

MASTERARBEIT

Herr
Charlie Noah Fritzsche

**Strategische Nutzung von Bitcoin
Mining in Unternehmen:
Untersuchung von wirtschaftlichen
Potenzialen für Unternehmen mit
erneuerbaren Energiequellen**

Mittweida, Juli 2025



MASTERARBEIT

Strategische Nutzung von Bitcoin Mining in Unternehmen: Untersuchung von wirtschaftlichen Potenzialen für Unternehmen mit erneuerbaren Energiequellen

Autor:

Charlie Noah Fritzsche

Studiengang:

Blockchain & Distributed Ledger Technologies

Seminargruppe:

BC22w1-M

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Ittner

Zweitprüfer:

M.Sc. Alexander Ebeling

Einreichung:

Mittweida, 01.07.2025

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2025

Faculty of **Applied Computer Sciences and Biosciences**

MASTER THESIS

Strategic Use of Bitcoin Mining in Companies: Analysis of Economic Potentials for Companies Utilizing Renewable Energy Sources

Author:

Charlie Noah Fritzsche

Course of Study:

Applied Computer Science

Seminar Group:

BC22w1-M

First Examiner:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Ittner

Second Examiner:

M.Sc. Alexander Ebeling

Submission:

Mittweida, 01.07.2025

Defense/Evaluation:

Mittweida, 2025

Bibliografische Beschreibung

Fritzsche, Charlie Noah:

Strategische Nutzung von Bitcoin Mining in Unternehmen: Untersuchung von wirtschaftlichen Potenzialen für Unternehmen mit erneuerbaren Energiequellen. – 2025. – 74 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften, Masterarbeit, 2025.

Kurzreferat

Diese Masterarbeit analysiert die strategische Nutzung von Bitcoin-Mining für Unternehmen in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des deutschen Strommarktes. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie sich Bitcoin-Mining in bestehende Marktstrukturen integrieren lässt, um als flexibler Lastabnehmer zur Netzstabilität und zur effizienten Nutzung erneuerbarer Energien beizutragen. Zur Fundierung der Ergebnisse wurde in Zusammenarbeit mit der Deutschen Telekom das Pilotprojekt „Digitale Monetäre Photosynthese“ umgesetzt. Die im Rahmen des Projekts erhobenen und ausgewerteten Daten ermöglichen es, konkrete Potenziale und Handlungsempfehlungen für die Integration von Bitcoin-Mining in den deutschen Energiemarkt abzuleiten.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Methodik	2
1.3 Aufbau der Thesis	2
2 Der deutsche Strommarkt	4
2.1 Grundlagen des deutschen Strommarkts	4
2.1.1 Erzeugung	4
2.1.2 Übertragung	5
2.1.3 Verteilung	6
2.1.4 Vertrieb	7
2.1.5 Liberalisierung des Strommarktes	8
2.2 Marktmechanismen	9
2.2.1 Spotmarkt	9
2.2.1.1 Day-Ahead-Handel	10
2.2.1.2 Intraday-Handel	11
2.2.2 Terminmarkt	12
2.2.3 OTC-Handel	12
2.3 Regelleistungsmärkte	13
2.3.1 Primärregelleistung	13
2.3.2 Sekundärregelleistung	14
2.3.3 Tertiärregelleistung	14
2.4 Strompreisbildung	15
2.4.1 Merit-Order-Prinzip	15
2.4.2 Einfluss erneuerbarer Energien auf die Residuallast und Preisbildung	17
2.4.3 Brennstoffpreise und CO ₂ -Kosten	17
2.4.4 Strompreiszusammensetzung	18
2.5 Regelleistung als Systemdienstleistung	20
2.6 Präqualifizierungsanforderungen	22
3 Grundlagen zu Bitcoin und Bitcoin-Mining	27
3.1 Entstehung von Bitcoin	27
3.2 Eigenschaften von Bitcoin	28
3.3 Wichtige Variablen für profitables Bitcoin-Mining	30
3.4 Kennzahlen im Bitcoin-Mining	32

4	Wirtschaftliche Analyse	35
4.1	Methodische Grundlagen der Fallbeispielberechnung	35
4.2	Kernparameter der Fallbeispielberechnung	36
4.3	Volllastbetrieb mit variiertem Strompreis	37
4.4	Bitcoin-Mining mit negativer Sekundärregelleistung	39
4.5	Bitcoin-Mining mit positiver Sekundärregelleistung	41
4.6	Bitcoin-Mining mit Primärregelleistung	42
4.7	Zusammenfassung der Fallbeispiele	44
5	Durchführung des Pilotprojekts	46
5.1	Aufbau	46
5.2	Wahl des Miningpools	48
5.3	Wahl der Softwareprogramme	49
5.4	Skripte	50
5.4.1	Aufzeichnung der Betriebsdaten	50
5.4.2	Dauerbetrieb unter Volllast	51
5.4.3	Effizienzanalyse	52
5.4.4	Negativer Regelleistungsbetrieb	53
5.4.5	Strompreisgesteuerte Leistungsanpassung	54
6	Datenauswertung	58
6.1	Methodik und Datenauswertung	58
6.2	Ergebnisse und Interpretation der Daten	59
6.2.1	Kosten für 1 BTC	59
6.2.2	Volllast	61
6.2.3	Effizienz	62
6.2.4	Primärregelleistung	63
6.2.5	Sekundärregelleistung	65
6.2.6	Reaktionsfähigkeit auf dynamische Daten	68
6.3	Diskussion zwischen Effizienz und Performance	69
7	Auswertung	71
7.1	Ergebnisse der Recherche	71
7.2	Ergebnisse der Durchführung	72
7.3	Ausblick	73
	Anhang	75
A	Liste der Anbieter von Regelleistung	76
B	Skripte	78
B.1	Aufzeichnung der Betriebsdaten	78
B.2	Durchführung der Effizienzmessung	78
B.3	Durchführung der Betriebsfahrt für negative Sekundärregelleistung	79
B.4	Abfrage der Nordpool Daten per API-Anfrage	80
B.5	Dynamische Steuerung des ASICs anhand der API-Daten	81
	Anhang	76

Inhaltsverzeichnis	III
Literaturverzeichnis	83
Eidesstattliche Erklärung	90

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zeitlicher Verlauf der Energieflüsse in Deutschland	5
2.2	Gebiete der Übertragungsnetzbetreiber	6
2.3	Ermittlung des Markträumungspreises anhand des Merit-Order-Prinzips	16
2.4	Durchschnittliche Leistungspreise in Deutschland	21
2.5	Durchschnittliche Arbeitspreise bei positiver Sekundär- und Tertiärregelenergie in Deutschland	22
2.6	Durchschnittliche Arbeitspreise bei negativer Sekundär- und Tertiärregelenergie in Deutschland	23
2.7	aFRR-Betriebsfahrt	24
2.8	Zulässige Abweichungen bei einer aFRR-Betriebsfahrt	25
2.9	Musterprotokoll zum Nachweis negativer aFRR	26
5.1	Aufbau des Pilotprojekts	47
6.1	zweimonatige Datenauswertung der Hashrate unter Volllast	61
6.2	Ermittlung des Effizienzoptimums	63
6.3	Datenauswertung der Bereitstellung primärer Regelleistung bei 20 °C	64
6.4	Datenauswertung der Bereitstellung sekundärer Regelleistung bei 30 °C	65
6.5	Temperaturverhalten der ASIC-Chips bei Leistungsänderung	66
6.6	Datenauswertung der Bereitstellung sekundärer Regelleistung bei 20 °C	67
A.1	Liste aller qualifizierten Anbieter für Regelleistung	76
A.2	Liste aller qualifizierten Anbieter für Regelleistung	77

Tabellenverzeichnis

2.1	Strompreiszusammensetzung für verschiedene Kundengruppen 2024	19
2.2	Strompreisentwicklung und Stunden mit niedrigen Preisen am Day-Ahead-Spotmarkt	19
4.1	Vergleich verschiedener Betriebsfälle für Bitcoin-Mining	37
4.2	Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining bei 20 ct/kWh	37
4.3	Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining bei 7 ct/kWh	38
4.4	Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining bei 5 ct/kWh	39
4.5	Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining unter Einbezug von negativer Sekundärregel- leistung	40
4.6	Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining unter Einbezug positiver Sekundärregel- leistung	41
4.7	Parameter zur Wirtschaftlichkeitsberechnung von Bitcoin-Mining für Primärre- gelleistung	42
4.8	Berechnung der täglichen Stromkosten und Vergütung für Bitcoin-Mining unter Einbezug von Primärregelleistung	43

Abkürzungsverzeichnis

ASIC	Application Integrated Circuit
FCR	Primärregelleistung
aFRR	Sekundärregelleistung
mFRR	Tertiärregelleistung
LÄB	Leistungsänderungsbereich
SB	Stationärer Bereich
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
OTC	Over-the-Counter
VNB	Verteilnetzbetreiber
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
SB	Stationärer Bereich
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
MRP	Markträumungspreis
POS	positiv
NEG	negativ
CAPEX	Capital Expenditures
OPEX	Operational Expenditures
TH	Terahash
RPi5	Raspberry Pi 5
LAN	Local Area Network
VPN	Virtual Private Network
API	Application Programming Interface
BOS	Braiiins Operating System

1 Einführung

Die Energiewende und die Transformation der Stromversorgung stellen Unternehmen und Netzbetreiber in Deutschland vor komplexe Herausforderungen. Während der Ausbau erneuerbarer Energien vorangetrieben wird, steigen die Strompreise für Haushalts- und Industriekunden kontinuierlich an und liegen deutlich über dem EU-Durchschnitt, wie aktuelle Daten belegen [Sta24a; Sta23]. Dieser Kostendruck trifft insbesondere die Industrie, die allein 45 Prozent des deutschen Stromverbrauchs ausmacht und zusammen mit Gewerbe, Handel und Dienstleistungen auf 70 Prozent kommt [Umw23]. Staatliche Umlagen, Abgaben und die Stromsteuer haben diese Belastung in den letzten Jahren weiter verschärft und gefährden die Wettbewerbsfähigkeit vieler Unternehmen [Cem25].

1.1 Motivation

Als Reaktion auf die hohen Energiepreise erwägen immer mehr Betriebe, ihren Eigenverbrauch durch selbst erzeugten Strom aus Photovoltaik-Anlagen zu decken. Die Bedingungen hierfür sind günstig, da sich der Strombedarf von Unternehmen häufig mit den produktiven Zeiten von Photovoltaik-Anlagen überschneidet, wodurch hohe Eigenverbrauchsquoten und verbesserte Renditen ermöglicht werden [Cem25]. Im Jahr 2022 investierten bereits ca. 160.000 Unternehmen in die Erzeugung oder Speicherung erneuerbarer Energien [KfW24].

Parallel treibt das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) den Ausbau erneuerbarer Energien voran, mit dem Ziel, ihren Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2030 auf 80 Prozent zu steigern [Deu23]. Dieser Wandel birgt jedoch Herausforderungen, insbesondere durch die fluktuierende Einspeisung von Wind- und Solarstrom, die flexible Lösungen zur Netzstabilisierung erfordert. Um diese zu gewährleisten, werden zunehmend flexible Regelmechanismen benötigt, die Leistungsschwankungen ausgleichen können [Chr23].

In den vergangenen Jahren hat Bitcoin eine zunehmend bedeutende Rolle im globalen Finanzsystem eingenommen. Während die bekannteste Kryptowährung ursprünglich einen Nischenmarkt bildete, entwickelte sie sich in den letzten Jahren zu einem der weltweit bedeutendsten Vermögenswerte. Inzwischen wird Bitcoin durch große Vermögensverwalter wie BlackRock beworben und als Anlageprodukt angeboten [Bla24]. Darüber hinaus wird Bitcoin in verschiedenen US-Bundesstaaten als potenzielles Reservevermögen diskutiert oder bereits in staatliche Finanzstrategien integriert [CCN25].

Auch die Bitcoin-Hashrate ist in den letzten Jahren um ein Vielfaches angestiegen [mem25]. Heute existieren weltweit zahlreiche hochprofessionelle Mining-Farmen, die sich auf die Sicherung des Netzwerks spezialisiert haben und daraus ein lukratives Geschäftsmodell entwickelt haben. Zu den wichtigsten Standorten zählen insbesondere die USA, Russland und China. Im Vergleich dazu spielt Deutschland mit einem geschätzten Anteil von lediglich etwa 0,025 Prozent am globalen Mining-Markt eine marginale Rolle [Has25]. Dies ist vor allem auf die hohen Strompreise im Land zurückzuführen.

Vor diesem Hintergrund untersucht diese Arbeit, inwiefern Bitcoin-Mining für Unternehmen mit erneuerbaren Energiequellen wirtschaftliche Potenziale eröffnen kann. Außerdem wird analysiert, ob Bitcoin-Mining als flexibler Lastabnehmer für Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber (ÜNB, VNB) technisch sowie wirtschaftlich geeignet ist.

1.2 Methodik

Die Thesis untersucht die wirtschaftlichen und technischen Potenziale von Bitcoin-Mining für Unternehmen mit erneuerbaren Energiequellen mithilfe eines methodischen Ansatzes, der quantitative und qualitative Methoden kombiniert. Im Mittelpunkt der Arbeit stehen zwei zentrale Forschungsfragen. Zum einen wird analysiert, unter welchen Bedingungen Bitcoin-Mining für deutsche Unternehmen mit erneuerbaren Energiequellen wirtschaftlich rentabel sein kann. Zum anderen wird geprüft, inwiefern sich Bitcoin-Mining technisch als flexibler Lastabnehmer für Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber eignet.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden sowohl eigene empirische Daten erhoben als auch eine systematische Auswertung bestehender Literatur und Marktdaten durchgeführt. Den Kern der Primärforschung bildet ein Pilotprojekt, das in Kooperation mit der Deutschen Telekom, dem Bankhaus Metzler und der Riva Engineering GmbH realisiert wurde. Im Rahmen dieses Projekts wurden über einen Zeitraum von sechs Monaten technische Leistungsparameter wie Effizienz, Stromverbrauch, Hashrate und Reaktionsfähigkeit von vier Minern erhoben. Die Datenerfassung erfolgte mithilfe von Python- und Shell-Skripten zur Automatisierung von Leistungsanpassungen sowie durch die Mining-Software Braiins OS+ für das Echtzeit-Monitoring der Geräte.

Um die Validität und Reliabilität der Ergebnisse sicherzustellen, wurden kritische Parameter wie Reaktionszeiten, Leistungsverbräuche und Effizienzoptima mehrfach gemessen. Diese Methodik ermöglichte eine umfassende Untersuchung der Forschungsfragen unter Einbezug praktischer Betriebserfahrungen und theoretischer Rahmenbedingungen.

Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung wurde ein Excel-basierter Mining-Rechner entwickelt, der zentrale Netzwerkdaten wie Hashrate, Schwierigkeitsgrad und Bitcoin-Preis sowie technische, betriebliche und wirtschaftliche Parameter der Mining-Infrastruktur berücksichtigt. Zusätzlich wurden Strommarktparameter in den Rechner integriert.

Parallel zur Primärforschung wurde eine umfangreiche Sekundärforschung betrieben. Dabei lag der Schwerpunkt auf der systematischen Auswertung wissenschaftlicher Literatur mit Fokus auf energiewirtschaftliche und regulatorische Aspekte. Zusätzlich wurden öffentlich verfügbare Marktdaten wie Strompreise, Regelleistungspreise und Bitcoin-Netzwerkparameter in die Analyse einbezogen.

1.3 Aufbau der Thesis

Die vorliegende Thesis gliedert sich in sieben Kapitel, die das Thema Bitcoin-Mining im deutschen Energiemarkt systematisch und umfassend behandeln. Das nachfolgende Kapitel behandelt den Aufbau und die Funktionsweise des deutschen Strommarktes und gibt Einblicke

in die unterschiedlichen Strommärkte und Vergütungsmechanismen. Kapitel drei führt in das Thema Bitcoin und Mining ein und zeigt die Berechnung marktrelevanter Kennzahlen auf. Im vierten Kapitel werden wirtschaftliche Fallbeispiele berechnet und ausgewertet. Kapitel fünf und sechs befassen sich mit dem Aufbau und der Durchführung des Pilotprojekts sowie der Analyse und Interpretation der gewonnenen Daten. Abschließend wird im letzten Kapitel die Arbeit zusammengefasst, ein Ausblick auf mögliche fortführende Forschungen gegeben, sowie konkrete Potenziale für Unternehmen aufgezeigt.

Innerhalb dieser Thesis werden die Begriffe ASIC (Application Specific Integrated Circuit) und Miner bzw. Bitcoin-Miner als Synonyme verwendet.

Zur besseren Verständlichkeit wird in dieser Thesis eine spezifische Schreibweise zwischen der Beschreibung des Bitcoin-Netzwerks und der Währungseinheit vorgenommen. Der Begriff Bitcoin (mit großen "B") bezieht sich auf das gesamte Bitcoin-Netzwerk und umfasst die Blockchain-Technologie, das Protokoll, die Software sowie alle anderen technischen Aspekte, die mit der Infrastruktur des Bitcoin-Netzwerks verbunden sind. Der Begriff bitcoin (mit kleinem "b") bzw. BTC bezieht sich auf die digitale Währung selbst bzw. auf die monetären Aspekte.

2 Der deutsche Strommarkt

Der deutsche Strommarkt ist ein komplexes Geflecht aus technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Strukturen, das die Grundlage für eine sichere und effiziente Stromversorgung bildet. Dieses Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die zentralen Akteure und Prozesse - von der Erzeugung über Übertragung und Verteilung bis hin zum Vertrieb und der Liberalisierung des Marktes. Anschließend werden die wichtigsten Marktmechanismen wie Spotmarkt, Terminmarkt und OTC-Handel (Over-the-Counter) erläutert, die das tägliche Marktgeschehen bestimmen. Ein besonderer Fokus liegt auf den Regelleistungsmärkten, in denen Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung zur Netzstabilisierung bereitgestellt werden. Zudem wird die Strompreisbildung analysiert, wobei das Merit-Order-Prinzip, die Rolle erneuerbarer Energien sowie die Zusammensetzung und Entwicklung der Strompreise im Mittelpunkt stehen. Abschließend werden die Systemdienstleistungen und die Voraussetzungen für die Teilnahme am Strommarkt beleuchtet, um die Besonderheiten und Herausforderungen des deutschen Stromsystems umfassend darzustellen.

2.1 Grundlagen des deutschen Strommarkts

Das deutsche Stromsystem gliedert sich traditionell in vier Wertschöpfungsstufen: Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Vertrieb. Diese Struktur bildet die Grundlage für die Organisation, Regulierung und Versorgungssicherheit des deutschen Strommarkts. Entsprechend lässt sich das Stromnetz in verschiedene Spannungsebenen unterteilen: Höchstspannung, Hochspannung, Mittelspannung und Niederspannung. Während die Übertragungsnetzbetreiber für das Höchstspannungsnetz verantwortlich sind, obliegt der Betrieb der Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze den regionalen und lokalen Verteilnetzbetreibern [Bun24a].

2.1.1 Erzeugung

Aus einer Mitteilung des Statistischen Bundesamts im Jahr 2024 wurden 431,5 Milliarden Kilowattstunden an Strom erzeugt und in das deutsche Stromnetz eingespeist. Dies sind 3,6 Prozent weniger als im Vorjahr. Der Rückgang begründet sich mit einem geringeren Strombedarf aufgrund des Produktionsrückgangs des produzierenden Gewerbes sowie einem verstärkten Stromimport aus dem Ausland. Der Anteil der aus erneuerbaren Energiequellen stammenden Stromeinspeisung in das deutsche Netz belief sich im Jahr 2024 auf 59,4 Prozent. Der Stromimport aus dem Ausland hat sich im Vergleich zum Vorjahr von 9,2 Milliarden Kilowattstunden auf 26,3 Milliarden Kilowattstunden fast verdreifacht. Abbildung 2.1 verdeutlicht, dass die inländische Netzeinspeisung seit 2018 einen signifikanten Rückgang verzeichnet. Die tatsächlich in den inländischen Stromnetzen verfügbare Strommenge ergibt sich aus der Summe der inländischen Stromeinspeisung und der Stromimporte abzüglich der Stromexporte. Während 2018 die tatsächlich in den inländischen Stromnetzen verfügbare Strommenge noch 518 Milliarden Kilowattstunden betrug, sank diese im Jahr 2024 um 11,6 Prozent auf 457,8 Milliarden Kilowattstunden [Sta24b].

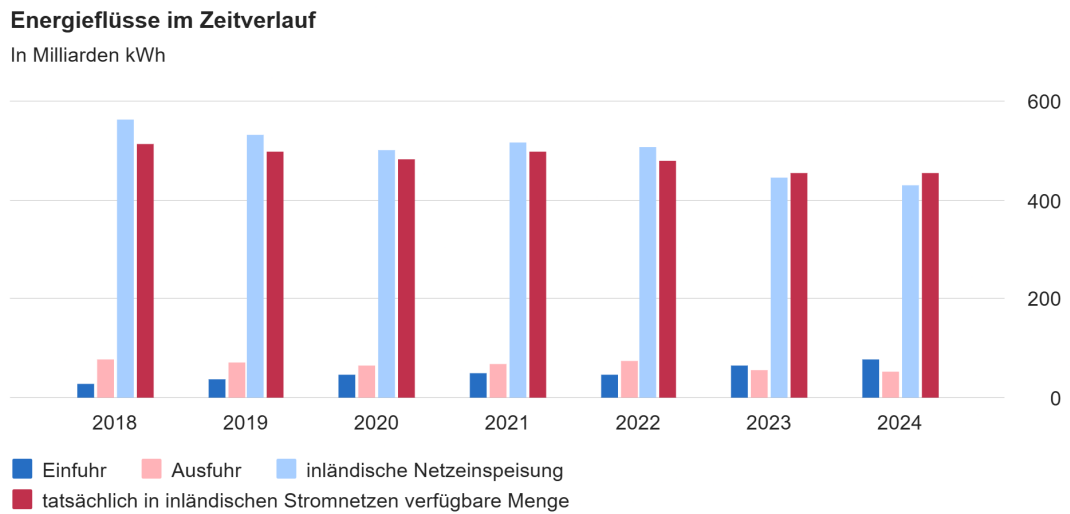


Abbildung 2.1: Zeitlicher Verlauf der Energieflüsse in Deutschland [Sta24b]

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass Deutschland im Jahr 2023 - nach zwei Jahrzehnten mit durchgehend positivem Stromhandelsbilanzsaldo - erstmals wieder zum Nettoimporteur von Elektrizität wurde, ein Trend, der sich auch 2024 fortsetzte [Ago24]. Faktoren wie der Rückbau konventioneller Kraftwerkskapazitäten wie der Abschaltung von Kernkraftwerken [Ago24] und der Rückgang der Kohlestromversorgung [Eur24] konnten nicht vollständig durch den Zubau erneuerbarer Energien kompensiert werden. Darüber hinaus sorgte die kostengünstige Stromerzeugung durch Wind- und Wasserkraft in Skandinavien dafür, dass es wirtschaftlich sinnvoller war, Strom aus diesen Ländern zu importieren, anstatt ihn in deutschen Kohle- und Gaskraftwerken zu produzieren [Fra24].

Mit der Liberalisierung des deutschen Strommarktes (siehe Kapitel 2.1.5) dezentralisierte sich über die Jahre hinweg auch die Stromerzeugung. Die Zahl der in das deutsche Stromnetz einspeisenden Photovoltaikanlagen hat sich in den letzten 6 Jahren von 1,7 Millionen auf 3,4 Millionen Stück verdoppelt [Sta24c]. Immer mehr Unternehmen und private Haushalte machen sich die Solarenergie für die Produktion oder den eigenen Verbrauch zunutze. Aufgrund der Dezentralisierung des Stromnetzes werden die vier Übertragungsnetzbetreiber vor neue Herausforderungen gestellt.

2.1.2 Übertragung

Die Netzfrequenz von 50 Hz im europäischen Verbundsystem wird durch ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Last innerhalb einer Toleranz von $\pm 0,2$ Hz aufrechterhalten. Diese Frequenzstabilität erfordert die Kompensation von Leistungsungleichgewichten infolge von Störungen wie Kraftwerksausfällen, fluktuierender Einspeisung oder Lastsprüngen [Nex24a]. Für die operative Umsetzung dieser Anforderungen sind die Übertragungsnetzbetreiber verantwortlich, die das überregionale Höchstspannungsnetz (220–380 kV) betreiben und den Strom über große Distanzen transportieren [Nex24b]. Sie nehmen elektrische

Energie von Großkraftwerken und Anlagen aus regenerativen Energiequellen auf und leiten sie über Umspannwerke in die nachgelagerten Verteilnetze weiter. Zudem ermöglichen sie durch internationale Verbindungsleitungen und Grenzkuppelstellen den grenzüberschreitenden Stromhandel und tragen so zur Versorgungssicherheit und Integration des europäischen Strommarkts bei [Bun24a]. Anders als die Stromerzeuger und Stromverteiler bilden die vier Übertragungsunternehmen TenneT, 50Hertz, Amprion und TransnetBW ein natürliches, reguliertes Monopol [Nex24c]. Abbildung 2.2 [Bun24a] bildet die geografische Unterteilung der Zuständigkeitsbereiche der Übertragungsnetzbetreiber ab.

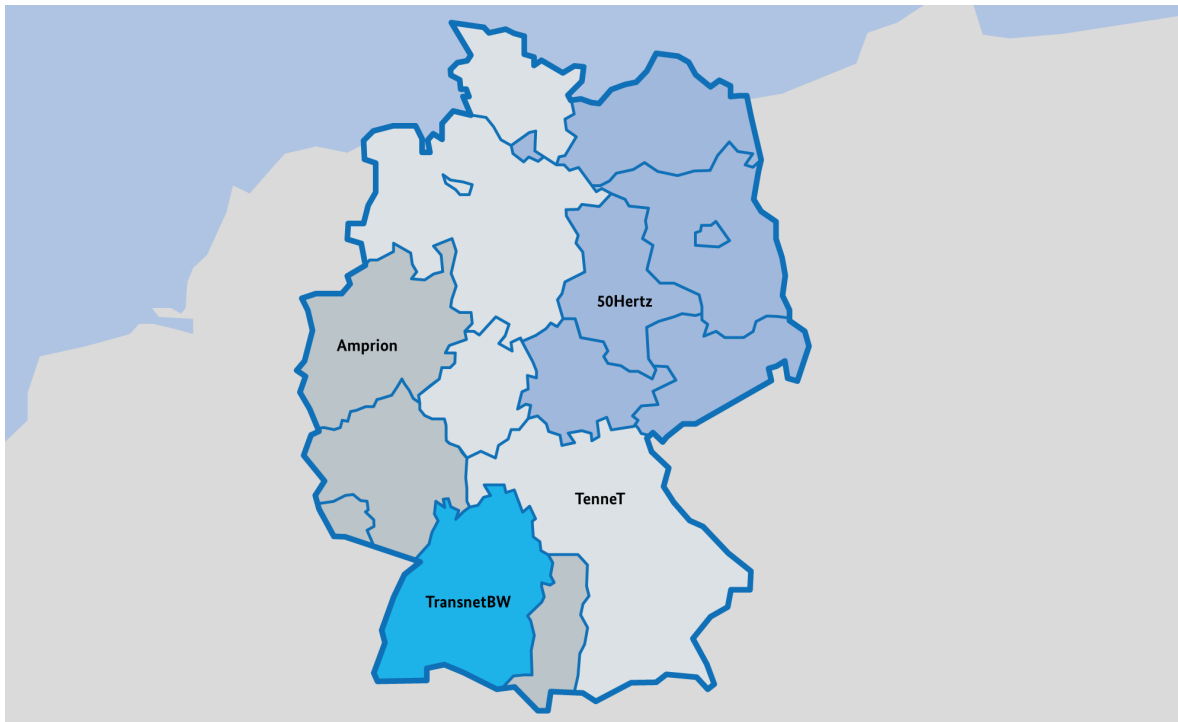


Abbildung 2.2: Gebiete der Übertragungsnetzbetreiber [Bun24a]

Die Übertragungsnetzbetreiber sind nach §11 Abs. 1 EnWG verpflichtet, ein „sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz diskriminierungsfrei zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht zu optimieren, zu verstärken und auszubauen, soweit es wirtschaftlich zumutbar ist“ [Bun24b]. Zu den Instrumenten, um die nach §11–16a EnWG geregelten Verpflichtungen einhalten zu können, zählen die Systemdienstleistungen, welche die Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau und die Betriebsführung umfassen [Nex24a].

Finanziert werden die Systemdienste durch die Netzentgelte. Im Fokus der in den Kapiteln 2.5 behandelten Systemdienstleistungen steht insbesondere die Regelleistung.

2.1.3 Verteilung

Die Verteilnetzbetreiber bilden das Rückgrat der Stromversorgung in Deutschland, da sie für Bau, Erhalt und Betrieb der Netzebenen von der Nieder- bis zur Hochspannung sowie der zugehörigen Umspannebenen verantwortlich sind. Über 800 VNB unterschiedlichster Größe,

vom kleinen lokalen Stadtwerk bis zum großen, entflochtenen Netzbetreiber mit mehr als 100.000 angeschlossenen Kunden, betreiben das Verteilnetz. Während große VNB Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebenen abdecken, sind kleinere meist nur für Nieder- und Mittelspannung zuständig und beziehen ihren Strom über vorgelagerte Verteilernetzbetreiber [[Bun25a](#)].

Das Verteilernetz ist entscheidend für die Umsetzung der Energiewende, da es die zentrale Grundlage für den Anschluss dezentraler Erzeuger wie Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie neuer Verbraucher aus dem Bereich Elektromobilität oder Wärmewende bildet. Besonders herausfordernd ist dabei, dass die Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen regional sehr unterschiedlich ausfallen und der Netzausbau daher gezielt und vorausschauend geplant werden muss [[Bun25a](#)].

Grundsätzlich unterliegen die Verteilnetzbetreiber denselben in den §§ 11 bis 16a EnWG geregelten Pflichten und Aufgaben wie die Übertragungsnetzbetreiber. Allerdings unterscheiden sich die konkrete Ausgestaltung und Umsetzung dieser Vorgaben in Abhängigkeit von der jeweiligen Netzebene und den spezifischen technischen sowie organisatorischen Anforderungen. Beispielsweise sind bestimmte Regelungen, wie die Erstellung von Regionalszenarien und Netzausbauplänen, insbesondere für große VNB mit mehr als 100.000 angeschlossenen Kunden relevant, während andere Vorschriften für alle Netzbetreiber gleichermaßen gelten [[FfE25](#); [Sta24d](#)].

Die Verteilnetzbetreiber sind - wie die Übertragungsnetzbetreiber - als natürliche Monopole organisiert und unterliegen einer strengen Regulierung durch die Bundesnetzagentur; Wettbewerb findet auf der Netzebene nicht statt, sondern wurde im Zuge der Liberalisierung auf die Sektoren Erzeugung und Vertrieb beschränkt.

2.1.4 Vertrieb

Der Vertrieb bildet die Schnittstelle zwischen dem Strommarkt und dem Endverbraucher. Stromvertriebe kaufen elektrische Energie entweder direkt von Erzeugern oder an der Strombörse ein und verkaufen diese an Haushalte, Gewerbe und Industrie weiter. Im Zuge der Liberalisierung des Strommarktes (siehe Kapitel [2.1.5](#)) wurde der Vertrieb vollständig dem Wettbewerb geöffnet. Seitdem können Verbraucher ihren Stromanbieter frei wählen, was zu einer Vielzahl neuer Marktteilnehmer und Tarifmodelle geführt hat [[Int24a](#)].

Im Gegensatz zu den Netzbetreibern, die als natürliche Monopole reguliert werden, agieren Stromvertriebe in einem wettbewerblichen Umfeld. Sie sind für die Gestaltung von Stromtarifen, die Abrechnung, den Kundenservice sowie zunehmend für innovative Dienstleistungen wie Grünstromprodukte, Smart-Home-Lösungen oder dynamische Preismodelle verantwortlich. Der Vertrieb übernimmt außerdem die Rolle des Vertragspartners für die Endkunden. Während der physische Stromtransport stets über die regionalen Netzbetreiber erfolgt, erhalten die Kunden ihre Stromrechnung und alle vertragsrelevanten Informationen vom gewählten Stromvertrieb [[Gre24](#)].

Im Stromvertrieb ist in den letzten Jahren eine zunehmende Vielfalt an Anbietern und Tarifmodellen zu beobachten. Während die vier großen Energieversorger EnBW, E.ON, RWE und Vattenfall weiterhin wichtige Marktakteure bleiben, gewinnen kleinere und regionale Anbieter stetig an Bedeutung. Besonders im Haushaltskundensegment zeigt sich, dass der Wettbewerb zunimmt und die Marktanteile der größten Unternehmen weiter zurückgehen. Dennoch bestehen in einigen Teilmärkten, wie etwa bei Heizstrom oder der Grundversorgung, weiterhin hohe Konzentrationen. Insgesamt ist jedoch davon auszugehen, dass der Wettbewerb im Vertrieb auch künftig weiter an Dynamik gewinnen wird [Bun24c].

