 250kW GK=22		
AN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	18	19	20	9	10	11
BP	0	0	GK	12	0	GK	16	18	0	GK	20	0	GK	10	14	0	GK	16	0	GK	18	0	GK	18	0	GK	24
NGG	1	*		*			0	0	*	*			*			0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	*
U	36	56		120					0	0			7,2					6			0,6			0,6			0
NGG	1	*		0	0	0	1	0	*	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	*	
U	36	56					120			4,8				4			1,07			1,07			1,07			0	

AN: Action-Node; **BP:** Gebotspreis [ct/MW/h]; **GK:** Grenzkosten [ct/MW/h]; **NGG:** Konfiguration der ANs im Nash-Gleichgewicht; **U:** Utility [ct]

In **NGG 1** sind *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* gebotspreissetzend und zeigen ein implizit kollusives Bieterverhalten²³. Da die Leistung eines der beiden Spieler zur Gebotsaggregation ausreicht und sie somit auch einzeln gebots- und grenzpreissetzend würden, überbieten beide ihre Grenzkosten gleichermaßen maximal und werden anteilig bezuschlagt. Alle weiteren **FMM**- und **RLM**-Spieler mit Grenzkosten kleiner dem **UP** von 18 ct/MW/h bieten in **NGG 1** ihre Leistung zu beliebigen Preisen kleiner dem **UP**. Zu welchem Preis sie ihr Gebot genau abgeben, ist im Hinblick auf das Auktionsergebnis irrelevant, da sie immer den vollen Zuschlag zu 18ct/MW/h erhalten. Dies gilt auch für *FMM-Spieler 3* und *FMM-Spieler 5*. Da sie allein kein MW aggregieren und die beiden gebotspreissetzenden *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* teurere interne Gebote abgeben, wird ihre Gebotsleistung in jedem Fall voll aggregiert. Spieler mit Grenzkosten oberhalb des **UP** (*RLM-Spieler 3* und *FMM-Spieler 4*) geben Gebote zu beliebigen Preisen größer gleich ihren Grenzkosten ab.

In **NGG 2**, in dem *RLM-Spieler 2* grenzpreissetzend ist, geben alle **RLM**-Spieler mit Grenzkosten unterhalb des **UP** unverändert ihre Gebote zu beliebigen Preisen unterhalb des **UP** ab. Die **FMM**-Spieler mit Grenzkosten unterhalb des **UP** geben ihre Gebote hingegen zu 0 ct/MW/h ab. Da *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* den **UP** in diesem **NGG** nicht beeinflussen und bei der Gebotsaggregation ein Überhang von 500 kW entsteht, unterbieten sie (und infolgedessen auch *FMM-Spieler 3* und *FMM-Spieler 5*) ihre Grenzkosten, um einen möglichst großen, anteiligen **FMM**-internen Zuschlag zu erhalten. Die Inhomogenität der **FMM**-Auktion wirkt sich also auch in diesem Szenario aus. Da der **UP** in beiden **NGG** der gleiche ist, verhalten sich *RLM-Spieler 3* und *FMM-Spieler 4* unverändert.

Die grenzpreissetzenden Gebote werden in beiden **NGG** voll bezuschlagt. Die Auszahlung ist für *RLM-Spieler 2* daher in beiden **NGG** die gleiche. Da *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* **FMM**-intern nur anteilig bezuschlagt werden, wenn der **FMM** grenzpreissetzend wird, ist es jedoch kein Gleichgewicht, dass *RLM-Spieler 3* und der **FMM** gleichzeitig den **UP** bieten (siehe auch Utilities in **Tabelle 3.5**).

Während in **NGG 1** in **Spiel 2.3** die Leistung eines der beiden gebots- und grenzpreissetzenden *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* für die Gebotsaggregation ausreichend wäre, wird in **Spiel 2.4** die Leistung beider Spieler zur Gebotsaggregation benötigt. Es kommt hierbei weiterhin zu einem Überhang. Dies führt zu den in **Tabelle 3.6** dargestellten echt unterschiedlichen Nash-Gleichgewichten²⁴. Ist der **FMM** grenzpreissetzend (**NGG 1** und **NGG 2**), so überbieten die *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* nun nicht mehr beide maximal ihre Grenzkosten, sondern einer der beiden Spieler wird gebotspreissetzend, während der andere

²³**Implizite Kollusion:** Bieter koordinieren sich in wiederholten Auktionen stillschweigend auf eine Gleichgewichtsstrategie, die für alle eine höhere Auszahlung erzielt [28].

²⁴**NGG 1** und **NGG 2** fassen jeweils $3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 2 \cdot 432 = 864$, **NGG 3** fasst $3 \cdot 2 \cdot 2 = 12$ Nash-Gleichgewichte zusammen.

Tabelle 3.6: Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.4 mit Ausschreibungsmenge 10 MW und Abrufwahrscheinlichkeit 0,5

	RLM-0 1MW GK=9	RLM-1 2MW GK=11	RLM-2 6MW GK=13	RLM-3 4MW GK=19	FMM-3 200kW GK=9	FMM-5 400kW GK=15	FMM-6.1 300kW GK=17	FMM-6.2 300kW GK=17	FMM-4 250kW GK=22		
AN	0	1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11	12 13 14 15	16 17 18	19 20	18 19 20	9 10 11		
BP	0	0 GK 12	0 GK 16 18	0 GK 20	0 GK 10 14	0 GK 16	0 GK 18	0 GK 18	0 GK 24		
NGG	1	*	*	0 0	*	*	0 0	1	*	0 0	*
NGG	1	*	*	0 0	*	*	*	0 0	0 1	0	*
NGG	1	*	0 0 0	1 0	*	1 0 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0 0	*	

Tabelle 3.7: Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.5 mit Ausschreibungsmenge 10 MW und Abrufwahrscheinlichkeit 0,5

	RLM-0 1MW GK=9	RLM-1 2MW GK=11	RLM-2 6MW GK=13	RLM-3 4MW GK=19	FMM-3 200kW GK=9	FMM-5 500kW GK=15	FMM-6.1 700kW GK=17	FMM-6.2 700kW GK=17	FMM-4 250kW GK=22	
AN	0	1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11	12 13 14 15	16 17 18	19 20	18 19 20	9 10 11	
BP	0	0 GK 12	0 GK 16 18	0 GK 20	0 GK 10 14	0 GK 16	0 GK 18	0 GK 18	0 GK 24	
NGG	1	*	*	0 0	*	*	0 0	1 0 0	1 0	*
NGG	1	*	0 0 0	1 0	*	1 0 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0 0	*

Tabelle 3.8: Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.6 mit Ausschreibungsmenge 10 MW und Abrufwahrscheinlichkeit 0,5

	RLM-1 2MW GK=11	RLM-2 6 MW GK=13	RLM-3 4MW GK=19	FMM-1 400kW GK=3	FMM-2 500kW GK=7	FMM-3 300kW GK=9	FMM-5 500kW GK=15	FMM-6 800kW GK=19	FMM-4 250kW GK=22	
AN	0 1 2 3	4 5 6 7	8 9 10 11	12 13 14 15	16 17 18 19	20 21 22 23	24 25 26 27	28		
BP	0 GK 12	0 GK 16 18	0 GK 20	0 GK 6	0 GK 8	0 GK 10 14	0 GK 16	0 GK 20	0 GK 24	
NGG U	*	*	0 1 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	0 0 0	*
	64	144	17,17	16,09	8,05	5,36	0	0	0	0
NGG U	*	*	0 0 1	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	0 0 0	*
	72	168	3,2	18,2	17,4	8,85	6,71	0,24	0	0

(ebenso wie die günstigeren **FMM**-Spieler) sein Gebot zu einem beliebigen günstigeren Preis abgibt und damit sicherstellt, dass seine volle Leistung aggregiert wird. Alle anderen Spieler verhalten sich in **NGG 1** und **NGG 2** wie in **NGG 1** in Spiel 2.3. **NGG 3** entspricht **NGG 2** aus Spiel 2.3.

In **Spiel 2.5** aggregiert der **FMM** insgesamt²⁵ 3 MW. Obwohl das grenzpreissetzende Gebot dadurch nicht mehr voll bezuschlagt wird, sind die Gleichgewichtsstrategien von Spiel 2.5 identisch mit denen von Spiel 2.3 (siehe **Tabelle 3.7**).

Das Verhalten der **FMM**-Spieler wird nicht dadurch beeinflusst, dass in **NGG 1** nur 1 MW des grenzpreissetzenden, aggregierten 2-MW-Gebots bezuschlagt wird. Aufgrund der internen Zuschlagsregel (vgl. **Abbildung 3.3**) werden *FMM-Spieler 3* und *5*, die jeweils ein beliebiges Gebot kleiner dem **UP** abgeben, bei der Umverteilung des anteiligen Zuschlags vom übergeordneten **RLM** intern voll bezuschlagt. Da *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* auch anteilig am bezuschlagten Megawatt beteiligt sind, überbieten sie weiterhin ihre Grenzkosten bis knapp unterhalb der Grenzkosten von *RLM-Spieler 3*, um einen möglichst hohen **UP** zu erzielen.

Auch dass *RLM-Spieler 2* seine Grenzkosten überbietet und grenzpreissetzend wird, ist weiterhin ein Gleichgewicht (**NGG 2**). Obwohl er in diesem Spiel in **NGG 2** nur einen anteiligen Zuschlag über 5 MW von 6 MW erhält und seine Grenzkosten unter denen der *FMM-Spieler 6.1* und *6.2* liegen, hat *RLM-Spieler 2* in diesem Gleichgewicht keinen Anreiz, von seiner Strategie abzuweichen. Da der **FMM** 3 MW zu 0 ct/MW/h aggregiert, ist *RLM-Spieler 2* der einzige, der bei den vorliegenden Aktionsmengen potenziell einen **UP** größergleich seinen Grenzkosten von 13 ct/MW/h setzen kann. Er würde daher Verluste machen, wenn er seinen Gebotspreis senkt.

In **Spiel 2.6** sind die Grenzkosten der beiden grenzpreissetzenden Spieler *FMM-Spieler 6* und *RLM-Spieler 3* identisch, wobei die Leistung des aggregierten **FMM**-Gebots oder von *RLM-Spieler 3* jeweils zur Markträumung ausreicht. Die Gleichgewichte in **Tabelle 3.8** zeigen das gleiche, im Fall von **NGG 2** implizit kollusive Bieterverhalten der grenzpreissetzenden Spieler wie in Spiel 2.3 auf **FMM**-Ebene. Da nur einer von beiden den Zuschlag erhält, wenn sie ihre Leistung zu unterschiedlichen Preisen bieten, geben der gebotspreissetzende *FMM-Spieler 6* und *RLM-Spieler 3* ihr Gebot in beiden Gleichgewichten zum jeweils gleichen Preis ab und werden daher aufgrund von Preisgleichheit zufällig bezuschlagt.

In **NGG 1** bieten sie ihre Grenzkosten, in **NGG 2** überbieten sie diese, wobei alle Spieler **NGG 2** gegenüber **NGG 1** favorisieren (siehe Utilities in **Tabelle 3.8**). Da die beiden anderen **RLM**-Spieler Grenzkosten unterhalb des jeweiligen **UP** besitzen, bieten sie ihre Leistung zu einem beliebigen niedrigeren Preis. Die **FMM**-Spieler mit günstigeren Grenzkosten un-

²⁵mit der Leistung der in *RLM-Spieler 0* zusammengefassten **FMM**-Spieler aus Spiel 2.1

terbieten hingegen ihre Grenzkosten und bieten ihre Leistung zum minimalen Preis von 0 ct/MW/h an, obwohl sie mit jedem beliebigen Gebot unterhalb des UP voll aggregiert würden. Dies liegt daran, dass der FMM zwei 1-MW-Gebote zu unterschiedlichen Preisen aggregiert. Das günstigere zu 0 ct/MW/h wird am übergeordneten RLM in jedem Fall bezuschlagt. Das teurere, grenzpreissetzende Gebot wird hingegen nur zufällig mit der Wahrscheinlichkeit $1/5$ bezuschlagt. Es besteht daher für FMM-Spieler mit Grenzkosten unterhalb des UP ein Anreiz, ihre Grenzkosten zu unterbieten, um mit einem möglichst großen Anteil im günstigeren Gebot aggregiert zu werden.

3.2.6 Abgleich mit den Hypothesen

Dass die Inhomogenität der Güter im hierarchisch an die deutschlandweite FCR-Auktion angebotenen FMM dazu anreizt, die Grenzkosten zu unterbieten, wenn der UP mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit über den eigenen Grenzkosten liegt und (1) ein Überhang bei der Gebotsaggregation (Spiel 2.1, NGG 2 in Spiel 2.3 und 2.5, NGG 3 in Spiel 2.4) und/oder (2) die Wahrscheinlichkeit der zufälligen, anteiligen oder Nichtbezuschlagung aggregierter Gebote besteht (Spiel 2.7), wird durch die Ergebnisse dieser Modellierung bekräftigt. Andernfalls bieten nicht-grenzpreissetzende FMM-Spieler mit Grenzkosten unterhalb des UP in den betrachteten Szenarien ein beliebiges Gebot kleiner dem UP. Hypothese 3 wird somit in allen NGG der untersuchten Spiele bestätigt.

Dass RLM-Spieler, die nicht erwarten, grenzpreissetzend zu werden, in dieser Modellierung ein anderes Verhalten zeigen, als laut der Literatur [23, 50] in homogenen Einheitspreisauktionen erwartet (Hypothese 5), und ihre Grenzkosten auch unterbieten, bestätigt sich in den betrachteten Szenarien. Dies wird nicht auf die Einführung des FMM zurückgeführt, sondern auf die Modellierung als Spiel vollständiger Information. In den NGG besteht keine Unsicherheit über das Verhalten der Gegenspieler und, da in den betrachteten Szenarien nur echt unterschiedliche Gleichgewichte in reinen Strategien existieren, auch keine Unsicherheit über den UP und die daraus resultierende Utility.