2.1.5 Liberalisierung des Strommarktes

Bis Ende des 20. Jahrhunderts war der deutsche Energiemarkt durch monopolistische Strukturen geprägt und durch das EnWG von 1935 gestützt. Das Gesetz zielte auf die Vermeidung volkswirtschaftlicher Ineffizienzen wie Doppelinvestitionen und sicherte eine zentralisierte, gebietsmonopolistische Versorgung durch vertikal integrierte Energieversorgungsunternehmen. Auch in Europa herrschten 1990 noch ausschließlich Monopole, wodurch die gesamte Wertschöpfungskette des Strommarktes meist in der Hand eines bzw. weniger staatlicher Unternehmen lag. Die Energieversorgungsunternehmen kontrollierten die gesamte Wertschöpfungskette - von der Erzeugung über die Übertragung bis zum Vertrieb - und genossen exklusive Versorgungsrechte in festgelegten Gebieten. Strompreise wurden staatlich festgelegt und ein Marktzugang für kleine, privatwirtschaftliche Unternehmen war nicht möglich [Nex24c]. Der fehlende Wettbewerb führte jedoch zu Kosteneffizienzen, da Preise ohne Marktdruck an Endkunden weitergegeben wurden. Im Jahr 1996 leitete die Europäische Union mit der entsprechenden Richtlinie [Eur96] die schrittweise Liberalisierung der nationalen Strommärkte ein. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem ersten Unbundling, also der Entflechtung der unterschiedlichen Tätigkeitsbereiche eines Energieversorgungsunternehmens wie Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Vertrieb. Ziel war es, durch die Schaffung eines integrierten europäischen Elektrizitätsbinnenmarktes den Wettbewerb zu fördern, die Netzkosten zu senken und die Versorgungssicherheit zu stärken. Die Vorgaben der EU [Eur96] wurden 1998 durch eine Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) in deutsches Recht umgesetzt [Bun98]. Zunächst sah die EU-Richtlinie lediglich eine buchhalterische Trennung der Geschäftsbereiche vor, wodurch jedoch noch kein echter Wettbewerb ermöglicht wurde [Nex24c].

Mit der Novelle des EnWG vom 4. August 2011 setzte Deutschland das Dritte Energiepaket der EU aus dem Jahr 2009 in nationales Recht um. Diese Gesetzesänderung ging über die bisherigen Maßnahmen der Strommarktliberalisierung hinaus und forderte insbesondere eine konsequente Trennung des Netzbetriebs von der Stromerzeugung und dem Vertrieb. Ziel des Unbundlings war es, die Unabhängigkeit der Netzbetreiber zu gewährleisten, Transparenz zu schaffen und einen diskriminierungsfreien Netzzugang sicherzustellen. Damit sollten faire Wettbewerbsbedingungen in den vor- und nachgelagerten Marktstufen gefördert und das Vertrauen der Marktteilnehmer gestärkt werden. Für Übertragungsnetzbetreiber wurde im Rahmen des dritten Energiebinnenmarktpakets zudem die Zertifizierung durch die Regulierungsbehörde eingeführt, um die Einhaltung der Entflechtungsvorgaben nachzuweisen [Sch25].

In den Jahren 2010 bis 2012 erfolgte die eigentumsrechtliche Trennung der Übertragungsnetze von den großen Energiekonzernen EnBW, E.ON, RWE und Vattenfall Europe. Durch Verkäufe und Ausgliederungen entstanden die heute unabhängigen Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz Transmission, Amprion, TenneT TSO und TransnetBW. Damit wurde die Stromübertragung in Deutschland organisatorisch und rechtlich von der Stromerzeugung und dem Vertrieb getrennt. Die vier bestehenden Übertragungsnetze mit ihren jeweiligen Regelzonen sind historisch gewachsen und spiegeln weniger wirtschaftliche oder technische Überlegungen wider als vielmehr frühere geopolitische Rahmenbedingungen. Eine Neugestaltung der Regelzonen nach rein effizienzorientierten Kriterien hätte vermutlich zu einer anderen Aufteilung geführt [Sch25].

Eine zentrale Folge der Liberalisierung und des Unbundlings ist der diskriminierungsfreie Zugang zu den Netzen für alle Marktteilnehmer. Die Netzbetreiber erhalten dafür ein reguliertes Netzentgelt, das von der Bundesnetzagentur festgelegt wird. Dieser freie Netzzugang ist die Grundlage für den offenen und stetig wachsenden Handel mit elektrischer Energie. Vor der Liberalisierung war eine Nutzung der Netze durch Dritte kaum möglich [Sch25].

Trotz der rechtlichen und organisatorischen Trennung bestehen weiterhin physikalische Abhängigkeiten zwischen Erzeugung, Last und Netz. Die Systemführung der Übertragungsnetzbetreiber muss daher kontinuierlich das Gleichgewicht zwischen Einspeisung und Verbrauch überwachen und bei Bedarf steuernd eingreifen, um die Netzstabilität zu gewährleisten [Sch25].

2.2 Marktmechanismen

2.2.1 Spotmarkt

Der Spotmarkt bildet das Herzstück des kurzfristigen Stromhandels in Deutschland und Europa. Hier werden Stromlieferungen mit physischer Erfüllung entweder am Vortag (Day-Ahead) oder am selben Tag (Intraday) gehandelt. Die Mindestabnahmemenge einer jeden Stromlieferung beträgt 0,1 MWh [DIH24]. Im Gegensatz zum Terminmarkt (siehe Kapitel 2.2.2), auf dem Stromlieferungen für Wochen, Monate oder Jahre im Voraus vereinbart werden, ermöglichen die Spotmärkte eine flexible und zeitnahe Anpassung an die tatsächlichen Erzeugungs- und Verbrauchsbedingungen. Dies ist besonders relevant angesichts der zunehmenden Einspeisung volatiler erneuerbarer Energien, deren Prognosegüte sich erst kurzfristig vor der Lieferung deutlich verbessert [Bun24c].

Der Spotmarkt setzt sich aus zwei zentralen Teilmärkten zusammen: dem Day-Ahead-Markt, auf dem Strom für jede Stunde des Folgetages in einer zentralen Auktion gehandelt wird, und dem Intraday-Markt, der einen kontinuierlichen Handel bis kurz vor Lieferbeginn ermöglicht. Beide Märkte werden in Deutschland vor allem über die EPEX SPOT [EPE24a], aber auch über Nord Pool [Nor24] und EXAA [EXA24] abgewickelt. Die physische Lieferung erfolgt in die vier deutschen Regelzonen sowie nach Luxemburg [Bun24c].

Die Preisbildung auf dem Spotmarkt erfolgt transparent und nach marktwirtschaftlichen Prinzipien: Angebot und Nachfrage treffen in standardisierten Produkten aufeinander, wobei die kurzfristigen Preise als wichtiges Referenzsignal für den gesamten Strommarkt dienen [Bun24a]. Durch die Kopplung der europäischen Märkte und die Integration in gemeinsame Auktions- und Handelsplattformen wird zudem eine effiziente grenzüberschreitende Allokation von Strom ermöglicht [EPE24b]. Der Spotmarkt trägt somit entscheidend zur Versorgungssicherheit, zur effizienten Integration erneuerbarer Energien und zur Preisfindung im Stromsystem bei [EPE24c]. Die spezifischen Ausgestaltungen und Funktionsweisen der Teilmärkte Day-Ahead und Intraday werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert betrachtet.

2.2.1.1 Day-Ahead-Handel

Der Day-Ahead-Handel beschreibt den Kauf und Verkauf von Strom am Tag vor dessen tatsächlicher Erzeugung und Lieferung. Diese Geschäfte werden entweder zentral an der Strombörse im Rahmen der sogenannten Day-Ahead-Auktion oder direkt zwischen Marktteilnehmern im OTC-Handel abgeschlossen. Ziel ist es, die geplante Stromproduktion und den voraussichtlichen Verbrauch bereits im Voraus möglichst präzise aufeinander abzustimmen und so eine effiziente Markt- und Systemsteuerung zu ermöglichen [Nex24d].

Ablauf und Funktionsweise des Day-Ahead-Markts

Der Day-Ahead-Markt ist eine tägliche Auktion, in der Strom für jede Stunde des Folgetags gehandelt wird. Der Prozess läuft wie folgt ab:

1. **Gebotsabgabe:** Marktteilnehmer (z. B. Stromerzeuger oder -händler) geben bis 12:00 Uhr mitteleuropäischer Zeit (CET) ihre Kauf- oder Verkaufsgebote ab. Diese Gebote können zwei Formen haben:
 2. • Einzelstunden-Orders: Gebote für jede einzelne Stunde des Folgetags.
 - Block-Orders: Gebündelte Gebote für mehrere zusammenhängende Stunden (z. B. ein Block von 8:00 bis 20:00 Uhr).Rund eine Stunde später gibt die Börse bekannt, wer aus den abgegebenen Geboten die Zuschläge erhält [Amp19].
3. **Preisberechnung:** Die Preisbildung im Day-Ahead-Markt erfolgt durch den Abgleich aller Kauf- und Verkaufsgebote in einer zentralen Auktion. Aus diesen Geboten werden für jede Stunde Angebots- und Nachfragekurven abgeleitet, deren Schnittpunkt den einheitlichen Markträumungspreis (MRP) bestimmt. Dieser Preis gilt verbindlich für alle Marktteilnehmer innerhalb einer Gebotszone. Die genaue Methodik der Gebotssortierung und Kurvenbildung folgt dem Merit-Order-Prinzip, das im Kapitel 2.4.1 detaillierter erläutert wird [EPE24d; Bun24c].
4. **Preisgültigkeit:** Der MRP gilt für alle Marktteilnehmer, unabhängig davon, ob ihr individuelles Gebot über oder unter diesem Preis lag.
 - Käufer, die einen höheren Preis als den MRP geboten haben, zahlen den MRP.
 - Verkäufer, die einen niedrigeren Preis als den MRP geboten haben, erhalten den MRP.

5. **Handelsabschluss:** Die Börse weist die gehandelten Strommengen automatisch zu. Es gibt keine direkte Zuordnung zwischen einzelnen Käufern und Verkäufern. Stattdessen wird sichergestellt, dass die gesamte gekaufte Menge der gesamten verkauften Menge entspricht.

Vorteile dieses Systems:

- **Transparenz:** Alle Teilnehmer handeln zum gleichen Preis.
- **Effizienz:** Die Auktion bündelt die Liquidität zu einem Zeitpunkt und ermöglicht eine faire Preisbildung.
- **Planungssicherheit:** Erzeuger und Verbraucher können ihre Strommengen für den Folgetag frühzeitig festlegen [EPE24d].

2.2.1.2 Intraday-Handel

Der Intraday-Handel bezeichnet den Kauf und Verkauf von Strom am Tag der Lieferung selbst. Das Hauptziel des Intraday-Handels ist es, kurzfristige Prognoseabweichungen bei Erzeugung und Verbrauch auszugleichen und so die Bilanzkreise möglichst genau auszugleichen [Nex24e]. Damit stellt der Intraday-Handel eine wichtige Erweiterung des Day-Ahead-Handels dar, indem er zusätzliche Flexibilität bietet und kurzfristige Schwankungen von Angebot und Nachfrage innerhalb eines Handelstages ausgleicht [Gri24].

Ablauf und Funktionsweise des Intraday-Markts

Der Intraday-Markt ermöglicht es, Stromprodukte für den aktuellen Liefertag bis kurz vor Lieferbeginn flexibel zu handeln. Der Ablauf gestaltet sich wie folgt:

1. **Handelsstart und Gebotsabgabe:** Der Intraday-Handel beginnt in der Regel am Vortag um 15 Uhr nach Abschluss des Day-Ahead-Markts [Nex24f]. Marktteilnehmer können kontinuierlich Kauf- und Verkaufsgebote für verschiedene Zeitsegmente (Stunden, Halbstunden, Viertelstunden) einstellen.
 - Einzelprodukte: Strom für einzelne Stunden oder Viertelstunden
 - Blockprodukte: Gebündelte Zeitabschnitte (z. B. mehrere aufeinanderfolgende Viertelstunden) [EPE24c]
2. **Preisbildung:** Die Preisbildung erfolgt im Intraday-Markt nach dem „Pay-as-Bid“-Prinzip. Sobald ein Kauf- und ein Verkaufsgebot preislich übereinstimmen, wird der Handel sofort abgeschlossen und der vereinbarte Preis gilt nur für diese Transaktion. Im Gegensatz zum Day-Ahead-Handel (Merit-Order-Prinzip) gibt es keinen einheitlichen Marktpreis pro Zeitintervall, sondern der Preis kann sich im Tagesverlauf je nach Angebot und Nachfrage stark verändern [Nex24f].
3. **Handelsschluss:** Der Intraday-Handel ist sehr kurzfristig: Produkte können meist bis zu fünf Minuten vor Lieferbeginn gehandelt werden. Im grenzüberschreitenden Handel (SIDC) endet der Handel für bestimmte Produkte 60 Minuten vor Lieferung, innerhalb der deutschen Gebotszone ist Handel bis direkt zum Lieferzeitpunkt möglich [Bun24c, S. 161].

4. **Handelsabschluss:** Wie im Day-Ahead-Markt erfolgt die automatische Zuordnung der gehandelten Strommengen. Es gibt keine direkte Zuordnung zwischen einzelnen Käufern und Verkäufern; die Börse sorgt für die Abwicklung und Bilanzierung der Geschäfte [EPE24c].

Vorteile dieses Systems:

- **Flexibilität:** Marktteilnehmer können auf kurzfristige Änderungen in Erzeugung und Verbrauch reagieren.
- **Integration erneuerbarer Energien:** Prognoseabweichungen, insbesondere bei Wind- und Solarstrom, können kurzfristig ausgeglichen werden.
- **Systemstabilität:** Der Intraday-Markt trägt dazu bei, Bilanzkreisabweichungen zu minimieren und die Netzstabilität zu sichern.

2.2.2 Terminmarkt

Am Terminmarkt werden sogenannte Terminkontrakte (Futures) gehandelt. Diese Verträge legen fest, dass eine bestimmte Strommenge zu einem festgelegten Preis in einem definierten Zeitraum in der Zukunft geliefert wird. Die wichtigsten Produkte sind Monats-, Quartals- und Jahresfutures, die entweder als Baseload (Bandlieferung) oder als Peakload (Lieferung zu Spitzenlastzeiten) ausgestaltet sind. Ein Terminmarktvertrag kann entweder als „Base“ oder als „Peak“ abgeschlossen werden. Ein Base-Kontrakt steht für eine durchgehende Stromlieferung, bei der in jeder 15-Minuten-Periode rund um die Uhr die gleiche Leistung bereitgestellt wird. Ein Peak-Kontrakt hingegen umfasst die Stromlieferung mit konstanter Leistung ausschließlich von Montag bis Freitag zwischen 8 und 20 Uhr. Außerhalb dieser Zeiten sowie an Wochenenden findet beim reinen Peak-Kontrakt keine Stromlieferung statt [Int24b; Nex24g].

Der Terminmarkt bietet Marktteilnehmern die Möglichkeit, sich gegen Preisschwankungen abzusichern (Hedging) und die Stromversorgung langfristig zu planen. So können beispielsweise Energieversorger den Bedarf ihrer Kunden bereits Jahre im Voraus zu festen Preisen eindecken, während Erzeuger ihre künftigen Einnahmen sichern können [Enp24]. Der Handel erfolgt in Deutschland hauptsächlich an der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig, die als zentrale Börse für standardisierte Strom-Termingeschäfte fungiert [Int24b].

Ein besonderes Merkmal des Strom-Terminmarkts ist, dass die Verträge nicht auf einen einzelnen Liefertag, sondern auf einen Lieferzeitraum (z. B. ein Monat, Quartal oder Jahr) abgeschlossen werden. Die kleinste handelbare Einheit beträgt in der Regel 1 MW, was bei einem Jahreskontrakt einer Lieferung von 8.760 MWh entspricht [Int24b].

2.2.3 OTC-Handel

Der OTC-Handel bezeichnet den außerbörslichen Handel von Strom direkt zwischen zwei Parteien, ohne dass eine Börse oder eine zentrale Abwicklungsstelle zwischengeschaltet ist [Amp19]. Die Vertragsparteien vereinbaren individuell Preis, Menge, Laufzeit und weitere

Konditionen. Der OTC-Handel ist in Deutschland von großer Bedeutung: Rund 75–80 Prozent des gesamten Stromhandelsvolumens werden auf diesem Weg abgewickelt [Ene24a; Amp19; Deu22]. Die restlichen 20–25 Prozent werden an der Strombörse (Spotmarkt und Terminmarkt) gehandelt.

Im OTC-Handel werden sowohl kurzfristige als auch langfristige Stromlieferverträge abgeschlossen. Besonders große Energieversorger, Industriekunden und Kraftwerksbetreiber nutzen diese flexible Form, um maßgeschneiderte Verträge zu schließen oder auf spezielle Bedürfnisse einzugehen. Die Preise im OTC-Markt orientieren sich in der Regel am Börsenpreis, können aber je nach Marktlage und Verhandlungsspielraum abweichen [DIH24].

Ein Vorteil des OTC-Handels ist die Flexibilität bei der Vertragsgestaltung, während der Börsenhandel auf standardisierte Produkte beschränkt ist. Allerdings sind die Risiken im OTC-Handel höher, da die Absicherung gegen Zahlungsausfälle und andere Risiken individuell geregelt werden muss. Zur Vereinfachung und Risikominimierung werden in der Praxis häufig Standardverträge wie der EFET-Rahmenvertrag verwendet [DIH24; Ene24b].

2.3 Regelleistungsmärkte

Im deutschen Stromsystem werden drei Hauptarten von Regelleistung unterschieden, die sich hinsichtlich ihrer Aktivierungszeit, ihrer technischen Anforderungen und ihres Einsatzbereichs unterscheiden. Zentral ist dabei die Unterscheidung zwischen Regelleistung, also der Vorhaltung von Kapazitäten, die zur Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden können, und Regelarbeit, die die tatsächliche Aktivierung dieser Kapazitäten und die damit verbundene Energiemenge beschreibt, die zur Frequenzregulierung eingespeist oder aus dem Netz entnommen wird.

2.3.1 Primärregelleistung

Hierbei handelt es sich um die schnellste und grundlegendste Form der Regelreserve. Sie reagiert automatisch und dezentral auf Frequenzabweichungen im europäischen Verbundnetz, ohne dass ein expliziter Abruf durch die Übertragungsnetzbetreiber erforderlich ist. Sobald eine Frequenzänderung auftritt, muss die FCR innerhalb von 30 Sekunden vollständig aktiviert werden und für mindestens 15 Minuten kontinuierlich bereitstehen. Im Gegensatz zu anderen Regelleistungsarten gibt es für die FCR keinen separaten Regelmarkt. Die Vergütung erfolgt ausschließlich für die Vorhaltung der Kapazität (Leistungspreis), unabhängig davon, ob die Leistung tatsächlich genutzt wird. Grund hierfür sind die dezentrale Aktivierung und die messtechnischen Herausforderungen bei der Erfassung der tatsächlich abgerufenen Energiemenge [reg24a; Nex24h].

Die FCR wird als symmetrisches Produkt ausgeschrieben: Anbieter müssen sowohl Leistungserhöhung (bei Unterfrequenz) als auch Leistungsabsenkung (bei Überfrequenz) in gleicher Höhe anbieten. Die Beschaffung erfolgt täglich in 4-Stunden-Produkten über ein grenzüberschreitendes europäisches Ausschreibungsverfahren, an dem sich zahlreiche Nachbarländer beteiligen. Dies gewährleistet eine kosteneffiziente Bereitstellung und stärkt die europäische

Netzstabilität. Die Mindestgebotsgröße liegt, wie bei allen anderen Regelleistungsmärkten, bei 1 MW. Die Aktivierung der Primärreserve erfolgt vollautomatisch und wird durch die Netzfrequenz gesteuert. Technische Einheiten wie Kraftwerke oder Batteriespeicher müssen dabei eigenständig auf Frequenzabweichungen ohne zentrale Steuerung reagieren können [reg24a; 50H24].

2.3.2 Sekundärregelleistung

Die Sekundärregelleistung (aFRR) wird automatisch durch zentrale Regler der Übertragungsnetzbetreiber aktiviert, sobald die Primärregelung nicht mehr ausreicht, um die Netzfrequenz zu stabilisieren. Die aFRR muss innerhalb von fünf Minuten nach Aktivierung vollständig bereitgestellt werden und für die gesamte Produktlänge von vier Stunden kontinuierlich verfügbar sein. Die tatsächliche Aktivierung der Regularbeit erfolgt in 15-Minuten-Intervallen, wobei die Leistung jeweils mindestens 15 Minuten lang gehalten werden muss [reg24b; Nex24i].

Die Ausschreibung der Regelleistung erfolgt täglich, wobei positive und negative Regelreserven getrennt voneinander angeboten werden. Positive Regelreserve wird eingesetzt, wenn im Stromsystem ein Erzeugungsdefizit besteht, also der Verbrauch die Erzeugung übersteigt. Sie wird bereitgestellt, indem entweder zusätzliche Stromerzeugung aktiviert oder der Verbrauch gesenkt wird. Negative Regelreserve wird benötigt, wenn ein Erzeugungsüberschuss vorliegt, also die Stromerzeugung den Verbrauch übersteigt. In diesem Fall wird die Erzeugung reduziert oder der Verbrauch erhöht, um das Gleichgewicht wiederherzustellen. Zusätzlich ist die Bildung von Anbieterpools möglich, sodass mehrere technische Einheiten gemeinsam die geforderte Leistung erbringen können. Bei aFRR erfolgt eine Vergütung sowohl für die Vorhaltung der Regelleistung als auch für die Erbringung der Regularbeit. Anbieter, die im Regelleistungsmarkt einen Zuschlag erhalten haben, müssen dann auch im Regularbeitsmarkt ein Gebot abgeben. Zudem können auch Anbieter, die im Regelleistungsmarkt keinen Zuschlag erhalten haben oder gar nicht beteiligt waren, im Regularbeitsmarkt agieren. Diese sogenannten Free Bids sind Gebote auf dem Regularbeitsmarkt ohne Gebotspflicht durch einen Zuschlag im Regelleistungsmarkt [50H24; Nex24i].

2.3.3 Tertiärregelleistung

Diese Art von Regelleistung wird manuell aktiviert, wenn länger anhaltende oder größere Ungleichgewichte im Netz auftreten. Die Tertiärregelleistung (mFRR) muss innerhalb von 12,5 Minuten nach Abruf vollständig bereitgestellt werden und für vier Stunden verfügbar sein. Die Aktivierung erfolgt in 15-Minuten-Intervallen [reg24c].

Die Ausschreibung der Regelleistung erfolgt täglich, wobei auch hier positive und negative Reserven getrennt gehandelt werden. Die Aktivierung von mFRR erfolgt über die europäische Plattform MARI (Manually Activated Reserves Initiative), wobei die Abrufe in 15-Minuten-Intervallen koordiniert werden. Technisch ist es bei der mFRR möglich, Blockangebote zu platzieren, die bei Zuschlag und Abruf nur vollständig und nicht in Teilmengen aktiviert werden können. Auch bei der mFRR erfolgt die Vergütung sowohl für die Vorhaltung der Re-

gelleistung als auch für die tatsächlich erbrachte Regelarbeit. Anbieter können sowohl mit Zuschlag im Regelleistungsmarkt als auch mit sogenannten Free Bids am Regelarbeitsmarkt teilnehmen [50H24].

Diese drei Regelleistungsarten bilden gemeinsam das Rückgrat der Netzstabilisierung in Deutschland und Europa. Sie unterscheiden sich vor allem in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit, ihrer technischen Umsetzung und der Art der Marktintegration, sind jedoch alle darauf ausgelegt, das Stromnetz zuverlässig und flexibel im Gleichgewicht zu halten.

2.4 Strompreisbildung

2.4.1 Merit-Order-Prinzip

Das Merit-Order-Prinzip ist ein zentraler Mechanismus zur Preisbildung auf dem Strommarkt. Es bestimmt die Einsatzreihenfolge von Kraftwerken anhand ihrer Grenzkosten, also der Kosten für die Produktion einer zusätzlichen Megawattstunde Strom. Kraftwerke mit den niedrigsten Grenzkosten werden zuerst zur Deckung der Nachfrage herangezogen, gefolgt von teureren Anlagen, bis der Bedarf vollständig gedeckt ist. Der MRP entspricht dabei den Grenzkosten des teuersten Kraftwerks, das noch benötigt wird (sog. Grenzkraftwerk). Dieser Preis gilt für alle Anbieter, unabhängig von ihren individuellen Geboten (Uniform Pricing) [Deu22; Sch25].

Die Grenzkosten umfassen neben den direkten Brennstoff- und Betriebskosten auch Opportunitätskosten, etwa entgangene Erlöse auf Regelenergiemärkten oder An- und Abfahrkosten. Da Fixkosten wie Investitionen oder Infrastruktur nicht berücksichtigt werden, priorisiert das Merit-Order-Prinzip flexible, grenzkostenarme Erzeugungstechnologien. Erneuerbare Energien wie Wind- und Solaranlagen, deren Grenzkosten nahe 0 € liegen, stehen daher am Beginn der Einsatzreihenfolge. Es folgen Grundlastkraftwerke (z. B. Braunkohle), Mittellastkraftwerke (z. B. Steinkohle) und schließlich Spitzenlastkraftwerke (z. B. Gas), die aufgrund hoher Brennstoffkosten die Merit-Order abschließen [Deu22].

Der Merit-Order-Effekt beschreibt die preissenkende Wirkung erneuerbarer Energien auf den Strommarkt. Da Wind- und Solaranlagen ihre Energie zu Grenzkosten nahe 0 € einspeisen, verdrängen sie teure konventionelle Kraftwerke aus der Merit-Order. In Phasen hoher Einspeisung erneuerbarer Energien sinkt die Residuallast - der verbleibende Bedarf, der durch konventionelle Erzeugung gedeckt werden muss - und damit auch der MRP. Im Extremfall können konventionelle Kraftwerke nur noch in Lastspitzen oder bei geringer erneuerbarer Einspeisung wirtschaftlich betrieben werden. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, decken erneuerbare Energien mit Grenzkosten nahe 0 € bei einer Nachfrage von 73 GW insgesamt 60 GW ab, während die restlichen 13 GW durch ein Gaskraftwerk mit Grenzkosten von 69 €/MWh gedeckt werden. Der MRP steigt dadurch auf 69 €/MWh, obwohl die Mehrheit der Anbieter niedrigere Kosten hat [Sch25, S. 322f.].

Trotz seiner zentralen Rolle für die Preisbildung am Strommarkt steht das Merit-Order-Prinzip in der Kritik. Ein wesentlicher Kritikpunkt ist die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Solange erneuerbare Energien den Strombedarf nicht vollständig decken können, bestimmen

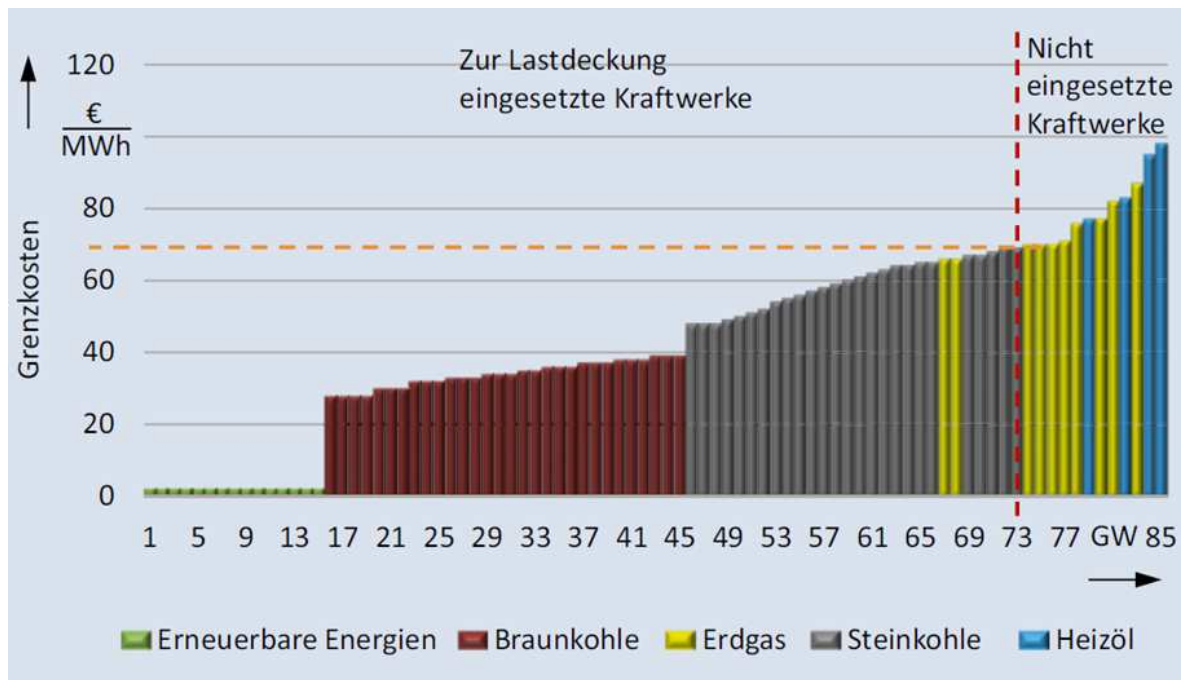


Abbildung 2.3: Ermittlung des Marktträumungspreises anhand des Merit-Order-Prinzips [Sch25, S.323]

konventionelle Kraftwerke - insbesondere Gaskraftwerke - den Marktpreis. Steigen die Gaspreise, wird das Gas-Kraftwerk zum preisbestimmenden Grenzkraftwerk, was zu starken Strompreisanstiegen führt, obwohl ein Großteil des Stroms aus günstigeren Quellen stammt. Zudem berücksichtigt das Modell ausschließlich variable Kosten wie Brennstoffpreise, während Fixkosten für Infrastruktur und Investitionen unberücksichtigt bleiben. Dies verzerrt die volkswirtschaftliche Kostenwahrheit. Erneuerbare Energien, deren Finanzierung oft von Subventionen abhängt, erscheinen im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken wirtschaftlicher, obwohl ihre Gesamtkosten (inkl. Förderungen) höher liegen könnten. Langfristig fehlen dadurch Anreize, in grundlastfähige Kapazitäten oder Speichertechnologien zu investieren, was die Versorgungssicherheit gefährden kann.

Neben dem Merit-Order-Prinzip werden verschiedene Alternativen diskutiert, um die bestehenden Schwächen des aktuellen Systems zu adressieren. Beim sogenannten Pay-as-Bid-Verfahren würden Kraftwerksbetreiber den von ihnen gebotenen Preis erhalten, anstatt eines einheitlichen Marktpreises. Dies könnte zwar die Kopplung des Strompreises an teure Gasangebote lockern, birgt aber das Risiko strategischer Überbietungen und damit insgesamt steigender Strompreise. Ein weiteres Modell ist das Locational Marginal Pricing, bei dem Strompreise regional nach Netzengpässen differenziert werden. Dies könnte die Effizienz erhöhen, würde jedoch zu teils erheblichen Preisunterschieden zwischen den Regionen führen. Trotz dieser Alternativen hat sich das Merit-Order-Prinzip bislang als das effizienteste und transparenteste Modell zur Förderung erneuerbarer Energien und zur Sicherung der Versorgungssicherheit erwiesen [EnB24].

2.4.2 Einfluss erneuerbarer Energien auf die Residuallast und Preisbildung

Der Ausbau erneuerbarer Energien verändert die Strompreisbildung und Netzstabilität grundlegend. Die Residuallast L_{res} wird definiert als:

$$L_{res} = L_{ges} - (P_{Wind} + P_{PV})$$

wobei L_{ges} die Gesamtlast und P_{Wind} , P_{PV} die Einspeisung aus Wind- und Solarenergie darstellen [Nex24j].

In Regionen bzw. in Zeiten mit hoher Erzeugung von Wind- und Solarkraft kann die Residuallast negativ werden, was zu negativen Strompreisen an den Spotmarkt führt. Dies tritt auf, da unflexible Energieerzeuger, wie zum Beispiel Kohle- oder Kernkraftwerke nicht schnell genug gedrosselt werden können. Laut EPEX Spot wurden im Jahr 2023 auf dem Day-Ahead-Markt an 46 Tagen insgesamt 301 Stunden mit negativen Strompreisen verzeichnet und auf dem Intraday-Markt an 66 Tagen insgesamt 316 Stunden. Negative Preise signalisieren nicht nur Überkapazitäten, sondern schaffen auch Anreize für Flexibilitätslösungen. Speicher, Lastmanagement oder Power-to-X-Technologien (Umwandlung von Strom, der sich besser speichern, lagern oder weiterverarbeiten lässt, z.B. Umwandlung von Strom in Wärme) können überschüssigen Strom aufnehmen und bei Bedarf wieder einspeisen [Bau24; EPE24d].

Die zunehmende Volatilität der Residuallast führt dazu, dass Strompreise am Spotmarkt stärker schwanken. Wie die Ariadne-Analyse zeigt, wird der Anteil der Stunden mit negativer Residuallast bis 2045 deutlich steigen - vor allem tagsüber im Sommer und bei starkem Wind. Gleichzeitig nehmen Phasen mit Strommangel, etwa während der winterlichen Dunkelflaute, an Intensität zu [Ari24, S.6f]. Auch werden die Maxima der positiven sowie negativen Residuallast bis 2045 aufgrund des Ausbaus von erneuerbaren Energien ansteigen. Diese Polarisierung verstärkt die Preisdynamik: Negative Preise fördern den Ausbau von Speichern und Power-to-X-Technologien, während hohe Preise in Engpasssituationen Investitionen in flexible Backup-Kapazitäten wie Gaskraftwerke oder Wasserstoffsysteme anregen [Ari24, S.8].

Aufgrund des geplanten Ausbaus erneuerbarer Energien bis 2045 wird die Bedeutung von Flexibilitätsoptionen im Stromsystem weiter zunehmen, da sie sowohl Stromüberschüsse effizient nutzbar machen als auch Engpässe ausgleichen müssen. Dafür sind dynamische Preissignale und eine intelligente, sektorenübergreifende Steuerung von Verbrauchern wie Wärmepumpen, Elektrolyseuren und Elektrofahrzeugen unerlässlich. Politische und technische Rahmenbedingungen sollten gezielt darauf ausgerichtet werden, flexible Betriebsweisen zu ermöglichen und die Vernetzung sowie Systemintegration zu fördern, um das volle Potenzial der Flexibilität auszuschöpfen [Ari24, S.33].

2.4.3 Brennstoffpreise und CO₂-Kosten

Die Strompreisbildung in Deutschland wird zudem durch die Entwicklung der Brennstoffpreise fossiler Kraftwerke und die Kosten für CO₂-Emissionszertifikate bestimmt. Da konventionelle Kraftwerke wie Gas- und Kohlemeiler häufig als „Grenzkraftwerke“ in der Merit-Order fungieren, wirken sich Preisschwankungen bei Brennstoffen und CO₂-Zertifikaten unmittelbar auf den MRP aus [Sch23, S. 329f.].

Brennstoffpreise sind ein zentraler Treiber der Grenzkosten. Gaskraftwerke, die aufgrund ihrer Flexibilität oft die teuersten Kraftwerke in der Merit-Order darstellen, reagieren besonders sensibel auf Preisanstiege. So führte der Anstieg des Gaspreises von durchschnittlich 9,55 €/MWh im Jahr 2020 auf 125,71 €/MWh im Jahr 2022 dazu, dass Gaskraftwerke zum preisbestimmenden Grenzkraftwerk in der Merit-Order wurden [Sch23, S. 334f.], was den Strompreis an der Börse auf bis zu 871 €/MWh (Maximalwert Q3 2022) trieb [Bun24d]. Solche Extremereignisse verdeutlichen die Verletzlichkeit des Strommarktes bei externen Schocks und unterstreichen die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen.

Der EU-ETS verstärkt diesen Effekt, indem er die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen systematisch verteuert. Im Jahr 2024 lag der CO₂-Preis bei durchschnittlich 66 €/tCO₂ [BDE25, S. 18], wodurch sich die Grenzkosten von:

- Steinkohlekraftwerken um 58 €/MWh (Annahme: 87,5 kgCO₂/MWh)
- Gaskraftwerken um 28 €/MWh (Annahme: 42,5 kgCO₂/MWh)

erhöhten [Sch23, S. 332].

Zukünftig wird die Bedeutung der CO₂-Kosten weiter zunehmen. Prognosen des Netzentwicklungsplans 2025-2037/2045 erwarten einen Anstieg des CO₂-Preises auf über 150 €/tCO₂ bis 2037 [Bun25b, S. 66].

Die starke Kopplung des Strompreises an volatile Brennstoff- und CO₂-Kosten birgt erhebliche Risiken für die Versorgungssicherheit und die Preisstabilität. Solange fossile Kraftwerke die Preisbildung dominieren, bleibt der Strommarkt anfällig für externe Preisschocks - eine Situation, die sich erst mit einem substanziellen Ausbau erneuerbarer Energien und vor allem flexibler Speichertechnologien grundlegend ändern dürfte.

2.4.4 Strompreiszusammensetzung

Der Strompreis in Deutschland setzt sich aus 3 Bestandteilen zusammen:

- Kosten für Beschaffung und Vertrieb, sowie die Marge
- Entgelte für die Netznutzung
- Steuern, Abgaben und Umlagen [Bun23a]

Die Kosten für die Beschaffung, den Vertrieb sowie die Marge können je nach Anbieter variieren und sind durch den Wettbewerb zwischen den Stromanbietern geprägt. Die Netznutzungsentgelte sind je nach Region unterschiedlich, da sie durch die Kosten des jeweiligen Netzgebiets, sowie dessen Stromverbrauch geprägt sind. Die Kosten durch Steuern, Abgaben und Umlagen werden durch Gesetze und staatliche Regelungen vorgegeben und sind durch die Stromanbieter nicht beeinflussbar. Im folgenden Absatz werden die Stromkosten tabellarisch (siehe Tabelle 2.1) für das Jahr 2023/24 für die Bereiche Industrie, Gewerbe und Haushalt aufgeführt [Bun24e].

Tabelle 2.1: Strompreiszusammensetzung für verschiedene Kundengruppen 2024

Quelle: Eigene Darstellung nach [Bun24c, S.188-192]

	Haushaltskunden	Gewerbekunden	Industriekunden
Jährliche Abnahme	2.500–5.000 kWh	50 MWh	24 GWh
Kosten für Beschaffung, Vertrieb und Marge	18,10 ct/kWh	16,60 ct/kWh	12,78 ct/kWh
Netzentgelt	11,18 ct/kWh	9,06 ct/kWh	3,92 ct/kWh
Steuern, Abgaben und Umlagen	12,31 ct/kWh	4,86 ct/kWh	3,46 ct/kWh
Gesamtpreis	41,59 ct/kWh	30,52 ct/kWh	20,16 ct/kWh

Bei den in der Tabelle dargestellten Werten handelt es sich um arithmetische Mittelwerte, da diese je nach Anbieter und Region schwanken. Auch ist anzumerken, dass der Strompreis bei Industriekunden stark schwanken kann, da Stromanbieter bei Industriekunden meist kundenspezifische Angebote unterbreiten. Zudem können vor allem stromintensive Unternehmen von Regelungen zur Preisreduktion bei Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen Gebrauch machen. Somit kann der Strompreis um bis zu 6,17 ct/kWh reduziert werden [Bun24e, S. 186f.].

In der folgenden Tabelle wird die Strompreisentwicklung aus den Jahren 2021–2024 abgebildet. Zusätzlich wird dargestellt, zu wie vielen Stunden der Strompreis unter 10, 0 und -5 ct/kWh auf dem Day-Ahead-Spotmarkt gefallen ist.

Tabelle 2.2: Strompreisentwicklung und Stunden mit niedrigen Preisen am Day-Ahead-Spotmarkt

Quelle: Eigene Darstellung nach [Net24a]

Jahr – 8760 Stunden	2021	2022	2023	2024
Day-Ahead arithmetisch	9,69 ct/kWh	23,54 ct/kWh	9,52 ct/kWh	7,92 ct/kWh
Anzahl Stunden Strompreis < 10 ct/kWh	6075	1384	4631	6472
Anzahl Stunden Strompreis < 0 ct/kWh	139	69	301	457
Anzahl Stunden Strompreis < -5 ct/kWh	10	0	15	27

Wie aus der vorliegenden Tabelle ersichtlich wird, zeigte sich insbesondere im Jahr 2024 ein deutlicher Rückgang der Strompreise am Day-Ahead-Spotmarkt. So lag der Strompreis in 6.472 Stunden unter 10 ct/kWh, während lediglich in 457 Stunden negative Preise verzeichnet wurden und nur in 27 Stunden ein Preisniveau von unter -5 ct/kWh erreicht wurde. Zu beachten ist hierbei, dass die dargestellten Werte ausschließlich den reinen Beschaffungspreis für am Spotmarkt teilnehmende Stromhändler abbilden. Für Letztverbraucher und Unternehmen kommen auf diesen Beschaffungspreis zusätzlich Netzentgelte sowie Steuern, Abgaben und Umlagen hinzu, sodass der tatsächlich zu zahlende Gesamtstrompreis in der Regel kaum unter 10 ct/kWh fällt. Darüber hinaus sind auch die internen Kosten der Strombeschaffung, wie beispielsweise Aufwendungen für das Risikomanagement, das Bilanzkreismanagement und die Abwicklung, zu berücksichtigen, die den effektiven Strompreis weiter erhöhen können. Die Analyse der Tabelle verdeutlicht zudem die erhebliche Volatilität der Strompreise in den vergangenen Jahren, wodurch belastbare Prognosen zur zukünftigen Preisentwicklung erschwert werden und eine verlässliche Vorausplanung für die kommenden Jahre mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist [Net24a].

2.5 Regelleistung als Systemdienstleistung

Systemdienstleistungen sind technische und organisatorische Maßnahmen, die den sicheren und stabilen Betrieb des Stromnetzes gewährleisten, insbesondere durch die Sicherung von Frequenz, Spannung und Netzlast [Lin23, S. 258 ff.]. Die rechtliche Grundlage bildet § 13 EnWG, der die Übertragungsnetzbetreiber zur Durchführung dieser Maßnahmen verpflichtet [Bun23b]. § 13a EnWG konkretisiert, dass Betreiber von Anlagen ab 100 kW auf Anforderung der Netzbetreiber ihre Einspeisung oder Last anpassen müssen, um Netzengpässe zu vermeiden oder die Systemstabilität wiederherzustellen. Für diese Eingriffe sieht das Gesetz einen finanziellen Ausgleich vor, der die Betreiber für entstandene Kosten und entgangene Erlöse entschädigt [Bun23c]. Das Kapitel beleuchtet die Frequenzhaltung (FCR, aFRR, mFRR) und analysiert die wirtschaftlichen Entlohnungsmechanismen für die Bereitstellung dieser Systemdienstleistungen.

Wie schon in den Kapiteln 2.3.1, 2.3.2 und 2.3.3 beschrieben gibt es 3 Arten von Regelleistung: Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung. Die Beschaffung von Regelleistung und Regelarbeit erfolgt in zwei getrennten, aufeinanderfolgenden Marktstufen:

Regelleistungsmarkt: Tägliche Ausschreibung vierstündiger Produkte für die Vorhaltung von Kapazitäten (FCR, aFRR, mFRR). Die Bezuschlagung erfolgt nach dem Leistungspreis (€/MW). Leistungspreis ist die Vergütung für das Bereithalten von Regelleistung, unabhängig von deren tatsächlicher Nutzung. Er wird durch Auktionen ermittelt, bei denen die günstigsten Gebote priorisiert werden, um die Vorhaltekosten zu minimieren, und Anbieter ihren individuellen Gebotspreis („pay as bid“) erhalten [Nex24j].

Regelarbeitsmarkt: Beschaffung tatsächlich abgerufener Energie in 15-Minuten-Intervallen. Der Regelarbeitsmarkt öffnet nach Abschluss des Regelleistungsmarkts und erlaubt auch nichtbezuschlagten Anbietern die Teilnahme („free bids“). Teilnehmer des Regelleistungsmarkts sind zur Angebotsabgabe für den Regelarbeitsmarkt verpflichtet. Die Ermittlung des Arbeitspreises erfolgt anhand der individuellen Gebotspreise, wobei die Angebote mit den niedrigsten Preisen zuerst aktiviert werden [Bun24f, S. 143f.].

Abbildung 2.4 zeigt die durchschnittliche quartalsweise Vergütung, beginnend für das Jahr 2023, für das Anbieten von Regelleistung in den jeweiligen Regelleistungsarten.

Die Abbildung zeigt die durchschnittlichen quartalsweisen Leistungspreise für verschiedene Regelleistungsarten im Zeitraum des ersten Quartals 2023 bis zum ersten Quartal 2025. Auffällig ist, dass die Primärregelleistung (FCR) durchgehend die höchsten Leistungspreise aufweist. Das liegt daran, dass FCR ausschließlich über den Leistungspreis vergütet wird; einen separaten Arbeitspreis für tatsächlich abgerufene Energie gibt es hier nicht, da sich die Aktivierungen im Mittel ausgleichen und eine separate Abrechnung nicht praktikabel wäre [Nex24j].

Im Gegensatz dazu werden aFRR und mFRR sowohl für das Bereitstellen der Kapazität (Leistungspreis) als auch für die tatsächlich aktivierte Energie (Arbeitspreis) vergütet. Beide Produkte werden jeweils in positiver (POS) und negativer (NEG) Richtung ausgeschrieben: aFRR

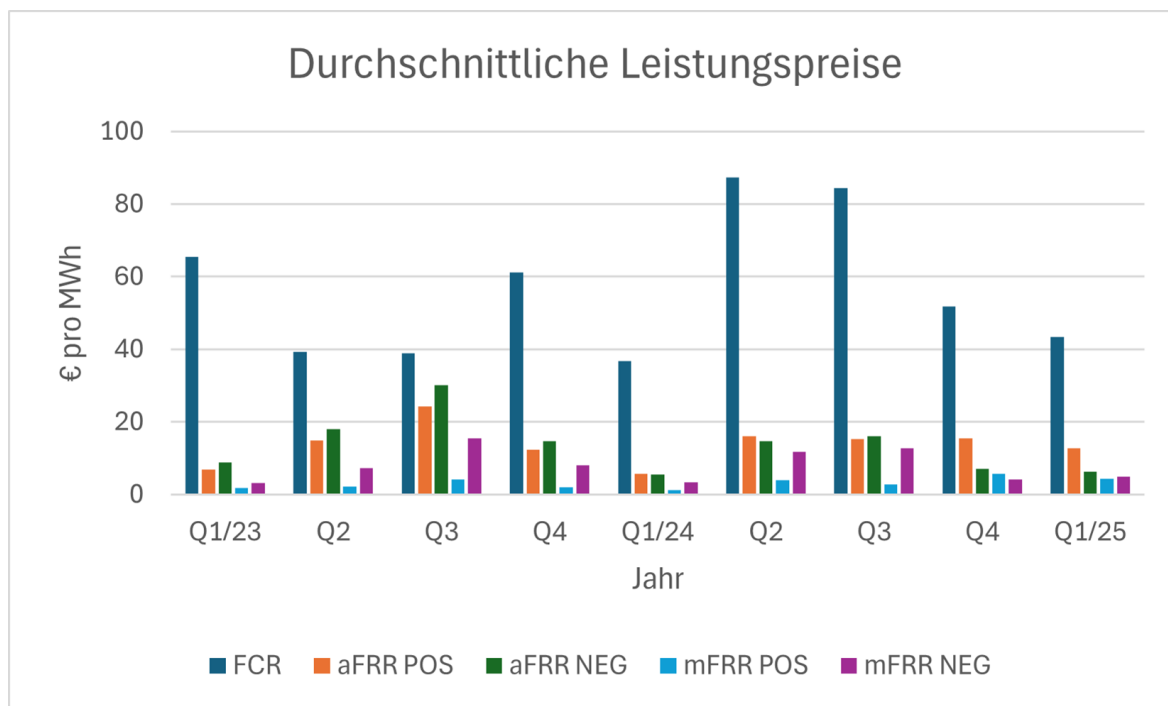


Abbildung 2.4: Durchschnittliche Leistungspreise in Deutschland [reg25a]

POS/mFRR POS bedeutet eine Erhöhung der Einspeisung ins Netz oder eine Reduzierung des Stromverbrauchs bei Strommangel, während aFRR NEG/mFRR NEG eine Reduzierung der Einspeisung oder eine Erhöhung des Stromverbrauchs bei Stromüberschuss beschreibt [reg24a]. Die durchschnittlichen Leistungspreise bei aFRR POS/NEG belaufen sich auf 5 bis auch teilweise 30 €/MWh wohingegen die Leistungspreisvergütung für mFRR sich auf 1 bis maximal 15 €/MWh durchschnittlich beläuft.

Die Abbildung 2.5 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Arbeitspreise für positive Sekundärregelenergie (aFRR POS) und Tertiärregelenergie (mFRR POS) im Zeitraum von Q1/2023 bis Q1/2025. Auffällig ist, dass die Arbeitspreise für mFRR POS in allen Quartalen deutlich über denen der aFRR POS liegen. Während der durchschnittliche Arbeitspreis für aFRR POS zwischen etwa 1.000 und 1.500 €/MWh schwankt, liegt der Wert für mFRR POS durchgehend auf einem sehr hohen Niveau von rund 4.000 bis 5.500 €/MWh, mit einem besonders ausgeprägten Maximum im ersten Quartal 2023. Die Arbeitspreise für mFRR POS sind für das Bitcoin-Mining jedoch kaum relevant, da im Jahr 2024 lediglich in etwa 0,8 Prozent der Jahresstunden tatsächlich positive Tertiärregelenergie abgerufen wurde [Net24b]. Die aktivierte positive Sekundärregelenergie ist im Kontext des Bitcoin-Minings besonders relevant, da sowohl die insgesamt abgerufene Energiemenge als auch die Zahl der Aktivierungsstunden deutlich höher ausfallen. In Kapitel 4.5 wird untersucht, ob bzw. unter welchen Bedingungen, es wirtschaftlich sinnvoll ist, mit Bitcoin-Mining am POS aFRR teilzunehmen.

Negative Arbeitspreise treten typischerweise bei Stromüberschuss auf und spiegeln Situationen wider, in denen eine Reduzierung der Einspeisung oder eine Erhöhung des Verbrauchs erforderlich ist. Die Abbildung 2.6 zeigt den Strompreis in € pro MWh für die negative Sekundär- und Tertiärregelenergie. Die durchschnittlichen Arbeitspreise für negative aFRR und mFRR unterscheiden sich in ihrer Höhe kaum von den positiven Arbeitspreisen, werden jedoch als

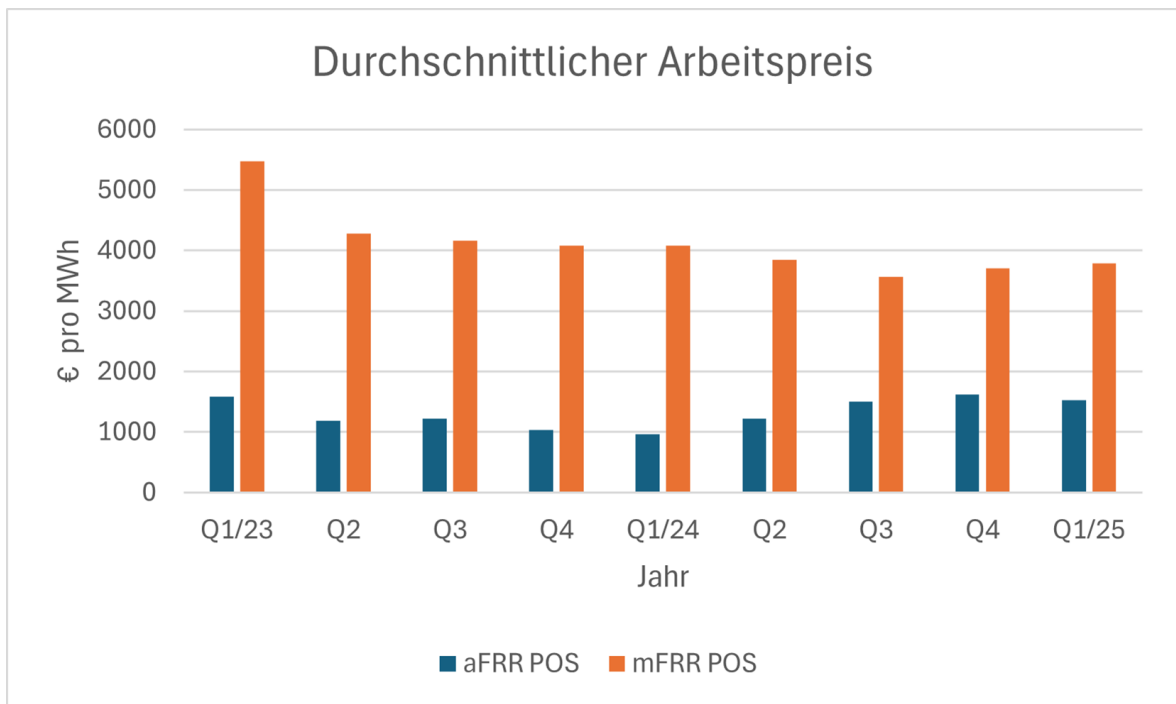


Abbildung 2.5: Durchschnittliche Arbeitspreise bei positiver Sekundär- und Tertiärregelenergie in Deutschland

[reg25a]

negative Werte ausgewiesen. Dies bedeutet, dass Erzeuger für die Reduzierung ihrer Einspeisung zahlen müssen, während flexible Verbraucher für die Erhöhung ihres Stromverbrauchs eine Vergütung erhalten.

Insgesamt verdeutlicht die Analyse, dass die Attraktivität der Entlohnungsmechanismen im Regelleistungsmarkt maßgeblich von der jeweiligen Produktart und deren Aktivierungshäufigkeit bestimmt wird. Für flexible Verbraucher wie Bitcoin-Miner erscheinen insbesondere die positive und negative Sekundärregelenergie (aFRR POS und NEG) als wirtschaftlich besonders interessant, da hier sowohl die Vergütung als auch die Aktivierungswahrscheinlichkeit vergleichsweise hoch sind. Der Primärleistungsmarkt wird aufgrund der äußerst geringen Aktivierungszeit sowie der symmetrischen Anforderungen an Regelenergie genutzt. Damit ein Bitcoin-ASIC-Miner für diesen Markt geeignet ist, müsste er kontinuierlich mit etwa 50 Prozent seiner Leistung betrieben werden, um im Bedarfsfall flexibel hoch- oder heruntergefahren werden zu können. In den meisten Fällen ist ein solcher Betrieb jedoch sehr unprofitabel, weshalb dieser nicht weiter in der Arbeit untersucht wird. Ebenso entfällt eine vertiefende Analyse des Tertiärregelleistungsmarktes, da dessen jährliche Abrufdauer zu gering ist, um für das Bitcoin-Mining eine signifikante Rolle zu spielen. Im Kapitel 4.4 und 4.5 wird daher die Rolle des Sekundärregelleistungsmarktes in Verbindung mit Bitcoin-Mining weiterführend untersucht.

2.6 Präqualifizierungsanforderungen

Die Teilnahme am Sekundärregelleistungsmarkt setzt voraus, dass Anbieter bestimmte technische, organisatorische und rechtliche Anforderungen erfüllen. Das sogenannte Präqualifizierungsverfahren dient dazu, die Eignung potenzieller Marktteilnehmer zu überprüfen und

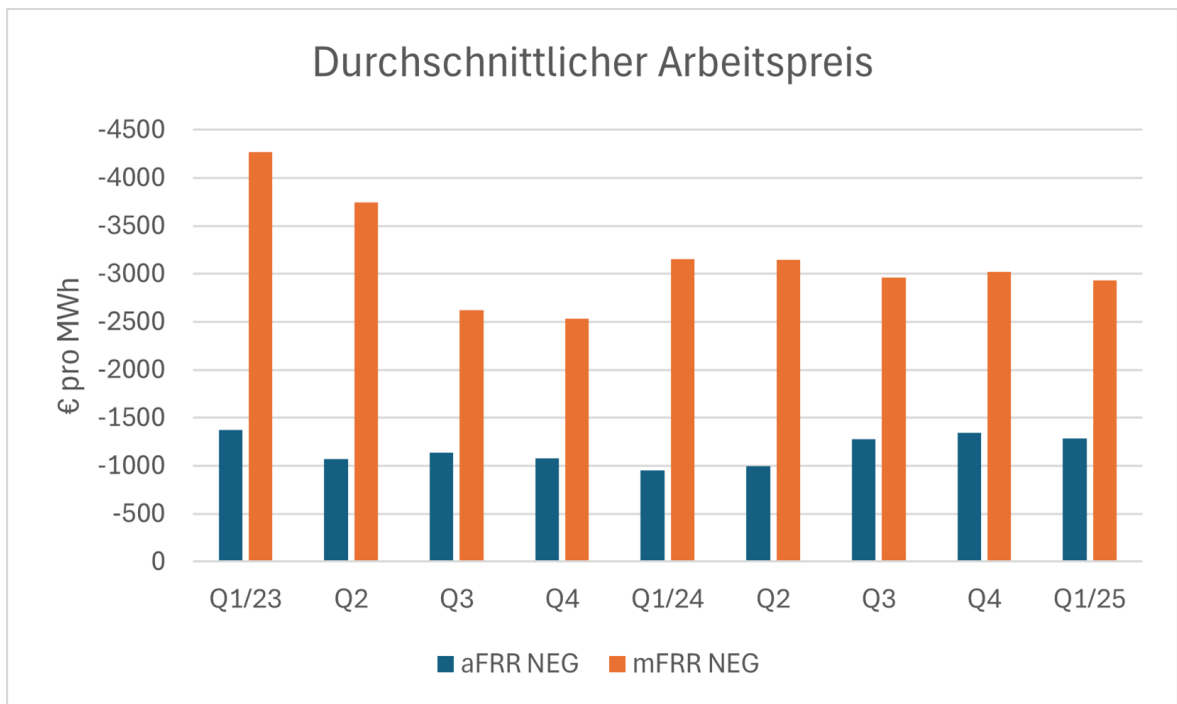


Abbildung 2.6: Durchschnittliche Arbeitspreise bei negativer Sekundär- und Tertiärregelenergie in Deutschland

[reg25a]

sicherzustellen, dass sie im Bedarfsfall zuverlässig Regelleistung bereitstellen können. Im Folgenden werden die wesentlichen Voraussetzungen und Schritte der Präqualifikation für den Sekundärregelleistungsmarkt erläutert.

Bisher sind in Deutschland 30 Anbieter für die Sekundärregelleistung zugelassen. Dabei handelt es sich vorrangig um Energieversorger, -händler, Stadtwerke sowie Betreiber von Kraftwerken. Die vollständige Liste der zugelassenen Unternehmen ist im Anhang A.1 und A.2 angefügt.

Die Präqualifikationsanforderungen zur Teilnahme an dem Sekundärregelleistungsmarkt lassen sich in vier wesentliche Inhalte untergliedern:

- IT-Anforderungen und Regelungen zum Datenaustausch
- Durchführung der Betriebsfahrt
- Durchführung des Leittechnischen Tests
- Organisatorische Anforderungen [Deu24, S.9]

Aufgrund der spezifischen Anforderungen von Bitcoin-Mining, insbesondere der Notwendigkeit, ASIC-Systeme nahtlos in netzstabilisierende Regelenergiemechanismen zu integrieren, konzentriert sich diese Thesis gezielt auf die technische Umsetzung der Betriebsfahrt, da diese den kritischen Engpass für die Marktteilnahme darstellt.

Bei der Betriebsfahrt handelt es sich um einen praktischen Test, der nach standardisierten Kriterien durchgeführt wird, um die technische Eignung der Anlagen unter Beweis zu stellen. Während dieser wird geprüft, ob jede Anlageneinheit die geforderte Regelleistung zuverlässig und steuerbar bereitstellen kann und korrekt in den Regelpool eingebunden ist.

Während der Betriebsfahrt werden die Anlagen hoch- und heruntergefahren und die dabei aufgezeichneten Werte an das Präqualifikationsportal übermittelt [Deu24, S.24]. Zudem werden zeitlich die Vorhaltungs- und die Erbringungsphasen unterschieden, die jeweils einen Leistungsänderungsbereich (LÄB) sowie einen stationären Bereich (SB) umfassen. Sowohl die während der Betriebsfahrt anfallenden Echtzeitdaten (zur Steuerung der Regellenergieabrufe) als auch die Offline-Daten (für den Erbringungsnachweis) müssen mit einer Auflösung von 1 bis 4 Sekunden an den Übertragungsnetzbetreiber übermittelt werden. Diese Anforderung gewährleistet, dass die Reaktionszeit von 30 Sekunden bis zur Vollaktivierung nach 5 Minuten eingehalten wird und gleichzeitig die technische Konformität der Mining-Infrastruktur nachweisbar bleibt [Deu24, S.26].

Abbildung 2.7 visualisiert den zeitlichen Ablauf der aFRR-Betriebsfahrt, unterteilt in den Leistungsänderungsbereich (0 bis 5 Minuten nach Sollwertsprung) und den stationären Bereich (5 bis 15 Minuten). Der Sollwertsprung bezeichnet den Zeitpunkt, an dem der neue Leistungszielwert für die Anlage festgelegt wird. Der Leistungsänderungsbereich erfordert, dass die Anlage innerhalb von maximal 30 Sekunden den Mittelwert der Vorhalte-/Erbringungsphase verlässt und mindestens einmal die präqualifizierbare Leistung erreicht. Überschreitet die Reaktionszeit 30 Sekunden, scheitert die Präqualifikation. Im stationären Bereich wird der arithmetische Mittelwert der Regelleistung über 10 Minuten ermittelt, um die Stabilität der Leistungsbereitstellung nachzuweisen [Deu24, S.28].

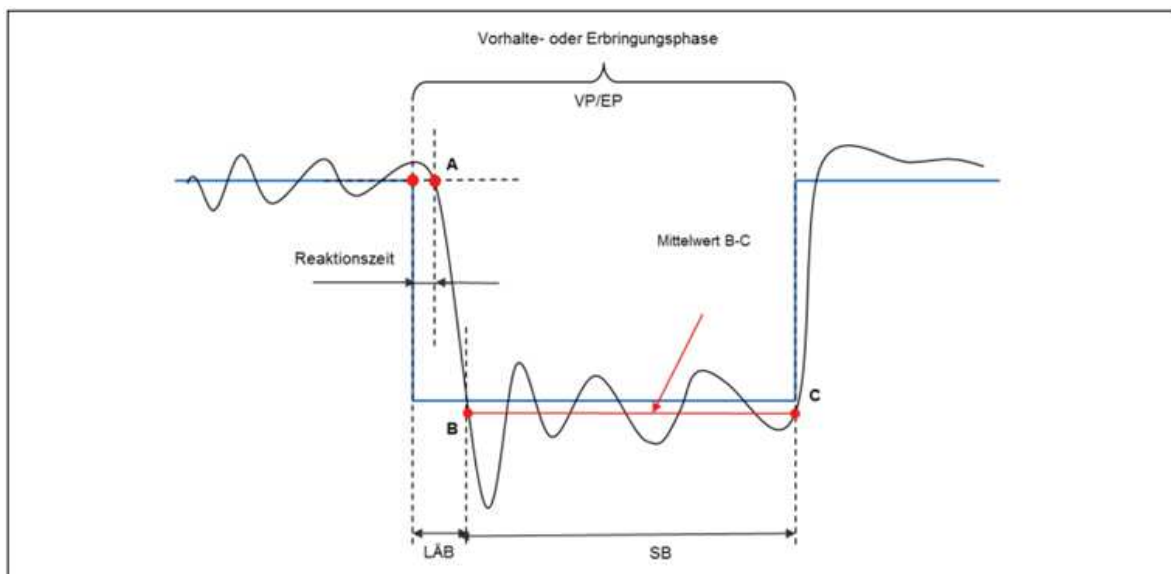


Abbildung 2.7: aFRR-Betriebsfahrt
[Deu24, S.28]

Abbildung 2.8 veranschaulicht die prozentualen Abweichungen der Leistungswerte während der einzelnen Phasen der aFRR-Betriebsfahrt. Die Toleranzvorgaben sind für die Teilnahme am Sekundärregelleistungsmarkt entscheidend. In der Reaktionszeitphase, die maximal 30 Sekunden nach dem Sollwertsprung dauert, dürfen höchstens 5 Prozent der Messwerte zwischen 5 und 10 Prozent unterhalb des Mittelwerts der Vorhaltephase liegen. Im anschließenden Leistungsänderungsbereich, der bis fünf Minuten nach dem Sollwertsprung reicht, ist der zulässige Bereich enger gefasst. Hier sind maximal 5 Prozent der Messwerte in einem Bereich von 0 bis 5 Prozent unterhalb des Mittelwerts toleriert. Überschreitungen dieser Grenzwerte führen zum Ausschluss aus der Präqualifikation. Diese Anforderungen sind essenziell, um die technische Zuverlässigkeit von Anlagen wie Bitcoin-ASICs im Regelenergiemarkt sicherzustellen [Deu24, S.32ff.].

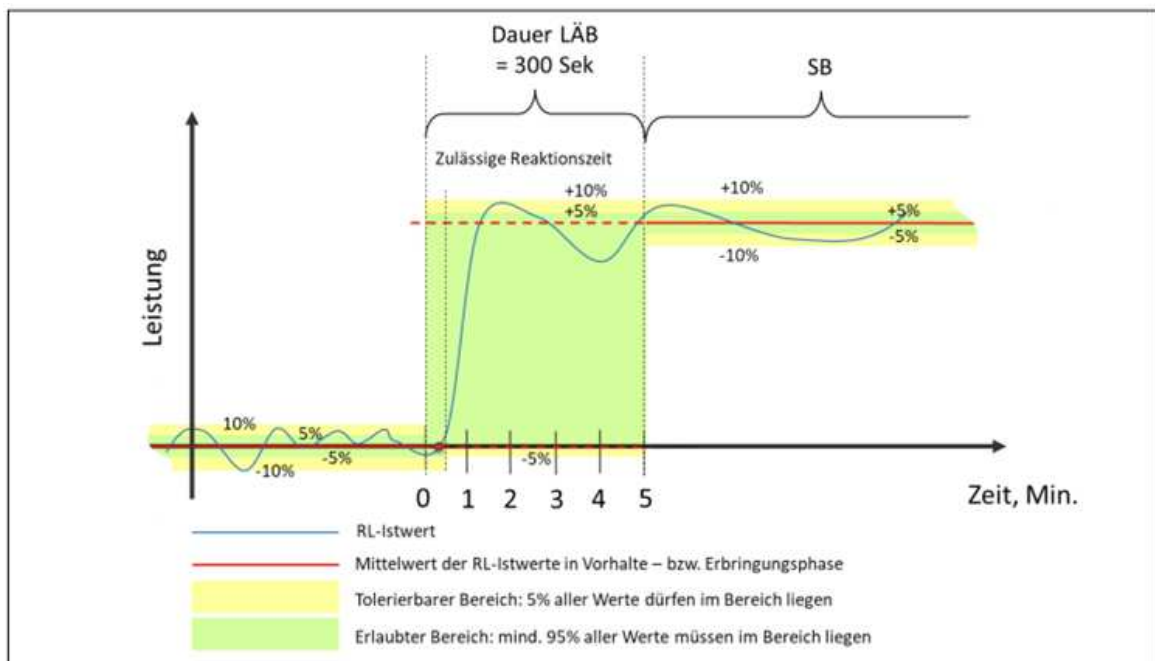


Abbildung 2.8: Zulässige Abweichungen bei einer aFRR-Betriebsfahrt [Deu24, S.33]

Für das erfolgreiche Bestehen der Betriebsfahrt muss insgesamt in zwei Phasen Regelenergie für mindestens 10 Minuten erbracht werden, wie in Abbildung 2.9 dargestellt.