Aus diesem Grund orientiert sich das in den Gleichgewichten beobachtbare Verhalten aller Spieler auch (anders als in den Hypothesen formuliert) nicht am fiktiven UP, sondern am tatsächlichen, für jedes NGG sicher bekannten UP. Dies wird an den Gleichgewichtsstrategien der grenzpreissetzenden FMM- und RLM-Spieler deutlich (NGG 2 in Spiel 2.3 und 2.5 sowie in NGG 3 in Spiel 2.4). So kommt es in NGG 2 in Spiel 2.5 zu einem ineffizienten, nicht erwarteten Gleichgewicht, in dem *RLM-Spieler 2* grenzpreissetzend und nur anteilig bezuschlagt wird, obwohl seine Grenzkosten günstiger als die der ebenfalls bezuschlagten *FMM-Spieler 5, 6.1* und *6.2* sind. Dass *FMM-Spieler 5, 6.1* und *6.2* bei

einem bekannten **UP** oberhalb ihrer Grenzkosten diese mit einem minimalen Gebotspreis unterbieten, ist durch die in der hierarchischen Verknüpfung der beiden Auktionen begründete Inhomogenität bedingt (vgl. [Abschnitt 3.1.3](#)) und führt zu einer ebenfalls ineffizienten anteiligen Gebotsaggregation am **FMM**.

Wenn das Wort *fiktiv* gestrichen wird, behalten [Hypothese 4](#) und [Hypothese 6](#) ihre Gültigkeit für *grenzpreissetzende* **RLM**- und **FMM**-Spieler. Diese verhalten sich wie in homogenen²⁶ Einheitspreisauktionen erwartet und überbieten ihre Grenzkosten so weit, wie es sie nicht den Zuschlag kostet. **FMM**- und **RLM**-Spieler mit Grenzkosten *oberhalb* des **UP** sind hingegen indifferent gegenüber allen Aktionen, für die sie definitiv keinen Zuschlag erhalten; darunter auch die Aktion, ihre volle Leistung zu einem Preis *gleich* ihren Grenzkosten zu bieten. Auch dieses Gleichgewichtsverhalten wird auf die Modellierung als Spiel vollständiger Information zurückgeführt und stimmt im Rahmen der betrachteten Szenarien mit den Ergebnissen aus [Modellierung 1](#) überein. Da zu allen Aktionen, für die definitiv kein Zuschlag erteilt wird, auch das Unterbieten der Grenzkosten, aber Überbieten des **UP** sowie ein beliebig hohes, von den Grenzkosten des nächstteureren Spielers unabhängiges Überbieten der Grenzkosten zählt, sind weitere unerwartete Gleichgewichtsstrategien denkbar, die sich ebenfalls auf die Modellierung als Spiel vollständiger Information zurückführen ließen. Die Existenz solcher unerwarteten Nash-Gleichgewichte wurde mit der gewählten Parametrierung allerdings nicht überprüft.

²⁶Für grenzpreissetzende **FMM**-Spieler besteht trotz der Inhomogenität der Güter am hierarchisch an die deutschlandweite **FCR**-Auktion angebotenen **FMM** kein Anreiz, ihre Grenzkosten zu unterbieten, da sie damit den **UP** senken und ihren Gewinn schmälern würden (vgl. [Abschnitt 3.1.3](#)).

3.3 MODELLIERUNG 3

In [Modellierung 2](#) wurden z.T. Abweichungen des Gleichgewichtsverhaltens der [RLM](#)-Spieler vom in homogenen Einheitspreisauktionen erwarteten Verhalten [[23](#), [50](#)] festgestellt, die auf die Limitation der Modellierung als Spiel vollständiger Information zurückgeführt werden. Um Unsicherheiten über die Anlagenzustände und Kosten der Marktakteure abzubilden, wird das Spiel aus [Abschnitt 3.2](#) im Folgenden als Bayes-Spiel unvollständiger Information modelliert. Die Annahmen [16](#) und [17](#) gelten weiterhin.

3.3.1 Spieldefinition

Entsprechend der formalen [Definition](#) eines Bayes-Spiels wird das Basisspiel definiert:

Definition 10. *FMM und RLM als Bayes-Spiel unvollständiger Information*
*Gegeben seien die Ausschreibungsmenge TA und die Abrufwahrscheinlichkeit p_{call} . Das *FMM-RLM-Bayes-Spiel* ist ein Tupel $G = (N, A, \Theta, P, u)$, mit*

- $N = N_{RLM} \cup N_{FMM}$: endliche Menge der Spieler, wobei $N_{RLM} \cap N_{FMM} = \{\}$ mit
 - N_{RLM} : Menge der Akteure, die vom [ÜNB](#) für die Teilnahme am zentralen [FCR](#)-Markt präqualifiziert sind, außer dem [FMM](#);
 - N_{FMM} : Menge der Akteure, die vom [VNB](#) für die Teilnahme am [FMM](#) präqualifiziert sind;
- $A = A_{RLM} \cup A_{FMM}$: Aktionsraum, wobei $A_{RLM} \cap A_{FMM} = \{\}$, mit
 - $A_{RLM} = (A_1 \times \dots \times A_{n_{RLM}})$, wobei $A_i \in A_{RLM}$ die endliche, diskrete Menge der Spieler $i \in N_{RLM}$ zur Verfügung stehenden [RLM](#)-Gebote ist. Ein [RLM](#)-Gebot $a_i \in A_i$ besteht aus einer Leistungsmenge und einem Leistungspreis (ba_i, bp_i) ;
 - $A_{FMM} = (A_{n_{RLM}+1} \times \dots \times A_n)$, wobei $A_i \in A_{FMM}$ die endliche, diskrete Menge der Spieler $i \in N_{FMM}$ zur Verfügung stehenden [FMM](#)-Gebote ist. Ein [FMM](#)-Gebot $a_i \in A_i$ setzt sich aus einer Leistungsmenge $ba_{i,t}$ und einem Leistungspreis $bp_{i,t}$ je Zeitslot t zusammen;
- $\Theta = (\Theta_1 \times \dots \times \Theta_n)$: Typraum, wobei Θ_i die Menge der für Spieler $i \in N$ denkbaren Anlagenzustände und Kosten umfasst;
- $P : \Theta \rightarrow [0, 1]$: Wahrscheinlichkeitsverteilung p über alle denkbaren Typkombinationen, wobei die Wahrscheinlichkeiten der Typen unterschiedlicher Spieler voneinander unabhängig sind,

- $u = (u_1, \dots, u_n)$: Vektor der Utilityfunktionen, wobei sich die Utility $u_i : A \times \Theta \mapsto \mathbb{R}$ von Spieler $i \in N$ berechnet durch:

$$u_i(a, \theta_i, TA) = \begin{cases} d \cdot ba'_i(a, TA) \cdot (UP(a, TA) - cMW_{\theta_i} - cMWh_{\theta_i} \cdot p_{call}) & i \in N_{RLM} \\ \frac{d}{\tau} \cdot \sum_{t=1}^{\tau} ba'_{i,t}(a, TA) \cdot (UP(a, TA) - cMW_{\theta_i,t} - cMWh_{\theta_i,t} \cdot p_{call}) & i \in N_{FMM} \end{cases} \quad (3.5)$$

a	Vektor der gewählten Aktionen aller Spieler (Aktionsprofil $a = (a_1, \dots, a_n) \in A$)
θ_i	Typ von Spieler $i \in N$
TA	Ausschreibungsmenge (Tender Amount) in der <i>FCR</i> -Auktion am übergeordneten <i>RLM</i> in MW
ts	Dauer einer Produktzeitscheibe in Stunden (zurzeit 4 Stunden [6])
τ	Anzahl Zeitslots, in die die Produktzeitscheibe am <i>FMM</i> unterteilt wird
$ba'_i(a)$	Bezuschlagte Leistung von Spieler $i \in N_{RLM}$: $ba'_i(a, TA) \leq ba_i \in a_i \in A_{i,\theta_i} \subseteq A_i$ in MW
$ba'_{i,t}(a)$	Bezuschlagte Leistung von Spieler $i \in N_{FMM}$ in Zeitslot t : $ba'_{i,t}(a, TA) \leq ba_{i,t} \in a_i \in A_{i,\theta_i} \subseteq A_i$ in MW
UP	Einheitspreis der <i>FCR</i> -Auktion am übergeordneten <i>RLM</i> [ct/MW/h]
cMW_{θ_i}	Vorhaltungskosten von Spieler $i \in N_{RLM}$ für bezuschlagte Regelleistung in ct/MW/h abhängig von seinem Typ $\theta_i \in \Theta_i$
$cMWh_{\theta_i}$	Erbringungskosten von Spieler $i \in N_{RLM}$ für abgerufene Regelleistung in ct/MWh abhängig von seinem Typ $\theta_i \in \Theta_i$
$cMW_{\theta_i,t}$	Vorhaltungskosten von Spieler $i \in N_{FMM}$ für in Zeitslot t bezuschlagte Regelleistung in ct/MW/h abhängig von seinem Typ $\theta_i \in \Theta_i$
$cMWh_{\theta_i,t}$	Erbringungskosten von Spieler $i \in N_{FMM}$ für in Zeitslot t abgerufene Regelleistung in ct/MWh abhängig von seinem Typ $\theta_i \in \Theta_i$
p_{call}	Wahrscheinlichkeit, dass die bezuschlagte Leistung vollständig abgerufen wird: $p_{call} \in]0, 1]$

Bayes-Spiele ermöglichen die Modellierung privater Spielereigenschaften über das Konzept der Typen. Der Typ eines Spielers umfasst hier die (z.B. nutzerverhalten- und/oder wetterabhängige) vermarktbarbare Leistung und Grenzkosten. Je nach Typ θ_i wählt ein Spieler i sein Gebot a_i daher aus einer anderen Typ-Aktionsmenge $A_{i,\theta_i} \subseteq A_i$ aus, die der privaten Spielereigenschaft entsprechend Aktionen mit anderen Gebotsleistungen und/oder anderen Gebotspreisen enthält.

Aufbauend auf [Annahme 10](#) wird das Bayes-Spiel als *ex interim*-Spiel betrachtet:

Annahme 19. *Das in [Definition 10](#) definierte Spiel ist ein *ex interim*-Spiel.*

Um das Spiel als *Bayesian Action-Graph Game* ([BAGG](#)) modellieren und effizient lösen zu können, müssen diese Typwahrscheinlichkeiten voneinander unabhängig sein [46]. Daher muss des Weiteren die folgende Annahme getroffen werden:

Annahme 20. *Die Flexibilitäten und Grenzkosten der Akteure am [FMM](#) und in der [FCR](#)-Auktion am übergeordneten [RLM](#) werden von voneinander unabhängigen, stochastischen Effekten beeinflusst.*

Unter [Annahme 20](#) berechnet sich die Wahrscheinlichkeit für ein Typprofil als das Produkt der einzelnen Typwahrscheinlichkeiten je Spieler. Aus der Kenntnis des eigenen Typs kann ein Spieler in diesem Modell daher keine Rückschlüsse auf den derzeitigen Typ eines Gegenspielers treffen. So können die Aktionsmengen, Typen und deren Wahrscheinlichkeiten je Spieler voneinander unabhängig definiert werden.

3.3.2 Implementierung

Da *GAMUT* bisher keine [BAGG](#)-Instanzen generieren kann, wird zunächst eine abstrakte Klasse *BayesActionGraphGame* angelegt, die von der bisher verwendeten *ActionGraphGame*-Klasse erbt, aber zusätzliche Parameter für den Typraum und die Wahrscheinlichkeiten der Typen enthält und die *writeGame*-Methode überschreibt, die das Spiel im [BAGG](#)-Format ausgibt. *GAMUT* wird zudem um eine Spielklasse *FMMRLMBayesGame* erweitert, die von der *BayesActionGraphGame* erbt. Diese Klasse verarbeitet Parameter und erzeugt basierend auf einer *Action-Graph*-Repräsentation entsprechende [BAGG](#)-Instanzen des in [Definition 10](#) definierten Basisspiels.

Kommandozeilenparameter

Eine Instanz des in [Definition 10](#) definierten Basisspiels kann z.B. durch die Ausführung der *gamut.jar*-Datei mit der folgenden Kommandozeile

```
java -jar gamut.jar -g FMMRLMBayesGame -f_config
"C:\Users\Spiel_3_Config.txt" -output SpecialOutput
```

und einer Konfigurationsdatei²⁷ erzeugt werden. Im Vergleich zur Konfigurationsdatei für das Basisspiel aus [Abschnitt 3.2.2](#) sind die inneren Parameteroptionen von `RLMplayerclasses` und `FMMplayerclasses` für Grenzkosten und Aktionen (`MW_cost`, `MWh_cost` und `actions`) nun innere Argumente einer neuen Parameteroption `types`. `types` erwartet außerdem als neues Argument die innere Parameteroption `distr`, deren Argument die Wahrscheinlichkeit dieses Typs angibt (Double, $0 \leq \text{distr} \leq 1$). Die Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Typen einer Spielerklasse muss 1 ergeben. Bei der Wahl der Aktionen und der Ausschreibungsmenge wird weiterhin erwartet, dass die Ausschreibungsmenge für alle möglichen Aktionsprofile erfüllt werden kann.

Infolge eines solchen Aufrufs werden zunächst die Parameter eingelesen und die `FMMRLMBayesGame`-Klasse initialisiert. Dann wird der *Action-Graph* erzeugt, und die Utilities für alle ANs und alle möglichen Konfigurationen werden berechnet. Im Zuge der Initialisierung werden die Parameter der `BayesActionGraphGame`-Klasse bestimmt, darunter die bisherigen Parameter des *Action-Graphs* (vgl. [Abschnitt 3.2](#)), aber auch die Typwahrscheinlichkeiten und die Typ-Aktionsmengen jeder Spielerklasse. Diese werden in der `.game`-Datei hinterlegt und von den Algorithmen zur Bestimmung von Nash-Gleichgewichten verwendet (vgl. [Abbildung B.5](#)), haben aber keinen Einfluss auf den Aufbau des *Action-Graphs*.

Der Action-Graph

Der *Action-Graph* des BAGG wird wie in [Abschnitt 3.2.2](#) erzeugt. Spielerklassenübergreifend und unabhängig von ihren Typwahrscheinlichkeiten werden identische Aktionen von Spielern mit identischen Utilityfunktionen, d.h. Grenzkosten, in einem AN zusammengefasst. ANs, die sich nur in ihrer Utilityfunktion unterscheiden, werden über einfache Aggregatoren aggregiert. Die `FMMRLMGame`- und die `FMMRLMBayesGame`-Klasse verwenden hierzu dieselbe Klasse `FMMRLMActionGraph` und die gleichen Methoden zur Initialisierung und Generierung des Graphen sowie zur Berechnung der Utilities für alle möglichen ANs und Konfigurationen (siehe auch [Algorithmus 2](#)).

3.3.3 Hypothesen

Das in [Definition 10](#) definierte Basisspiel bildet Unsicherheiten über die Grenzkosten und Flexibilität der Spieler in privaten Typen ab. Dabei kann zeitgleich Unsicherheit über Grenzkosten *und* Flexibilität eines Spielers herrschen. Um die Auswirkungen der Unsicherheiten auf die MOL der Grenzkosten zu beleuchten und daraus Hypothesen abzuleiten,

²⁷Im [Anhang C](#) findet sich eine Konfigurationsdatei zur Erzeugung einer Instanz der Basisspielklasse `FMMRLMBayesGame` mit `GAMUT` in [Abbildung C.9](#).

soll die Variation der Grenzkosten und die Variation der Flexibilitäten der Anschaulichkeit halber einleitend voneinander entkoppelt betrachtet werden:

Variieren die Grenzkosten der Spieler über ihre Typen (bei gleichbleibender Flexibilität), so werden die Einträge in der **MOL** in Richtung der Ordinate (Gebotspreis) (gestreckt (höhere Grenzkosten) oder gestaucht (niedrigere Grenzkosten) und wechseln potentiell die Reihenfolge. Es herrscht Unsicherheit über (1) die Utilityfunktionen der Gegenspieler, die potenziell die Wahl der Gebotspreise beeinflussen, und somit über (2) die Grenzkosten aggregierter **FMM**-Gebote und (3) den (fiktiven) **UP**.

Variiert die vermarktbare Leistung der Spieler über ihre Typen (bei gleichbleibenden Grenzkosten), so werden die Einträge in der **MOL** in Richtung der Abszisse (Leistung P) gestreckt (höhere Leistung) oder gestaucht (niedrigere Leistung). Sie wechseln zwar nicht die Reihenfolge; je höher die Grenzkosten, desto unsicherer ist jedoch, ob die Leistung eines Akteurs im bezuschlagten Bereich der **MOL** liegt oder von günstigeren Akteuren verdrängt wird. Es herrscht keine Unsicherheit über die Utilityfunktionen, aber über (1) die Flexibilität und somit die Gebotsleistung der Gegenspieler. Dadurch herrscht Unsicherheit darüber, (2) wie viele Gebote am **FMM** zu welchen fiktiven Gebotspreisen aggregiert werden können und ob dabei ein Überhang entsteht, sowie über (3) den fiktiven **UP**.

Auch in einem Spiel unvollständiger Information ist die Definition des Spiels, d.h. die Anzahl Spieler, deren Typen und Typwahrscheinlichkeiten sowie ihre typabhängigen Aktionsmengen und Utilityfunktionen bekannt. Wie beschrieben, ist dennoch nicht mehr zwingend²⁸ jederzeit bekannt, welcher Spieler in der **MOL** der Grenzkosten grenzpreissetzend würde. Aufbauend auf diesen und den in **Abschnitt 3.2.3** angestellten Überlegungen werden für Instanzen des in **Definition 10** definierten Basisspiels die folgenden Hypothesen formuliert:

Hypothese 7. *In den Nash-Gleichgewichten (reinen wie gemischten) herrscht Unsicherheit über den **UP**.*

In einem Nash-Gleichgewicht in reinen Strategien wählt ein Spieler in der gleichen Entscheidungssituation immer die gleiche Aktion [25]. Hier (*ex interim*-Spiel, **Annahme 19**) ist Spielern der eigene Typ bekannt. Typabhängig befinden sie sich in (aus ihrer Sicht) differenzierbaren Entscheidungssituationen. Eine reine Strategie, in der ein Spieler i je Typ

²⁸Es sind auch Parametrierungen des in **Definition 10** definierten Basisspiels möglich, die aufgrund der Wahl der Typen von vornherein nur bedingt oder gar keine Unsicherheiten abbilden. Eine Instanz des in **Definition 10** definierten Basisspiels ist ein Spiel *vollständiger* Information, wenn jeder Spieler nur einen Typ mit der Typwahrscheinlichkeit 1 besitzt. Die Hypothesen beziehen sich auf Parametrierungen, in denen jeder Spieler mindestens zwei Typen besitzt, die Unsicherheit über die Grenzkosten und/oder Flexibilität eines Spielers abbilden.

immer die gleiche, aber typabhängig unterschiedliche Aktionen wählt, wirkt auf Gegenspieler (denen im *ex interim*-Spiel der Typ von Spieler i unbekannt ist) jedoch wie eine gemischte Strategie, bei der die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Aktionen seiner Typwahrscheinlichkeitsverteilung entspricht. Daher kann auch in reinen Nash-Gleichgewichten Unsicherheit über den **UP** herrschen.

Hypothese 8. *In Nash-Gleichgewichten, in denen Unsicherheit darüber herrscht, ob der Markt zu einem **UP** unterhalb, gleich oder oberhalb ihrer Grenzkosten geräumt wird, bieten **RLM**-Spieler mindestens ihre Grenzkosten.*

Wie in [Abschnitt 3.2.3](#) beschrieben, nehmen die Akteure des übergeordneten **RLM** direkt an der Einkaufsauktion mit homogenen Gütern teil. Daher wird erwartet, dass sie sich, sofern Unsicherheit über den **UP** besteht, wie laut der Literatur [[23](#), [50](#)] zu homogenen Einheitspreisauktionen verhalten und ihre Grenzkosten (über)bieten (wenn die Wahrscheinlichkeit besteht, grenzpreissetzend zu werden). Da die Grenzkosten der Gegenspieler mit Unsicherheiten behaftet sein können, wird keine konkretere Hypothese dazu getroffen, wie weit die **RLM**-Spieler ihre Grenzkosten überbieten.

Hypothese 9. *In Nash-Gleichgewichten, in denen Unsicherheit darüber herrscht, ob der Markt zu einem **UP** unterhalb, gleich oder oberhalb ihrer Grenzkosten geräumt wird, bieten **FMM**-Spieler maximal ihre Grenzkosten.*

Es wurde in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich erläutert, dass am **FMM** eine Inhomogenität vorliegt, die Anreize bietet, die Grenzkosten ggf. zu unterbieten. Herrscht Unsicherheit über die am **FMM** aggregierbaren Gebote und den resultierenden **UP** am übergeordneten **RLM**, lässt sich zum Zeitpunkt der Gebotsabgabe ggf. nicht antizipieren, ob ein **FMM**-Akteur in der **MOL** der Grenzkosten gebots- und grenzpreissetzend wird und seine Grenzkosten überbieten sollte. Daher wird angenommen, dass er im Zweifelsfall seine Grenzkosten (unter-)bietet (um die Chance auf eine Aggregation in einem günstigen Gebot des **FMM** sowie einen Zuschlag desselben zu erhöhen).

3.3.4 Parametrierung

Im Folgenden wird ein synthetisches Szenario betrachtet, das einige der mit den vorherigen Modellierungen betrachteten Spielsituationen in einem Szenario mit Unsicherheit über die Anzahl Bieter²⁹, ihre Aktionsmengen und Utilityfunktionen zusammenfasst. Die Konfigurationsdatei dieses Spiels findet sich in [Abbildung C.9](#) in [Anhang C](#).

²⁹Die Unsicherheit über die Anzahl Bieter in einer Auktion kann insofern abgebildet werden, als dass Spieler auch Typen mit einer Flexibilität von 0 kW besitzen, in denen ihre Aktionsmenge nur die Aktion *kein Gebot* umfasst.

- **Anzahl Zeitslots:** 2
- **Abrufwahrscheinlichkeit:** 0,5
- **Ausschreibungsmenge:** 6 MW
- **Anzahl RLM-Spieler:** 2
- **Anzahl FMM-Spieler:** 3
- **Anzahl Typen je Spieler:** 2
 - **Typen der RLM-Spieler:** Über die Typen der RLM-Spieler werden ihre Grenzkosten und damit ihre Reihenfolge in der MOL variiert. Die gleichbleibende Flexibilität wird so gewählt, dass die RLM-Spieler in Summe die Ausschreibungsmenge ohne den FMM erbringen können.
 - **Typen der FMM-Spieler:** Über die Typen der FMM-Spieler wird ihre Flexibilität und somit die aggregierbare Leistung des FMM variiert, die für alle Typprofile kleiner als die Ausschreibungsmenge ist.

Die Grenzkosten der FMM-Spieler und die Flexibilitäten der RLM-Spieler werden nicht zusätzlich variiert, um das Spiel übersichtlich zu halten. Der Typraum wird so gewählt, dass (je nachdem, welches Typprofil vorliegt) nach der MOL der Grenzkosten sowohl RLM- als auch FMM-Spieler grenzpreissetzend werden können.

- **Aktionen je Typ je Spieler:** Jeder Spieler hat je Typ mehrere³⁰ von seinen Grenzkosten abhängige Gebotspreise zur Auswahl: die Möglichkeit, Leistung (1) zu 0 ct/MW/h zu bieten, (2) zu seinen Grenzkosten zu bieten, sowie (3) seine Grenzkosten zu überbieten zu einem Preis knapp unter *möglichen* Grenzkosten von je nach Typ ggf. teureren RLM- und/oder FMM-Spielern. Dabei werden die Gebotspreise nach oben hin durch einen hypothetischen Spieler mit typunabhängigen Grenzkosten von 16 ct/MW/h gedeckelt (d.h. der maximale Gebotspreis eines Spielers beträgt 15 ct/MW/h). Jedem Spieler steht je Typ jeweils nur eine Gebotsmenge zur Auswahl, die der maximalen Leistung entspricht, die er im Fall einer vollständigen Bezuschlagung erbringen kann. Insgesamt kann somit jeder Spieler³⁰ je Typ zwischen mindestens drei Aktionen (einer Gebotsmenge zu mindestens drei unterschiedlichen -preisen) wählen.
- **Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Typen je Spieler:** gleichverteilt³¹

In diesem Szenario aggregiert der FMM abhängig von den Typen seiner Spieler 1 MW mit verschiedenen Überhängen, 1 MW ohne Überhang oder 2 MW mit 100 kW Überhang,

³⁰Ausnahme: *FMM-Spieler 1* kann im Fall von Typ 2 kein Gebot abgeben.

³¹Ausnahme: *FMM-Spieler 1* kann mit Wahrscheinlichkeit 0,1 kein Gebot abgeben (Typ 2), mit Wahrscheinlichkeit 0,9 liegt Typ 1 vor.

wobei die Grenzkosten der aggregierten Gebote bei mindestens 7 ct/MW/h und maximal 11ct/MW/h für das erste Megawatt und bei 11ct/MW/h für das zweite Megawatt liegen. Abhängig vom Typprofil könnten, wenn alle Spieler ihre Grenzkosten böten, sowohl *RLM-Spieler 1* (nur mit Typ 2), *RLM-Spieler 2* als auch *FMM-Spieler 2* und *3* grenzpreissetzend werden. Dabei könnten *RLM-Spieler 2* (nur mit Typ 1) und *FMM-Spieler 2* mit übereinstimmenden Grenzkosten von 7 ct/MW/h auch *gleichzeitig* grenzpreissetzend werden. *RLM-Spieler 1* besitzt in diesem Setting eine gewisse Marktmacht, da zur Erfüllung der Ausschreibungsmenge von 6 MW für jedes mögliche Typprofil mindestens 2 MW seiner Flexibilität benötigt und daher unabhängig vom Gebotspreis bezuschlagt werden.

3.3.5 Ergebnisse und Abgleich mit den Hypothesen

Aus der Konfigurationsdatei in `autoreffig:05FMMBayesConfig.txt` in [Anhang C](#) wird Spiel 3 mit *GAMUT* als Instanz der neu implementierten Spielklasse *FMMRLMBayesGame* generiert. Wie in den vorangegangenen Abschnitten werden die Nash-Gleichgewichte (NGG) mit den Algorithmen *gambit-enumpure* und *gambit-enumpoly* bestimmt. Die Ergebnisse sind in [Tabelle 3.9](#) dargestellt. *gambit-enumpure* liefert drei echt unterschiedliche NGG³² in reinen Strategien. Anders als für die zuvor betrachteten Spiele vollständiger Information findet *gambit-enumpoly* darüber hinaus ein viertes NGG³³ in gemischten Strategien, das reine Strategien aus NGG 2 und 3 kombiniert. NGG 2, 3 und 4 sind dennoch echt unterschiedliche Gleichgewichte, da sie zu unterschiedlichen Auktionsergebnissen, d.h. Einheitspreisen und Zuschlägen für die einzelnen Spieler, führen.

In NGG 1, 2 und 4 herrscht Unsicherheit über den UP, der je nach Typprofil 10 ct/MW/h, 15 ct/MW/h oder (nur im Fall von NGG 2 und 4 auch) 12 ct/MW/h betragen kann. In NGG 3 wird der Markt hingegen immer zu 15 ct/MW/h geräumt, wodurch [Hypothese 7](#) widerlegt wird. In diesem NGG gibt der grenzpreissetzende *RLM-Spieler 2* typunabhängig das gleiche, maximal teure Gebot ab. Da keine Unsicherheit über den UP herrscht, verhalten sich die Spieler wie in einem Spiel vollständiger Information (vgl. [Abschnitt 3.2.5](#)). *RLM-Spieler 1*, dessen Grenzkosten für beide seiner Typen unterhalb des UP liegen, bietet seine Leistung zu einem beliebigen Preis günstiger als der UP. Alle *FMM-Spieler* mit Grenzkosten unterhalb des UP bieten ihre Leistung aufgrund der Inhomogenität in der Aggregationsauktion am *FMM* zum minimalen Preis von 0 ct/MW/h. *FMM-Spieler 3* stellt mit Typ 2 eine Ausnahme dar, da es eine positive Wahrscheinlichkeit gibt, dass der *FMM* 2 MW aggregiert und den ansonsten gebotspreissetzenden *RLM-Spieler 2* aus

³²NGG 2 fasst drei, NGG 3 fasst 3 · 4 = 12 Nash-Gleichgewichte in reinen Strategien zusammen.

³³NGG 4 fasst drei Nash-Gleichgewichte in gemischten Strategien zusammen.

den bezuschlagten Geboten verdrängt, wenn *FMM-Spieler 3* 15 ct/MW/h unterbietet. Im Durchschnitt erhält *FMM-Spieler 3* eine höhere Auszahlung, wenn er seine Grenzkosten um 4 ct/MW/h überbietet und (falls der *FMM* 2 MW aggregiert) aufgrund von Preisgleichheit mit *RLM-Spieler 2* nur mit der Wahrscheinlichkeit³⁴ $1/3$ einen Zuschlag erhält, als wenn er das nächstgünstigere Gebot von 12 ct/MW/h auswählt, mit dem er immer einen Zuschlag erhält, aber nur einen Gewinn von 1 ct/MW/h macht.