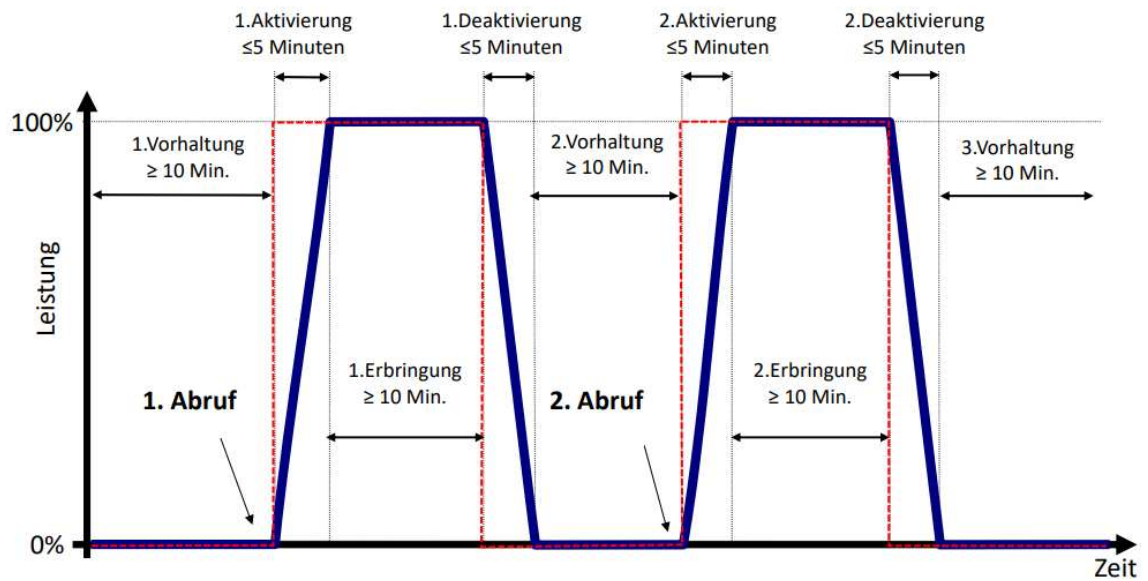


Abbildung 2.9: Musterprotokoll zum Nachweis negativer aFRR
[reg25b]

Die in diesem Kapitel dargestellten Präqualifikationsanforderungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit, insbesondere in den Kapiteln 6.2.4 und 6.2.5, hinsichtlich ihrer technischen Umsetzbarkeit durch Bitcoin-Mining geprüft.

3 Grundlagen zu Bitcoin und Bitcoin-Mining

Dieses Kapitel bietet eine grundlegende Einführung in die Entstehung und Funktionsweise von Bitcoin sowie die zentralen Aspekte des Mining-Prozesses. Zunächst wird die historische Entwicklung von Bitcoin als erste dezentrale Kryptowährung beleuchtet, gefolgt von einer Darstellung der grundlegenden Eigenschaften, die das System auszeichnen. Im Anschluss werden die wichtigsten Einflussfaktoren für ein profitables Bitcoin-Mining analysiert, wobei die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Abschließend erfolgt eine Übersicht über die zentralen Kennzahlen, die zur Bewertung und Steuerung von Mining-Aktivitäten herangezogen werden. Damit legt dieses Kapitel das notwendige Fundament für das Verständnis der weiteren Analysen und Fallstudien im Kontext von Bitcoin-Mining.

3.1 Entstehung von Bitcoin

Die Entwicklung digitaler Währungen ist eng mit Fortschritten in der Kryptografie verbunden. Schon früh stellte sich die Frage, wie sich digitale Werte sicher und zuverlässig übertragen lassen. Wer digitales Geld akzeptiert, muss sicherstellen können, dass das Geld echt ist, nicht gefälscht wurde, nicht mehrfach ausgegeben werden kann (Double-Spending-Problem) und dass der Besitzanspruch eindeutig ist. Während physisches Geld durch seine materielle Existenz Fälschungen und Mehrfachausgaben weitgehend verhindert, müssen digitale Währungen auf andere Mittel zurückgreifen. In klassischen elektronischen Zahlungssystemen übernehmen zentrale Instanzen wie Banken diese Kontrollfunktion, indem sie alle Transaktionen überwachen und abgleichen.

Mit der Verfügbarkeit moderner Kryptografie ab den späten 1980er-Jahren entstanden erste digitale Währungen, die meist durch nationale Währungen oder Edelmetalle wie Gold gedeckt waren. Diese Systeme funktionierten technisch, blieben aber zentralisiert und waren damit anfällig für Angriffe durch Regierungen oder Hacker. Die zentrale Abrechnungsstelle stellte einen Single Point of Failure dar. Wurde sie kompromittiert oder rechtlich angegriffen, brach das gesamte System zusammen. Die Geschichte dieser frühen digitalen Währungen zeigt, dass eine wirklich widerstandsfähige digitale Währung dezentral organisiert sein muss, um Eingriffe und Zensur zu verhindern [AH24, S. 4f.].

Bitcoin wurde 2008 als Reaktion auf diese Herausforderungen vorgestellt. Im Whitepaper „Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System“, veröffentlicht unter dem Pseudonym Satoshi Nakamoto, wurden erstmals verschiedene kryptografische und netzwerktechnische Ansätze wie b-money und Hashcash zu einem vollständig dezentralen Zahlungssystem kombiniert. Die zentrale Innovation von Bitcoin ist der Einsatz eines verteilten Rechensystems, das als Proof-of-Work-Algorithmus bekannt ist. Dieser Mechanismus ermöglicht es dem Netzwerk, etwa alle zehn Minuten einen globalen Konsens, ohne zentrale Instanz, über den aktuellen Stand der Transaktionen zu erzielen. Damit löst Bitcoin das Double-Spending-Problem auf elegante Weise. Anstatt, dass eine zentrale Stelle alle Transaktionen abgleicht, übernimmt das dezentrale Netzwerk diese Aufgabe selbst [AH24, S. 4f.].

Bitcoin löst zudem das Problem der byzantinischen Generäle, ein fundamentales Dilemma der verteilten Systeme, bei dem sich Teilnehmer in einem unsicheren Netzwerk auf einen gemeinsamen Konsens einigen müssen. Satoshi Nakamotos Proof-of-Work-Mechanismus ermöglicht dies ohne zentrale Instanz, sichert die Integrität der Blockchain und schafft ein anreizbasiertes System. Damit legte Bitcoin die technische Grundlage für vertrauenslose digitale Wertübertragung, die ausschließlich auf mathematischen Prinzipien und Netzwerkkonsens beruht [AH24, S. 4f.].

3.2 Eigenschaften von Bitcoin

Bitcoin vereint vier zentrale Innovationen zu einem leistungsfähigen Ökosystem für digitales Geld: ein dezentrales Peer-to-Peer-Netzwerk, eine öffentliche Blockchain, klare Konsensregeln und den Proof-of-Work-Algorithmus. Diese Komponenten bilden gemeinsam die Grundlage für die Funktionsweise, Sicherheit und Integrität des gesamten Systems [AH24, S. 2].

Das dezentrale Peer-to-Peer-Netzwerk, das als Bitcoin-Protokoll bezeichnet wird, ermöglicht es allen Teilnehmern, direkt miteinander zu kommunizieren und Transaktionen auszutauschen, ohne dass eine zentrale Instanz oder ein Server erforderlich ist. Die Software ist als Open Source verfügbar und kann auf verschiedensten Geräten betrieben werden, was einen einfachen Zugang zum Netzwerk gewährleistet. Nutzer können bitcoin weltweit transferieren, Güter erwerben, Geld senden oder Kredite vergeben. Die Übertragung erfolgt schnell, sicher und grenzüberschreitend, wodurch Bitcoin besonders als „Internet-Geld“ prädestiniert ist [AH24, S. 1].

Die Blockchain bildet das öffentliche Kassenbuch von Bitcoin. Sie ist eine fortlaufende, chronologisch geordnete Kette von Blöcken, in denen alle Transaktionen dauerhaft gespeichert werden. Jeder Block enthält einen kryptografischen Verweis auf den vorherigen Block, wodurch Manipulationen praktisch ausgeschlossen sind. Die Bestandteile eines Bitcoin-Blocks setzen sich aus dem Blockheader sowie den Transaktionen zusammen. Der Blockheader setzt sich aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- **Versionsnummer:**
Gibt die Version des Bitcoin-Protokolls an, die für die Erstellung des Blocks verwendet wurde. Sie signalisiert, welche Konsensregeln und Features aktiv sind.
- **Vorheriger Block-Hash:**
Der kryptografische Hash (SHA-256) des Headers des unmittelbar vorhergehenden Blocks. Diese Verknüpfung bildet die unveränderliche Kette der Blockchain, wobei jede Änderung alle nachfolgenden Hashes ungültig machen würde.
- **Merkle Root:**
Ein Hash-Wert, der alle Transaktionen im Block in einem Merkle-Baum zusammenfasst. Ermöglicht effiziente Verifikation einzelner Transaktionen ohne Download der gesamten Blockchain.
- **Zeitstempel:**
Die grobe Erstellungszeit des Blocks in Sekunden seit der Unix-Epoche (1. Januar 1970). Das Netzwerk toleriert Abweichungen von bis zu zwei Stunden, um Uhrenunterschiede zwischen Nodes auszugleichen.

- **Target:**

Ein hexadezimaler Wert, der die erforderliche Schwierigkeit für den Proof-of-Work definiert. Legt fest, wie viele führende Nullen der Block-Hash haben muss, um als gültig zu gelten. Wird alle 2016 Blöcke (≈ 2 Wochen) neu berechnet, um die Blockzeit bei ~ 10 Minuten zu halten.

- **Nonce:**

Ein 32-Bit-Zähler, den Miner schrittweise erhöhen, um einen gültigen Hash unterhalb des Target-Werts zu finden. Da der Nonce-Bereich begrenzt ist, müssen Miner häufig auch den Merkle Root oder Zeitstempel anpassen, um eine Lösung zu finden [Con25].

Der Block Body hingegen besteht aus sämtlichen Transaktionen, die in diesem Block bestätigt und dauerhaft in die Blockchain aufgenommen werden [Con25].

- **Coinbase-Transaktion:**

Die erste Transaktion im Block, mit der ein Miner die Blockbelohnung und die Transaktionsgebühren erhält [AH24].

- **Transaktionsliste:**

Alle weiteren Transaktionen, die im Block bestätigt werden. Sie enthalten die Übertragungen der bitcoin zwischen den Nutzern.

Die Blockchain sorgt für Transparenz und Nachvollziehbarkeit sämtlicher Transaktionen im Netzwerk. Jede Node besitzt eine vollständige Kopie dieser Blockchain und verifiziert unabhängig alle neuen Transaktionen und Blöcke. So entsteht ein globales, vertrauenswürdigen Register, ohne dass eine zentrale Autorität benötigt wird.

Die Konsensregeln definieren die Rahmenbedingungen für die unabhängige Validierung von Transaktionen und die Ausgabe neuer bitcoin. Zu den wichtigsten Regeln zählen die Begrenzung der Gesamtmenge auf knapp 21 Millionen bitcoin, die schrittweise und nach einem festen Zeitplan durch das Mining in Umlauf gebracht werden. Die Geschwindigkeit der Ausgabe halbiert sich etwa alle vier Jahre (Halving), was zu einer deflationären Struktur führt. Die Formel zur Berechnung der maximalen bitcoin-Menge unter Berücksichtigung des Halvings lautet:

$$\sum_{i=0}^{32} 210,000 \times \frac{50}{2^i}$$

wobei 210.000 die Anzahl der Blöcke pro Halving-Epoche ist, 50 die initiale Blockbelohnung in bitcoin und 32 die maximale Anzahl der Halvings darstellt [AH24, S.217]. Ein neuer Block wird im Durchschnitt alle zehn Minuten gefunden, sodass die Ausgabe neuer bitcoin und die Bestätigung von Transaktionen in einem regelmäßigen, vorhersehbaren Rhythmus erfolgen [AH24, S.215]. Diese mathematische Begrenzung verhindert eine inflationäre Geldpolitik und sorgt für Vorhersehbarkeit und Knappheit der Währung.

Der Proof-of-Work-Algorithmus bildet das Kernstück des dezentralen Konsensmechanismus in der Blockchain. Miner konkurrieren um die schnellste Lösung eines kryptografischen Hash-Puzzles – ein rechenintensiver Prozess, bei dem Milliarden von Hash-Varianten pro Sekunde getestet werden. Sobald ein Miner eine gültige Lösung findet, erlangt er das Recht, einen neuen Block zur Blockchain hinzuzufügen und wird durch die Blockbelohnung entlohnt erfolgen

[AH24, S.27]. Dieser Prozess, bekannt als Mining, sorgt dafür, dass Transaktionen verifiziert und in das öffentliche Register aufgenommen werden. Die Lösung des mathematischen Problems, der sogenannte Proof-of-Work, dient als Nachweis, dass der Miner erhebliche Rechenleistung aufgewendet hat. Der Schwierigkeitsgrad dieser Aufgabe (Network Difficulty) passt sich dynamisch an die Gesamtleistung des Netzwerks an, sodass im Durchschnitt alle zehn Minuten ein neuer Block entsteht. Mit jedem Block werden neue bitcoin ausgeschüttet, jedoch diese Vergütung sinkt mit jeder Halving-Epoche. Nach dem Jahr 2140 werden keine neuen bitcoin mehr generiert, und das Mining wird sich ausschließlich über die Transaktionsgebühren finanzieren [AH24, S.1f].

Der dezentrale Konsens in Bitcoin entsteht durch das Zusammenspiel mehrerer Prozesse. Jede Full Node verifiziert unabhängig jede Transaktion, fasst diese in neuen Blöcken zusammen, prüft und akzeptiert neue Blöcke und entscheidet sich stets für die längste (beziehungsweise die mit der höchsten kumulierten Rechenleistung) Blockchain. Konsens ist dabei kein explizites Ereignis, sondern das Ergebnis der asynchronen Interaktion Tausender unabhängiger Nodes, die einfachen Regeln folgen. Dadurch entsteht ein robustes System, das ohne zentrale Instanz auskommt und dennoch eine universelle, vertrauenswürdige Buchführung ermöglicht [AH24, S.219f.].

3.3 Wichtige Variablen für profitables Bitcoin-Mining

Miner erfüllen vier zentrale Aufgaben: Sie speichern und verbreiten die jeweils längste, fortlaufende Kette der Bitcoin-Blockchain, sie validieren und verteilen neue Transaktionen im Netzwerk, sie partizipieren in der Ausschüttung neuer bitcoin und sie sichern die Bitcoin Blockchain, indem sie durch die Rechenleistung ihrer Hardware den Konsens im System herstellen. Der Konsens im Bitcoin-Netzwerk entsteht dabei emergent - es gibt also keinen eindeutig bestimmbareren Zeitpunkt, zu dem Konsens erreicht wird [Fru+22, S.29]. Dies geschieht durch den Prozess des sekundlich billionenfachen Ausprobierens von unterschiedlichen Hashes, wobei der Miner für jeden Hash die Parameter in dem Block-Header (Änderung der Nonce bzw. des Zeitstempels) oder das Feld der extra Nonce in der Coinbase Transaktion ändert, bis er einen Hashwert unter dem Zielwert (Target) erhält und somit den gültigen Block an das Netzwerk propagieren kann [Con25].

Auf physikalischer Ebene wandeln Miner hierfür elektrische Energie durch ihre Hochleistungs-Hardware in größtenteils Wärme um, ein notwendiger Prozess, der die Sicherheit des Netzwerks durch hohen Energieaufwand gewährleistet.

Im Bitcoin-Mining unterscheidet man zwischen zwei Kostenträgern: CAPEX (Capital Expenditures - Kapitalkosten) und OPEX (Operational Expenditures - Betriebskosten). Die CAPEX umfassen die Anschaffung der ASICs und Netzteile, die Planungs- und Baukosten für die Mining-Einrichtung, Ausgaben für Kühlsysteme wie Belüftungsanlagen oder Immersionsbecken sowie die regulatorisch bedingten Kosten. Auch die Menge der angeschafften ASICs hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Profitabilität. Mit einer steigenden Anzahl angeschaffter moderner ASICs verkürzt sich die Amortisationszeit für die übrigen CAPEX-Kostenträger, da sich die Fixkosten auf mehr leistungsfähige Geräte verteilen und dadurch schneller durch die Einnahmen aus dem Mining gedeckt werden können.

Die OPEX umfassen hingegen die monatlichen Ausgaben für Strom und Gehälter, Kosten für die Standortüberwachung, Versicherungsprämien, Steuern sowie Rechtsberatung und sonstige juristische Gebühren [Fru+22, S. 81]. Mit zunehmender Betriebszeit der ASICs steigen die OPEX, da insbesondere die Stromkosten direkt proportional zur monatlichen bzw. jährlichen Laufzeit zunehmen. Je länger die Geräte in Betrieb sind, desto höher fallen die laufenden Betriebskosten aus, da der Stromverbrauch linear mit der Betriebsdauer steigt. Auch spielt die Stromeffizienz der einzelnen ASIC-Modelle eine maßgebliche Rolle bei der Profitabilität des Geschäfts. Je effizienter die ASICs sind, umso geringer ist ihr Stromverbrauch und damit auch ihre Stromkosten pro produzierten Hash. Effizientere ASICs sind in der Anschaffung meist deutlich teurer als weniger leistungsfähige oder ältere Modelle. Während moderne Geräte durch ihren geringeren Stromverbrauch pro Hash langfristig die Betriebskosten senken und die Profitabilität steigern können, bieten günstigere Mining-Hardware oft einen niedrigeren Einstiegspreis, gehen jedoch mit höheren laufenden Stromkosten und einer geringeren Wettbewerbsfähigkeit einher. Daher sollte vor einer Investition stets eine sorgfältige Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgen, bei der die höheren Anschaffungskosten moderner ASICs den potenziellen Einsparungen bei den Betriebskosten gegenübergestellt und mit den Risiken und Vorteilen günstigerer Hardware abgewogen werden.

Als Einnahmequelle decken Bitcoin-Miner ihre Kosten lediglich durch den Block-Reward, welcher sich aus der Block Subsidy (Neuausschüttung der bitcoin) und den Transaktionsgebühren ergibt. Da der Block-Reward sich aufgrund des Halvings aller vier Jahre halbiert, gewinnen die Transaktionsgebühren für die Bitcoin-Miner deutlich an Relevanz. Im Regelfall erzielen Miner ihre Einnahmen über Mining-Pools. Dies sind Zusammenschlüsse vieler Miner, die gemeinsam ihre Chancen auf einen gültigen Block erhöhen. Die im Pool erzielten Block-Rewards werden anschließend anteilig entsprechend der bereitgestellten Rechenleistung an die einzelnen Miner verteilt. Ein weiterer Einflussfaktor ist somit auch die Entwicklung der Hashrate (Anzahl der Hashes pro Sekunde im gesamten Bitcoin-Netzwerk), denn mit einer steigenden Hashrate sinkt gleichzeitig auch die Ausschüttung der bitcoin pro Miner (Pool) bzw. die Chance, einen gültigen Block zu finden (Solo-Mining). Als eine der wichtigsten Variablen ist zudem die Entwicklung des bitcoin-Preises zu nennen. Viele Miner gehen von einem langfristigen Wertzuwachs aus und halten daher einen Teil ihrer bitcoin strategisch zurück. Sie versuchen, ihre Bestände vor allem in Phasen günstiger Marktbedingungen zu veräußern, um Gewinne zu realisieren und den laufenden Betrieb zu finanzieren. Ein deutlicher Anstieg des bitcoin-Preises würde tendenziell mehr Miner anziehen und die Netzwerk-Hashrate weiter erhöhen. Umgekehrt würden bei einem anhaltend fallenden Preis zunächst die Miner mit den höchsten Betriebskosten aus dem Markt ausscheiden, da das Mining für sie unrentabel wird [Coi25].

Die in diesem Kapitel erläuterten Variablen bilden die Grundlage für den in Kapitel 4 entwickelten Mining-Calculator, der die ökonomische Bewertung verschiedener Mining-Szenarien ermöglicht.

3.4 Kennzahlen im Bitcoin-Mining

Hashpreis-Index

Der Hashpreis-Index ist eine zentrale Kennzahl zur Quantifizierung des monetären Werts von Mining-Hashrate. Er definiert den erwarteten Tagesertrag pro Einheit Rechenleistung, typischerweise in USD pro Petahash (PH/s - 1 Billion Hashes pro Sekunde). Zur Berechnung des Hashpreises (H_P) werden folgende Inputs benötigt: globale Hashrate (HR_{Glob}), bitcoin-Preis (p_{BTC}), Block Subsidy (R_S) und der Transaktionsgebühr (R_G), wobei sich der tägliche Reward (R_{Tag}) aus der Summe der Subsidy sowie der Transaktionsgebühr multipliziert mit den 144 täglich neu geschürften bitcoin (b_{Tag}) bildet. Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$R_{Tag} = b_{Tag} \times (R_S + R_G)$$

$$H_P = \frac{R_{Tag} \times p_{BTC}}{HR_{Glob}}$$

Stand 10. Juni 2025 belaufen sich die aktuellen Werte auf: $HR_{Glob}=873.500$ PH/s $p_{BTC}=109.350$ USD $R_S= 3.125$ $R_G= 0,04$

$$H_P = \frac{(144 \cdot (3,125 + 0,04)) \cdot \$109,350}{873,500 \text{ PH/s}} = 57,05 \text{ USD}$$

Nach aktuellen Werten produziert somit ein Petahash an Rechenleistung rund 57 USD in bitcoin pro Tag [[Ind25a](#)].

Effizienz und Break-Even-Effizienz

Die Effizienz von ASICs spielt eine maßgebliche Rolle bei der Profitabilitätsrechnung und zieht den Energieverbrauch mit dem direkten Output an Hashrate in ein direktes Verhältnis. Anhand der Effizienz von ASICs kann berechnet werden, ob der aktuelle Betrieb der Hardware noch wirtschaftlich ist bzw. ob die Geräte abgeschaltet werden müssen. Angegeben wird diese bei ASICs in Joule pro Terahash (J/TH). Dies beschreibt den Verbrauch an Joule bzw. kWh pro erzeugtem Terahash (TH) (entspricht eine Billion Hashes). ASICs werden mit jeder neuen Generation effizienter, was alte Mininghardware nach und nach von dem Markt verdrängt. Je geringer der Wert der Effizienz ist, umso effizienter ist der ASIC, jedoch steigt meist die Kaufkosten des Miners.

Die Effizienz von ASIC-basierter Mining-Hardware stellt eine zentrale Kenngröße zur Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit von Bitcoin-Mining-Operationen dar. Die energetische Effizienz η , angegeben in Joule pro Terahash (J/TH), wird durch das Verhältnis von elektrischer Leistungsaufnahme (P) zur Hashrate (HR in TH/s) definiert:

$$\eta = \frac{P}{HR}$$

Die Effizienzkennzahl korreliert direkt mit den variablen Betriebskosten (C_{op}), da

$$C_{op} = \frac{\eta \cdot HR \cdot C_{el} \cdot t}{1000}$$

wobei C_{el} der Strompreis in €/kWh und t die Betriebsdauer in Stunden ist.

Technologische Sättigung: ASIC-Generationen folgen anfangs dem Mooreschen Degressionspfad, der besagt, dass jede neue Generation die Effizienz η um etwa 15–25 Prozent verbessert – was ältere Hardware durch negative Skaleneffekte obsolet macht. Jedoch nehmen diese Effizienzsteigerungen aufgrund der technischen und physikalischen Begrenzungen bei immer kleineren Chipstrukturen mit jeder Generation ab [Vra17, S. 4f.].

Die Wirtschaftlichkeit eines Miners ergibt sich aus der **Break-even-Effizienz (η_{BE})**:

$$\eta_{BE} = \frac{H_P}{C_{el} \times t}$$

Die Variable t wird mit 24 Stunden angesetzt, da die Break-even-Effizienz auf Basis eines vollen Tages berechnet wird. Stand 06/2025 liegt die Break-Even-Effizienz bei einem Strompreis von 7ct/kWh bei 35-37 J/TH. Der Betrieb von ASICs oberhalb dieser Effizienzgrenze, ohne zusätzliche Verwendung der Abwärme, ist somit wirtschaftlich nicht rentabel [Ind25b]

Kosten eines bitcoin

Die Kosten für das Schürfen eines bitcoin [Ins25] stellen eine Schlüsselmetrik für Investitionsentscheidungen zum Betrieb von ASICs dar. Sie ermöglichen die direkte Vergleichbarkeit zwischen dem Kapitaleinsatz in bitcoin als Asset und der Investition in Mining-Infrastruktur (Hardware + Strom). Die Berechnung erfolgt durch:

$$\text{Kosten pro BTC} = \frac{\text{tägliche Stromkosten}}{\text{BTC}_{\text{Tag}}}$$

wobei BTC_{Tag} (täglich erhaltene bitcoin eines ASIC-Miners) durch folgende Faktoren determiniert wird:

$$\text{BTC}_{\text{Tag}} = R \times (t \div (S_N \times (Z \div HR_{\text{ASIC}})))$$

Variablendefinition:

- S_N : Netzwerkschwierigkeit (*Difficulty*)
- Z : Zielwert der Hash-Funktion
- R : Block-Reward in BTC
- HR_{ASIC} : Hashrate des Miners in Hash/s
- t : Zeitraum in Sekunden (86,400 für 24h)

Da die Kosten für den Erhalt eines bitcoin in dieser Rechnung nur eine tägliche Momentaufnahme darstellen, ist es wichtig, Parameter wie die Netzwerkschwierigkeit (Difficulty) und die Blockbelohnung (Block-Reward) in Modellen dynamisch anzupassen. Nur so können Schwankungen der Hashrate, Halving-Ereignisse und sich verändernde Transaktionsgebühren in der Wirtschaftlichkeitsberechnung abgebildet werden.

In Kapitel [6.2.1](#) wird die Berechnung für die Kosten des Schürfens von einem bitcoin anhand der Realwerte des Pilotprojekts ermittelt.

4 Wirtschaftliche Analyse

In diesem Kapitel steht die wirtschaftliche Analyse der Arbeit im Mittelpunkt. Um Bitcoin-Mining nachhaltig und rentabel betreiben zu können, ist es notwendig, die vielfältigen Einflussfaktoren auf die Rentabilität systematisch zu erfassen und in ein geeignetes Framework zu überführen. In den vorherigen Kapiteln 2.3.2, 2.5 und 2.6 wurden bereits der positive und negative Sekundärregelleistungsmarkt behandelt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen in die anschließenden Berechnungen und Bewertungen dieses Kapitels ein

4.1 Methodische Grundlagen der Fallbeispielberechnung

Im Internet gibt es zahlreiche Bitcoin-Mining-Rentabilitätsrechner, doch diese sind meist auf Standardfälle zugeschnitten und bieten nur begrenzte Möglichkeiten, individuelle Parameter zu verändern. Spezielle Fallbeispiele, wie etwa die Nutzung von überschüssigem Strom aus Photovoltaikanlagen oder die Teilnahme am Sekundärregelleistungsmarkt, lassen sich mit diesen Tools oft nicht abbilden. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Arbeit ein eigener Bitcoin-Mining-Rentabilitätsrechner in Microsoft Excel entwickelt. Mit diesem können wichtige Kennzahlen flexibel angepasst und verschiedene Szenarien realistisch simuliert werden. Der Rentabilitätsrechner befindet sich im Anhang dieser Thesis.

Der Rechner liefert als Ergebnis unter anderem die Stromkosten, Gesamtkosten, die erzielten bitcoin-Erträge (sowohl in BTC als auch in Euro), die Profitabilität mit und ohne Berücksichtigung der ASIC-Kosten, den Return on Investment (mit und ohne Abschreibung der Hardware) sowie die Operating Margin. Diese Ergebnisse werden jeweils für Zeiträume von 12, 24 und 36 Monaten ausgegeben. Um die Ertragswerte zu ermitteln, werden die geschürften bitcoin in der aktuellen Berechnung monatlich verkauft. Der Mining-Rechner berücksichtigt zudem eine alternative Strategie, bei der die bitcoin über einen Zeitraum von 36 Monaten, also drei Jahre, gehalten und erst dann verkauft werden. Das Halten von bitcoin ist eine gängige Strategie im Mining-Business, da viele Miner einen Wertzuwachs erwarten.

Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussgrößen auf die Rentabilität beschrieben. Der Stromverbrauch bezieht sich auf einen einzelnen ASIC und kann je nach Modell individuell angepasst werden. Ebenso flexibel ist der Kaufpreis der Hardware. Die Stromkosten pro Kilowattstunde haben einen besonders großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Minings. Die tägliche Laufzeit in Stunden sowie die Anzahl der Betriebstage pro Jahr sind ebenfalls anpassbar. Idealerweise sollte der Miner möglichst lange laufen, um die Rentabilität zu maximieren, sofern keine zusätzlichen Vergütungen für Flexibilität bestehen.

Die Hashrate des ASIC ist ein zentraler Parameter und steht in engem Zusammenhang mit dem Stromverbrauch. Im Rechner wird zudem ein monatlicher prozentualer Anstieg der Hashrate berücksichtigt. Dieser Wert lässt sich anpassen, sodass auch negative Entwicklungen simuliert werden können. Die Entwicklung der Hashrate ist allerdings schwer vorherzusagen, da sie von vielen Faktoren wie der Verfügbarkeit von Chips, dem bitcoin-Preis, der

globalen Wirtschaftslage und regulatorischen Veränderungen in wichtigen Mining-Ländern abhängt. Aus den letzten zwei Jahren lässt sich ein durchschnittlicher monatlicher Anstieg von etwa 3 Prozent ableiten.

Auch der monatliche prozentuale Anstieg des bitcoin-Preises ist ein unsicherer Faktor, da der Kurs starken Schwankungen unterliegt. Im Rechner wird der Anstieg linear angenommen, um die Berechnungen übersichtlich zu halten. In den Beispielrechnungen wird ebenfalls ein monatlicher Anstieg von 3 Prozent angenommen, um die Vergleichbarkeit mit der Hashrate zu gewährleisten.

Der Reward aus Transaktionsgebühren ist im Rechner auf 0,3 BTC pro Block festgelegt. Das ist aktuell deutlich höher als der tatsächliche Wert (Stand Juni 2025), allerdings wird davon ausgegangen, dass die Transaktionsgebühren mit zunehmender weltweiter Nutzung von Bitcoin steigen werden. Der Block Reward beträgt aktuell 3,125 BTC und halbiert sich voraussichtlich im April 2028. Diese Halbierung ist im Rechner bereits integriert.

In der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden zusätzliche Investitions- und Betriebskosten, wie etwa die Anschaffung von Mining-Containern, Reparaturkosten sowie Wartungsaufwände und Kosten für Ersatzteile, nicht berücksichtigt. Diese Faktoren können in der Praxis einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten und damit auf die Rentabilität des Minings haben, wurden aber zur Vereinfachung und Übersichtlichkeit des Modells aus der Betrachtung ausgeschlossen.

Insgesamt ermöglicht der entwickelte Rechner eine realistische und flexible Simulation verschiedener Mining-Szenarien, sodass individuelle Fallbeispiele abgebildet und verglichen werden können.

4.2 Kernparameter der Fallbeispielberechnung

Zur Berechnung der einzelnen Fallbeispiele werden in diesem Kapitel die unterschiedlichen Inputs zum Verständnis aufgezeigt. Je nach Fallbeispiel sind zusätzliche Inputs erforderlich, welche gegliedert beschrieben werden.

Inputs für alle Fallbeispiele:

- bitcoin Startpreis: 90.000 €
- Monatlicher Preisanstieg von bitcoin: 3 Prozent
- Monatlicher Anstieg der Hashrate: 3 Prozent
- Hashrate des Netzwerks: 766 EH/s (Stand 01.01.2025)
- Reward an Transaktionsgebühren: 0,3 BTC
- Block Subsidy: 3,125 BTC - ab 01.2028 1,5625 BTC

Inputs für die einzelnen Fallbeispiele:

Tabelle 4.1: Vergleich verschiedener Betriebsfälle für Bitcoin-Mining

	Volllast	aFRR NEG	aFRR POS
Kaufpreis ASIC	3540 €	300 €	300 €
Menge	274	322	322
Hashrate in TH/s	200	90	90
Stromverbrauch pro ASIC	3650 W	3100 W	3100 W
Stromverbrauch gesamt	1 MW	1 MW	1 MW
Stromkosten	5 ct, 7 ct, 20 ct	20 ct	20 ct
Laufzeit pro Tag	24 Stunden	1 Stunde	23 Stunden
Betriebstage pro Jahr	365	365	365
Aktivierte Regelleistung pro Tag	-	1 Stunde	1 Stunde
Geforderter Stromverbrauch durch Regelleistung	-	1 MWh	-
Geforderte Lastreduktion durch Regelleistung	-	-	1 MWh
Leistungspreis	-	7 € pro MWh	7 € pro MWh
Arbeitspreis	-	1500 € pro MWh	1500 € pro MWh

4.3 Volllastbetrieb mit variiertem Strompreis

Für den Volllastbetrieb wurden jeweils 3 unterschiedliche Stromwerte genommen: 5, 7 und 20 ct/kWh. Die 5 ct/kWh orientieren sich an den gängigen Strompreisen bei Hostinganbietern von Bitcoin-Mining-Farmen. Die 7 ct/kWh stellen den vereinbarten Strompreis für das Pilotprojekt der Deutschen Telekom dar und die 20 ct/kWh sollen den ungefähren Strompreis für Industriekunden abbilden. Die Gesamtkosten bilden die Summe aus den Kosten für die ASICs sowie den Stromkosten ab, umfassen jedoch nicht zusätzlich anfallende Kosten wie bspw. Management-, Wartungs- und Reparaturkosten, die Kosten für die Bereitstellung und den Betrieb von Miningcontainern sowie die Ausgaben für die Kühlung der Hardware.