Zur Untersuchung der Hypothesen 8 und 9 können somit nur *NGG* 1, 2 und 4 herangezogen werden. *RLM-Spieler 1* mit Typ 1 widerlegt *Hypothese 8* mit seinem Bieterverhalten in allen *NGG*. Insbesondere in *NGG* 1 besteht im Fall von Typ 1 seine einzige Gleichgewichtsstrategie darin, seine Grenzkosten zu unterbieten³⁵. Allerdings stellt *RLM-Spieler 1* mit Typ 1 eine Ausnahme dar. Seine Grenzkosten sind günstiger als alle möglichen anderen Grenzkosten der *RLM-Spieler* (7, 9 und 13 ct/MW/h) und als alle möglichen Gebotsaggregation des *FMM* (7 oder 11 ct/MW/h), wobei er die Ausschreibungsmenge allein nicht erfüllen kann. *RLM-Spieler 2* sowie *RLM-Spieler 1* mit Typ 2 verhalten sich hingegen wie in *Hypothese 8* bzw. einer homogenen Einheitsauktion erwartet. Es ist hervorzuheben, dass sie dabei zum Teil auch die möglichen nächstteureren Grenzkosten der Gegenspieler überbieten. Dass *RLM-Spieler 1* seine Grenzkosten mit Typ 2 in *NGG* 1 und 2 maximal überbietet, lässt sich mit seiner in *Abschnitt 3.3.4* beschriebenen Marktmacht erklären. Auch wenn er nur anteilig bezuschlagt wird, lohnt es sich, seine Marktmacht zu nutzen, um den *UP* in die Höhe zu treiben. Dies plausibilisiert wiederum, dass der nach Grenzkosten günstigere *RLM-Spieler 2* mit Typ 1 die Grenzkosten von *RLM-Spieler 1* mit Typ 2 (9 ct/MW/h) überbietet.

Das Verhalten von *FMM-Spieler 2* mit Typ 2 in *NGG* 1 ebenso wie das Verhalten von *FMM-Spieler 3* mit Typ 2 in *NGG* 2 und 4 widerlegt außerdem *Hypothese 9*. Mit diesen Gleichgewichtsstrategien können sie grenzpreissetzend werden. Böten sie stattdessen (maximal) ihre Grenzkosten und würden grenzpreissetzend, so würden sie keinen Gewinn machen.

In allen anderen Situationen bieten die *FMM-Spieler* ihre Leistung zum minimalen Preis von 0 ct/MW/h. Die Wahrscheinlichkeit (*ex ante*), dass der *FMM* nur 1 MW aggregiert und dabei kein Überhang entsteht, beträgt $0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,025$. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei der Gebotsaggregation am *FMM* ein Überhang entsteht, beträgt somit mit 97,5% und setzt einen Anreiz für *FMM-Spieler*, ihre Grenzkosten zu unterbieten.

³⁴Das erste MW des *FMM* wird in *NGG* 3 zu 0 ct/MW/h aggregiert. *RLM-Spieler 1* bietet 4 MW zu einem Preis kleiner 15 ct/MW/h. Daher steht für die grenzpreissetzenden Spieler im Fall von Preisgleichheit nur 1 MW zur Erfüllung der Ausschreibungsmenge aus.

³⁵Die erwartete Utility für *RLM-Spieler 1* mit Typ 1 beträgt in *NGG* 1 tatsächlich für alle drei möglichen Aktionen 11 ct. *RLM-Spieler 1* ist daher in diesem Fall theoretisch indifferent gegenüber seinen Aktionen. Ein *NGG* besteht allerdings nur für den Fall, dass er seine Leistung zu 0 ct/MW/h bietet.

Im Zuge dessen ist insbesondere das Gleichgewichtsverhalten von *FMM-Spieler 3* mit Typ 1 sowie in *NGG 1* auch mit Typ 2 hervorzuheben. Es besteht eine positive Wahrscheinlichkeit, dass der Markt zu 10 ct/MW/h geräumt wird. Der *FMM* aggregiert definitiv 1 MW zu einem Gebotspreis von 0 ct/MW/h und im Fall von *NGG 1* und Typ 2 ggf. ein weiteres 1-MW-Gebot zu 10 ct/MW/h. An beiden Gebotsaggregationen ist *FMM-Spieler 3* mit einem Teil seiner Leistung beteiligt. Er geht das Risiko ein, in einer Auktion einen Zuschlag über 10 ct/MW/h zu erhalten und somit einen Verlust von 1 ct/MW/h multipliziert mit der bezuschlagten Leistung zu machen. Die im Durchschnitt erwartete Utility für das Unterbieten der Grenzkosten ist allerdings höher als für alternative Strategien in den jeweiligen Gleichgewichten³⁶. Denn sobald der Markt zu 15 ct/MW/h geräumt wird, profitiert *FMM-Spieler 3* davon, seine Grenzkosten unterboten zu haben und mit einem maximal großen Anteil in den günstigeren Geboten des *FMM* aggregiert worden zu sein.

In allen vier *NGG* ist das Bieterverhalten zum Teil anders als erwartet. Dadurch, dass die Spieldefinition, die die Typen und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen umfasst, allgemein bekannt ist, können Spieler auch in diesem Spiel unvollständiger Information Rückschlüsse auf die Gebotsstrategien der Gegenspieler ziehen. Ihre Gegenspieler verhalten sich aus ihrer Sicht stochastisch.

³⁶Für *FMM-Spieler 3* mit Typ 2 beträgt die erwartete Utility in *NGG 1* z.B. 5,17 ct (auf zwei Nachkommastellen gerundet). Würde *FMM-Spieler 3* mit Typ 2 von dieser Strategie abweichen, während alle anderen Spieler sich unverändert verhalten, würde er im Durchschnitt folgende Utility erzielen: 2,82 ct beim Bieten der Grenzkosten, 3,14 ct bei einem Gebotspreis von 12 ct/MW/h und 2,31 ct bei einem Gebotspreis von 15 ct/MW/h.

Tabelle 3.9: Nash-Gleichgewichte für Spiel 3 mit Ausschreibungsmenge 6 MW

	RLM-Spieler 1								RLM-Spieler 2							
p	0,5				0,5				0,5				0,5			
	4MW				4MW				2MW				2MW			
GK	5				9				7				13			
AN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
BP	0	GK	6	0	GK	10	12	15	0	GK	8	10	15	0	GK	15
NGG	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
NGG	*			0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
NGG	*			*			0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
NGG	*			0	0	0	0,876	0,124	0	0	0	0,524	0,476	0	0	1

FMM-Spieler 1				FMM-Spieler 2								FMM-Spieler 3								
0,9		0,1		0,5				0,5				0,5				0,5				p
400kW		0kW		600kW				900kW				400kW				800kW				
3		3		7				7				11				11				GK
17	18	19	0	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	AN
0	GK	6	x	0	GK	8	10	0	GK	8	10	0	GK	12	15	0	GK	12	15	BP
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	NGG
1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	NGG
1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	NGG
1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,729	0,271	NGG

AN: Action-Node; **BP:** Gebotspreis [ct/MW/h]; **GK:** Grenzkosten [ct/MW/h]; **NGG:** Konfiguration der ANs im Nash-Gleichgewicht; **U:** Utility [ct]

4

Auswertung

Die spieltheoretische Modellierung wird in dieser Arbeit als Methode vorgeschlagen, um das strategische Verhalten rationaler, nutzenbasierter Agenten in der verteilten, hierarchisch an den zentralen RLM für FCR angebotenen Auktion am FMM zu untersuchen. Für ein potenzielles Marktdesign wurden drei mögliche spieltheoretische Modellierungen entwickelt und Gleichgewichtsstrategien in exemplarischen Szenarien untersucht. Die Erkenntnisse dieses spieltheoretischen Durchstichs werden nun zunächst zur Beantwortung der in [Abschnitt 1.3](#) formulierten Forschungsfragen herangezogen, an die sich ein kritischer Vergleich der spieltheoretischen Modellierungen aus [Kapitel 3](#) mit dem agentenbasierten Entwurf aus [Abschnitt 2.2](#) anschließt.

4.1 BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN

1. Welche strategisch relevanten Eigenschaften besitzt der FMM aufgrund seiner verteilten Struktur und wie können diese sinnvoll in einem spieltheoretischen Modell abgebildet werden?

In [Abschnitt 2.1.1](#) wurde skizziert, wie sich eine verteilte und dennoch verdeckte Auktion auf einer Blockchain implementieren lässt. Der Kenntnisstand der Bieter unterscheidet sich in dieser Auktion insofern von verdeckten Auktionen mit zentralem Auktionator, als dass zum Zeitpunkt der Gebotsabgabe (1) bereits eingegangene Gebote in ihrer verschlüsselten Form beobachtbar sind und (2) alle Gebote vergangener Auktionen, d.h. sowohl bezuschlagte als auch nicht bezuschlagte interne Gebote, pseudonymisiert veröffentlicht werden. Es wurde argumentiert, dass die beobachtbare Anzahl eingegangener Gebote (1) keinen signifikanten Einfluss auf das Bieterverhalten hat. Indem die wiederholten Auktionen in dieser Arbeit als eine Folge statischer, voneinander unabhängiger Spiele betrachtet werden, wird die Kenntnis der Bieter über alle Gebote vergangener Auktionen (2) vernachlässigt. Unter den getroffenen Annahmen besitzt der FMM daher keine strategisch relevanten Eigenschaften, die speziell aufgrund seiner verteilten Struktur in einem spieltheoretischen Modell des Basisspiels abgebildet werden müssen.

Weitere Arbeiten sollten untersuchen, ob das strategische Verhalten am **FMM**, an dem über einen längeren Zeitraum eine Vielzahl von Geboten aggregiert wird, nicht als ein (un-)endlich wiederholtes Spiel betrachtet werden sollte, in dem Spieler ihre erwartete Auszahlung über eine Vielzahl von Auktionen maximieren. In einer solchen Modellierung ließe sich abbilden, dass Akteure ihr Bieterverhalten an die in (der) vorherigen Auktion(en) eingereichten Gebote anpassen. Dies kann zu Nash-Gleichgewichten führen, die sich in der Modellierung der einmaligen, statisch wiederholten Auktion nicht einstellen und ggf. zu höheren Utilities führen. [48, 52] Untersuchungen des deutschen Sekundärregelleistungsmarktes [30, 31, 28] finden z.B. Hinweise darauf, dass Bieter in der regelmäßig wiederholten **aFRR**-Auktion die Kenntnis über das teuerste bezuschlagte Gebot aus früheren Auktionen dazu nutzen, um sich implizit auf ein höheres Preisniveau zu koordinieren (implizite Kollusion). In [28] wird eine große Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Modellierung einer **aFRR**-Auktion als statisch wiederholtes Spiel und den empirischen Marktdaten festgestellt und eine Modellierung als unendlich wiederholtes Spiel mit Diskontierung¹ vorgeschlagen.

Schließlich sollte die Gültigkeit der Annahmen 1 und 7 überprüft und die verteilte, verdeckte Auktion simuliert oder ein Prototyp der Blockchain aufgesetzt werden. Sollten die Erkenntnisse weitergehender Untersuchungen **Annahme 7** widerlegen oder ergeben, dass anstelle einer Blockchain doch ein dezentraler Ansatz mit **AOs** verwendet werden sollte, so würden die während einer Auktion beobachtbaren Gebotsabgaben zu strategisch relevanten Aspekten, die in der verteilten Struktur der **FMM**-Auktion zu begründen wären. Diese müssten in ihrem zeitlichen Verlauf, ggf. unter Berücksichtigung der Latenzen innerhalb der Infrastruktur, in einem Extensivformspiel modelliert werden. Extensivformspiele können in einer Erweiterung der **AGG**-Darstellung als *Temporal Action-Graph Game* [53] kompakt repräsentiert und effizient gelöst werden.

2. *Wie kann die hierarchische Anbindung der **FMM**-Auktion an den zentralen Regelleistungsmarkt sinnvoll in einem spieltheoretischen Modell abgebildet werden?*

In **Kapitel 3** wurden zwei Möglichkeiten betrachtet, die Zuschlagsvergabe am übergeordneten, zentralen **RLM** abzubilden: eine Substitution des Bieterverhaltens am **RLM** durch einen exogen fest vorgegebenen **UP** (**Modellierung 1**) sowie eine explizite Modellierung der Akteure am **RLM** als Spieler, deren Gebote ohne vorherige Aggregation in die dortige Zuschlagsvergabe eingehen (**Modellierungen 2 und 3**). Da weder empirische Daten noch Simulationen des **FMM** vorliegen, können diese beiden Optionen nur im qualitativen Vergleich zueinander bewertet werden. Der Vergleich der Ergebnisse der Spiele 1.1 und 1.2 mit

¹**Diskontierung:** Abhängig vom Diskontierungsfaktor gewichten Spieler in wiederholten Spielen kurzfristige Gewinne höher als langfristige. Der Diskontierungsfaktor lässt sich auch als Wahrscheinlichkeit, dass das Spiel in der nächsten Runde endet, interpretieren. [25]

den Spielen 2.1 und 2.2 weist darauf hin, dass **Modellierung 1** für Situationen, in denen der **UP** sicher über den Grenzkosten der **FMM**-Spieler liegt und das Bieterverhalten am **FMM** den **UP** (aufgrund der Leistungs-Kosten-Struktur an **FMM** und **RLM**) nicht signifikant beeinflusst, ebenso geeignet ist wie die Modellierungen **2** und **3**. Beide Varianten, die hierarchische Verknüpfung mit dem zentralen **RLM** abzubilden, modellieren die aus dieser Beziehung resultierende Inhomogenität der Güter am **FMM**.

Sobald sich die Grenzkosten der **FMM**-Spieler im Bereich der **RLM**-Spieler bewegen und aggregierte Gebote ggf. grenzpreissetzend werden, bilden die komplexeren Modellierungen **2** und **3** die Auktion am **FMM** jedoch deutlich besser ab. **Modellierung 1** ließe sich zwar dahingehend verbessern, dass nur **FMM**-Gebote kleiner und nicht kleiner gleich dem **UP** den Zuschlag erhalten, dies würde den grenzpreissetzenden Fall, in dem aggregierte Gebote des **FMM** ggf. einen zufälligen und/oder anteiligen Zuschlag erhalten, sowie die Einflussnahme des Bieterverhaltens am **FMM** auf den am übergeordneten **RLM** resultierenden **UP** aber dennoch vernachlässigen.

Eine Veränderung der Gleichgewichtsstrategien der **RLM**-Akteure durch die Einführung des **FMM**² wurde für das gewählte Marktdesign in den betrachteten Szenarien nicht festgestellt. Solche Aussagen über mögliche Auswirkungen der **FMM**-Einführung auf das Bieterverhalten am **RLM** lassen sich aber aus offensichtlichen Gründen nur mit den Modellierungen **2** und **3** treffen.

Die in **Kapitel 3** entwickelten Modellierungen liefern mögliche Antworten auf **Teilfrage 2**. Diese Arbeit kann und soll aber nicht die Gesamtheit aller möglichen Ansätze, die hierarchische Anbindung des **FMM** an die deutschlandweite **FCR**-Auktion abzubilden, aufzeigen und untersuchen. Es sind weitere Ansätze denkbar, in denen das Geschehen am **RLM** z.B. nicht akteurweise, sondern als ein alle **RLM**-Akteure substituierender Spieler abgebildet wird. In das Konzept der Aktionsmenge könnte für diesen Spieler die Gesamtheit der am **RLM** abgegebenen Gebote eingehen. In einem Bayes-Spiel könnte darüber hinaus Unsicherheit über die den **RLM**-Akteuren in ihrer Gesamtheit zur Verfügung stehenden Aktionen herrschen. Ein solcher Ansatz würde die Modellierung vereinfachen, ohne die Einflussnahme des **FMM** auf den **UP** oder die zufällige Zuschlagsvergabe bei Preisgleichheit zu vernachlässigen. Ob eine solche Modellierung signifikante Vorteile hinsichtlich Rechenleistungs- und Speicherplatzbedarf den Modellierungen **2** bzw. **3** gegenüber böte und welche weiteren Möglichkeiten, die hierarchische Verknüpfung zum **RLM** zu modellieren, ggf. denkbar sind, bleibt in dieser Arbeit unbeantwortet.

²gegenüber dem erwarteten Bieterverhalten [23, 50] in Auktionen homogener Güter, die nicht auf das Konzept der spieltheoretischen Modellierung und Analyse von Gleichgewichtsstrategien zurückzuführen ist, in dem allen Spielern die Spieldefinition bekannt ist

Im Rahmen der Energie- und Mobilitätswende aggregieren perspektivisch mehrere **FMMs** aus unterschiedlichen Verteilnetzen Gebote, die am **RLM** miteinander konkurrieren und deren präqualifizierte Leistung in Summe ausreicht, um die Ausschreibungsmenge ohne konventionelle Akteure aus dem Übertragungsnetz zu erfüllen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit die Konkurrenz aggregierter Gebote aus separaten **FMMs** Auswirkungen auf das strategische Bieterverhalten hat. Interessant wäre daher weiterhin zu untersuchen, ob und falls ja, wie, die hierarchische Anbindung *mehrerer FMMs* an den **RLM** in einem spieltheoretischen Modell abzubilden ist.

Schließlich wird hier die hierarchische Anbindung des **FMM** an den zentralen **RLM** für **FCR** betrachtet. Sollen an einem vergleichbaren verteilten Markt Gebote für die deutschlandweiten **aFRR**- oder **mFRR**-Auktionen aggregiert werden, so muss nicht nur die Anbindung an den zentralen **RLM**, sondern auch an den nachgeschalteten **RAM** berücksichtigt werden.

3. Wie können Unsicherheiten über die Anlagenzustände und Kosten einzelner Akteure sinnvoll in einem spieltheoretischen Modell abgebildet werden?

Bayesian Action-Graph Games wurden als kompakte, effizient lösbare Darstellungsform von Bayes-Spielen identifiziert. **BAGGs** ermöglichen die Modellierung privater, stochastisch auftretender Spielereigenschaften über das Konzept der Typen und deren Wahrscheinlichkeitsverteilung, wobei typabhängig die Utilityfunktionen eines Spielers variiert und seine Aktionsmenge auf eine sogenannte Typ-Aktionsmenge³ beschränkt werden kann [46]. In **Modellierung 3** wird die Unsicherheit über die Anlagenzustände eines Akteurs als typabhängige vermarktbarbare Leistung, die als maximale Gebotsleistung in die Aktionsmenge eingeht, abgebildet. Unsicherheiten über Kosten gehen als typabhängige Vorhaltungs- und Grenzkosten negativ in die Utilityfunktionen ein.

Voraussetzung für die Modellierung von Unsicherheiten in Bayes-Spielen ist, dass eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über diese vorliegt. Während die Definition des Bayes-Spiels grundsätzlich Abhängigkeiten zwischen den Unsicherheiten mehrerer Spieler erlaubt, setzt die Darstellung als **BAGG**⁴ voraus, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen über die Typen der Spieler voneinander unabhängig sind [46]. **Annahme 20** beschränkt daher die Art der Unsicherheiten, die mit **Modellierung 3** abbildbar sind. Wetterbedingte Unsicherheiten über die Flexibilität von **WEA** und **PV**-Anlagen treten z.B. aufgrund ihrer geografischen Nähe zueinander innerhalb eines Verteilernetzes i.A. nicht voneinander unabhängig auf.

³Unter **Annahme 11** bieten die Akteure niemals mehr Leistung, als sie erbringen können. Die Möglichkeit, die Aktionsmenge eines Spielers typabhängig auf eine Typ-Aktionsmenge zu beschränken, erlaubt darüber hinaus eine kompaktere Darstellung.

⁴<http://agg.cs.ubc.ca/BAGGFORMAT.txt>, Abruf: 01.12.2020

Weitere Einflüsse auf die Anlagenzustände und/oder Kosten, die z.B. im Nutzerverhalten bzw. der privaten Wertschätzung der Eigentümer begründet sind, können aber durchaus mit voneinander unabhängigen Wahrscheinlichkeiten auftreten.

Modellierung 3 liefert eine mögliche Antwort auf **Teilfrage 3**. Diese Arbeit kann und soll aber nicht die Gesamtheit aller Möglichkeiten, Unsicherheiten in einem spieltheoretischen Modell abzubilden, aufzeigen und untersuchen. Weiterführende Arbeiten sollten die Verwendung anderer Spielrepräsentationen oder auch die Erweiterung der bestehenden Implementierung um weitere, alle oder mehrere Spieler ggf. gleichzeitig betreffende Unsicherheiten prüfen. So kann die Vorgabe von p_{call} unter den Annahmen **12** und **13** als exogene Variable dazu führen, dass Spieler in Nash-Gleichgewichten ihre vermarktbar Flexibilität gezielt überbieten und z.B. ein Gebot über die doppelte Leistung abgeben, wenn p_{call} 0,5 beträgt. Stochastische Effekte, wie z.B. Schwankungen des bisher fest vorgegebenen mittleren Abrufs bezuschlagter Regelleistung p_{call} oder Wettereinflüsse, könnten ggf. auch als eine neue Art von Sonderspielern des **BAGG** implementiert werden, die je Typ nur eine Aktion besitzen. Über die Typwahrscheinlichkeiten und die Abhängigkeit der Utilities einzelner oder aller **FMM**- (und **RLM**)-Spieler von der Belegung der **AN** dieser Sonderspieler könnten voneinander abhängige Unsicherheiten möglicherweise modelliert werden. In einem solchen Ansatz wären die in Sonderspielern externalisierten Typen den davon beeinflussten **FMM**- (und **RLM**)-Spielern in einem *ex interim*-Spiel ex ante nicht bekannt.

4.2 VERGLEICH MIT DEM AGENTENENTWURF

Die drei in **Kapitel 3** definierten Basisspiele modellieren das strategische Verhalten der in **Abschnitt 2.2** entworfenen nutzenbasierten Softwareagenten als rationale Spieler in *einer* statisch wiederholten, verdeckten Auktion am **FMM**. Jeder der Agenten geht als ein Spieler $i \in N$ in die Definitionen **8** und **9** der Basisspiele vollständiger Information $G = (N, A, u)$ (und in die **Definition 10** des Basisspiels unvollständiger Information $G = (N, A, \Theta, P, u)$) ein. Die explizit spieltheoretisch modellierten Handlungen eines Agenten beschränken sich auf eine verdeckte Gebotsabgabe über seine Schnittstelle zur Blockchain. Die (vom Typ $\theta_i \in \Theta_i$ abhängige) Prognose der vermarktbar Leistung eines Agenten geht als obere Schranke für die Gebotsleistung in die (Typ-)Aktionsmenge $A_i \in A$ des ihn modellierenden Spielers ein. Die (Typ-)Aktionsmenge eines Spielers unterscheidet sich insofern vom Handlungsspielraum des in **Abschnitt 2.2** entworfenen Agenten bei der Gebotsabgabe (vgl. **Gleichung 2.1** mit q_i als obere Schranke). Der Agent berücksichtigt bei der

Maximierung seines Performanzmaßes allerdings auch die Pönale, mit der der **VNB** Akteure belegt, die bezuschlagte Leistung nicht erbringen können. Diese Pönale wurde in **Abschnitt 2.1** nicht genauer definiert und in den Utilityfunktionen u der Spiele vernachlässigt (vgl. Annahmen **10** und **11**). Abgesehen von der Pönale wird das Performanzmaß der Agenten in den Utilityfunktionen der Spieler korrekt abgebildet. Die Zuschlagszahlung geht über den **UP** und die bezuschlagte Leistung (ba) in die Gleichungen **3.2**, **3.3** und **3.5** ein, von der die Vorhaltungs- ($cMWh$) und die Erbringungskosten für den prognostizierten Regelleistungsabruf ($cMWh \cdot p_{call}$) abgezogen werden. Das mögliche Ziel eines Agenten, dieses Performanzmaß nicht nur kurzfristig über *eine* Auktion, sondern über eine längere Zeitspanne zu maximieren, kann mit den Modellierungen als statisch wiederholte Spiele allerdings nicht abgebildet werden (**Annahme 6**). Dies ist ein kritischer Punkt, der in der **Beantwortung von Teilfrage 1** bereits diskutiert wurde.

Die zentrale Vereinfachung, die bei der spieltheoretischen Modellierung und Analyse des strategischen Verhaltens der nutzenbasierten Agenten vorgenommen wird, besteht in **Annahme 8**. Die Bestimmung von Nash-Gleichgewichten setzt voraus, dass allen Spielern die Spieldefinition bekannt ist. Im Fall der Spiele vollständiger Information wird unter dieser Annahme im Umkehrschluss jedoch eine Situation modelliert, in der den Agenten

- N die Menge aller Agenten am **FMM** (sowie am übergeordneten **RLM** in **Definition 9**) bekannt ist, denen sie jeweils eine individuelle Aktionsmenge A_i und Utilityfunktion u_i zuordnen können. Darüber ist ihnen weiterhin
- A die in der modellierten Produktzeitscheibe vermarktbare Leistung aller Anlagen am **FMM** (sowie am übergeordneten **RLM** in **Definition 9**) sowie
- u deren individuelle Vorhaltungs- und Erbringungskosten bekannt.

Dies ist insofern bemerkenswert, als dass die Agenten in dem in **Abschnitt 2.1** entworfenen Markt Informationen über die anderen Akteure nur aus den historischen, pseudonymisierten Geboten am **FMM** und den historischen, anonymisierten bezuschlagten Geboten am **RLM** sammeln können. Den Akteuren lässt sich dabei keine individuelle Gebotshistorie zuordnen. Darüber hinaus unterliegen die Anlagenzustände und Kosten insbesondere der dezentralen Akteure i.A. zahlreichen unsicheren Einflussfaktoren. In den Spielen vollständiger Information gilt hingegen die Annahme, dass die Prognosen der Agenten über die Anlagenzustände und Kosten aller Akteure korrekt sind. Selbst im Spiel unvollständiger Information gilt die **Annahme 19**, dass die Prognose über die eigenen Anlagenzustände und Kosten $\theta_i \in \Theta_i$ einen Tag im Voraus korrekt ist, sowie dass eine Menge möglicher Anlagenzustände und Kosten aller anderen Akteure $\Theta_{-i} = \Theta \setminus \Theta_i$ und deren Wahrscheinlichkeitsverteilung P bekannt ist. Dabei nehmen die Agenten unter **Annahme 7** während einer Auktion keine

relevanten Informationen wahr⁵. Stattdessen liegt die [Annahme 8](#) zugrunde, dass sie im Laufe vergangener Auktionen ein perfektes⁶ Weltmodell erlernt haben, aus dem sie die Eigenschaften aller Akteure bzw. deren Anlagenzustände und Kosten ableiten.

Vor diesem Hintergrund ist zu hinterfragen, (1) ob ein solcher Lernprozess in der gewählten Marktinfrastruktur und unter fluktuierenden Umweltbedingungen überhaupt möglich ist, (2) falls ja, wie lange ein solcher Lernprozess dauern würde, und (3) ob dieser sich in einer Umgebung abschließen lässt, die sich im Laufe der Zeit weiter verändert. Selbst wenn in einer solchen Umgebung strategische Gleichgewichte existieren, ist daher unklar, ob diese sich bei einer praktischen Einführung des [FMM](#) jemals einstellen. Diese Arbeit kann diese Frage nicht beantworten. Zu deren Untersuchung könnten in weiteren Arbeiten Multiagentensimulationen aufgesetzt werden. Die spieltheoretische Modellierung und Analyse von Nash-Gleichgewichten in der [FMM](#)-Auktion ist dennoch im Rahmen des Marktdesigns ein wertvolles Hilfsmittel. Mit diesem kann das Verhalten der Bieter zwar nicht vorausgesagt werden. Besitzt die spieltheoretische Modellierung der Auktion jedoch Nash-Gleichgewichte, in denen die Bieter die Versorgungssicherheit gefährden, können Lücken im Marktdesign identifiziert werden, die nicht ausreichend Anreize für netzdienliches Verhalten setzen, und im Zuge des Mechanismus-Designs behoben werden.

⁵Auch die Vernachlässigung zeitlicher Abläufe und der Beobachtbarkeit der Anzahl eingehender Gebote wurde in der [Beantwortung von Teilfrage 1](#) bereits diskutiert.

⁶Nur im Spiel unvollständiger Information herrschen Unsicherheiten über die Anlagenzustände und Kosten der anderen Agenten, wobei auch das Erlernen der Typen und Typwahrscheinlichkeiten bereits bemerkenswert ist.