Für die oben abgebildeten Inputs ergaben sich somit folgende Ergebnisse:

Tabelle 4.2: Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining bei 20 ct/kWh

20 ct/kWh	12 Monate (monatlicher Verkauf)	24 Monate (monatlicher Verkauf)	36 Monate (monatlicher Verkauf)	Verkauf erst nach 36 Monaten
Stromkosten	1.752.175 €	3.504.350 €	5.256.526 €	5.256.526 €
Gesamtkosten	2.722.135 €	4.474.310 €	6.226.486 €	6.226.486 €
Erlös durch Geminte bitcoin in €	1.159.072 €	2.318.143 €	3.477.215 €	6.111.779 €
Erlös abzüglich Stromkosten	-593.104 €	-1.186.207 €	-1.779.311 €	855.253 €
Erlös abzüglich Gesamtkosten	-1.563.064 €	-2.156.167 €	-2.749.271 €	-114.707 €

Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen im Bitcoin-Mining ist die Rentabilität des Betriebs in Regionen mit einem Strompreis von 20 ct/kWh nicht gegeben. Dies zeigt sich selbst dann, wenn man eine Haltedauer der geschürften bitcoin von 36 Monaten und einen hypothetischen Verkaufskurs von etwa 250.000 €/BTC annimmt. Die kumulierten Einnahmen aus dem Mining würden in dieser Konstellation die anfallenden Stromkosten nicht kompensieren, sodass das Modell unter Berücksichtigung der reinen Energieausgaben bereits einen Verlust erwirtschaftet.

Darüber hinaus werden in dieser vereinfachten Rechnung die oben genannten Kostenfaktoren nicht berücksichtigt, was im realen Betrieb einen weiteren erheblichen Kostenblock darstellt. Hinzu kommen zusätzliche finanzielle Belastungen durch Steuern, die die Gesamtkosten weiter erhöhen und die Rentabilität zusätzlich schmälern.

Im internationalen Vergleich wird deutlich, dass die Wettbewerbsfähigkeit von Mining-Betrieben in Regionen mit hohen Strompreisen wie Deutschland erheblich eingeschränkt ist. In anderen Ländern, insbesondere dort, wo Strom zu deutlich niedrigeren Preisen verfügbar ist, können Mining-Unternehmen weiterhin profitabel agieren. Die starke Konkurrenz innerhalb der Branche verschärft diesen Effekt zusätzlich, da die globalen Akteure mit den niedrigsten Stromkosten einen strukturellen Vorteil besitzen und somit die Schwelle für die Markteintrittsbarrieren in Hochpreisländern wie Deutschland weiter anheben.

Tabelle 4.3: Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining bei 7 ct/kWh

7 ct/kWh	12 Monate (monatlicher Verkauf)	24 Monate (monatlicher Verkauf)	36 Monate (monatlicher Verkauf)	Verkauf erst nach 36 Monaten
Stromkosten	613.261 €	1.226.523 €	1.839.784 €	1.839.784 €
Gesamtkosten	1.583.221 €	2.196.483 €	2.809.744 €	2.809.744 €
Erlös durch Geminte Bitcoin in €	1.159.072 €	2.318.143 €	3.477.215 €	6.111.779 €
Erlös abzüglich Stromkosten	545.810 €	1.091.620 €	1.637.431 €	4.271.995 €
Erlös abzüglich Gesamtkosten	-424.150 €	121.660 €	667.471 €	3.302.035 €

Bei einem Strompreis von 7 ct/kWh verbessert sich die Wirtschaftlichkeit des Bitcoin-Minings im Vergleich zu höheren Strompreisen deutlich. Die Auswertung der verschiedenen Szenarien zeigt, dass bereits nach 24 Monaten ein leichter Überschuss erzielt werden kann: Während die Gesamtkosten bei rund 2,2 Millionen Euro liegen, werden durch das Mining Erlöse von etwa 2,3 Millionen Euro generiert, was zu einer positiven absoluten Profitabilität von gut 120.000 € führt. Nach 36 Monaten steigt dieser Wert auf rund 667.000 € an. Besonders deutlich wird der Effekt einer längeren Haltedauer der geschürften bitcoin. Erfolgt der Verkauf erst nach 36 Monaten, erhöht sich die absolute Profitabilität auf über 3,3 Millionen Euro.

Trotz weiterhin signifikanter Betriebskosten zeigt sich, dass ein Strompreis von 7 ct/kWh, vor allem bei einer strategisch gewählten Haltedauer und günstigen Marktbedingungen, die Grundlage für ein rentables Mining-Modell bieten kann. Die Ergebnisse unterstreichen, wie entscheidend niedrige Energiekosten und eine flexible Verkaufsstrategie für die Profitabilität im Bitcoin-Mining sind. Für das Mining bei 7 ct/kWh sind erhebliche Vorabinvestitionen notwendig, die erst nach einer Haltedauer der bitcoin von 36 Monaten nicht nur vollständig amortisiert werden, sondern einen Nettoüberschuss von etwa 3 Millionen Euro generieren.

Ein monatlicher Verkauf der bitcoin bringt zwar innerhalb von 36 Monaten einen Profit von 667.000 Euro, doch nach Abzug der zusätzlichen Kostenfaktoren kann das Geschäftsmodell schnell unprofitabel werden.

Die Rentabilität hängt somit entscheidend von der strategischen Haltedauer ab. Während kurzfristige Verkäufe lediglich einen begrenzten Cashflow generieren, ermöglicht erst die 36-monatige Halteperiode die vollständige Amortisation der Investitionen und die Realisierung des prognostizierten Gewinns.

Tabelle 4.4: Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining bei 5 ct/kWh

5 ct/kWh	12 Monate (monatlicher Verkauf)	24 Monate (monatlicher Verkauf)	36 Monate (monatlicher Verkauf)	Verkauf erst nach 36 Monaten
Stromkosten	438.044 €	876.088 €	1.314.131 €	1.314.131 €
Gesamtkosten	1.408.004 €	1.846.048 €	2.284.091 €	2.284.091 €
Erlös durch Geminte bitcoin in €	1.159.072 €	2.318.143 €	3.477.215 €	6.111.779 €
Erlös abzüglich Stromkosten	721.028 €	1.442.055 €	2.163.083 €	4.797.647 €
Erlös abzüglich Gesamtkosten	-248.932 €	472.095 €	1.193.123 €	3.827.687 €

Bei einem Strompreis von 5 ct/kWh zeigt sich eine deutlich verbesserte Wirtschaftlichkeit des Bitcoin-Minings. Bereits nach 24 Monaten kann bei monatlichem Verkauf der bitcoin ein positiver Cashflow von etwa 472.000 € erzielt werden, während nach 36 Monaten die Profitabilität auf rund 1,2 Millionen Euro ansteigt¹. Besonders attraktiv wird das Modell bei einer strategischen Haltedauer von 36 Monaten: Hier erhöht sich die absolute Profitabilität auf über 3,8 Millionen Euro.

Im Vergleich zu höheren Strompreisen ermöglicht das 5-Cent-Modell bereits bei kürzeren Haltedauern eine solide Kapitalrückgewinnung und reduziert das Liquiditätsrisiko erheblich. Während bei 7 ct/kWh eine 36-monatige Bindung des Kapitals nahezu unverzichtbar ist, bietet der niedrigere Energiepreis bereits nach 24 Monaten ausreichende Margen, um auch zusätzliche Betriebskosten wie Wartung, Kühlung und Steuern zu kompensieren. Dies macht das 5-Cent-Szenario zu einem wesentlich robusteren Geschäftsmodell, das auch bei konservativeren Verkaufsstrategien profitabel bleibt und somit für bspw. das Hosting der ASICs eine attraktive Grundlage für nachhaltige Mining-Operationen darstellt.

4.4 Bitcoin-Mining mit negativer Sekundärregelung

Der zweite Anwendungsfall untersucht Bitcoin-Mining in Kombination mit negativer Sekundärregelung, bei der Mining-Hardware gezielt zur Netzstabilisierung eingesetzt wird. Im Gegensatz zu kontinuierlichen Mining-Operationen werden die ASICs nur bei Bedarf an negativer Regelenergie aktiviert, wenn Stromüberschüsse im Netz ausgeglichen werden müssen. In der restlichen Zeit befinden sich die Miner im Ruhezustand und verbrauchen nur minimal Energie. Für dieses Szenario kommt eine ältere ASIC-Generation (Antminer S19 mit 90 TH/s) zum Einsatz, da deren deutlich niedrigere Anschaffungskosten eine schnellere Amortisation ermöglichen und das Risiko durch flexible, bedarfsorientierte Betriebszeiten reduziert wird.

Die ASICs werden nur auf Volleistung geschaltet, wenn negative Regelleistung benötigt wird, andernfalls befinden sie sich im Ruhezustand und verbrauchen nur minimal Strom. Bei einer aktivierten Regelleistung von einer Stunde pro Tag ergeben sich somit folgende Werte:

Tabelle 4.5: Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining unter Einbezug von negativer Sekundärregelleistung

	12 Monate (monatlicher Verkauf)	24 Monate (monatlicher Verkauf)	36 Monate (monatlicher Verkauf)	Verkauf erst nach 36 Monaten
Stromkosten	72.869 €	145.737 €	218.606 €	218.606 €
Gesamtkosten	169.469 €	242.337 €	315.206 €	315.206 €
Erlös durch aktivierte Regelleistung	54.750 €	109.500 €	164.250 €	164.250 €
Erlös durch Regelleistung	5.877 €	11.753 €	17.630 €	17.630 €
Erlös durch Geminte bitcoin in €	56.755 €	113.510 €	170.265 €	299.269 €
Erlös abzüglich Stromkosten	44.513 €	89.026 €	133.539 €	262.543 €
Erlös abzüglich Gesamtkosten	-52.087 €	-7.574 €	36.939 €	165.942 €

Die Analyse einer täglichen Aktivierungsdauer von einer Stunde zeigt eine wirtschaftlich schwierige Ausgangslage. Nach 12 Monaten ergibt sich ein kumulierter Verlust von 52.087 Euro, der sich nach 24 Monaten auf 7.574 € reduziert. Erst nach 36 Monaten ergibt sich ein kumulierter Gewinn von 36.939 Euro, sofern die bitcoin monatlich verkauft werden. Wenn die bitcoin dagegen erst nach 36 Monaten verkauft werden, erhöht sich der Gewinn auf 165.942 Euro.

Die Wirtschaftlichkeit verbessert sich deutlich, wenn die Aktivierungsdauer auf zwei Stunden täglich erhöht wird. Bereits nach 24 Monaten ergibt sich ein positiver kumulierter Gewinn von 69.188 Euro. Dieser steigt nach 36 Monaten bei monatlichem Verkauf der bitcoin auf 152.082 € an. Wird die strategische Haltedauer eingehalten und der Verkauf erst nach 36 Monaten vorgenommen, erhöht sich der kumulierte Gewinn sogar auf 410.089 € - mehr als das Doppelte des Ein-Stunden-Szenarios.

Die Analyse zeigt, dass die Rentabilität maßgeblich von der Aktivierungsdauer der Mining-Hardware abhängt - je länger die Miner täglich aktiviert werden, desto wirtschaftlicher wird das Modell. Dies unterstreicht das Potenzial flexibler Mining-Konzepte zur Integration erneuerbarer Energien und zur Netzstabilisierung. Durch die gezielte Aktivierung bei Stromüberschüssen trägt das Modell zur Netzstabilisierung bei und unterstützt die Integration erneuerbarer Energien, wie Pilotprojekte in Norwegen zeigen [Sef24]. Ein weiterer Vorteil dieses Modells liegt in der vergleichsweise geringen Anfangsinvestition, was das Kapitalrisiko für Investoren deutlich reduziert. Allerdings bleibt dieses Geschäftsmodell abhängig von der Höhe des Arbeits- und Leistungspreises. Darüber hinaus können regulatorische Änderungen sowie häufigere technische Ausfälle aufgrund der veralteten ASIC-Generation zu Betriebsrisiken führen. Um diese zu minimieren, sind redundante Systeme, häufigere Wartungszyklen und eine sorgfältige Überwachung der Funktionsfähigkeit der Hardwarekomponenten erforderlich.

4.5 Bitcoin-Mining mit positiver Sekundärregelung

Der dritte Anwendungsfall analysiert Bitcoin-Mining in Kombination mit positiver Sekundärregelung, bei der ASICs als flexible Last zur Netzstabilisierung dienen. Im Gegensatz zum vorherigen Modell laufen die ASICs kontinuierlich und werden nur bei Bedarf an positiver Regelenergie abgeschaltet, um Stromengpässe im Netz auszugleichen. Die Miner operieren somit 23 Stunden täglich und werden lediglich für eine Stunde pro Tag deaktiviert. Dieses Modell zielt darauf ab, durch die Erlöse der Arbeits- und Leistungspreise die Rentabilität trotz hoher Stromkosten von 20 Cent/kWh zu sichern. Die Auswertung der kumulierten Gewinne, Verluste und Regelenergie-Erlöse unter diesen Bedingungen ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 4.6: Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining unter Einbezug positiver Sekundärregelung

	12 Monate (monatlicher Verkauf)	24 Monate (monatlicher Verkauf)	36 Monate (monatlicher Verkauf)	Verkauf erst nach 36 Monaten
Stromkosten	1.675.978 €	3.351.956 €	5.027.933 €	5.027.933 €
Gesamtkosten	1.772.578 €	3.448.556 €	5.124.533 €	5.124.533 €
Erlös durch aktivierte Regelenergie	54.750 €	109.500 €	164.250 €	164.250 €
Erlös durch Regelleistung	5.877 €	11.753 €	17.630 €	17.630 €
Erlös durch Geminte bitcoin in €	1.305.366 €	2.610.731 €	3.916.097 €	6.883.186 €
Erlös abzüglich Stromkosten	-309.986 €	-619.972 €	-929.957 €	2.037.132 €
Erlös abzüglich Gesamtkosten	-406.586 €	-716.572 €	-1.026.557 €	1.940.532 €

Die Analyse einer täglichen Abschaltdauer von einer Stunde zeigt eine deutlich schwierigere wirtschaftliche Ausgangslage als bei der negativen Regelenergie. Nach 12 Monaten ergibt sich ein kumulierter Verlust von 406.586 Euro, der sich nach 24 Monaten auf 716.572 € erhöht. Nach 36 Monaten steigt der Verlust bei monatlichem Verkauf der bitcoin auf 1.026.557 € an. Erst wenn die bitcoin strategisch gehalten und nach 36 Monaten verkauft werden, ergibt sich ein positiver kumulierter Gewinn von 1.940.532 Euro. Die Verluste sind mit dem Strompreis und der geringen Aktivierungsdauer positiver Regelenergie zu begründen. Wie schon im Fallbeispiel "Volllastbetrieb" dargestellt wurde, ist Bitcoin-Mining zu einem Strompreis von 20 ct/kWh nicht rentabel. Auch fallen deutlich höhere laufende Kosten für den Investor an, was das Risiko des Geschäftsmodells deutlich erhöht. Erst ab einer täglichen Aktivierungsdauer von 6 Stunden positiver Regelenergie erwirtschaftet das Fallbeispiel bei einem monatlichen Verkauf der bitcoin nach 36 Monaten einen geringen Gewinn von rund 30.000 €. Dieser schließt jedoch noch nicht die zusätzlich anfallenden Kostenträger wie Steuern, Wartungs- und Managementkosten sowie Kosten für den Container ein. Erst bei deutlich geringeren Stromkosten (unter 10 ct/kWh) und einer zusätzlich hohen täglichen Aktivierungsdauer (über 6 Stunden) kann das Fallbeispiel wirtschaftlich tragfähig sein. Jedoch ist das Modell auch hier stark abhängig von der Preisgestaltung des Arbeits- und Leistungspreises sowie der täglichen Einsatzdauer für die positive Regelenergie.

4.6 Bitcoin-Mining mit Primärregelleistung

Die Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining im Primärregelleistungsmarkt wird durch ein komplexes Zusammenspiel von Erlösen, Stromkosten und Marktdynamiken bestimmt. Dieses Kapitel versucht eine vereinfachte ökonomische Perspektive aufzuzeigen und wird deshalb von den anderen Fallbeispielen getrennt betrachtet.

Der Primärregelleistungsmarkt vergütet Anbieter ausschließlich über einen Kapazitätspreis (€/MW/h), der für die Bereithaltung symmetrischer Regelleistung gezahlt wird. Dieser deckt jedoch nicht die variablen Betriebskosten, insbesondere die Stromkosten während der Aktivierung:

Hochregelung:

- Verursacht zusätzliche Stromkosten durch erhöhten Verbrauch
- Tritt auf, wenn die Netzfrequenz unter 50 Hz fällt (z. B. bei Lastspitzen)

Herunterregelung:

- Generiert Stromkostensparnis durch Leistungsreduktion
- Tritt auf, wenn die Netzfrequenz über 50 Hz steigt (z. B. bei Stromüberschuss)

Im Folgenden Beispiel wird angenommen, dass die tägliche Regelleistungszeit 24 Stunden beträgt. Innerhalb dieser Zeit werden täglich je 25 Prozent hochgeregelt und 25 Prozent heruntergeregelt. Dies entspricht bei einer symmetrischen Kapazität jeweils 0,25 MW. Es soll geprüft werden, ob Bitcoin-Mining auch bei einem äußerst geringen Strompreis in Höhe von 10 ct/kWh rentabel sein kann. Weitere Variablen sind:

Tabelle 4.7: Parameter zur Wirtschaftlichkeitsberechnung von Bitcoin-Mining für Primärregelleistung

Kaufpreis ASIC	3.540 €
Anzahl Bitcoin-ASICs	546 Stück
Hashrate in TH/s	100 bzw. hochgeregelt 200
Stromverbrauch pro ASIC	3,65 kW
Stromverbrauch aller ASICs	1 MW
Laufzeit pro Tag	24 Stunden
Strompreis	10 ct/kWh
Aktivierte Regelleistung pro Tag	24 Stunden
Leistungspreis	50 € pro MWh

Berechnung des täglichen Strompreises:**Tabelle 4.8:** Berechnung der täglichen Stromkosten und Vergütung für Bitcoin-Mining unter Einbezug von Primärregelung

Betrieb	Berechnung	Kostenwirkung
Normalbetrieb 12 Stunden (50 Prozent Auslastung)	1000 kW × 12 h × 0,10 €/kWh =	1.200 € Stromkosten pro Tag
Hochregelung	2000 kW × 6 h × 0,10 €/kWh =	1.200 € Stromkosten pro Tag
Herunterregelung	0 kW × 6 h × 0,10 €/kWh =	0 € Stromkosten
Leistungspreisvergütung	24 h × 1 MW × 50 €/MWh =	1.200 € Vergütung pro Tag
Gesamtkosten		1.200 € pro Tag

Der Rechnung nach fallen tägliche Stromkosten in Höhe von 1.200 € an.

Laut dem bitcoin Rentabilitätsrechner wird durch die Bitcoin-Miner ein täglicher Gewinn von ca. 0,03 BTC/Tag bzw. 2.500 €/Tag erzielt. Die Differenz zwischen den beiden Werten beträgt 1.300 € an theoretischem Erlös. Dies sind knapp rund 475.000 € pro Jahr. Der Vergleich zwischen dem jährlichen theoretischen Erlös von 475.000 € und den Anschaffungskosten der ASICs in Höhe von 2.000.000 € zeigt, dass selbst bei einem Strompreis von 10 ct/kWh kein wirtschaftlich tragfähiges Geschäftsmodell realisiert werden kann. Die Risiken wie bspw. Ausfall der Miner, dem Nichteinhalten der geforderten Regelleistung innerhalb der definierten Zeit, sowie den hohen Anfangsinvestitionen überwiegen deutlich die potenziellen Einnahmen. Andere Technologien wie bspw. Batteriespeicher eignen sich für dieses Szenario aufgrund ihrer technischen Überlegenheit in Reaktionsgeschwindigkeit, Regelpräzision und Kosteneffizienz deutlich besser [reg24a; Ene15].

4.7 Zusammenfassung der Fallbeispiele

Die Analyse der vier Fallbeispiele zur Rentabilität und Integration von Bitcoin-Mining in Deutschland zeigt, dass die Profitabilität des Minings maßgeblich von den Energiekosten, der Flexibilität des Geschäftsmodells sowie der Einbettung in energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen abhängt.

Im ersten Fallbeispiel wurde deutlich, dass das klassische Bitcoin-Mining in Deutschland aufgrund der hohen Strompreise für Unternehmen und Privatverbraucher kaum profitabel umsetzbar ist. Lediglich unter der Voraussetzung eines langfristigen Strombezugspreises von weniger als 7 ct/kWh kann ein rentabler Betrieb realisiert werden. Da solche Konditionen für Endverbraucher in der Praxis jedoch kaum erreichbar sind, ergibt sich eine besondere Chance für Betreiber erneuerbarer Energien, die Überschüsse aus Photovoltaik- oder anderen regenerativen Erzeugungsanlagen nutzen können. In diesem Szenario lassen sich die Stromkosten für das Mining auf nahezu null reduzieren, wobei allerdings die Verfügbarkeit überschüssiger Energie ein entscheidender Faktor bleibt. Da Miner idealerweise rund um die Uhr betrieben werden sollten, ist die Rentabilität stark von der Einspeisungshäufigkeit abhängig. Eine weitere Option zur Steigerung der Effizienz ist die Nutzung der Abwärme der Mining-Hardware, beispielsweise für Heizzwecke. Unternehmen wie 21energy [21e24] und Terahash.energy GmbH [Ter24a] bieten hierzu bereits innovative Lösungen an. Da die Wärmenutzung jedoch stark kundenindividuell gestaltet wird, wurde sie in dieser Arbeit nicht vertieft analysiert. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass das alleinige Bitcoin-Mining für Unternehmen und Privatverbraucher in Deutschland unter den gegebenen Rahmenbedingungen nur schwer profitabel zu realisieren ist.

Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der Integration von Bitcoin-Mining in den Regelleistungsmarkt ein erhebliches Potenzial. Die Fallbeispiele der positiven und negativen Sekundärregelenergie verdeutlichen, dass Bitcoin-Mining auch bei einem Strompreis von 20 ct/kWh wirtschaftlich sein kann, sofern es zur Bereitstellung von Regelenergie eingesetzt wird. Entscheidende Einflussfaktoren sind hierbei die durchschnittliche tägliche Aktivierungsdauer der Regelleistung sowie die Höhe der Arbeits- und Leistungspreise. Besonders vorteilhaft erweist sich der Einsatz von Mining-Hardware zur Bereitstellung negativer Sekundärregelenergie. Aufgrund des geringeren Kapitaleinsatzes und der höheren prozentualen Gewinne ist dieses Modell wirtschaftlich attraktiv und mit einem vergleichsweise geringen Investitionsrisiko verbunden. Bereits bei einer täglichen Aktivierungsdauer von mindestens einer Stunde kann ein profitables Geschäftsmodell aufgestellt werden. Auch bei positiver Sekundärregelenergie ist eine Rentabilität möglich, sofern die tägliche Aktivierungsdauer mindestens sechs Stunden beträgt und entsprechende Vergütungen erzielt werden. Allerdings ist hierbei der Kapitaleinsatz deutlich höher und das Risiko entsprechend größer.

Die Wirtschaftlichkeit von Bitcoin-Mining im Primärregelungsmarkt wird durch mehrere strukturelle Faktoren limitiert. Die hohen Anfangsinvestitionen für Hardware stehen in keinem Verhältnis zu den begrenzten Erlösen aus der reinen Kapazitätsvorhaltung. Zudem fehlt eine Vergütungskomponente für tatsächlich abgerufene Energie, was die Rentabilität im Vergleich zu Sekundärregelungsmärkten deutlich reduziert. Die technische Unterlegenheit

gegenüber spezialisierten Lösungen wie Batteriespeichern verschärft das Problem, da diese präziser und kosteneffizienter regeln können. Zusammengenommen führen diese Faktoren zu einem unwirtschaftlichen Geschäftsmodell für Bitcoin-Mining im FCR-Bereich.

Die wichtigsten Variablen auf die Profitabilität von Bitcoin-Mining zur Bereitstellung von Regelleistung sind vor allem die Aktivierungsdauer und die Arbeits- und Leistungspreisvergütung, wohingegen beim klassischen Mining vor allem der Strompreis, sowie die tägliche Betriebsdauer, Hashrate des Netzwerks, Energieeffizienz des ASICs sowie der Preis pro bitcoin eine zentrale Rolle spielen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Integration von Bitcoin-Mining in den sekundären Regelleistungsmarkt, insbesondere zur Bereitstellung negativer Sekundärregelleistung, nach aktuellem Stand die vielversprechendste Option darstellt. Sie ermöglicht nicht nur eine wirtschaftliche Nutzung der Hardware, sondern trägt auch zur Netzstabilisierung und zur Integration erneuerbarer Energien bei. Für ein nachhaltiges und profitables Mining in Deutschland sind daher flexible, netzdienliche Geschäftsmodelle sowie niedrige Energiekosten und eine strategische Ausrichtung auf Regelenergieangebote von zentraler Bedeutung.

5 Durchführung des Pilotprojekts

Die Durchführung des Pilotprojekts umfasst alle praktischen Schritte zur Umsetzung und Analyse der Mining-Infrastruktur. Beginnend mit dem Aufbau und der Auswahl zentraler Komponenten wie Miningpool und Softwareprogramme werden die technischen Grundlagen für den Betrieb geschaffen. Im Anschluss, steht die Entwicklung und Anwendung spezifischer Skripte im Mittelpunkt, die sowohl die systematische Aufzeichnung der Betriebsdaten als auch verschiedene Betriebsmodi abdecken. Dazu zählen der Dauerbetrieb unter Volllast, Effizienzanalysen sowie die Simulation von netzdienlichen Betriebsarten wie negativer Regelleistung und strompreisgesteuerter Leistungsanpassung. Durch diese strukturierte Herangehensweise, wird eine umfassende Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit des Mining-Setups ermöglicht.

5.1 Aufbau

Der praktische Teil dieser Arbeit, wurde in Kooperation mit der Telekom MMS GmbH, der Riva Engineering GmbH und dem Bankhaus Metzler realisiert. Ziel des Projekts, war es, die Performance der eingesetzten ASIC-Miner zu analysieren, deren Ausfallsicherheit zu bewerten, die Reaktionszeiten auf Steuerungssignale zu messen sowie die Profitabilität der Mining-Operationen zu berechnen. Die Riva Engineering GmbH stellte am Firmenstandort in Backnang, Baden-Württemberg, einen Mining-Container zur Verfügung und garantierte einen festen Strompreis von 7 ct/kWh. Dieser günstige Strompreis ergab sich daraus, dass die Riva Engineering GmbH die überschüssigen Kapazitäten ihrer Photovoltaikanlagen auf dem Dach nicht vollständig nutzen konnte und den nicht benötigten Strom der Telekom für das Projekt bereitstellte. Darüber hinaus übernahm sie die Beschaffung von Ersatzteilen und die Durchführung von Reparaturen. Die Finanzierung der ASIC-Miner sowie die Übernahme der Stromkosten erfolgten gemeinsam durch das Bankhaus Metzler und die Telekom MMS GmbH. Es wurde sich für das ASIC-Modell Antminer S21 entschieden, das bei einer Leistungsaufnahme von 3650 W eine durchschnittliche Rechenleistung von 200 TH/s erreicht. Für das Pilotprojekt kamen insgesamt fünf dieser ASIC-Miner zum Einsatz.

Das Monitoring, der Betrieb und die Steuerung der ASIC-Miner wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Aufgrund der räumlichen Distanz zwischen dem Mining-Standort in Backnang und dem Standort der MMS in Dresden war es notwendig, eine sichere Infrastruktur zu entwerfen, die das Monitoring, die Steuerung und die Datenauswertung der ASIC-Miner ermöglicht. Der Aufbau dieses Pilotprojekts ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

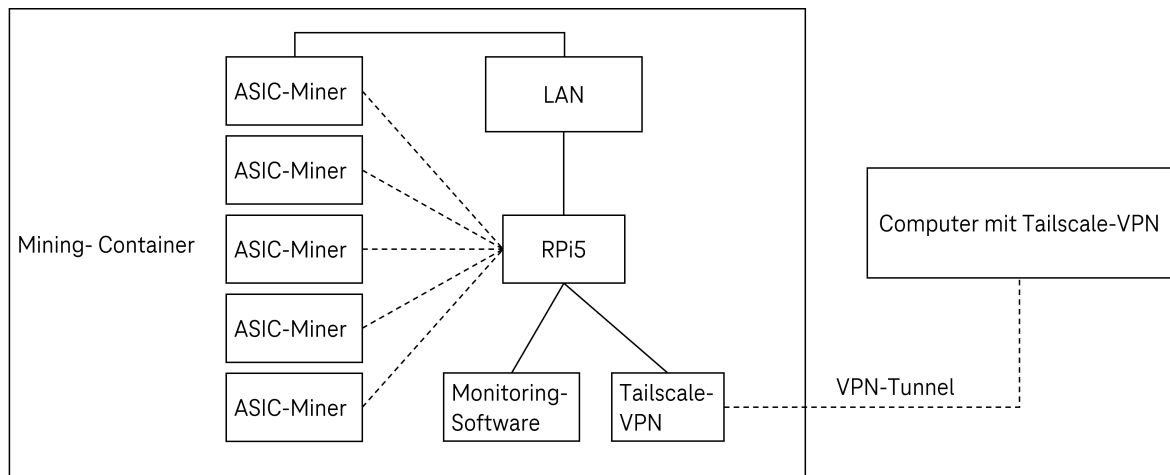


Abbildung 5.1: Aufbau des Pilotprojekts

Die Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Aufbau der im Pilotprojekt eingesetzten Infrastruktur zur Überwachung und Steuerung der ASIC-Miner im Mining-Container.

Im linken Bereich der Grafik, ist der Mining-Container abgebildet. In diesem Container sind mehrere ASICs installiert, die sich alle im selben lokalen Netzwerk (LAN) befinden. Die ASICs sind über Ethernet mit einem zentralen Steuerungs- und Überwachungsgerät, einem Raspberry Pi 5 (RPi5), verbunden. Der RPi5 fungiert als zentrale Schnittstelle innerhalb des Containers. Er ist im lokalen Netzwerk integriert und übernimmt von dort aus die Kommunikation mit den ASICs.

Vom RPi5 gehen drei Hauptverbindungen aus:

- Zum einen ist der RPi5 mit dem Local Area Network (LAN) verbunden, das als gemeinsames Netzwerksegment für alle im Container befindlichen Geräte dient.
- Zum anderen sind auf dem RPi5 unterschiedliche Softwareprogramme installiert, die für die kontinuierliche Überwachung, Steuerung und Auswertung der Betriebsdaten der ASIC-Miner zuständig sind.
- Zusätzlich läuft auf dem RPi5 ein Tailscale-Virtual-Private-Network-Client (VPN), der eine sichere, verschlüsselte Verbindung nach außen ermöglicht.

Für das Projekt, wurde ein RPi5 mit 8 Gigabyte Arbeitsspeicher ausgewählt. Die Entscheidung fiel aufgrund des geringen Energieverbrauchs, der hohen Betriebsstabilität sowie der für die Projektanforderungen ausreichenden Rechenleistung.

Auf der rechten Seite der Grafik, befindet sich ein externer Computer, auf dem ebenfalls der Tailscale-VPN-Client installiert ist. Der Zugriff auf das System ist von jedem Computer mit installiertem Tailscale-VPN möglich, sofern das jeweilige Gerät mit einem freigegebenen Nutzerkonto angemeldet ist. Zwischen dem Tailscale-VPN auf dem RPi5 und dem externen Computer ist in der Grafik ein VPN-Tunnel dargestellt. Dieser symbolisiert die verschlüsselte

Kommunikation zwischen beiden Geräten über das Internet. Dieser Tunnel ermöglicht es, von außerhalb des Standorts sicher auf die Monitoring-Software und die Steuerungsfunktionen des Mining-Containers zuzugreifen.

Durch diese Architektur, wird sichergestellt, dass die Überwachung, Steuerung und Datenauswertung der ASIC-Miner auch aus der Ferne und unter Einhaltung der Sicherheitsstandards erfolgt. Die Grafik verdeutlicht die Trennung zwischen dem lokalen Netzwerk im Mining-Container und dem externen Zugriff, wobei der VPN-Tunnel als zentrales Element für die sichere Kommunikation dient.