5

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie eine Auktion zur Aggregation von Primärregelleistungsgeboten an einem verteilten, hierarchisch an den deutschlandweiten RLM für FCR angebotenen Markt auf Verteilnetzebene (*FreqMatchMarket*, FMM genannt) spieltheoretisch modelliert werden kann, um Aussagen über das strategische Verhalten der durch rationale, nutzenbasierte Softwareagenten repräsentierten Bieter treffen zu können. Der Fokus lag hierbei auf der Abbildung strategisch relevanter Aspekte der Auktion am FMM, die den deutschlandweiten Regelleistungsauktionen gegenüber neu sind. Konkret sind das (1) eine verteilte Infrastruktur, (2) eine hierarchische Anbindung an die Auktion auf Übertragungsnetzebene, in der die entscheidende Zuschlagsvergabe für am FMM wiederum auktionsbasiert aggregierte Gebote erfolgt, sowie (3) Unsicherheiten über Anlagenzustände und Kosten einzelner Marktakteure, die bei DERs (anders als bei konventionellen Kraftwerken auf Übertragungsnetzebene) großen individuellen Schwankungen unterliegen können.

Da es sich beim FMM um einen visionären Markt handelt, mussten zunächst eine potenzielle Marktinfrastruktur, Auktionsregeln und die Softwareagenten, deren Agieren am FMM es spieltheoretisch zu modellieren galt, entworfen werden. In einer theoretischen Diskussion zweier Ansätze für resiliente Auktionen erwies sich eine Blockchain als geeignete Infrastruktur, die die Durchführung verdeckter Auktionen auch ohne zentralen Auktionator ermöglicht. Vor diesem Hintergrund konnte die verteilte Marktinfrastruktur strategisch vernachlässigt werden. Es wurde eine Auktion definiert, in der Teilgebote für eine in mehrere Zeitslots unterteilte Produktzeitscheibe zu potenziell mehreren 1-MW-Geboten aggregiert und jeweils zum Einheitspreis der beteiligten Teilgebote an die deutschlandweite FCR-Auktion weitergeleitet werden. Die Softwareagenten interagieren im gewählten Setting nur über die Blockchain und unter wechselnden Pseudonymen miteinander und verfolgen das Ziel, ihren finanziellen Gewinn durch die Vermarktung der Flexibilität dezentraler Anlagen am FMM zu maximieren.

In Erweiterung von *GAMUT*, eines Generators für Instanzen unterschiedlicher Basisspielklassen wurden drei neue Basisspiele implementiert, die eine solche Auktion als statisch

wiederholtes Spiel modellieren: (1) ein Normalformspiel vollständiger Information in **AGG**-Darstellung, das die zentrale **FCR**-Auktion durch einen festen Markträumungspreis substituiert, (2) ein Normalformspiel vollständiger Information in **AGG**-Darstellung, das die Bieter am zentralen Markt explizit als Spieler modelliert, sowie (3) ein Bayes-Spiel unvollständiger Information in **BAGG**-Darstellung, das Unsicherheiten über die Flexibilität und Grenzkosten von Gegenspielern abbildet. Für alle drei Modellierungen wurden Nash-Gleichgewichte in synthetischen Szenarien bestimmt.

Der qualitative Vergleich der Ergebnisse deutet darauf hin, dass die Wechselwirkungen zwischen dem Bieterverhalten am **RLM** und am **FMM** und der daraus resultierende Einfluss der am **FMM** aggregierten Gebote auf den Einheitspreis in Szenarien, in denen aggregierte Gebote mit Blick auf die Leistungs-Kosten-Struktur am **FMM**, die Leistungs-Kosten-Struktur am **RLM** und der Ausschreibungsmenge grenzpreissetzend werden können, von strategischer Relevanz sind und in der spieltheoretischen Modellierung nicht vernachlässigt werden sollten. Die Modellierungen 2 und 3 sind vor diesem Hintergrund deutlich geeigneter als **Modellierung 1**. Angesichts des Bedarfs an Speicherplatz und Rechenleistung zur Repräsentation und Lösung von Spielen mit vielen Spielern und/oder großen Aktionsmengen sollten allerdings weitere Möglichkeiten erwogen werden, das Bieterverhalten in der Auktion am **RLM** vereinfacht zu modellieren. **Modellierung 3** lieferte einen vielversprechenden Ansatz zur Abbildung voneinander unabhängig auftretender Schwankungen der vermarktbareren Flexibilität und Kosten einzelner Akteure. Anpassungsbedarf besteht zur Modellierung von Unsicherheiten, die mehrere oder alle Spieler betreffen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen, d.h. (1) des gewählten, visionären Marktdesigns, (2) der gewählten spieltheoretischen Modellierungen und (3) der betrachteten synthetischen Szenarien zu bewerten. Letztere dienen nur als Mittel, um die entwickelten Modellierungen mangels empirischer Daten und Simulationen des **FMM** miteinander zu vergleichen. Insbesondere die Modellierung als statisch wiederholtes Basisspiel ist angesichts der potenziell regelmäßig am **FMM** stattfindenden Auktionen kritisch zu betrachten. Weitere Arbeiten sollten daher die Notwendigkeit einer Modellierung als (un-)endlich wiederholtes Spiel prüfen. Außerdem sollten der in dieser Arbeit nur theoretisch erörterte Ansatz, blockchainbasiert verdeckte Auktionen durchzuführen, und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen für die spieltheoretische Untersuchung anhand einer Simulation oder eines Prototyps überprüft werden. Interessant wäre weiterhin, auch Möglichkeiten zu untersuchen, die indirekte Interaktion mehrerer an der Auktion am **RLM** teilnehmenden **FMMs** in einem spieltheoretischen Modell abzubilden.

Das entworfene Marktdesign hinsichtlich des induzierten Bieterverhaltens zu untersuchen, war nicht der Fokus der vorliegenden Arbeit. Vielmehr liefert diese einen ersten

Durchstich der spieltheoretischen Modellierung einer verteilten, hierarchisch verknüpften Auktion zur Erhebung von Flexibilitäten auf Verteilnetzebene und deren Nutzbarmachung für die Frequenzhaltung. Dieser zeigt Ansätze auf, wie die hierarchische Anbindung an den deutschlandweiten **RLM** sowie Unsicherheiten über die Anlagenzustände und Kosten einzelner Akteure modelliert werden können, erhebt dabei allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Erkenntnisse sollen als Grundlage für weitere Arbeiten dienen, um anhand spieltheoretischer Modellierungen begründete Marktmechanismen für verteilte (Regelleistungs-)Märkte auf Verteilnetzebene zu entwickeln, die Anreize für netzdienliches Verhalten setzen. Nicht zuletzt liegt der Analyse strategischen Bieterverhaltens anhand der spieltheoretischen Modellierung und Bestimmung von **NGGn** die Annahme zugrunde, dass die Softwareagenten die Gleichgewichtsstrategien tatsächlich erlernen. Ergänzend zur spieltheoretischen Modellierung sollten im Zuge des Marktentwurfs daher auch Multiagentensimulationen genutzt werden.



Zuschlagsvergabe am *FreqMatchMarket* im Regelbetrieb

Algorithm 3 FMM Bid Aggregation and Market Clearing in Normal Operation Mode
(in case of $\tau = 4$ time slots)

Input: Bid amounts [kW] and prices [ct/MW/h] of n bidders for each time slot
Output: Accepted bid amounts [kW] for each bidder and time slot; uniform market clearing price [ct/MW/h] from central capacity balancing market

- 1: $aggrArr := \{0, 0, 0, 0\}$
- 2: **for all** time slots $t \in [1, 4]$ **do** ▷ Bid aggregation
- 3: Create ascending merit order list of bids received for slot t
- 4: $aggrArr[t] := \sum(\text{bid amounts for slot } t)$
- 5: Round $aggrArr[t]$ down to multiples of 1 MW
- 6: $numMW := \min(aggrArr)$
- 7: **for all** aggregated MW $m \in [1, numMW]$ **do**
- 8: $UP := \max(\text{prices [ct/MW/h] across all slots } t \text{ and bids aggregated in this MW})$
- 9: Place bid (1 MW¹ at price UP ct/MW/h) at central balancing capacity market
- 10: Await market clearing at central capacity balancing capacity market
- 11: $UP :=$ market clearing price from central capacity market
▷ Internal allocation of central market clearing
- 12: **for all** bidders $i \in [1, n]$ **do**
- 13: $tendAcc(i) := \{0, 0, 0, 0\}$ ▷ Init tender accept amounts
- 14: **for all** accepted tenders² $m' \in M' \subseteq [1, numMW]$ **do**
- 15: **for** $t := 1$ **to** $numtSlots$ **do**
- 16: **for all** bidders $i' \in I' \subseteq [1, n]$ that have a share in MW m' for time slot t **do**
- 17: $tendAcc(i')[t] := tendAcc(i')[t] + share(i', m', t)$
- 18: **for all** bidders $i \in [1, n]$ **do**
- 19: **if** $tendAcc(i) == \{0, 0, 0, 0\}$ **then**
- 20: Send *tender reject* to bidder i
- 21: **else**
- 22: Send *tender accept* to bidder i with amounts $tendAcc(i)$ at price UP

¹In case of several MW aggregated at the same price UP , they are joined and placed as one multi-MW bid at price UP at the central balancing capacity market.

²In case of partial tender acceptance of multi-MW bids they are internally accepted MW-wise according to the slot-wise merit order lists of the internal bids.

B

Spielrepräsentation

	Schere	Stein	Papier
Schere	(0, 0)	(-1, 1)	(1, -1)
Stein	(1, -1)	(0, 0)	(-1, 1)
Papier	(-1, 1)	(1, -1)	(0, 0)

Abbildung B.1: Auszahlungsmatrix des Normalformspiels *Schere-Stein-Papier* mit $n = 2$ Spielern und dem Aktionsraum $A = (A_1 \times A_2)$, wobei $A_1 = A_2 = \{Schere, Stein, Papier\}$ (eigene Darstellung). Jede Zeile entspricht einer möglichen Aktion für Spieler 1, jede Spalte einer möglichen Aktion für Spieler 2. Es lässt sich zeigen, dass das Spiel kein Nash-Gleichgewicht in reinen Strategien besitzt. Das einzige Nash-Gleichgewicht in gemischten Strategien ist das Strategieprofil $s^* = (s_1^*, s_2^*)$ mit $s_1^* = s_2^* = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$. [25]

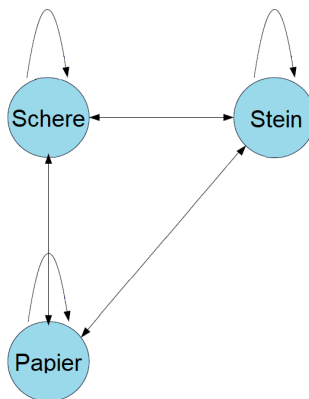


Abbildung B.2: *Action-Graph* des Normalformspiels *Schere-Stein-Papier* aus [Abbildung B.1](#) (eigene Darstellung). Da die Aktionsmengen beider Spieler identisch sind, enthält das **AGG** $|A_1| = 3$ ANs und nicht $|A_1| + |A_2| = 6$ ANs. Solange die Aktionsmengen und Utilityfunktionen der Spieler identisch sind, wächst die Darstellungsform nicht mit der Anzahl Spieler. Die Auszahlung einer jeden Aktion ist in diesem Spiel von der Konfiguration aller ANs abhängig, es liegt also keine kontextspezifische Unabhängigkeit vor.

SchereSteinPapierAGG.game

```

#AGG
#The number of Players, n.
2
#The number of action nodes, |S|.
3
#The number of function nodes, |P|.
0
#Size of action set for each Player.
3 3
#Each Player's action set.
0 1 2
0 1 2
#The Action Graph.
3 0 1 2
3 0 1 2
3 0 1 2
#Types of functions.

#The payoff functions.
0 1.0 -1.0 0.0
0 -1.0 0.0 1.0
0 0.0 1.0 -1.0

```

Abbildung B.3: *.game*-Datei des *Schere-Stein-Papier-AGGs* aus [Abbildung B.2](#) (erzeugt mit *AGGUI*¹): *Each Player's action set* ordnet in n Zeilen jedem der n Spieler die ANs seiner Aktionsmenge, indiziert von 0 bis $|S| - 1$, zu. Der *Action-Graph* enthält $|S| + |P|$ Zeilen mit Nachbarschaftslisten für alle $|S|$ ANs und alle $|P|$ FNs, wobei die erste Ziffer einer Zeile die Anzahl Nachbarn dieses Knotens angibt. Unter *The payoff functions* sind die Utilities für jeden der $|S|$ ANs in jeweils einer Zeile angegeben. Die Utilityfunktion für eine Aktion s ist eine Abbildung von Konfigurationen auf reelle Zahlen. Die Menge der möglichen Konfigurationen kann aus dem *Action-Graph* abgeleitet und lexikografisch entsprechend der Nachbarschaftsliste von s sortiert werden. Beispielsweise sind die möglichen Konfigurationen für AN 0 in lexikografischer Reihenfolge: $[1,0,1]$, $[1,1,0]$, $[2,0,0]$. In dieser Reihenfolge sind die resultierenden Utilities als eine Reihe reeller Zahlen ohne die explizite Angabe der zugehörigen Konfiguration angegeben. Die erste Zahl jeder Zeile gibt den Typ der Darstellung der Utilityfunktion an. Im Rahmen dieser Arbeit ist nur Typ 0, die vollständige Darstellung, relevant.

¹Das *AGG Graphical User Interface (AGGUI)* ist eine grafische Benutzeroberfläche zur Erstellung, Bearbeitung und Visualisierung von AGGs: <http://agg.cs.ubc.ca/aggi.jar>, AGG Graphical User Interface (AGGUI), Abruf: 01.12.2020

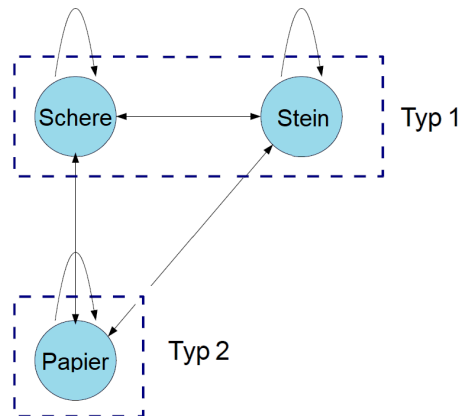


Abbildung B.4: Action-Graph eines beispielhaften, fiktiven Bayes-Spiels: Das klassische Spiel *Schere-Stein-Papier* aus [Abbildung B.1](#) ist ein Spiel vollständiger Information. Beiden Spielern sind die Aktionen (*Schere*, *Stein* und *Papier*) bekannt, die gewählt werden können. Man stelle sich nun eine fiktive Erweiterung der Spielregeln vor, in der beide Spieler vor ihrem Zug Aktionskarten aus einem Stapel ziehen. Es gibt zwei unterschiedliche Typen von Karten: Typ 1 erlaubt einem Spieler, sich zwischen der Aktion *Schere* oder *Stein* zu entscheiden. Zieht ein Spieler eine Karte vom Typ 2, so muss er *Papier* spielen. Jeder Spieler besitzt einen eigenen Stapel Karten, aus dem er zieht². In beiden Stapeln sind jeweils 70% der Karten vom Typ 1, 30% vom Typ 2. Das beschriebene Spiel ist ein Bayes-Spiel mit zwei Spielern, zwei Typen und drei Aktionen. Im Sonderfall dieses Spiels besitzen beide Spieler die gleichen Typ-Aktionsmengen ($\{Schere, Stein\}$ für Typ 1 und $\{Papier\}$ für Typ 2) sowie die gleichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Typ 1 liegt in 70%, Typ 2 in 30% der Fälle vor). Da die Menge individueller Aktionen und die Auszahlungsfunktionen des *Schere-Stein-Papier*-Spiels vollständiger Information und dieser fiktiven Spielerweiterung übereinstimmen, sind die *Action-Graphen* der beiden Spiele identisch (vgl. [Abbildung B.2](#), die Typen sind hier nur zur Veranschaulichung eingezeichnet).

²Würden beide Spieler aus einem gemeinsamen Stapel ziehen, würde die Bedingung der voneinander unabhängigen Typwahrscheinlichkeiten nicht mehr gelten, da die Spieler aufgrund ihrer eigenen Karte dann Rückschlüsse auf die A posteriori-Wahrscheinlichkeit der Karte des Gegenspielers ziehen könnten.

SchereSteinPapierBAGG.game

```

#BAGG
#The number of Players, n.
2
#The number of action nodes, |S|.
3
#The number of function nodes, |P|.
0
# The number of types for each player, as a row of n integers.
2 2
# Type distribution for each player.
0.7 0.3
0.7 0.3
# Size of type-action set for each player's each type.
2 1
2 1
# Type-action set for each player's each type.
0 1
2
0 1
2
#The Action Graph.
3 0 1 2
3 0 1 2
3 0 1 2
#Types of functions.

#The payoff functions.
0 1.0 -1.0 0.0
0 -1.0 0.0 1.0
0 0.0 1.0 -1.0

```

Abbildung B.5: *.game*-Datei des in [Abbildung B.4](#) beschriebenen, beispielhaften Bayes-Spiels: Statt der Anzahl Aktionen je Spieler sind im BAGG-Format³³ die Anzahl Typen je Spieler (in einer Zeile aus n (hier $n=2$) Ganzzahlen) und deren Wahrscheinlichkeiten (in n Zeilen bestehend aus reellen Zahlen, die in sich je Zeile zu 1 aufsummieren) anzugeben. Unter *Type-action set for each player's each type* sind je Typ und je Spieler in einer Zeile die Indizes der *Action-Nodes* der Typ-Aktionsmenge anzugeben, indiziert von 0 bis $|S|-1$. Der *Action-Graph*, die Art der *Function-Nodes* (*Types of functions*, sofern vorhanden) und die Utilities für alle möglichen Konfigurationen (*The payoff functions*) sind genauso wie im AGG-Format anzugeben (vgl. [Abbildung B.3](#)).

C | Parametrierung: Konfigurationsdateien

C.1 MODELLIERUNG 1

Spiel_1.1_Config.txt

```

# uniform price at central market
-up_rlm 20
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-playerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [2,2] -MWh_cost [2,2]
-actions [400,0,400,0 400,3,400,3 400,6,400,6]]
#           0           1           2
#
[-num_players 1 -MW_cost [4,4] -MWh_cost [6,6]
-actions [500,0,500,0 500,7,500,7 500,8,500,8]]
#           3           4           5
#
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [300,0,300,0 300,9,300,9 300,20,300,20]]
#           6           7           8
#
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]
#           9           10          11
#
# Help:
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour)
#           (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)
# UP: in cent per MW and hour

```

Abbildung C.1: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 1.1 als Instanz der Basisspielklasse *FMMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

Spiel_1.2_Config.txt

```

# uniform price at central market
-up_rlm 20
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-playerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [2,2] -MWh_cost [2,2]
-actions [400,0,400,0 400,3,400,3 400,6,400,6]]
#           0           1           2
#
[-num_players 1 -MW_cost [4,4] -MWh_cost [6,6]
-actions [300,0,300,0 300,7,300,7 300,8,300,8]]
#           3           4           5
#
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [300,0,300,0 300,9,300,9 300,20,300,20]]
#           6           7           8
#
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]
#           9           10          11
#
# Help:
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour)
#           (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)
# UP: in cent per MW and hour

```

Abbildung C.2: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 1.2 als Instanz der Basisspielklasse *FMMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

C.2 MODELLIERUNG 2

Spiel_2.1_Config.txt

```

# call for bids
-rlm_tendAmount 10
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-FMMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [2,2] -MWh_cost [2,2]
-actions [400,0,400,0 400,3,400,3 400,6,400,6]]
#           9           10           11
[-num_players 1 -MW_cost [4,4] -MWh_cost [6,6]
-actions [500,0,500,0 500,7,500,7 500,8,500,8]]
#           12           13           14
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [300,0,300,0 300,9,300,9 300,10,300,10 300,20,300,20]]
#           15           16           17           18
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]]
#           19           20           21
#
-RLMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [6] -MWh_cost [10]
-actions [2000,0 2000,11 2000,12]]
#           0           1           2
[-num_players 1 -MW_cost [7] -MWh_cost [12]
-actions [6000,0 6000,13 6000,18]]
#           3           4           5
[-num_players 1 -MW_cost [12] -MWh_cost [14]
-actions [4000,0 4000,19 4000,20]]]
#           6           7           8
#
# Help:
# rlm_tendAmount: call for bids in MW
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour for
#           both RLM and FMM players) (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)

```

Abbildung C.3: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.1 als Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

Spiel_2.2_Config.txt

```

# call for bids
-rlm_tendAmount 10
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-FMMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [2,2] -MWh_cost [2,2]
-actions [400,0,400,0 400,3,400,3 400,6,400,6]]
#           9           10           11
[-num_players 1 -MW_cost [4,4] -MWh_cost [6,6]
-actions [300,0,300,0 300,7,300,7 300,8,300,8]]
#           12           13           14
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [300,0,300,0 300,9,300,9 300,10,300,10 300,20,300,20]]
#           15           16           17           18
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]]
#           19           20           21
#
-RLMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [6] -MWh_cost [10]
-actions [2000,0 2000,11 2000,12]]
#           0           1           2
[-num_players 1 -MW_cost [7] -MWh_cost [12]
-actions [6000,0 6000,13 6000,18]]
#           3           4           5
[-num_players 1 -MW_cost [12] -MWh_cost [14]
-actions [4000,0 4000,19 4000,20]]]
#           6           7           8
#
# Help:
# rlm_tendAmount: call for bids in MW
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour for
#           both RLM and FMM players) (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)

```

Abbildung C.4: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.2 als Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

Spiel_2.3_Config.txt

```

# call for bids
-rlm_tendAmount 10
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-FMMplayerclasses [
#
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [200,0,200,0 200,9,200,9 200,10,200,10 200,14,200,14]]
#          11          12          13          14
[-num_players 1 -MW_cost [10,10] -MWh_cost [10,10]
-actions [500,0,500,0 500,15,500,15 500,16,500,16]]
#          15          16          17
[-num_players 2 -MW_cost [11,11] -MWh_cost [12,12]
-actions [400,0,400,0 400,17,400,17 400,18,400,18]]
#          18          19          20
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]]
#          21          22          23
#
-RLMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [5] -MWh_cost [8]
-actions [1000,0]]
#          0
[-num_players 1 -MW_cost [6] -MWh_cost [10]
-actions [2000,0 2000,11 2000,12]]
#          1          2          3
[-num_players 1 -MW_cost [7] -MWh_cost [12]
-actions [6000,0 6000,13 6000,16 6000,18]]
#          4          5          6          7
[-num_players 1 -MW_cost [12] -MWh_cost [14]
-actions [4000,0 4000,19 4000,20]]]
#          8          9          10
#
# Help:
# rlm_tendAmount: call for bids in MW
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour for
#          both RLM and FMM players) (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)

```

Abbildung C.5: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.3 als Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

Spiel_2.4_Config.txt

```

# call for bids
-rlm_tendAmount 10
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-FMMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [200,0,200,0 200,9,200,9 200,10,200,10 200,14,200,14]]
#
#           11           12           13           14
[-num_players 1 -MW_cost [10,10] -MWh_cost [10,10]
-actions [400,0,400,0 400,15,400,15 400,16,400,16]]
#
#           15           16           17
[-num_players 2 -MW_cost [11,11] -MWh_cost [12,12]
-actions [300,0,300,0 300,17,300,17 300,18,300,18]]
#
#           18           19           20
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]]
#
#           21           22           23
#
-RLMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [5] -MWh_cost [8]
-actions [1000,0]]
#
#           0
[-num_players 1 -MW_cost [6] -MWh_cost [10]
-actions [2000,0 2000,11 2000,12]]
#
#           1           2           3
[-num_players 1 -MW_cost [7] -MWh_cost [12]
-actions [6000,0 6000,13 6000,16 6000,18]]
#
#           4           5           6           7
[-num_players 1 -MW_cost [12] -MWh_cost [14]
-actions [4000,0 4000,19 4000,20]]]
#
#           8           9           10
#
# Help:
# rlm_tendAmount: call for bids in MW
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour for
#           both RLM and FMM players) (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)

```

Abbildung C.6: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.4 als Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

Spiel_2.5_Config.txt

```

# call for bids
-rlm_tendAmount 10
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-FMMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [200,0,200,0 200,9,200,9 200,10,200,10 200,14,200,14]]
#           11           12           13           14
[-num_players 1 -MW_cost [10,10] -MWh_cost [10,10]
-actions [500,0,500,0 500,15,500,15 500,16,500,16]]
#           15           16           17
[-num_players 2 -MW_cost [11,11] -MWh_cost [12,12]
-actions [700,0,700,0 700,17,700,17 700,18,700,18]]
#           18           19           20
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]
#           21           22           23
#
-RLMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [5] -MWh_cost [8]
-actions [1000,0]]
#           0
[-num_players 1 -MW_cost [6] -MWh_cost [10]
-actions [2000,0 2000,11 2000,12]]
#           1           2           3
[-num_players 1 -MW_cost [7] -MWh_cost [12]
-actions [6000,0 6000,13 6000,16 6000,18]]
#           4           5           6           7
[-num_players 1 -MW_cost [12] -MWh_cost [14]
-actions [4000,0 4000,19 4000,20]]
#           8           9           10
#
# Help:
# rlm_tendAmount: call for bids in MW
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour for
#           both RLM and FMM players) (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)

```

Abbildung C.7: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.5 als Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

Spiel_2.6_Config.txt

```

# call for bids
-rlm_tendAmount 10
# calling probability
-p_call 0.5
# number of timeslots
-num_tSlots 2
#
-FMMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [2,2] -MWh_cost [2,2]
-actions [400,0,400,0 400,3,400,3 400,6,400,6]]
#          10          11          12
[-num_players 1 -MW_cost [4,4] -MWh_cost [6,6]
-actions [500,0,500,0 500,7,500,7 500,8,500,8]]
#          13          14          15
[-num_players 1 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [8,8]
-actions [300,0,300,0 300,9,300,9 300,10,300,10 300,14,300,14]]
#          16          17          18          19
[-num_players 1 -MW_cost [10,10] -MWh_cost [10,10]
-actions [500,0,500,0 500,15,500,15 500,16,500,16]]
#          20          21          22
[-num_players 1 -MW_cost [12,12] -MWh_cost [14,14]
-actions [800,0,800,0 800,19,800,19 800,20,800,20]]
#          23          24          25
[-num_players 1 -MW_cost [15,15] -MWh_cost [14,14]
-actions [250,0,250,0 250,22,250,22 250,24,250,24]]]
#          26          27          28
#
-RLMplayerclasses [
[-num_players 1 -MW_cost [6] -MWh_cost [10]
-actions [2000,0 2000,11 2000,12]]
#          0          1          2
[-num_players 1 -MW_cost [7] -MWh_cost [12]
-actions [6000,0 6000,13 6000,16 6000,18]]
#          3          4          5          6
[-num_players 1 -MW_cost [12] -MWh_cost [14]
-actions [4000,0 4000,19 4000,20]]]
#          7          8          9
#
# Help:
# rlm_tendAmount: call for bids in MW
# MW_cost (MWh_cost): cost to provide (deliver) 1 MW for an hour in cent
# actions: bid amount (in kW) and bid price (in cent per MW per hour for
#          both RLM and FMM players) (ba1, bp1, ba2, bp2, ...)