5.2 Wahl des Miningpools

Für das Pilotprojekt dieser Arbeit wurde der Braiins Pool als Miningpool ausgewählt. Da es sich um ein experimentelles Vorhaben mit begrenztem Umfang handelte, stand das Gebührenmodell des Pools nicht im Vordergrund der Entscheidung. Entscheidender waren vielmehr Aspekte wie der umfassende Kundensupport, die transparente Verteilung der geschürften bitcoin auf die einzelnen Stakeholder sowie die regionale Verankerung des Pools in Europa.

Im Gegensatz zu vielen großen Miningpools, deren Zentren sich überwiegend in China oder den USA befinden, stammt der Braiins Pool aus Tschechien und zeichnet sich durch eine offene Kommunikation sowie einen besonders responsiven Kundensupport aus. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist die Bereitstellung innovativer Steuerungs- und Monitoring-Tools, wie beispielsweise die Braiins Toolbox und die Braiins Operating System (BOS) Application Programming Interface (API), die eine flexible und transparente Verwaltung der Mining-Hardware ermöglichen.

Zudem bietet der Braiins Pool die Möglichkeit, die geschürften bitcoin direkt auf individuell hinterlegte Wallets zu transferieren. Dadurch kann die Auszahlung je nach Präferenz flexibel aufgeteilt werden, was insbesondere für Projekte mit mehreren Stakeholdern von Vorteil ist. Auch die regelmäßigen Updates und die aktive Community des Pools tragen zu einer hohen Betriebssicherheit und Transparenz bei.

Diese Kombination aus regionaler Nähe, technischer Innovation, transparentem Support und flexibler Auszahlungsstruktur war ausschlaggebend für die Wahl des Braiins Pools für dieses Pilotprojekt.

5.3 Wahl der Softwareprogramme

Für das Monitoring, die Steuerung sowie die Datenauswertung wurden innerhalb des Pilotprojektes verschiedene Softwareprogramme getestet. Hierbei wird unterschieden zwischen dem installierten Betriebssystem der ASICs und den installierten Softwareprogrammen auf dem RPi5.

Installierte Firmware auf den ASICs

Für das Pilotprojekt wurde auf allen eingesetzten ASIC-Minern die Firmware Braiins OS+ installiert. Diese Softwarelösung ermöglicht eine direkte Steuerung der Miner, die Anpassung der Betriebstemperatur, die Feinabstimmung der Taktfrequenz sowie die Auswahl verschiedener Tuningprofile zur Optimierung der Energieeffizienz. Zusätzlich bietet Braiins OS+ detaillierte Logausgaben, die eine schnelle Fehleranalyse und -behebung unterstützen.

Die Wahl von Braiins OS+ wurde unter anderem durch die vielfältigen Einstellungsoptionen sowie durch die bereits bestehende Nutzung des Braiins Miningpools und das damit verbundene Ökosystem begründet.

Zu Beginn des Pilotprojekts wurden die ASIC-Miner über die direkte Zugriffsplattform „Braiins Pool“ [Bra24] überwacht. In dieser Weboberfläche werden die aktuelle Hashrate der einzelnen ASICs angezeigt, historische Daten zu Ausfällen der Miner dokumentiert sowie Einstellungen für die Auszahlung der geschürften bitcoin bereitgestellt. Allerdings bietet die Plattform keine zentralen Steuerungsfunktionen für die Miner, da sie ausschließlich als Überwachungs- und Managementplattform für Miningpools konzipiert ist. Für die direkte Steuerung der ASICs wurden weitere Programme auf den RPi5 installiert.

Installierte Softwareprogramme auf dem RPi5

Als erstes Steuerungsprogramm wurde die Zusammenarbeit mit dem finnischen Unternehmen Nordblock gewählt, um deren entwickelte Monitoring-Software „Hashman“ [Has24] zu nutzen. Die Software befindet sich zwar noch in einem frühen Entwicklungsstadium, bietet jedoch bereits gut strukturierte Monitoring-Daten.

Als Alleinstellungsmerkmal konzentriert sich die Software auf die Darstellung des Energiemarktes und der täglichen Strompreise auf europäischen Strommärkten, kombiniert mit Mining-Kennzahlen wie Hash-Preis, Break-Even-Effizienz und der aktuellen Netzwerk-Hashrate.

Da die Software jedoch keine direkte Steuerung der ASICs ermöglicht, wurde anschließend das Tool „Foreman“ [For25] getestet. Foreman bietet eine vollständige Datenaufbereitung, zeigt detaillierte Betriebsdaten der ASICs und stellt Tools zur Steuerung des Energieverbrauchs sowie planbare Power-Control-Zyklen bereit. Foreman wird häufig im professionellen Umfeld für groß angelegte Mining-Operationen eingesetzt und stellt zahlreiche standardisierte Steuerungsfunktionen zur Verfügung. Da diese jedoch nicht ausreichend flexibel auf die spezifischen Anforderungen dieser Arbeit zugeschnitten sind, wurden letztlich zwei weitere Softwareprogramme gewählt.

Braiiins Toolbox in Verbindung mit BOS API

Mit den Softwareprogrammen Braiiins Toolbox und BOS API kann direkt auf die einzelnen ASICs zugegriffen werden. Durch Skripte und Steuerungsbefehle lassen sich detaillierte Power-Zyklen konfigurieren. Die Braiiins Toolbox übernimmt die Steuerung der ASICs, während die BOS API das Monitoring relevanter Parameter wie Stromverbrauch, Hashrate, Energieeffizienz und Temperaturen ermöglicht. Die hierfür entwickelten Skripte, die mit beiden Tools interagieren, werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

5.4 Skripte

Innerhalb der Thesis wurden verschiedene Shell- und Python-Skripte zur Steuerung und Datenauswertung der ASIC-Miner entwickelt. Diese umfassen sowohl Skripte zur direkten Steuerung der Hardware als auch zur Aufzeichnung von Betriebsdaten in CSV-Dateien. Während des Pilotprojekts wurden vier unterschiedliche Betriebsszenarien untersucht:

Dauerbetrieb unter Volllast: Kontinuierlicher Betrieb der ASICs bei maximaler Leistung ohne Eingriffe.

Effizienzanalyse: Untersuchung der Miner-Performance bei variierenden Taktfrequenzen.

Regelleistungsbetrieb: Integration der ASICs in negative Sekundärregelleistung.

Strompreisgesteuerte Leistungsanpassung: Dynamische Taktfrequenzanpassung basierend auf Strompreisen des Day-Ahead-Markts von Nordpool.

Die vollständigen Skripte zu den jeweiligen Betriebsszenarien befinden sich jeweils im Anhang A.

5.4.1 Aufzeichnung der Betriebsdaten

Zur Aufzeichnung der Betriebsdaten wurde die BOS API eingesetzt. Für diesen Zweck wurde ein Shell-Skript erstellt, das vor jeder Datenabfrage den aktuellen Session-Token für den jeweiligen ASIC-Miner anfordert und diesen für die Authentifizierung über gRPCurl nutzt. Da der Token eine Gültigkeit von einer Stunde besitzt, jedoch beliebig oft neu erstellt werden kann, wird er im Skript vor jedem Abfragevorgang automatisch aktualisiert.

```
FULL_RESPONSE=$(grpcurl -plaintext -v -d '{"username": "root", "password": "root"}'
192.168.10.101:50051 'braiiins.bos.v1.AuthenticationService/Login' 2>&1)

SESSION_TOKEN=$(echo "$FULL_RESPONSE" | grep 'authorization:' | awk '{print $2}')

echo "Erhaltener Token: $SESSION_TOKEN" # Debug-Ausgabe
```

Nach erfolgreicher Authentifizierung mit dem Session-Token lassen sich die gewünschten Betriebsdaten direkt über die API abrufen. Die entsprechende Abfrage wird durch den folgenden Codeblock realisiert:

```
OUTPUT=$(grpcurl -plaintext -H "authorization:$SESSION_TOKEN" -d '{}'  
192.168.10.101:50051 'braiins.bos.v1.MinerService/GetMinerStats' | jq '{  
powerConsumption: .powerStats.approximatedConsumption.watt, efficiency: .  
powerStats.efficiency.joulePerTerahash, hashrate_5s: .minerStats.realHashrate.  
last5s.gigahashPerSecond}')
```

Innerhalb des Skripts wird der Energieverbrauch, die Effizienz, die Hashrate des ASICs und der Timestamp ausgelesen und - wie im folgenden Codeblock gezeigt - in eine CSV-Datei geschrieben:

```
# Dateipfad der CSV-Datei  
  
CSV_FILE="/home/raspberry-mms/miner_stats_6h_101.csv"  
  
# Initialisieren der CSV-Datei mit einer Kopfzeile, falls sie noch nicht existiert  
  
if [ ! -f "$CSV_FILE" ]; then  
echo "timestamp,powerConsumption,efficiency,hashrate_5s" > "$CSV_FILE"  
  
fi  
  
echo "$TIMESTAMP,$POWER_CONSUMPTION,$EFFICIENCY,$HASHRATE_5S" >> "$CSV_FILE"
```

Das Skript arbeitet in einer Endlosschleife, wobei nach jeder Datenerfassung eine konfigurierbare Wartezeit (sleep) eingefügt wird. Dadurch werden die Daten in regelmäßigen Intervallen erfasst und gespeichert, was eine kontinuierliche Überwachung ermöglicht. Das beschriebene Skript fand in allen Betriebsszenarien Anwendung und wurde jeweils nur durch eine Anpassung der Schleifenzeit individuell angepasst.

5.4.2 Dauerbetrieb unter Volllast

Im ersten Betriebsszenario wurden die ASIC-Miner über einen Zeitraum von zwei Monaten unter Volllast betrieben. Die Betriebsdaten wurden im Sechs-Stunden-Intervall in eine CSV-Datei geschrieben, ohne dass während dieses Zeitraums aktive Steuerungseingriffe an den Minern vorgenommen wurden. Da die elektrische Leistungsaufnahme der Miner in diesem Szenario konstant gehalten wurde, konnte die Konfiguration ausschließlich mit der Braiins Toolbox realisiert werden. Hierfür kam folgender Befehl zur Anwendung:

```
./braiins-toolbox tuner target --power 3650 --ip-file "ip_miner"
```

Dieser Befehl setzte alle in der Datei "ip_miner" definierten Miner auf eine Zielleistung von 3650 W. Die Datenerfassung erfolgte durch das in Abschnitt 5.4.1 beschriebene Skript.

5.4.3 Effizienzanalyse

Für die Effizienzanalyse der einzelnen ASIC-Miner wurde ein Skript entwickelt, das die elektrische Leistungsaufnahme initial auf 900 W setzt und diese anschließend im 60-Minuten-Intervall schrittweise um 250 W erhöht, bis ein Maximalwert von 3650 W erreicht ist. Die Umsetzung dieses Prozesses wird durch den folgenden Codeblock veranschaulicht:

```
# Funktion zum Setzen der Leistung

function set_power_target() {

    local POWER_WATT=$1

    echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Setze Power auf ${POWER_WATT}W..."

    $TOOLBOX tuner target --power "$POWER_WATT" --yes --ip-file "$IP_FILE"

}

# Hauptschleife

while true; do

    # Start bei 900W

    CURRENT_POWER=900

    # Hochfahren in 250W-Schritten bis 3650W

    while [ "$CURRENT_POWER" -le 3650 ]; do

        set_power_target "$CURRENT_POWER"

        sleep 3600 # 60 Minuten

        CURRENT_POWER=$((CURRENT_POWER + 250))

    done

done
```

Die Betriebsdaten der einzelnen ASICs wurden jeweils im Fünf-Minuten-Intervall in die CSV-Datei geschrieben. Für die anschließende Analyse lag der Fokus auf den Effizienzdaten innerhalb der einzelnen Leistungsbereiche.

5.4.4 Negativer Regelleistungsbetrieb

Im Fallbeispiel der negativen Sekundärregelleistung ist es erforderlich, dass der ASIC innerhalb von Sekunden auf Volllast oder Leerlauf geschaltet werden kann. Ein Miner kann dabei verschiedene Betriebszustände durchlaufen, darunter das Stoppen in den Leerlauf und das anschließende Fortsetzen des Minings, einen vollständigen Neustart des ASIC, sowie das normale Herunterfahren und anschließende Hochfahren auf den vorherigen Leistungszustand. Braiins OS+ stellt zwar individuelle Tuner-Profile bereit, die spezifisch auf Chipabweichungen jedes ASICs zugeschnitten sind und so eine optimale Leistung ermöglichen, jedoch fanden diese Profile in den beschriebenen Fallbeispielen keine Anwendung.

Der Neustart eines ASIC erweist sich als zeitaufwendig, da der Miner nach jedem Neustart alle Leistungsprofile erneut durchlaufen muss. Auch das Hoch- oder Herunterfahren kann mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Aus diesem Grund wurde für dieses Fallbeispiel entschieden, den ASIC zu stoppen und anschließend wieder zu starten. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Anforderungen an die schnelle Reaktionszeit im Kontext der negativen Sekundärregelleistung bestmöglich zu erfüllen.

Bei der Durchführung des negativen Regelleistungsbetriebs wurden die ASICs zunächst in den Leerlauf versetzt. Nach einer Wartezeit von 15 Minuten wurde das Steuerungsskript aktiviert, das die Miner direkt vom Leerlauf auf eine Zielleistung von 3000 W hochfährt. Die Umsetzung dieses Prozesses zeigt folgendes Codebeispiel:

```
TOOLBOX="/home/raspberry-mms/./braiins-toolbox"

function set_power_target() {

    local POWER_WATT=$1

    echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Setze Power auf ${POWER_WATT}W..."

    $TOOLBOX tuner target --power "$POWER_WATT" --yes --ip-file "$IP_FILE"

}

# Start mit 3000W

set_power_target 3000
```

Im Anschluss daran werden die ASICs mit folgender Funktion gestoppt:

```
function pause_mining() {

    echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Pausiere Mining..."

    $TOOLBOX miner pause --ip-file "$IP_FILE"

}
```

Insgesamt sollen die ASICs jeweils 15 Minuten auf 3000 W laufen und 15 Minuten pausieren. Dies soll jeweils in zwei identischen Zyklen stattfinden, siehe folgender Codeblock:

```
# 2 identische Zyklen

for i in {1..2}
do

    sleep 900 # 15 Minuten Betrieb

    pause_mining

    sleep 900 # 15 Minuten Pause

    resume_mining

done

# Letzte Pause nach dem 2. Zyklus

pause_mining

echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Skript beendet (2 Zyklen abgeschlossen)."
```

Beendet wird das Skript damit, dass die ASICs wieder ihren Betrieb pausieren und somit die Mustervorlage (siehe Abbildung 2.9) zur negativen Regelleistung abgeschlossen ist.

5.4.5 Strompreisgesteuerte Leistungsanpassung

Als letztes Skript wurde eine regelbasierte Leistungssteuerung für die ASIC-Miner implementiert, die sich dynamisch an den stündlichen Strompreisen des Day-Ahead-Markts orientiert. Grundlage hierfür bildeten die Strompreisdaten von Nordpool, die über die offizielle Nordpool-Website bezogen wurden. Abhängig vom aktuellen Strompreis entscheidet das System autonom, ob die ASICs in den Betriebsmodus hochgefahren oder in den Leerlauf versetzt werden. Wie im nachfolgenden Codeblock veranschaulicht, erfordern die stündlichen Preisschwankungen des Day-Ahead-Markts eine ebenso stündliche Anpassung der Betriebszustände - wobei das Skript die Entscheidung zwischen Betriebspause und Volllast automatisch trifft.

Für die Steuerung der ASICs wurden zunächst die Day-Ahead-Strompreisdaten für Deutschland über die Nordpool-API abgerufen (siehe nachfolgendem Codeblock). Die Rohdaten wurden anschließend in ein maschinenlesbares Format transformiert, das von der Steuerungslogik der ASICs verarbeitet werden kann.

```
heute = datetime.today().strftime('%Y-%m-%d')

url = f"https://dataportal-api.nordpoolgroup.com/api/DayAheadPrices?date={heute}&market=
      DayAhead&deliveryArea=GER&currency=EUR"

# API-Anfrage senden

response = requests.get(url)

data = response.json()
```

Wie im nachfolgenden Codeblock veranschaulicht, erfordern die stündlichen Preisschwankungen des Day-Ahead-Markts eine ebenso stündliche Anpassung der Betriebszustände - wobei das Skript die Entscheidung zwischen Betriebspause und Volllast automatisch trifft. Die Ausgabe der Daten wurde im Anschluss in ein lesbares Format gebracht und in eine CSV-Datei gespeichert. Sie wird wie folgt dargestellt:

```
Delivery Start,Delivery End,Price (EUR/MWh)

2025-02-17T00:00:00Z,2025-02-17T01:00:00Z,121.06

2025-02-17T01:00:00Z,2025-02-17T02:00:00Z,120.34

2025-02-17T02:00:00Z,2025-02-17T03:00:00Z,125.52

2025-02-17T03:00:00Z,2025-02-17T04:00:00Z,128.94

2025-02-17T04:00:00Z,2025-02-17T05:00:00Z,131.54

2025-02-17T05:00:00Z,2025-02-17T06:00:00Z,153.16

2025-02-17T06:00:00Z,2025-02-17T07:00:00Z,204.74

//Sprung bis zum Ende des Tages

2025-02-17T23:00:00Z,2025-02-17T00:00:00Z,128.05
```

Im Anschluss daran wurde ein weiteres Skript geschrieben, welches definiert, ab welchem Strompreis der Miner auf Volllast fährt oder in den Leerlauf geht. Auf dieser Grundlage passt er seine Aktivität an die stündlich wechselnden Strompreise des Day-Ahead-Marktes an. Durch das nachfolgende Codebeispiel wird aus der CSV-Datei für jede aktuelle Stunde der passende Strompreis ausgelesen. Dabei werden zunächst die Kopfzeilen übersprungen, sodass nur die eigentlichen Datenzeilen verarbeitet werden. In jeder Zeile wird geprüft, ob der Wert in der ersten Spalte - also der Startzeitpunkt der Lieferung - mit dem aktuellen Stundenwert übereinstimmt. Sobald eine Übereinstimmung gefunden wird, wird der zugehörige Preis aus der dritten Spalte extrahiert und in der Shell-Variablen PRICE gespeichert. Damit ist sichergestellt, dass stets der korrekte stündliche Strompreis für die weitere Verarbeitung bereitsteht.

```

# Annahme: CSV-Spalten sind:
# Delivery Start,Delivery End,Price (EUR/MWh)
# Suche die Zeile, in der Spalte 1 = CURRENT_HOUR_UTC
PRICE=$(awk -F',' -v h="$CURRENT_HOUR_UTC" '
NR > 1 {          # Kopfzeile ueberspringen
  if ($1 == h) {  # $1 enthaelt Delivery Start
    print $3;     # Spalte 3 = "Price (EUR/MWh)"
    exit;        # Abbrechen, wenn gefunden
  }
}
' "$CSV_FILE")

```

In dem nachfolgenden Codebeispiel wird der ASIC bei einem Strompreis von >100 € pro MWh pausiert und bei einem Strompreis von <100 € pro MWh auf 3650 W hochgefahren.

```

# Da $PRICE Kommazahl sein kann, Verwendung von 'bc -l' fuer den Float-Vergleich:
if (( $(echo "$PRICE > 100" | bc -l) )); then
  echo "Preis>100: Pausiere Mining..."
  # Braiins Toolbox: Miner stoppen
  ./braiins-toolbox miner pause "$MINER_IP"
else
  echo "Preis <= 100: Setze Wattage auf 3650..."
  # Braiins Toolbox: Mining fortsetzen und auf 3650 W erhoehen
  ./braiins-toolbox miner resume "$MINER_IP" && sleep 30 &&
  ./braiins-toolbox tuner target --yes --power 3650 "$MINER_IP"
fi

```

Das entwickelte System basiert auf einem zweistufigen Automatisierungsansatz zur marktdynamischen Steuerung von ASIC-Minern. Das erste Skript fungiert als Nordpool-Datenextraktor, der über die offizielle API stündlich aktuelle Day-Ahead-Strompreise abrufen und diese in eine strukturierte CSV-Datei konvertiert. Das zweite Skript implementiert die eigentliche Steuerungslogik, indem es zeitgesteuert die Strompreisdaten auswertet und basierend auf einem definierten Schwellenwert autonom entscheidet, ob die ASIC-Miner in den Betriebsmodus versetzt oder pausiert werden. Das erste Skript wird stündlich zur Minute 0 ausgeführt und

aktualisiert die Strompreisdaten. Das zweite Skript folgt zur Minute 2 und greift auf die aktualisierte CSV-Datei zu, um die Steuerungsentscheidungen zu treffen. Dieser zeitliche Versatz gewährleistet, dass stets die neuesten Daten verarbeitet werden. Diese Architektur demonstriert erfolgreich die Machbarkeit einer vollautomatisierten, internetbasierten Steuerung von Mining-Hardware durch externe Marktdaten. Die zugrundeliegenden Skripte sind bewusst einfach gehalten, lassen sich jedoch flexibel um zusätzliche Strompreis-Schwellenwerte oder variable Leistungsaufnahmen erweitern. Obwohl eine produktive Integration in echte Strommarkt-Schnittstellen erheblich komplexere technische und regulatorische Herausforderungen mit sich bringen würde, insbesondere hinsichtlich Latenzanforderungen, Authentifizierung und Compliance, liefert das Pilotprojekt einen realisierbaren Proof-of-Concept für marktresponsive Mining-Operationen.

6 Datenauswertung

Dieses Kapitel widmet sich der systematischen Auswertung und Interpretation der erhobenen Daten. Neben der Analyse zentraler Kennzahlen wie den Kosten für einen bitcoin, Effizienz und Performance werden auch die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsmodi, darunter Volllast und Teilnahme an Regelleistungsmärkten, betrachtet. Abschließend erfolgt eine kritische Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf das Zusammenspiel von Effizienz und Performance.

6.1 Methodik und Datenauswertung

Die Auswertung der erhobenen Betriebsdaten der ASICs ist ein zentraler Bestandteil zur Beantwortung der Forschungsfrage. Insbesondere im Kontext des effizienten und wirtschaftlichen Betriebs der ASIC-Hardware spielt eine methodisch fundierte Datenanalyse eine wichtige Rolle, um die Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz der ASICs objektiv zu bewerten, Schwankungen im Stromverbrauch zu identifizieren und Erfahrungen für die Entwicklung und Umsetzung von Optimierungsansätzen zu sammeln.

Die Daten wurden innerhalb von unterschiedlich langen Zeiträumen erhoben. Für die Berechnung der Kosten zur Erzeugung eines bitcoin wurde der gesamte Durchführungszeitraum von zehn Monaten zugrunde gelegt. Auf diese Weise konnte jeder einzelne Tag in den Betrachtungszeitraum einfließen und ein möglichst genaues Ergebnis erzielt werden. Die Daten aller fünf eingesetzten ASICs wurden dabei berücksichtigt. Innerhalb dieses zehnmonatigen Betrachtungszeitraums wurden sämtliche Betriebsunterbrechungen der ASICs sowie alle Schwankungen in der Leistungsaufnahme erfasst und in die Analyse einbezogen. Parallel dazu ermöglichte der gewählte Zeitraum die Beobachtung von Volatilitäten der globalen Bitcoin-Netzwerk-Hashrate und deren konkrete Auswirkungen auf die Erträge der eingesetzten ASICs.

Für die Analyse des Dauerbetriebs unter Volllast (3650 W) wurde ein zweimonatiger, unbeaufsichtigter Testzeitraum herangezogen. Innerhalb dieses Zeitraums erfolgten weder Monitoring noch Steuerungseingriffe, um die autonome Betriebsfähigkeit aller ASICs ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand zu evaluieren und auftretende Ausfallraten zu dokumentieren. Die Leistungsdaten der Miner wurden mittels eines Liniendiagramms visualisiert, das die Hashrate-Entwicklung jedes einzelnen ASICs über den gesamten Untersuchungszeitraum abbildet.

Zur Ermittlung der Hardwareeffizienz wurden die Mittelwerte aller fünf eingesetzten ASIC-Miner für jede Leistungsstufe (in Watt) berechnet und in einem Liniendiagramm visualisiert. Dabei wurde jede Leistungsstufe über einen definierten Zeitraum von einer Stunde bei konstanter Leistung betrieben, bevor die Leistungsaufnahme in 250-Watt-Schritten erhöht wurde. Die Effizienzmessungen wurden mehrfach wiederholt, wobei nach jedem Durchführungszeitraum gleichbleibende Ergebnisse erzielt wurden. Diese methodische Vorgehensweise ermöglicht die präzise Identifikation des optimalen Betriebspunkts maximaler Energieeffizienz.

Zur Evaluierung der Machbarkeit negativer Sekundärregelleistung wurde exemplarisch ein einzelner ASIC-Miner ausgewählt und dessen Leistungsdaten innerhalb eines 75-minütigen Zeitraums in einem Liniendiagramm visualisiert. Diese Fokussierung ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der Regelgeschwindigkeit und Grenzwert-Einhaltung. Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Tests mehrfach wiederholt und auf weitere ASICs ausgeweitet, wobei auch hierbei konsistente Resultate erzielt wurden.

Im letzten Versuch wurde die Reaktionsfähigkeit der ASIC-Miner auf externe dynamische Daten aus Internetquellen untersucht, mit Fokus auf der autonomen Steuerungslogik. Die generierten Logdaten dienten hierbei als primärer Validierungsnachweis für den erfolgreichen Betrieb ohne manuelle Intervention.

Als primäre Datenquelle für die Fallbeispiele diente die BOS API, die kontinuierlich Betriebsparameter wie Stromverbrauch, Energieeffizienz, Hashrate und Temperatur erfasst. Die Messgenauigkeit dieser Werte unterliegt potenziellen Schwankungen, da sie auf internen Hardware Sensoren basieren. Es wird jedoch angenommen, dass diese Abweichungen vernachlässigbar gering sind und die Validität der Analyseergebnisse nicht signifikant beeinträchtigen.

6.2 Ergebnisse und Interpretation der Daten

6.2.1 Kosten für 1 BTC

Wie schon in Kapitel 3.4 erläutert, können die Kosten zum Minen von 1 bitcoin mit folgender Formel dargestellt werden:

$$\text{Kosten pro BTC} = \frac{\text{tägliche Stromkosten}}{\text{BTC}_{\text{Tag}}}$$

Da bisher noch nicht die gesamte Stromrechnung der Riva Engineering GmbH gestellt wurde, können für den Betrachtungszeitraum vom 12.08.2024 bis 12.06.2025 nur Näherungswerte für den Strompreis angenommen werden, welche sich aus folgender Formel ergeben:

$$C_{EL} = \varnothing\eta_{ASIC} \div 1000 \times \varnothing HR_{ASIC} \times N_{ASIC} \times t_{Tag} \times t_{Gesamt} \times C_{el}$$

Variablendefinition:

- C_{EL} : Stromkosten über den gesamten Betrachtungszeitraum
- $\varnothing\eta_{ASIC}$: durchschnittlich angenommene Effizienz pro ASICs in J/TH
- $\varnothing HR_{ASIC}$: durchschnittliche Hashrate pro ASIC in TH/s
- N_{ASIC} : Anzahl aller ASICs
- t_{Tag} : Stunden pro Tag
- t_{Gesamt} : gesamter Betrachtungszeitraum in Tage

- C_{el} : Stromkosten in €

Die durchschnittliche Hashrate pro ASIC ergibt sich aus der Datenauswertung des Braiins Pools, wobei aus jeder täglichen Hashrate ein Mittelwert über alle Miner gebildet wurde. Leichte Schwankungen kann es bei der durchschnittlich angenommenen Effizienz geben, wobei über den Betrachtungszeitraum die Effizienz meist zwischen 17 und 18,5 J/TH schwankte. Aus diesem Grund wurde sich für die Effizienz von 17,75 entschieden.

Aus der oben aufgestellten Formel lässt sich folgender Strompreis für den gesamten Betrachtungszeitraum (305 Tage) ableiten:

$$C_{EL} = 17,75 \frac{J}{TH} \div 1000 \times 159,64 \frac{TH}{s} \times 5 \times 24 \text{ Stunden} \times 305 \text{ Tage} \times 0,07 = 7.259,71$$

Innerhalb des Zeitraums zwischen dem 12.08.2024 und 12.06.2025 wurden insgesamt 0,1452273 BTC gemint.

Aus den gesamten Stromkosten und den geminten bitcoin innerhalb des Betrachtungszeitraums können nun die Kosten pro bitcoin ermittelt werden:

$$\text{Kosten pro BTC} = \frac{7,259,71}{0,1452273 \text{ BTC}} = 51,396,74$$

Unter ausschließlicher Berücksichtigung der Stromkosten belaufen sich die Kosten für die Erzeugung eines gesamten bitcoin für die Telekom MMS auf 49.988,60 €. Diese Kosten liegen damit unterhalb des aktuellen bitcoin-Preises von ca. 93.000 € (Stand: 12.06.2025). Bisher konnten Einnahmen in Höhe von 13.070,46 € erzielt werden, woraus sich ein Deckungsbeitrag 1 von 5.810,75 € ergibt. Umgerechnet auf einen einzelnen Tag entspricht dies einem täglichen Deckungsbeitrag 1 von 19,05 €. Bei konstanten Rahmenbedingungen und einem gleichbleibenden Preis des bitcoin würden sich die Investitionskosten der fünf ASICs in Höhe von 22.080,92 € nach 1163 Tagen (ca. 3,19 Jahren) amortisieren. Diese Berechnungen sind jedoch unter Vorbehalt zu betrachten. Die durchschnittliche Auslastung der ASICs lag im Betrachtungszeitraum bei etwa 80 Prozent. Dies ist zum einen auf regelmäßige Ausfälle einzelner Miner infolge von Hardware-Reparaturen zurückzuführen, zum anderen darauf, dass die Miner im Rahmen der durchgeführten Fallbeispiele nicht stets mit maximaler Leistung betrieben wurden. Darüber hinaus berücksichtigt diese Kalkulation keine potenziellen Abschreibungskosten der ASICs, die sich durch steuerliche Entlastungseffekte positiv auf die Gesamtwirtschaftlichkeit auswirken könnten.

Insgesamt zeigt das Projekt, dass ein wirtschaftlich rentabler Betrieb von Bitcoin-ASICs bei einem Strompreis von 7 ct/kWh und den gegebenen Rahmenbedingungen schwierig ist. Die Auslastung der Hardware blieb durch Reparaturen und der Durchführung der unterschiedlichen Fallbeispiele deutlich unter dem möglichen Maximum, und die räumliche Distanz er-

schwerte die Wartung und Fehlerbehebung erheblich. Für eine nachhaltige Rentabilität wären niedrigere Stromkosten, eine höhere Anlagenverfügbarkeit und eine effizientere Wartungsstrategie unerlässlich.

6.2.2 Volllast

Wie schon im Kapitel 5.4.2 erläutert, sollte die Hashrate, sowie die Ausfallzeit der einzelnen ASICs über einen Zeitraum von zwei Monaten getestet werden. Innerhalb dieser Zeit erfolgten keine weiteren Steuerungseingriffe. Die Daten sind in Abbildung 6.1 abgebildet:

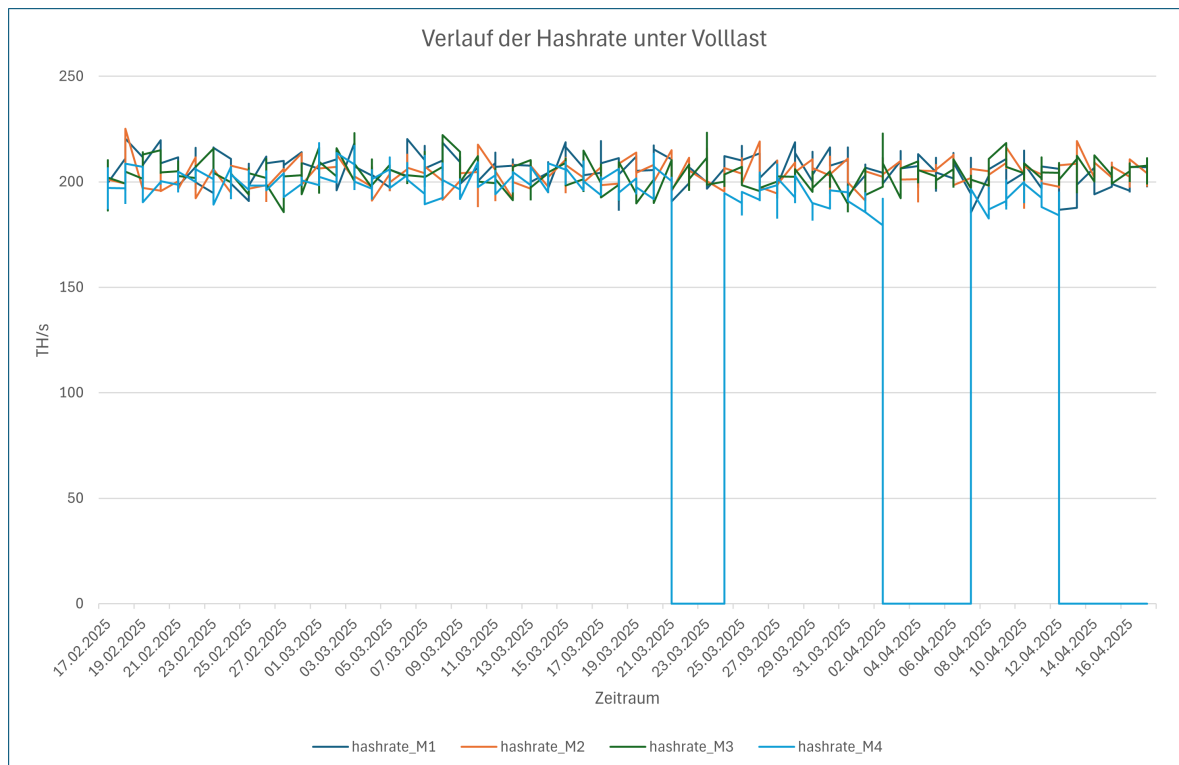


Abbildung 6.1: zweimonatige Datenauswertung der Hashrate unter Volllast

Während des betrachteten Zeitraums waren insgesamt nur vier Miner in Betrieb, da ein ASIC aufgrund eines defekten Hashboards zur Reparatur war. Wie aus dem Liniendiagramm hervorgeht, lag die Gesamt-Hashrate der betriebenen ASICs größtenteils knapp über 200 TH/s und erreichte zeitweise sogar Maximalwerte von bis zu 225 TH/s.