```

Abbildung C.8: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.6 als Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

C.3 MODELLIERUNG 3

```

Spiel_3_Config.txt
-----
-rlm_tendAmount 6
-p_call 0.5
-num_tSlots 2
#
-RLMplayerclasses [
[-num_players 1 -types [
[-distr 0.5 -MW_cost [3] -MWh_cost [4]
-actions [4000,0 4000,5 4000,6]]
#           1       2       3
[-distr 0.5 -MW_cost [6] -MWh_cost [6]
-actions [4000,0 4000,9 4000,10 4000,12 4000,15]]]]
#           4       5       6       7       8
#
[-num_players 1 -types [
[-distr 0.5 -MW_cost [4] -MWh_cost [6]
-actions [2000,0 2000,7 2000,8 2000,10 2000,15]]
#           9       10      11      12      13
[-distr 0.5 -MW_cost [9] -MWh_cost [8]
-actions [2000,0 2000,13 2000,15]]]]]
#           14      15      16
###
-FMMplayerclasses [
[-num_players 1 -types [
[-distr 0.9 -MW_cost [2,2] -MWh_cost [2,2]
-actions [400,0,400,0 400,3,400,3 400,6,400,6]]
#           17           18           19
[-distr 0.1 -MW_cost [2,2] -MWh_cost [2,2]
-actions [0,0,0,0]]]
#           0
#
[-num_players 1 -types [
[-distr 0.5 -MW_cost [4,4] -MWh_cost [6,6]
-actions [600,0,600,0 600,7,600,7 600,8,600,8 600,10,600,10]]
#           20           21           22           23
[-distr 0.5 -MW_cost [4,4] -MWh_cost [6,6]
-actions [900,0,900,0 900,7,900,7 900,8,900,8 900,10,900,10]]]
#           24           25           26           27
#
[-num_players 1 -types [
[-distr 0.5 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [12,12]
-actions [400,0,400,0 400,11,400,11 400,12,400,12 400,15,400,15]]
#           28           29           30           31
[-distr 0.5 -MW_cost [5,5] -MWh_cost [12,12]
-actions [800,0,800,0 800,11,800,11 800,12,800,12 800,15,800,15]]]]]
#           32           33           34           35

```

Abbildung C.9: Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 3 als Instanz der Basisspielklasse *FMMRLMBayesGame* mit *GAMUT*. Die Indizes der resultierenden ANs sind nur als Orientierung für den Leser als Kommentare unter den Aktionen angegeben.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zeitliche Anforderungen an den FCR-Abruf	4
2.1	Darstellung einer Gebotsaggregation am FMM	24
3.1	Graphische Darstellung des <i>Action-Graph Games</i> für eine Instanz des in Definition 8 definierten Basisspiels	45
3.2	Beispielhafte Merit-Order-Liste zur Veranschaulichung der Inhomogenität am FMM	49
3.3	Multi-MW-Gebotsaggregation am FMM	57
3.4	Merit-Order-Liste der Grenzkosten in Spiel 2.1	64
3.5	Merit-Order-Liste der Grenzkosten in Spiel 2.2	64
3.6	Merit-Order-Liste der Grenzkosten in Spiel 2.3	65
3.7	Merit-Order-Liste der Grenzkosten in Spiel 2.4	65
3.8	Merit-Order-Liste der Grenzkosten in Spiel 2.5	66
3.9	Merit-Order-Liste der Grenzkosten in Spiel 2.6	66
B.1	Auszahlungsmatrix des Normalformspiels <i>Schere-Stein-Papier</i>	99
B.2	<i>Action-Graph</i> des Normalformspiels <i>Schere-Stein-Papier</i>	99
B.3	<i>.game</i> -Datei des <i>Schere-Stein-Papier-Action-Graph Games</i>	100
B.4	<i>Action-Graph</i> eines beispielhaften Bayes-Spiels	101
B.5	<i>.game</i> -Datei im BAGG-Format	102
C.1	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 1.1 mit <i>GAMUT</i>	104
C.2	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 1.2 mit <i>GAMUT</i>	105
C.3	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.1 mit <i>GAMUT</i>	107
C.4	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.2 mit <i>GAMUT</i>	108
C.5	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.3 mit <i>GAMUT</i>	109
C.6	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.4 mit <i>GAMUT</i>	110
C.7	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.5 mit <i>GAMUT</i>	111
C.8	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 2.6 mit <i>GAMUT</i>	112
C.9	Konfigurationsdatei zur Erzeugung von Spiel 3 mit <i>GAMUT</i>	114

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung der Infrastrukturüberlegungen	17
2.2	Überblick über die FCR- und FMM-Auktion	19
3.1	Nash-Gleichgewichte für Spiel 1.1	51
3.2	Nash-Gleichgewichte für Spiel 1.2	51
3.3	Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.1	68
3.4	Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.2	68
3.5	Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.3	68
3.6	Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.4	70
3.7	Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.5	70
3.8	Nash-Gleichgewichte für Spiel 2.6	70
3.9	Nash-Gleichgewichte für Spiel 3	84

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): dena-studie Systemdienstleistungen 2030. Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse der Studie „Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“. (2014)
- [2] Moser, A., Drees, T., Bongers, T.: Erweiterte Verantwortung der Verteilnetzbetreiber - Kurzfassung (Gutachten). Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Aachen. Abruf: 31.10.2020 (2016). https://www.bdew.de/media/documents/20161208_Gutachten-RWTH-Aachen-DSO.pdf
- [3] Lapac, A. (ed.): Resilienz Digitalisierter Energiesysteme: Wie können Blackout-Risiken begrenzt Werden? acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V., Nationale Akademie der Wissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V., München (2021)
- [4] Kreusel, J., Saliba, S.: Digitalisierung am Rande der Netze – Voraussetzung für eine erfolgreiche Dezentralisierung der elektrischen Energieversorgung. In: Realisierung Utility 4.0 Band 1: Praxis der digitalen Energiewirtschaft von den Grundlagen bis zur Verteilung im Smart Grid, pp. 331–350. Springer, Wiesbaden (2020). doi:[10.1007/978-3-658-25332-5_20](https://doi.org/10.1007/978-3-658-25332-5_20)
- [5] Russell, S.J., Norvig, P.: Artificial Intelligence: a Modern Approach vol. 3. Pearson, Boston (2010)
- [6] Consentec GmbH: Beschreibung von Konzepten des Systemausgleichs und der Regelreservemärkte in Deutschland. Erläuterungsdokument im Auftrag der deutschen regelzonenverantwortlichen Übertragungsnetzbetreiber, Aachen. Abruf: 18.11.2020 (2020). https://www.regelleistung.net/ext/download/MARKTBESCHREIBUNG_CONS
- [7] Die Europäische Kommission: Verordnung (EU) 2017/2195 der Kommission vom 23. November 2017 zur Festlegung einer Leitlinie über den Systemausgleich im Elektrizitätsversorgungssystem. Amtsblatt der Europäischen Union (2017)

- [8] Die Europäische Kommission: Verordnung (EU) 2017/1485 der Kommission vom 2. August 2017 zur Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb. Amtsblatt der Europäischen Union (2017)
- [9] McAfee, R.P., McMillan, J.: Auctions and bidding. *Journal of economic literature* **25**(2), 699–738 (1987)
- [10] Berninghaus, S., Ehrhart, K.-M., Güth, W.: *Strategische Spiele: Eine Einführung in die Spieltheorie*. Springer, Berlin, Heidelberg (2010). doi:10.1007/978-3-642-11651-3
- [11] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Beschluss BK6-18-006, Bonn. Abruf: 25.11.2020 (2018). https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1_GZ/BK6-GZ/2018/BK6-18-006/beschluss_mit_anlagen.pdf
- [12] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Beschluss BK6-18-004-RAM, Bonn. Abruf: 19.11.2020 (2019). https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1_GZ/BK6-GZ/2018/BK6-18-004/BK6-18-004-RAM_beschluss_vom_2019_10_02.pdf
- [13] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH: Präqualifikationsverfahren für Regelreserveanbieter (FCR, aFRR, mFRR) in Deutschland. Stand: 29.05.2020 (2020). https://www.regelleistung.net/ext/download/PQ_Bedingungen_FCR_aFRR_mFRR
- [14] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH: Präqualifikations-Portal: Plattform für Reserveanbieter. Abruf: 25.11.2020 (2020). <https://pq-portal.energy/>
- [15] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Flexibilität im Stromversorgungssystem: Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität (Diskussionspapier), Bonn. Abruf: 31.10.2020 (2017). https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/BNetzA_Flexibilitaetspapier.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [16] Kok, K.: *The PowerMatcher: Smart Coordination for the Smart Electricity Grid*, (2013)
- [17] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: RICHTLINIE (EU) 2019/944 des Europäischen Parlament und des Rates vom 5. Juni 2019 mit

- gemeinsamen Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union (2019)
- [18] Huber, J., Köppl, S., Klempp, N., Schutz, M., Heilmann, E.: Engineering smart market platforms for market based congestion management. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems, pp. 544–549 (2018)
- [19] Wooldridge, M.J., Jennings, N.R.: Intelligent agents: Theory and practice. *The knowledge engineering review* **10**(2), 115–152 (1995)
- [20] Wedde, H.F., Lehnhoff, S., Handschin, E., Krause, O.: Real-time multi-agent support for decentralized management of electric power. In: 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS'06), p. 9 (2006). IEEE
- [21] Wedde, H.F., Lehnhoff, S., Handschin, E., Krause, O.: Dezentrale vernetzte Energiebewirtschaftung (DEZENT) im Netz der Zukunft. *Wirtschaftsinformatik* **49**(5), 361–369 (2007)
- [22] Weinhardt, C., Holtmann, C., Neumann, D.: Market-engineering. *Wirtschaftsinformatik* **45**(6), 635–640 (2003)
- [23] Krishna, V.: Auction Theory - Second Edition. Academic Press, Burlington, MA (2010)
- [24] Rapoport, A.: N-person Game Theory: Concepts and Applications. Dover Publications, Inc., Mineola, New York (2013)
- [25] Shoham, Y., Leyton-Brown, K.: Multiagent Systems: Algorithmic, Game-theoretic, and Logical Foundations. Cambridge University Press, Cambridge (2008)
- [26] Riechmann, T.: Spieltheorie vol. 4. Vahlen, München (2014)
- [27] Nash, J.: Non-cooperative games. *Annals of Mathematics* **54**(2), 286–295 (1951). doi:[10.2307/1969529](https://doi.org/10.2307/1969529)
- [28] Ocker, F., Ehrhart, K.-M., Belica, M.: Harmonization of the European balancing power auction: A game-theoretical and empirical investigation. *Energy Economics* **73**, 194–211 (2018). doi:[1016/j.eneco.2018.05.003](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.003)
- [29] Müsgens, F., Ockenfels, A., Peek, M.: Economics and design of balancing power markets in Germany. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **55**, 392–401 (2014)
- [30] Ocker, F., Ehrhart, K.-M.: The „German Paradox“ in the balancing power markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67**, 892–898 (2017). doi:[10.1016/j.rser.2016.09.040](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.040)

- [31] Ocker, F., Ehrhart, K.-M., Ott, M.: Bidding strategies in austrian and german balancing power auctions. *WIREs Energy and Environment* **7**(6), 303 (2018). doi:[10.1002/wene.303](https://doi.org/10.1002/wene.303)
- [32] Maaz, A.: Auswirkungen von strategischem Bietverhalten auf die Marktpreise am deutschen Day-Ahead-Spotmarkt und an den Regelleistungsauktionen. Moser, Albert, Aachen (2017)
- [33] Braghin, C., Cimato, S., Damiani, E., Baronchelli, M.: Designing smart-contract based auctions. In: *International Conference on Security with Intelligent Computing and Big-data Services*, pp. 54–64 (2018). Springer
- [34] ethereum.org: Ethereum Development Documentation. (2020). Stand: 04.12.2020. Abruf: 04.01.2021. <https://ethereum.org/de/developers/docs/>
- [35] Buchmann, J.: Einführung in die Kryptographie vol. 6. Springer, Berlin (2016). doi:[10.1007/978-3-642-39775-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39775-2)
- [36] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Chancen und Herausforderungen von DLT (Blockchain) in Mobilität und Logistik, Berlin (2019)
- [37] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Die Blockchain-Technologie: Potenziale und Herausforderungen in den Netzsektoren Energie und Telekommunikation, Bonn (2019)
- [38] Blass, E.-O., Kerschbaum, F.: Strain: A secure auction for blockchains. In: *European Symposium on Research in Computer Security*, pp. 87–110 (2018). Springer
- [39] Blass, E.-O., Kerschbaum, F.: Borealis: Building block for sealed bid auctions on blockchains. In: *Proceedings of the 15th ACM Asia Conference on Computer and Communications Security*, pp. 558–571 (2020)
- [40] Xiong, J., Wang, Q.: Anonymous auction protocol based on time-released encryption atop consortium blockchain. arXiv preprint arXiv:1903.03285 (2019)
- [41] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW begleitet Start des nationalen Regelarbeitsmarkts, Berlin. Stand: 02.11.2020. Abruf: 19.11.2020 (2020). <https://www.bdew.de/energie/bdew-begleitet-start-des-nationalen-regelarbeitsmarkts/>
- [42] Lamparter, S., Becher, S., Fischer, J.-G.: An agent-based market platform for smart grids. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Industry Track*, pp. 1689–1696 (2010). Citeseer

- [43] Holler, M.J., Illing, G., Napel, S.: Einführung in die Spieltheorie vol. 8. Springer, Berlin (2019). doi:[10.1007/978-3-642-31963-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31963-1)
- [44] Jiang, A.X., Leyton-Brown, K., Bhat, N.: Action-graph games. *Games and Economic Behavior* **71**(1), 141–173 (2011)
- [45] Nudelman, E., Wortman, J., Shoham, Y., Leyton-Brown, K.: Run the GAMUT: A comprehensive approach to evaluating game-theoretic algorithms. In: *AAMAS*, vol. 4, pp. 880–887 (2004)
- [46] Jiang, A.X., Leyton-Brown, K.: Bayesian action-graph games. *Advances in Neural Information Processing Systems* **23**, 991–999 (2010)
- [47] Harsanyi, J.C.: Games with incomplete information played by “Bayesian“ Players. 159–182, 320–334, 486–502 (1967-1968)
- [48] Fudenberg, D., Tirole, J.: *Game Theory*. The MIT Press, Cambridge, London (1991)
- [49] Nudelman, E., Wortman, J., Shoham, Y., Leyton-Brown, K.: GAMUT User Guide. Abruf: 30.01.2021 (2004). <http://gamut.stanford.edu/userdoc.pdf>
- [50] Ausubel, L.M., Cramton, P., Pycia, M., Rostek, M., Weretka, M.: Demand Reduction and Inefficiency in Multi-Unit Auctions. *The Review of Economic Studies* **81**(4), 1366–1400 (2014). doi:[10.1093/restud/rdu023](https://doi.org/10.1093/restud/rdu023). <https://academic.oup.com/restud/article-pdf/81/4/1366/18398215/rdu023.pdf>
- [51] Herrmann, D.: Hypergeometrische Verteilung. In: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik—30 BASIC-Programme*, pp. 16–17. Springer, Braunschweig (1984)
- [52] Fudenberg, D., Levine, D., Maskin, E.: The folk theorem with imperfect public information. *Econometrica* **62**(5), 997–1039 (1994)
- [53] Jiang, A.X., Leyton-Brown, K., Pfeffer, A.: Temporal action-graph games: A new representation for dynamic games. arXiv preprint arXiv:1205.2638 (2012)

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Hannover, den 25. Mai 2021

Gesa Nadine Ohlendorf