Innerhalb des Betrachtungszeitraums operierten die Miner 1 bis 3 sehr stabil und erreichten durchschnittliche Hashraten zwischen 203 und 205 TH/s. Eine Ausnahme bildete Miner 4, der in der zweiten Hälfte des Zeitraums mehrfach Einbrüche in der Hashrate verzeichnete. Den Logdaten war zu entnehmen, dass die Hashboards nicht korrekt erkannt wurden, weshalb der Miner zeitweise das Mining einstellte. Nach einigen Tagen nahm Miner 4 seine Aktivitäten jedoch wieder auf. Aufgrund dieser Ausfälle lag die durchschnittliche Hashrate von Miner 4 bei lediglich 154 TH/s.

Auch wenn die laufenden Miner insgesamt recht zuverlässig waren, hat sich gezeigt, dass eine kontinuierliche Überwachung der ASICs unerlässlich ist. Es kam immer wieder vor, dass einzelne Geräte aufgrund von Überhitzung oder Sensorfehlern kurzfristig ausfielen. In solchen Fällen konnte das Problem häufig durch einen Neustart behoben werden. Im gesamten Projektverlauf zwischen dem 12.08.2024 und dem 12.06.2025 war es notwendig, bei zwei unterschiedlichen Minern jeweils ein Hashboard auszutauschen. Dadurch traten jeweils längere Betriebsausfälle auf.

Es zeigte sich außerdem, dass die ASICs bei höheren Außentemperaturen anfälliger für Störungen waren. Besonders im Mai und Juni, wenn die Temperatur auf 25 bis 30 °C stieg, traten Ausfälle regelmäßig auf. In diesen Zeiträumen erreichte die Chiptemperatur zeitweise mehr als 90 °C, sodass ein eingebauter Sicherheitsmechanismus die betroffenen ASICs automatisch abschaltete.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die eingesetzten ASICs im Testzeitraum überwiegend zuverlässig arbeiteten. Die durchschnittliche Hashrate blieb, mit Ausnahme des vierten Miners, konstant auf hohem Niveau. Die beobachteten Ausfälle waren größtenteils auf hardwarebedingte Defekte zurückzuführen. Für einen zukünftigen Dauerbetrieb empfiehlt sich insbesondere während Hitzeperioden ein besonderes Augenmerk auf die Kühlstrategie zu legen, um Ausfallzeiten weiter zu reduzieren und die Betriebssicherheit zu erhöhen.

6.2.3 Effizienz

Die Energieeffizienz ist ein zentraler Faktor für die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Mining-Operationen. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zum Energieverbrauch und zur Effizienz der eingesetzten Miner bei unterschiedlichen Leistungsstufen vorgestellt.

Zur Datenerhebung wurde die BOS API genutzt, wobei pro Leistungsstufe eine einstündige Messreihe durchgeführt wurde. Innerhalb dieser Zeitspanne erfolgte alle fünf Minuten eine Datenerfassung des Effizienzwertes. Für jeden einzelnen Miner wurde anschließend der arithmetische Mittelwert der 12 Messpunkte gebildet. Abschließend wurde pro Leistungsstufe ein übergreifender Mittelwert aller fünf Miner berechnet, um eine aussagekräftige Vergleichsbasis zu generieren. Die Werte wurden in Form eines Liniendiagramms in [Abbildung 6.2](#) zusammengefasst.

Die Analyse zeigt, dass der geringste Wirkungsgrad mit 20,89 J/TH bei niedriger Leistungsaufnahme (900 W) auftritt. Die geringe Effizienz des Miners bei 900 W Leistungsaufnahme resultiert aus dem hohen Anteil systembedingter Grundlastverluste (Netzteil, Kühlung) an der Gesamtenergie. Dieses Phänomen ist charakteristisch für Hardwaresysteme im Teillastbetrieb [[BHR22](#), S.160f.]. Das Effizienzoptimum von 16,49 J/TH wird bei 2.150 W erreicht, wobei bereits bei 1.650 W mit 16,55 J/TH ein vergleichbar hoher Effizienzwert erzielt wird. Mit steigender Leistungsaufnahme (>2150 W) nimmt die Effizienz leicht ab. Dieser Trend korreliert direkt mit dem Anstieg der Chiptemperatur, die zu einer erhöhten Wärmeabgabe und damit sinkender Energieeffizienz führt. Zusätzlich trägt der gesteigerte Kühlbedarf bei, da höhere Lüfterleistungen den Systemwirkungsgrad weiter reduzieren.

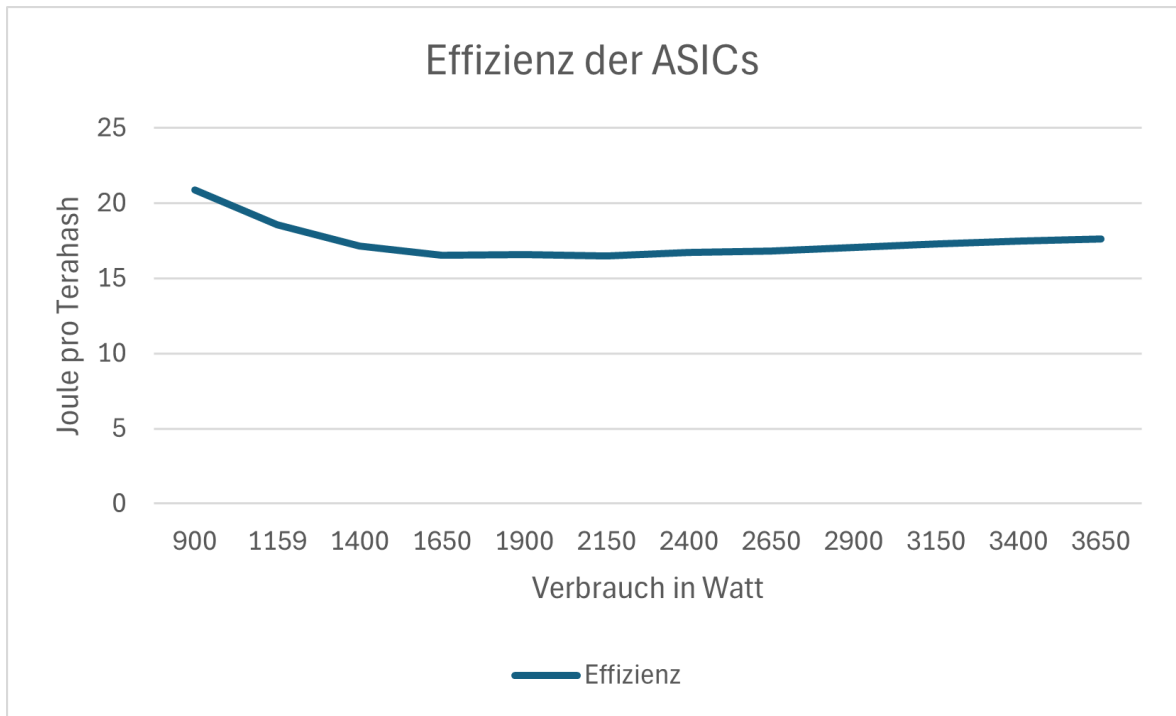


Abbildung 6.2: Ermittlung des Effizienzoptimums

Die Analyse hat gezeigt, dass sowohl im unteren wie auch im oberen Bereich der Leistungsaufnahme die Effizienz merklich nachlässt. In Kapitel 6.3 wird analysiert, in welchen Einsatzsituationen ein effizienzoptimierter Betrieb der ASICs gegenüber dem Betrieb unter Volllast zu empfehlen ist.

6.2.4 Primärregelleistung

Obwohl die wirtschaftliche Tragfähigkeit von Bitcoin-Mining zur Erbringung von Primärregelleistung in Kapitel 4.6 nicht direkt bestätigt werden konnte, widmet sich dieser Abschnitt der Untersuchung der technischen Machbarkeit. Im Fokus steht hierbei die Reaktionsdynamik eines Bitcoin-ASICs auf Leistungswechsel - ein entscheidendes Kriterium für die Bereitstellung von Primärregelleistung. Anders als bei der im Folgekapitel detailliert analysierten Betriebsfahrt konzentriert sich diese Auswertung speziell auf das Zeitverhalten bei Laständerungen.

Gemäß den regulatorischen Vorgaben (vgl. Kapitel 2.6) muss ein Anbieter von Primärregelleistung innerhalb von 30 Sekunden die geforderte Leistung bereitstellen. Im vorliegenden Versuch wurde der ASIC aus dem Standby-Zustand aufgefordert, innerhalb dieses Zeitfensters eine Leistung von 3000 W zu erreichen. Die Messungen erfolgten bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 20 °C. Abbildung 6.3 dokumentiert den Leistungsverlauf während dieses Tests.

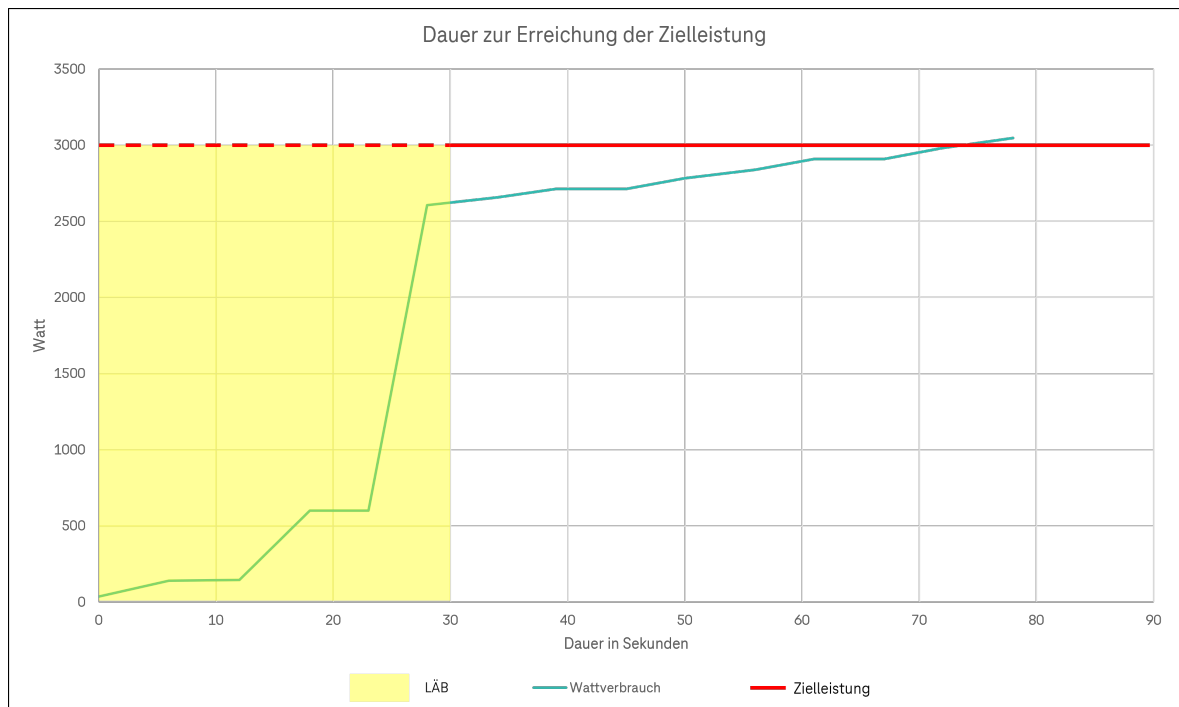


Abbildung 6.3: Datenauswertung der Bereitstellung primärer Regelleistung bei 20 °C

Die Auswertung zeigt, dass der ASIC die geforderte Zielleistung nicht innerhalb des vorgegebenen 30-Sekunden-Intervalls erreichte. Zwar erfolgte zwischen der 20. und 30. Sekunde ein rascher Leistungsanstieg auf etwa 2750 W, jedoch benötigte die letzte Leistungssteigerung um die verbleibenden 250 W weitere 30 Sekunden. Diese Trägheit im oberen Leistungsbereich deutet auf thermische oder regelungstechnische Limitierungen hin.

Obgleich die technische Machbarkeit mit diesem spezifischen Modell unter den gegebenen Bedingungen nicht erreicht wurde, lassen die Ergebnisse auf Verbesserungspotenziale schließen. Insbesondere folgende Aspekte könnten die Reaktionsgeschwindigkeit optimieren:

- Einsatz von ASICs mit optimierter Leistungselektronik
- Modifikation der Firmware bzw. der eingesetzten Software für dynamischere Leistungsanpassung
- Implementierung aktiver Kühlkonzepte zur Reduktion thermischer Trägheit

Diese Maßnahmen würden die Eignung für Primärregelleistung möglicherweise ermöglichen, indem sie die kritische Phase der Endregelung beschleunigen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Integration von Mining-Hardware in Regelleistungskonzepte nicht nur wirtschaftliche, sondern auch technologische Anpassungen erfordert. Insbesondere die Kombination aus leistungsfähiger Kühlung und optimierten Regelalgorithmen erscheint als vielversprechender Ansatz zur Überwindung der identifizierten Limitierungen.

6.2.5 Sekundärregelleistung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die technische Machbarkeit eines ASICs als flexibler Lastabnehmer für die negative Sekundärregelleistung validiert. Gemäß der Mustervorlage, welche in Kapitel 2.6 beschrieben wird, erfolgte die Experimentdurchführung über 75 Minuten, wobei der Miner im 15-Minuten-Takt hoch- und heruntergefahren wurde. Für die Erbringung der Sekundärregelleistung wurde ein Soll-Verbrauch von 3.000 W definiert. Innerhalb eines 5-Minuten-Intervalls musste der ASIC die geforderte Laständerung umsetzen und anschließend den Zielwert für 10 Minuten stabil halten. Während dieser Stabilisierungsphase durften die Verbrauchswerte maximal um 5-10 Prozent vom Sollwert abweichen, was einen Toleranzbereich von 2.700 W bis 3.300 W entspricht. In der Vorhaltephase vor Aktivierung war ein Verbrauch unter 300 W einzuhalten. Die Leistungsanpassung wurde durch das in Kapitel 5.4.4 beschriebene Skript realisiert, das auf Braiins Toolbox basiert und die Einhaltung des Zeit- und Leistungsrahmens steuerte. Die ersten Messungen fanden tagsüber bei einer ungefähren Umgebungstemperatur von 30 °C statt. Im Mittelpunkt der Auswertung steht, wie schnell und zuverlässig der Miner auf Leistungsänderungen reagiert. Besonders wichtig ist dabei, ob die vorgegebenen Toleranzgrenzen während der Lastwechsel eingehalten werden. Um dies anschaulich darzustellen, vergleicht die folgende Abbildung 6.4 die gemessenen Verbrauchswerte des ASICs direkt mit den Anforderungen der Mustervorlage für negative Sekundärregelleistung.

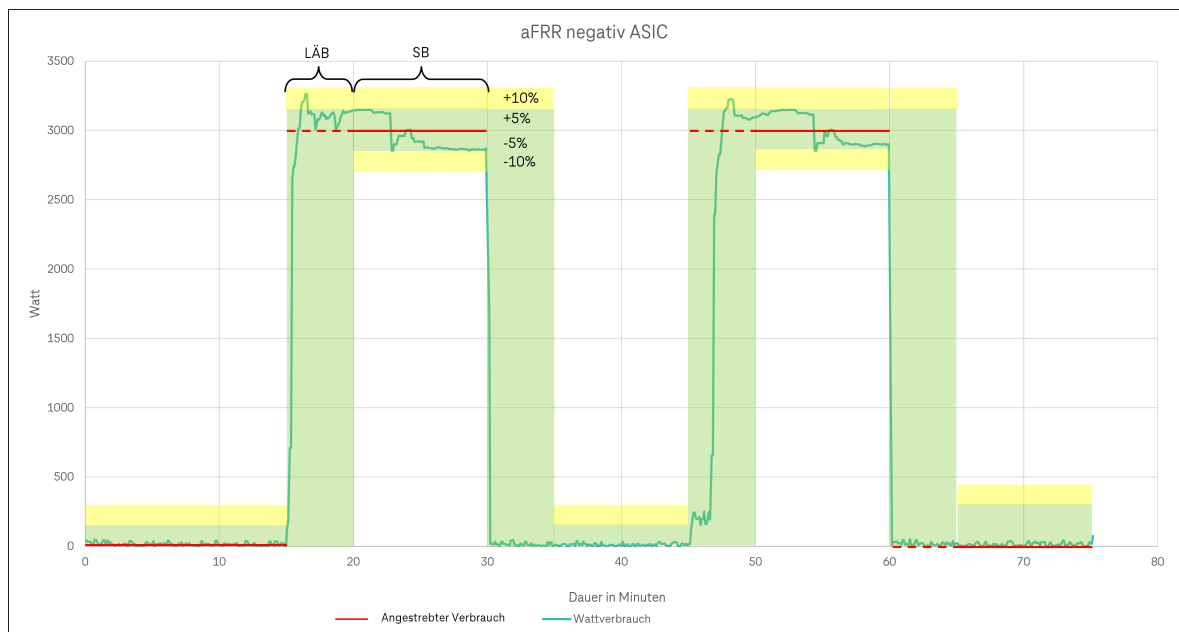


Abbildung 6.4: Datenauswertung der Bereitstellung sekundärer Regelleistung bei 30 °C

In Abbildung 6.4 sind die gelben und grünen Bereiche als Toleranzzonen für den Leistungswert des ASIC-Miners dargestellt. Der grüne Bereich kennzeichnet den erlaubten Bereich, in welchem mindestens 95 Prozent der Messwerte liegen müssen. Der gelbe Bereich markiert den tolerierbaren Bereich, in dem maximal 5 Prozent der Werte liegen dürfen.

Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass lediglich 1,46 Prozent der Werte außerhalb des erlaubten (grünen) Bereichs liegen, jedoch überschreiten diese Werte zu keinem Zeitpunkt den tolerierbaren (gelben) Bereich. Die Überschreitungen traten ausschließlich während des Einsatzes von Regelleistung, also dem Hochfahren des ASICs auf. Nach kurzer Zeit stabilisierte sich der Verbrauch leicht oberhalb der vorgegebenen Zielleistung.

Das Diagramm verdeutlicht, dass der ASIC-Miner sehr schnell auf Leistungsänderungen reagiert. Nach dem ersten Lastanstieg erreichte das Gerät innerhalb von etwa 40 Sekunden die angestrebte Zielleistung. Beim zweiten Leistungsanstieg dauerte die Stabilisierung knapp über zwei Minuten. Auch beim Leistungsabfall reagierte der Miner sehr schnell und erreichte den Standby-Modus innerhalb von rund 10 Sekunden. Damit wurde die maximal zulässige Reaktionszeit bei allen Lastwechseln eingehalten.

Während der Standby-Phasen lag der Stromverbrauch des Miners konstant zwischen 1 und 50 W und damit deutlich im erlaubten Bereich. Dieser geringe Energiebedarf minimiert die anfallenden Stromkosten für den Betreiber, falls für eine längere Zeit keine Regelleistung benötigt wird.

Auffällig ist, dass der Stromverbrauch des ASICs jeweils nach etwa der Hälfte der Erbringungszeit im stationären Betrieb von rund 3130 W auf etwa 2860 W abfällt. Dieser Leistungsabfall wird durch eine parallele Temperaturabnahme von etwa 3 °C begleitet, was darauf hindeutet, dass der ASIC seine Leistung aktiv reduziert, um die Chiptemperatur zu reduzieren. Besonders deutlich wird dies im Zusammenhang mit dem Temperaturverhalten des ASICs. Beim Übergang vom Standby-Modus zur Volllast steigt die Temperatur zunächst von 55 °C auf 75 °C an. Die Veränderung der Chiptemperaturen im Zusammenhang mit den Leistungsanpassungen wird in [Abbildung 6.5](#) aufgezeigt.

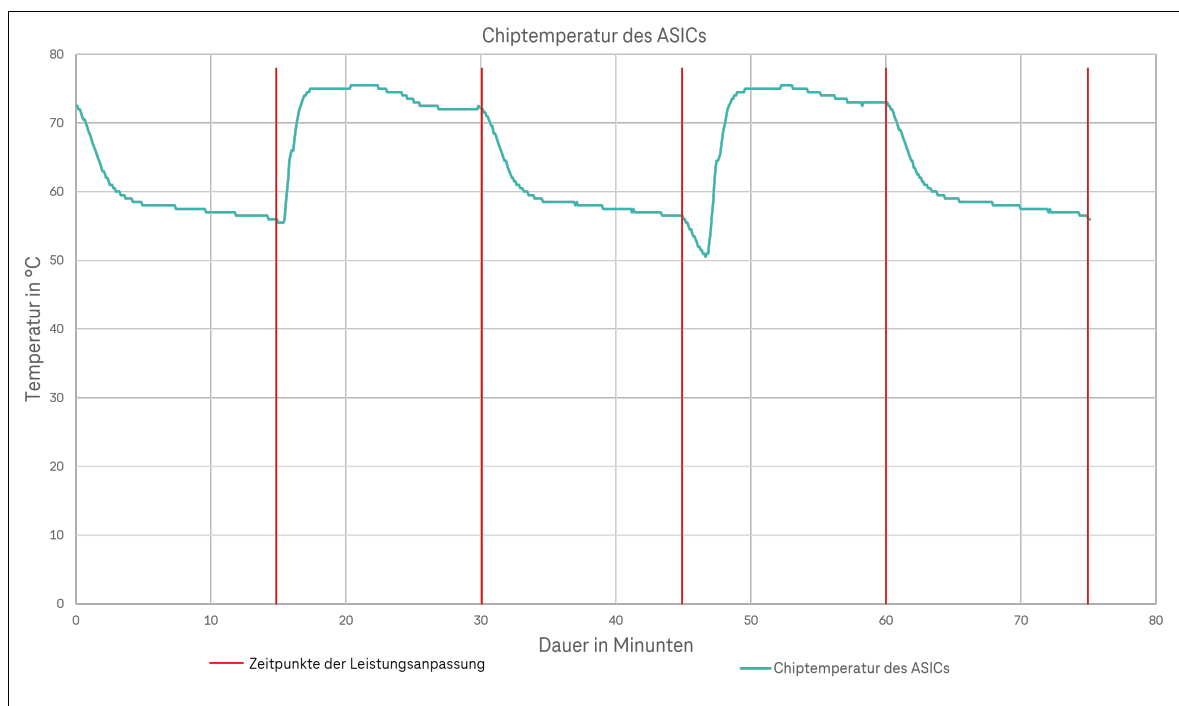


Abbildung 6.5: Temperaturverhalten der ASIC-Chips bei Leistungsänderung

Um die Ursache für die Leistungsreduktion zu klären, wurde ein Vergleichsversuch durchgeführt. Es wird vermutet, dass die hohen Umgebungstemperaturen zu einer unregelmäßigen Leistungsabnahme des ASICs führen. Zur Überprüfung der Vermutung erfolgten weitere Messungen bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 20 °C. Die Messwerte sind in Abbildung 6.6 dargestellt.

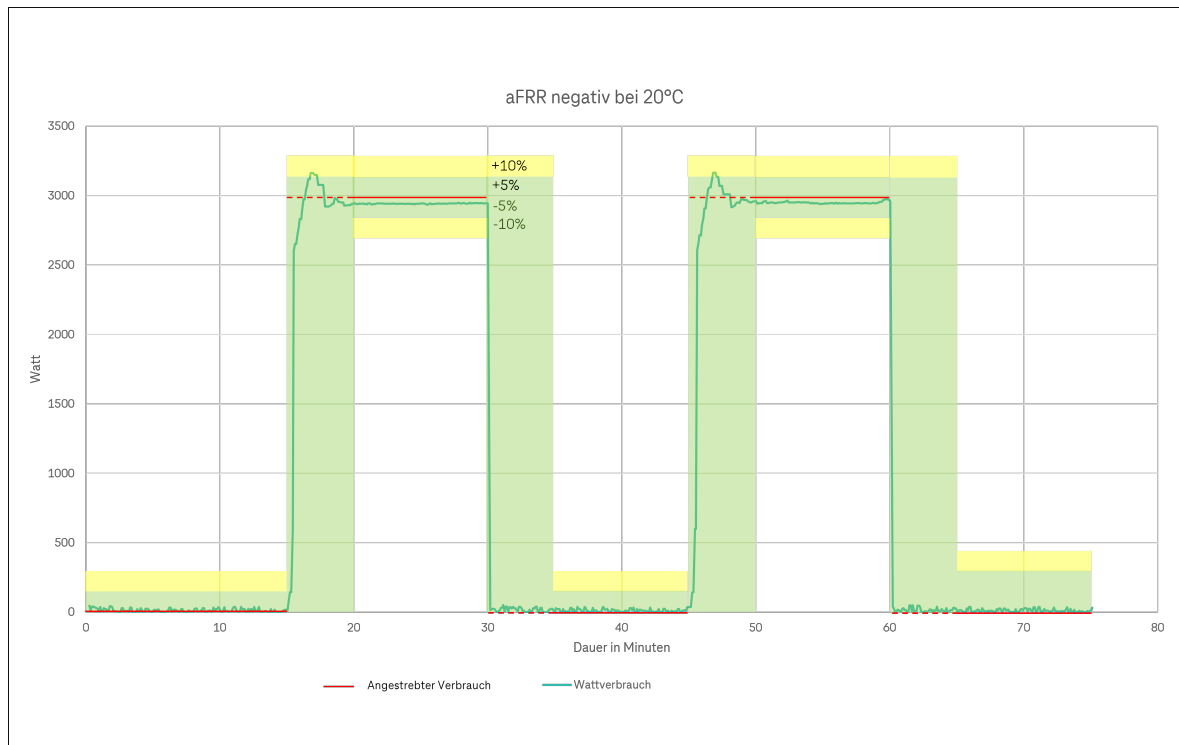


Abbildung 6.6: Datenauswertung der Bereitstellung sekundärer Regelleistung bei 20 °C

Wohingegen der Leistungsabfall bei einer hohen Umgebungstemperatur von ca. 30 °C regelmäßig auftrat, konnte er bei einer Wiederholung des Versuchs bei etwa 20 °C Umgebungstemperatur nicht beobachtet werden. Dies bestätigt die Annahme, dass die Leistungsanpassung der Temperaturregulierung dient und der ASIC bei hohen Außentemperaturen aktiv seine Leistung reduziert, um eine Überhitzung zu vermeiden und die Systemstabilität sicherzustellen. Auch die Chiptemperaturen des ASICs waren durchschnittlich um 10 °C kälter. Die Ergebnisse verdeutlichen, wie entscheidend ein effektives Kühlsystem für die Leistungsfähigkeit und Stabilität der ASICs ist, insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen.

Es wurde kein zusätzliches Kapitel für positive Sekundärregelleistung angelegt, da die Ergebnisse nahezu identisch sind. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der Bitcoin-Miner zu Beginn und am Ende der Betriebsfahrt jeweils im Volllastbetrieb läuft. Besonders in Hitzeperioden ist dabei das Kühlungsmanagement umso wichtiger, da die Miner überwiegend unter Volllast arbeiten und thermische Drosselungen vermieden werden müssen.

Die gewonnenen Daten aus der Versuchsdurchführung belegen, dass Bitcoin-Mining technisch hervorragend als flexibler Lastabnehmer für sowohl den positiven als auch den negativen Sekundärregelleistungsmarkt geeignet ist. Die relativ präzise Steuerbarkeit des Leistungsprofils ermöglicht eine zuverlässige Teilnahme am sekundären Regelleistungsmarkt.

6.2.6 Reaktionsfähigkeit auf dynamische Daten

Im letzten Versuch wurde die Reaktionsfähigkeit des ASICs auf externe sich dynamisch ändernde Daten getestet. Konkret steuerte der ASIC seinen Betrieb anhand von Strompreisen aus dem deutschen Day-Ahead-Markt (via Nordpool-API), die als Signal für Zustandsänderungen dienten. Die definierte Regellogik sah vor:

- Volllastbetrieb (3.650 W) bei Preisen ≤ 100 €/MWh
- Mining-Pause (Standby) bei Preisen >100 €/MWh.

Der folgende Logausschnitt des Skripts dokumentiert die Umsetzung dieser Logik während zwei aufeinanderfolgenden Stunden:

```
Aktuelle Stunde (UTC) ist: 2025-06-26T02:00:00Z

Gefundener Preis = 98.79 EUR/MWh

Preis <= 100: Setze Wattage auf 3650...

2025-06-26T02:02:01.571339Z INFO toolbox_cli::commands: running miner resume on 1 miners
...

2025-06-26T02:02:01.578004Z INFO toolbox_cli::commands: 1/1 miners resumed successfully

//ASIC beginnt das Mining

2025-06-26T02:02:32.449438Z INFO toolbox_cli::commands: running configuration of tuner
target on 1
miners...

2025-06-26T02:02:32.456268Z INFO toolbox_cli::commands: 1/1 miners configured
successfully

//ASIC setzt den angestrebten Wattverbrauch auf 3650 W

Skript beendet.

Aktuelle Stunde (UTC) ist: 2025-06-26T03:00:00Z

Gefundener Preis = 102.91 EUR/MWh

Preis > 100: Pausiere Mining...

2025-06-26T03:02:01.402036Z INFO toolbox_cli::commands: 1/1 miners paused successfully

//ASIC pausiert das Mining

Skript beendet.
```

Der Codeblock demonstrierte eine zuverlässige Reaktionsfähigkeit auf dynamische Marktdaten. Dies belegt die Eignung für marktgetriebene Flexibilitätsdienste, insbesondere für den Sekundärregelleistungsmarkt, welcher eine schnelle Reaktion auf externe Steuersignale erfordert. Die Nutzung öffentlicher Nordpool-Daten diente hier als vereinfachtes Testmodell.

In der Praxis würde die Anbindung an die Regelenergieplattformen der Übertragungsnetzbetreiber erfolgen. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die technische Grundvoraussetzung für eine adaptive Laststeuerung erfüllt ist.

6.3 Diskussion zwischen Effizienz und Performance

Die Frage, ob Bitcoin-Miner auf Volllast oder im Effizienzoptimum betrieben werden sollen, ist für jeden Betreiber von zentraler Bedeutung. In der Praxis wird häufig der leistungsorientierte Betrieb bevorzugt, da so die Investitionskosten am schnellsten amortisiert werden und die Miner innerhalb ihrer Lebensdauer möglichst viele Bitcoin schürfen können. Besonders für Betreiber, die auf einen langfristigen Preisanstieg des Bitcoin setzen, ist dieser Ansatz attraktiv, weil ein Betrieb im Effizienzoptimum weniger Coins in der gleichen Zeit zur Folge hätte. Allerdings ist dieser Vorteil nur dann gegeben, wenn die Stromkosten dauerhaft niedrig bleiben. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln festgestellt, ist der Betrieb bei Strompreisen über 7 ct/kWh kaum mehr rentabel. Da in dieser Arbeit vor allem der deutsche Markt untersucht wurde, sind solche günstigen Stromverträge jedoch selten, weshalb es sinnvoll ist, die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für einen performanceorientierten Betrieb kritisch zu hinterfragen.

Thermische Belastung

Anders stellt sich die Situation dar, wenn Miner als flexible Lastabnehmer für Stromerzeuger oder -händler eingesetzt werden, die am Regelleistungsmarkt aktiv sind. In diesem Fall kann ein effizienzorientierter Betrieb durchaus vorteilhafter sein, da die Miner dann gezielt Lastspitzen und -täler ausgleichen können. Ein ständiger Wechsel zwischen Volllast und Standby, wie er bei der Teilnahme am Regelenergiemarkt erforderlich wäre, setzt die Hardware jedoch starken Spannungs- und Temperaturschwankungen aus und kann deren Lebensdauer verkürzen. Ein Betrieb im Bereich von 1600 bis 2400 W, also im Effizienzoptimum, reduziert die thermische Belastung der ASICs deutlich und erhöht damit die Betriebsstabilität und Lebensdauer. Besonders in heißen Regionen oder während Hitzeperioden ist dieser Ansatz vorteilhaft, wie auch die eigenen Versuche gezeigt haben. Innerhalb der Zeit während des Pilotprojekts fielen bei hohen Außentemperaturen und suboptimaler Kühlung die Miner nicht selten aufgrund von Überhitzung aus. Ein effizienzgetriebener Betrieb senkt die Chiptemperatur und sorgt so für mehr Zuverlässigkeit.

Primärregelleistungsmarkt

Beim Primärregelleistungsmarkt kommt eine weitere Dimension hinzu. Da dieser Markt symmetrisch funktioniert, muss der Teilnehmer garantieren, dass er Lasten flexibel ab- und zuschalten kann. Im Idealfall würden die Miner daher dauerhaft auf etwa 50 Prozent ihrer Leistung laufen, um sich im Effizienzoptimum zu befinden, und könnten bei Bedarf kurzfristig hochgefahren oder pausiert werden. In den eigenen Versuchen konnte jedoch bewiesen werden, dass die geforderten Reaktionszeiten für den Primärregelleistungsmarkt mit der aktuellen Hardware nicht eingehalten werden. Dennoch wäre es denkbar, diese Hürde mit einer verbesserten Kühlung, optimierter Software oder einem anderen ASIC-Modell zu überwinden.

Dynamische Strompreise

Für Betreiber, die dynamische Strompreismärkte nutzen, bietet sich eine weitere Möglichkeit, bei der ein Miner so konfiguriert wird, dass er bei hohen Strompreisen automatisch stoppt oder im Effizienzoptimum läuft, während er bei niedrigen Preisen auf Volllast schaltet. Ein solches automatisiertes Load-Shifting könnte die Profitabilität leicht steigern, setzt aber eine enge Einbindung in die Dynamik des Strommarktes voraus und sollte im Vorfeld sorgfältig analysiert werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Wahl zwischen Effizienz- und Performance-Betrieb stark vom Einsatzszenario und den lokalen Rahmenbedingungen abhängt. Für den Standardbetrieb von Bitcoin-Minern, gekoppelt an feste oder dynamische Strompreise, ist entweder Volllast (bei dauerhaft niedrigen Stromkosten <7 ct/kWh) oder eine Hybridstrategie mit preisadaptiver Steuerung wirtschaftlich optimal. Im Kontext von Regelleistungsmärkten hingegen bietet der Betrieb im Effizienzoptimum entscheidende Vorteile, da eine geringere thermische Belastung die Hardware-Lebensdauer erhöht und stabile Leistungsprofile präzisere Netzdienstleistungen ermöglichen. Diese Potenziale sollten in zukünftigen Studien quantitativ validiert werden.

7 Auswertung

7.1 Ergebnisse der Recherche

Die vorliegende Masterarbeit untersuchte das ökonomische Potenzial von Bitcoin-Mining für deutsche Unternehmen mit besonderem Bezug auf erneuerbare Energien sowie dem deutschen Strommarkt. Da die Wirtschaftlichkeit des Minings primär durch Stromkosten determiniert wird, bildete eine umfassende Analyse des deutschen Strommarkts das methodische Fundament der Arbeit. Diese Analyse umfasste die strukturellen Grundlagen, Funktionsweise, Marktmechanismen, Preisgestaltungsverfahren des Strommarkts sowie die wirtschaftlichen Entlohnungssysteme für die Bereitstellung von Regelleistung. Die durchgeführten Profitabilitätsrechnungen ergaben ein zentrales Erkenntnis: Aufgrund der charakteristisch hohen Strompreise in Deutschland, sowohl für Endverbraucher als auch für Gewerbe- und Industriekunden, erweist sich Bitcoin-Mining über konventionelle Stromverträge als nicht rentabel. Die quantitative Analyse demonstrierte, dass nachhaltige Profitabilität ausschließlich bei Stromkosten unter 7 ct/kWh, optimal sogar unter 5 ct/kWh, realisierbar ist. Da diese Kostenstruktur durch reguläre Stromtarife in Deutschland nicht erreichbar ist, fokussierte die Untersuchung auf alternative Erlösmodelle durch die Partizipation an Regelleistungsmärkten.

Die Analyse identifizierte den negativen Sekundärregelleistungsmarkt als besonders geeignetes Einsatzfeld für Bitcoin-Mining-Operationen. Dieses Szenario ist durch eine hohe Rendite bei relativ niedrigen Investitionskosten gekennzeichnet. Die Untersuchung der positiven Sekundärregelleistung verdeutlichte hingegen, dass die Rentabilität maßgeblich von der Bereitstellungsdauer der Regelernergie sowie dem bezogenen Strompreis abhängt und deutlich höhere laufende Kosten verursacht.

Ein weiterer kritischer Erfolgsfaktor kristallisierte sich in der strategischen Bitcoin-Haltestrategie heraus. Sowohl die theoretische Analyse als auch die Handhabung verschiedener Bitcoin-Miner belegen, dass Betreiber ihre Bitcoin-Bestände langfristig akkumulieren und diese strategisch in Bullenmärkten veräußern. Dieses Erkenntnis führt zu der Empfehlung, laufende Betriebskosten nicht unmittelbar durch gemintete Bitcoin zu decken, sondern die Bitcoin als bilanziellen Vermögenswert zu führen und zeitoptimiert zu verkaufen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Bitcoin-Mining in Deutschland vor allem dann wirtschaftlich betrieben werden kann, wenn es in Flexibilitätsmärkte wie den negativen Sekundärregelleistungsmarkt integriert wird. Darüber hinaus bieten auch alternative Ansätze wie die Eigenerzeugung von Strom ohne Netzentgelte, beispielsweise durch Direktverbrauch erneuerbarer Energien, oder die Nutzung der Abwärme zusätzliche Möglichkeiten, die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Konventionelle Stromtarife reichen in der Regel nicht aus, um eine profitable Mining-Operation zu ermöglichen. Die Abwärmenutzung als weiteres Geschäftsfeld wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht vertieft und bleibt ein Ansatzpunkt für zukünftige Untersuchungen. Insgesamt zeigt sich, dass der wirtschaftliche Betrieb von Bitcoin-Mining in Deutschland maßgeblich von der Anpassung an spezifische Markt- und Infrastrukturbedingungen abhängt und verschiedene innovative Lösungswege denkbar sind.

7.2 Ergebnisse der Durchführung

Innerhalb der Durchführung wurden folgende zentrale Aspekte der ASICs im Rahmen des Pilotprojekts getestet:

- Ertrag innerhalb des gesamten Zeitraums des Pilotprojekts
- Laufleistung und Stabilität innerhalb eines zweimonatigen Zeitraums ohne Steuerungseingriffe
- Herausfinden der Effizienz innerhalb unterschiedlicher Leistungsstufen
- Einhalten der Reaktionszeit und des Energieverbrauchs für die Qualifikation am Sekundärregelleistungsmarkt
- Dynamische Taktfrequenzanpassung basierend auf Strompreisen des Day-Ahead-Markts

Im Verlauf des Pilotprojekts zeigte sich, dass die erwartete Rentabilität aufgrund verschiedener Faktoren nicht erreicht werden konnte. Zu diesen Faktoren zählten unter anderem häufige Ausfälle einzelner ASICs, wiederholte Leistungsanpassungen während des Projektzeitraums sowie ein Strompreis, der das Mining im globalen Markt nur gering wettbewerbsfähig machte. Berechnungen ergaben, dass die Miner unter Berücksichtigung der anfallenden Stromkosten erst nach etwa 1200 Tagen vollständig amortisiert wären. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Wert durch Hardwareausfälle und experimentelle Phasen beeinflusst wurde - ohne diese Störfaktoren wäre die Amortisationszeit deutlich kürzer ausgefallen.

Während des zweimonatigen Zeitraums, in dem keine Steuerungseingriffe vorgenommen wurden, liefen drei der vier Miner ohne Ausfälle und konstant auf Volllast. Lediglich der vierte Miner verzeichnete in der zweiten Hälfte der Versuchsdurchführung drei Ausfälle, die jeweils zwischen zwei und sechs Tagen andauerten. Diese Ausfälle können jedoch mit einem aktiven Monitoring, festgelegten Wartungszyklen und einer besseren Kühlung minimiert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Bestimmung des Effizienzoptimums der eingesetzten ASICs. Die Ergebnisse zeigen, dass dieses Optimum zwischen 1650 W und 2400 W liegt. In diesem Leistungsbereich arbeiteten die ASICs am effizientesten, was insbesondere für Anwendungsfälle mit erhöhten Umgebungstemperaturen, für einen auf die Lebensdauer optimierten Betrieb oder für die Bereitstellung von Primärregelleistung von Vorteil sein kann - sofern die technischen Voraussetzungen erfüllt werden. Die konkreten Auswirkungen auf die Hardware-Lebensdauer konnten im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht abschließend untersucht werden, da dies den zeitlichen und finanziellen Rahmen des Projekts überschritten hätte.

Als ein zentraler Teil dieser Thesis bildete der technische Nachweis zur Einhaltung der Reaktionszeit, sowie des Leistungsverbrauchs, für die Qualifikation am sekundären Regelleistungsmarkt. Dieser Versuch zeigte, dass die vorgegebenen Grenzen eingehalten werden konnten und die Reaktionszeit des ASIC die maximal vorgeschriebene Reaktionszeit innerhalb des Leistungsänderungsbereichs deutlich unterschritt. Anhand der gewonnenen Daten konnte festgestellt werden, dass sich Bitcoin-Mining als flexibler Lastabnehmer sehr gut eignet. Jedoch konnte innerhalb des Pilotprojektes die geringe Reaktionsfähigkeit innerhalb des 30-

sekündigen Leistungsänderungsbereichs für den primären Regelleistungsmarkt nicht eingehalten werden, weshalb es hierfür noch weitere Versuchsdurchführungen unter veränderten Bedingungen bedarf.

Abschließend wurde im Rahmen des Pilotprojekts gezeigt, dass die ASICs auf dynamische Strommarktdaten reagieren und ihren Leistungsverbrauch flexibel an vordefinierte Parameter anpassen können. Dieser Versuch diene als vereinfachte Demonstration für eine mögliche Integration in die Regelenergieplattform. Es ist jedoch festzuhalten, dass für eine tatsächliche Integration zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen zu treffen sind und die Softwarearchitektur an die Anforderungen des Energiemarkts angepasst werden muss.

7.3 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat fundiert nachgewiesen, dass Bitcoin-Mining als flexibler Lastabnehmer für Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber einen wesentlichen Mehrwert bietet. Insbesondere die Eignung für den Sekundärregelleistungsmarkt wurde technisch und wirtschaftlich validiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen sollen zukünftige Projekte gezielt mit bereits qualifizierten Regelleistungsanbietern (siehe Anhang [A.1](#), [A.2](#)) kooperieren, um durch Schulungen branchenspezifisches Know-how aufzubauen und Pilotprojekte zur aktiven Marktintegration von Bitcoin-Mining in Regelenergiesysteme zu entwickeln. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass Bitcoin-Mining aufgrund der charakteristisch hohen Strompreise in Deutschland für die meisten Unternehmen nicht wirtschaftlich ist. Lediglich für Unternehmen mit eigener Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die regelmäßig überschüssigen Strom produzieren, der nicht ins Netz eingespeist oder selbst verbraucht werden kann, bietet Bitcoin-Mining eine wirtschaftlich interessante Alternative. Für die meisten Unternehmen am Markt bringt Bitcoin-Mining jedoch keine wirtschaftlichen Vorteile.

Darüber hinaus kann Bitcoin-Mining für Stromerzeuger ohne direkten Netzanschluss als Puffer für Überschussstrom dienen. Hier soll untersucht werden, ob die Vermietung von Mining-Containern als lukratives Geschäftsmodell etabliert werden kann. Somit könnten Stromerzeuger temporär überschüssige Energie für Mining nutzen, um die Wartezeiten bis zur Netzeinspeisegenehmigung wirtschaftlich zu überbrücken. Dieses Modell bietet insbesondere für Projekte im Genehmigungsverfahren eine innovative Überbrückungslösung.

Ein drittes Potenzial, welches jedoch nicht vertieft in dieser Thesis untersucht wurde, liegt in der Nutzung der Abwärme, die durch Bitcoin-Mining entsteht. Internationale Beispiele belegen hierzu bereits erfolgreiche Anwendungen. In Finnland ist geplant, die anfallende Abwärme aus dem Mining in das regionale Fernwärmenetz einzuspeisen [[Ter24b](#)], während in den Niederlanden bereits ein Tulpenzüchter die Wärme seiner Mining-Anlage zur Beheizung der Gewächshäuser nutzt [[Eur22](#)]. Auch existiert in New York das Projekt *Bathhouse*, das die Abwärme der ASICs zur Erwärmung des Schwimmbadwassers nutzt [[Li23](#)]. Diese Projekte zeigen, dass die Abwärme aus Bitcoin-Mining sinnvoll genutzt werden kann und vielfältige Synergien zwischen digitaler Wertschöpfung und nachhaltiger Energieversorgung möglich sind. Für Deutschland besteht hier noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Skalierbarkeit in bestehenden Netzen und der Wirtschaftlichkeit unter den aktuellen Energiepreisbedingungen. Die Integration solcher Modelle könnte

Bitcoin-Mining zu einem wichtigen Baustein der dezentralen und nachhaltigen Energieversorgung machen und damit einen zusätzlichen Mehrwert für Netzstabilität und erneuerbare Energien schaffen.

Obwohl in dieser Thesis der Fokus auf dem deutschen Strommarkt lag, bietet auch die Betrachtung des europäischen Strommarktes ein erhebliches Potenzial für innovative Geschäftsmodelle im Bereich Bitcoin-Mining. Angesichts der zunehmenden Harmonisierung der europäischen Energiemärkte und der Entwicklung einheitlicher Regelungen zur Bereitstellung von Regelleistung könnten sich in anderen Ländern ähnliche oder sogar weitergehende Vergütungsmöglichkeiten ergeben. Eine Analyse der regulatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in verschiedenen europäischen Staaten würde es ermöglichen, erfolgreiche Ansätze zu identifizieren und auf andere Märkte zu übertragen. Der europäische Kontext stellt somit ein vielversprechendes Feld für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar, insbesondere im Hinblick auf die Integration flexibler Lastabnehmer wie Bitcoin-Mining in länderübergreifende Regelenergiesysteme.

Diese Arbeit stellt eine solide Grundlage für die weitere Entwicklung und Integration von Bitcoin-Mining in den deutschen Energiemarkt dar und kann als Referenz für zukünftige Projekte im Bereich flexibler Lastabnehmer dienen. Die strukturierte Analyse der wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen sowie die praxisnahe Durchführung der Versuche bieten einen fundierten Einblick in die Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Umsetzung innovativer Energiekonzepte mit Bitcoin-Mining. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen bilden somit eine wichtige Basis für die Weiterentwicklung nachhaltiger und wirtschaftlich tragfähiger Mining-Strategien.

Anhang

Anhang A: Liste der Anbieter von Regelleistung

Präqualifizierte Anbieter je Regelenergieart

Anbieter	FCR	aFRR	mFRR
Axpo Deutschland GmbH		●	●
BayWa r.e. Energy Trading GmbH		●	●
Coulomb GmbH	●		
E.ON Energie Deutschland GmbH			●
eins energie in sachsen GmbH & Co. KG	●		
EnBW Energie Baden-Württemberg AG	●	●	●
Eneco Energy Trade B.V.	●		
Enercity AG	●	●	●
Energie Vertrieb Deutschland EVD GmbH	●		
Energy2market GmbH	●	●	●
ENGIE Deutschland AG	●	●	●
ENGIE Deutschland GmbH	●	●	
Entelios AG	●	●	●
envia Mitteldeutsche Energie AG	●	●	●
EWE TRADING GmbH	●	●	●
Frequenz Energy-as-a-Service GmbH	●		
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG	●	●	
Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG		●	●
Lausitz Energie Kraftwerke AG	●	●	●
Lechwerke AG	●	●	●
Mark-E AG		●	●
MVV Trading GmbH	●	●	●
Next Kraftwerke GmbH	●	●	●
Nordgrön Energie GmbH		●	
RheinEnergie AG		●	
RWE Supply & Trading GmbH	●	●	●
sonnen eServices GmbH	●		
Stadtwerke Würzburg AG	●	●	
Statkraft Markets GmbH	●	●	●
STEAG GmbH	●		
Südvolt GmbH	●	●	●
SWM Services GmbH	●	●	●
TIWAG - Tiroler Wasserkraft AG		●	●
Trianel GmbH		●	●
Uniper Global Commodities SE	●	●	●
Vattenfall Energy Trading GmbH	●	●	●
VERBUND Energy4Business GmbH	●	●	●

Abbildung A.1: Liste aller qualifizierten Anbieter für Regelleistung
[reg24d].

Präqualifizierte Anbieter je Regelenergieart

Anbieter	FCR	aFRR	mFRR
VSE AG		●	●
VW Kraftwerk GmbH			●
WEMAG AG	●		

Präqualifizierte Anbieter sind alle Regelreserveanbieter, die einen gültigen Rahmenvertrag zur Regelleistungserbringung mit mindestens einem Anschluss-ÜNB abgeschlossen haben und gleichzeitig präqualifizierte Leistungen von mindestens der Mindestangebotsgröße aufzuweisen haben. Zudem müssen die gültigen PQ-Anforderungen umgesetzt sein.

Abbildung A.2: Liste aller qualifizierten Anbieter für Regelleistung [reg24d].

Anhang B: Skripte

B.1 Aufzeichnung der Betriebsdaten

```
#!/bin/bash

# Funktion zur Authentifizierung und Abrufen eines neuen Session-Tokens
function authenticate() {
    # Fuehrt den grpcurl-Befehl aus, um das Token zu erhalten
    FULL_RESPONSE=$(grpcurl -plaintext -v -d '{"username": "root", "password": "root"}'
        192.168.10.101:50051 'braiins.bos.v1.AuthenticationService/Login' 2>&1)
    SESSION_TOKEN=$(echo "$FULL_RESPONSE" | grep 'authorization:' | awk '{print $2}')
    echo "Erhaltener Token: $SESSION_TOKEN" # Debug-Ausgabe
}

# Dateipfad fuer die CSV-Datei
CSV_FILE="/home/raspberry-mms/miner_stats_6h_101.csv"

# Initialisieren der CSV-Datei mit einer Kopfzeile, falls sie noch nicht existiert
if [ ! -f "$CSV_FILE" ]; then
    echo "timestamp,powerConsumption,efficiency,hashrate_5s" > "$CSV_FILE"
fi

# Hauptschleife
while true; do
    # Authentifiziere nach jeder Schleifeniteration, um sicherzustellen, dass es ein
    # gueltiger Token ist
    authenticate
    # Fuehre den grpcurl-Befehl aus und speichere die Ergebnisse in Variablen
    OUTPUT=$(grpcurl -plaintext -H "authorization:$SESSION_TOKEN" -d '{}'
        192.168.10.101:50051 'braiins.bos.v1.MinerService/GetMinerStats' | jq '{
            powerConsumption: .powerStats.approximatedConsumption.watt, efficiency: .
            powerStats.entropy.joulePerTerahash, hashrate_5s: .minerStats.realHashrate.
            last5s.gigahashPerSecond}')

    # Hole das aktuelle Datum und die Uhrzeit
    TIMESTAMP=$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S')

    # Extrahiere die Werte aus dem JSON-Output
    POWER_CONSUMPTION=$(echo "$OUTPUT" | jq -r '.powerConsumption')
    EFFICIENCY=$(echo "$OUTPUT" | jq -r '.efficiency')
    HASHRATE_5S=$(echo "$OUTPUT" | jq -r '.hashrate_5s')

    # Schreibe die Werte in die CSV-Datei
    echo "$TIMESTAMP,$POWER_CONSUMPTION,$EFFICIENCY,$HASHRATE_5S" >> "$CSV_FILE"

    # Warte 6 Stunden (21600 Sekunden)
    sleep 21600
done
```

B.2 Durchführung der Effizienzmessung

```
#!/bin/bash

# Pfad zur Braiins Toolbox
TOOLBOX="./braiins-toolbox"

# IP-Datei der Miner
IP_FILE="/home/raspberry-mms/ip_miner"

# Funktion zum Setzen der Leistung
function set_power_target() {
    local POWER_WATT=$1
    echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Setze Power auf ${POWER_WATT}W..."
    $TOOLBOX tuner target --power "$POWER_WATT" --yes --ip-file "$IP_FILE"
}

# Hauptschleife
while true; do
    # Start bei 900W
    CURRENT_POWER=900

    # Hochfahren in 250W-Schritten bis 3650W
    while [ "$CURRENT_POWER" -le 3650 ]; do
        set_power_target "$CURRENT_POWER"
        sleep 1800 # 60 Minuten
        CURRENT_POWER=$((CURRENT_POWER + 250))
    done

    # 30 Minuten auf 3650W bleiben
    echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - 30 Minuten auf 3650W halten..."
    sleep 1800

    # Zurueck auf 900W in einem Schritt
    set_power_target 900
    echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Zurueck auf 900W."

    # Kleine Pause vor dem neuen Durchlauf (optional)
    sleep 60
done
```

B.3 Durchführung der Betriebsfahrt für negative Sekundärregelleistung

```
#!/bin/bash

TOOLBOX="/home/raspberry-mms/./braiins-toolbox"
IP_FILE="/home/raspberry-mms/ip_miner"

function set_power_target() {
    local POWER_WATT=$1
    echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Setze Power auf ${POWER_WATT}W..."
    $TOOLBOX tuner target --power "$POWER_WATT" --yes --ip-file "$IP_FILE"
}

function pause_mining() {
```

```

echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Pausiere Mining..."
$TOOLBOX miner pause --ip-file "$IP_FILE"
}

function resume_mining() {
echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Setze Mining fort..."
$TOOLBOX miner resume --ip-file "$IP_FILE"
}

# Start mit 3000W
set_power_target 3000

# 2 identische Zyklen
for i in {1..2}
do
sleep 900 # 15 Minuten Betrieb
pause_mining
sleep 900 # 15 Minuten Pause
resume_mining
done

# Letzte Pause nach dem 2. Zyklus
pause_mining
echo "$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S') - Skript beendet (2 Zyklen abgeschlossen)."
```

B.4 Abfrage der Nordpool Daten per API-Anfrage

Nordpool-scraper day ahead:

```

import requests
import json
import pandas as pd
from datetime import datetime, timedelta

heute = datetime.today().strftime('%Y-%m-%d')

url = f"https://dataportal-api.nordpoolgroup.com/api/DayAheadPrices?date={heute}&market=
DayAhead&deliveryArea=GER&currency=EUR"

# API-URL für den gewünschten Tag und Markt
# url = "https://dataportal-api.nordpoolgroup.com/api/DayAheadPrices?date=2025-01-29&
market=DayAhead&deliveryArea=GER&currency=EUR"

# API-Anfrage senden
response = requests.get(url)
data = response.json()

# Debugging: Zeige die Antwortstruktur
#print(json.dumps(data, indent=4))

# Daten extrahieren
if "multiAreaEntries" in data:
entries = data["multiAreaEntries"]

# Liste für DataFrame vorbereiten
```

```

rows = []
for entry in entries:
    delivery_start = entry["deliveryStart"] # Startzeit
    delivery_end = entry["deliveryEnd"] # Endzeit
    price = entry["entryPerArea"].get("GER", "N/A") # Preis für AT

    rows.append({
        "Delivery Start": delivery_start,
        "Delivery End": delivery_end,
        "Price (EUR/MWh)": price
    })

# DataFrame erstellen
df = pd.DataFrame(rows)

# CSV speichern
csv_filename = "nordpool_prices.csv"
df.to_csv(csv_filename, index=False)

print(" ^|^e Daten gespeichert in:", csv_filename)

else:
    print(" ^z ^o Keine Daten gefunden.")

```

B.5 Dynamische Steuerung des ASICs anhand der API-Daten

```

#!/usr/bin/env bash
# check_nordpool_and_set_wattage.sh
# Dieses Skript liest aus einer Nordpool-CSV (z. B. "nordpool_prices.csv")
# die stündlichen Preise. Es vergleicht den aktuellen Stundenpreis
# mit einem Schwellwert (z. B. 100), um anschliessend den Miner
# via Braiins Toolbox auf Stop oder 3650W zu setzen

# Pfad zur CSV-Datei (liegt lokal auf deinem Raspberry Pi/Admin-PC):
CSV_FILE="/home/raspberry-mms/nordpool_prices.csv"

# IP-Adresse(n) deines Miners - kann auch ein Range oder '--ip-file' sein
MINER_IP="--ip-file=/home/raspberry-mms/ip_miner"

# 1. Aktuelle Stunde in UTC bestimmen
# Beispiel-Format: 2025-02-02T10:00:00Z
CURRENT_HOUR_UTC="$(date -u +%Y-%m-%dT%H:00:00Z)"
echo "Aktuelle Stunde (UTC) ist: $CURRENT_HOUR_UTC"

# 2. Passenden Preis aus CSV auslesen
# Annahme: CSV-Spalten sind:
# Delivery Start, Delivery End, Price (EUR/MWh)
# Suche die Zeile, in der Spalte 1 = CURRENT_HOUR_UTC
PRICE=$(awk -F',' -v h="$CURRENT_HOUR_UTC" '
NR > 1 { # Kopfzeile ueberspringen
    if ($1 == h) { # $1 enthaelt Delivery Start
        print $3; # Spalte 3 = "Price (EUR/MWh)"
        exit; # Abbrechen, wenn gefunden
    }
}
' "$CSV_FILE")

```

```
# 3. Fehlerbehandlung, falls kein Preis gefunden
if [ -z "$PRICE" ]; then
  echo "FEHLER: Kein Preis gefunden fuer Stunde $CURRENT_HOUR_UTC in Datei $CSV_FILE"
  exit 1
fi

echo "Gefundener Preis = $PRICE EUR/MWh"

# 4. Vergleich mit Schwellwert 100
#   Da $PRICE Kommazahl sein kann, Verwendung von 'bc -l' fuer den Float-Vergleich:
if (( $(echo "$PRICE > 100" | bc -l) )); then
  echo "Preis > 100: Pausiere Mining..."
  # Braiins Toolbox: Miner stoppen
  ./braiins-toolbox miner pause "$MINER_IP"
else
  echo "Preis <= 100: Setze Wattage auf 3650..."
  # Braiins Toolbox: Mining fortsetzen und auf 3650W erhoehen
  ./braiins-toolbox miner resume "$MINER_IP" && sleep 30 &&
  ./braiins-toolbox tuner target --yes --power 3650 "$MINER_IP"
fi

echo "Skript beendet."
```

Literaturverzeichnis

- [1] Statista GmbH, *Strompreise für Haushalte in Europa nach Ländern 2024*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197196/umfrage/elektrizitaetspreise-ausgewaehlter-europaeischer-laender/>.
- [2] Statista GmbH, *Strompreise für Industriekunden in der EU 2023*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2023. Adresse: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151260/umfrage/strompreise-fuer-industriekunden-in-europa/>.
- [3] Umweltbundesamt, *Energiesparen in Industrie und Gewerbe*, Online, Zugriff am 08.06.2025, 2023. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparen-in-industrie-gewerbe#energieeinsparpotenziale>.
- [4] Cemrehan Engin, *Eigenstromerzeugung: Photovoltaik für Unternehmen*, Online, Zugriff am 15.05.2025, 2025. Adresse: <https://partner.mvv.de/blog/eigenstromerzeugung-photovoltaik-f%C3%BCr-unternehmen-pvtk>.
- [5] KfW Research, *Jedes zweite Unternehmen in Deutschland nutzt Strom aus erneuerbaren Energien*, Online, Zugriff am 03.06.2025, 2024. Adresse: https://www.kfw.de/%C3%9Cber-die-KfW/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen-Details_804096.html.
- [6] Deutscher Bundestag, *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energiewirtschaftsrechtlicher Vorschriften zur Steigerung des Ausbaus photovoltaischer Energieerzeugung*, Online, Drucksache 20/8657, Zugriff am 25.05.2025, 2023. Adresse: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/086/2008657.pdf>.
- [7] Christian Bernhard, *Netzstabilität: Probleme und Lösungen*, Online, Zugriff am 09.05.2025, 2023. Adresse: <https://www.autarq.com/de-de/magazin/solartechnik/netzstabilitaet-174/>.
- [8] BlackRock, *Bitcoin ETFs: a new era of access*, Online, Zugriff am 18.05.2025, 2024. Adresse: <https://www.blackrock.com/institutions/en-axj/insights/bitcoin-etfs-a-new-era-of-access>.
- [9] CCN.com, *Race to Bitcoin Reserves: Arizona Passes Second BTC Reserve Bill*, Online, Zugriff am 21.05.2025, 2025. Adresse: <https://www.ccn.com/news/crypto/us-states-strategic-bitcoin-reserve-2025/>.
- [10] mempool.space, *Bitcoin Mining Dashboard*, Online, Zugriff am 16.05.2025, 2025. Adresse: <https://mempool.space/de/mining>.
- [11] Hashrate Index, *Global Hashrate Heatmap*, Online, Zugriff am 11.06.2025, 2025. Adresse: <https://data.hashrateindex.com/network-data/global-hashrate-heatmap>.
- [12] Bundesnetzagentur, *Strommarkt und Netzbetrieb*, Online-Plattform, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.smard.de/page/home/wiki-article/446/205184>.
- [13] Statistisches Bundesamt, *Stromerzeugung 2024: Erzeugung, Im- und Export von Strom in Deutschland*, Online, Pressemitteilung, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/03/PD25_091_43312.html.

- [14] Agora Energiewende, *Is Germany a Net Importer or Net Exporter of Electricity?*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.agora-energiewende.org/about-us/the-german-energiewende/is-germany-a-net-importer-or-net-exporter-of-electricity>.
- [15] Euracoal, *Country profiles: Germany*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://euracoal.eu/info/country-profiles/germany-8/>.
- [16] Fraunhofer ISE, *German net power generation in first half 2024: Record generation of green power, generation from fossil fuels continues decline*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2024/german-net-power-generation-in-first-half-2024-record-generation-of-green-power-generation-from-fossil-fuels-continues-decline.html>.
- [17] Statistisches Bundesamt, *Photovoltaikanlagen: Zahl in sechs Jahren verdoppelt*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/07/PD24_N038_43.html.
- [18] Next Kraftwerke, *Systemdienstleistungen: Definition, Aufgaben und Bedeutung*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/systemdienstleistungen>.
- [19] Next Kraftwerke, *Übertragungsnetzbetreiber: Aufgaben und Bedeutung*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/uebert ragungsnetzbetreiber>.
- [20] Next Kraftwerke, *Liberalisierung der Strommärkte: Entwicklung und Auswirkungen*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/liberalisierung-strommaerkte>.
- [21] Bundesministerium der Justiz, *Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html#BJNR197010005BJNG000400000.
- [22] Bundesnetzagentur, *Verteilnetzbetreiber: Aufgaben und Bedeutung im Stromnetz*, Online-Plattform, Zugriff am 04.06.2025, 2025. Adresse: <https://www.smard.de/page/home/wiki-article/446/215536>.
- [23] FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., *Netzausbauplanung: Das Spiegelbild der heterogenen Verteilnetzbetreiberlandschaft*, Online, S. 4, Zugriff am 04.06.2025, 2025. Adresse: <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2025/02/Netzausbauplanung-Das-Spiegelbild-der-heterogenen-Verteilnetzbetreiberlandschaft-1.pdf>.
- [24] Stadtwerke Osnabrück AG, *Netzausbauplan 2024 SWO Netz*, Online, S. 3, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.enwg-veroeffentlichungen.de/swo/Netze/Stromnetz/Netzausbauplan1/Netzausbauplan-2024-SWO-Netz.pdf>.
- [25] Interconnector Deutschland AG, *Liberalisierung des Strommarktes: Entwicklung und Auswirkungen*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.interconnector.de/wissen/liberalisierung/>.
- [26] GreenSmartHome, *Dynamische Stromtarife: Funktionsweise und Marktentwicklung*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://greensmarthome.de/technik/dynamischer-stromtarif>.

- [27] Bundesnetzagentur, *Monitoringbericht 2024: Entwicklung des Stromvertriebsmarktes*, Online, S. 19, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Downloads/EN/Areas/ElectricityGas/CollectionCompanySpecificData/Monitoring/MonitoringReport2024.pdf>.
- [28] Europäische Union, *Richtlinie 96/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Dezember 1996 zur gemeinsamen Regelung des Elektrizitätsbinnenmarktes*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 1996. Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:31996L0092>.
- [29] Bundesgesetzblatt, *Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts vom 24. April 1998*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 1998. Adresse: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl198s0730.pdf#/text/bgbl198s0730.pdf?_ts=1747337887190.
- [30] K. F. Schäfer, *Systemführung: Betrieb elektrischer Energieübertragungsnetze*. Springer-Verlag, 2025, S. 74–75, ISBN: 978-3-658-47006-7.
- [31] DIHK, *Strombeschaffung und Handel: Faktenpapier*, Online, S. 8, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.dihk.de/resource/blob/16826/6b374abd68f83c368ed7d9cc68dadcd0/dihk-faktenpapier-strombeschaffung-und-handel-data.pdf>.
- [32] EPEX SPOT, *Power Trading*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.epexspot.com/en>.
- [33] Nord Pool, *European Power Trading*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.nordpoolgroup.com/>.
- [34] EXAA, *Energy Exchange Austria*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.exaa.at/>.
- [35] EPEX SPOT, *Market Coupling*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.epexspot.com/en/marketcoupling>.
- [36] EPEX SPOT, *Basics of Power Markets*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.epexspot.com/en/basicspowermarket>.
- [37] Next Kraftwerke, *Day-Ahead-Trading: Stromhandel am Vortag erklärt*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/day-ahead-trading-electricity>.
- [38] Amprion GmbH, *Die Ware Strom – Wie funktioniert der Stromhandel?*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2019. Adresse: <https://www.amprion.net/Netzjournal/Beitr%C3%A4ge-2019/Die-Ware-Strom.html>.
- [39] EPEX SPOT, *Day-Ahead and Intraday: The Backbone of the European Spot Market*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.epexspot.com/en/basicspotmarket#day-ahead-and-intraday-the-backbone-of-the-european-spot-market>.
- [40] Next Kraftwerke, *Intraday-Trading: Kurzfristiger Stromhandel erklärt*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/intraday-trading>.
- [41] GridX, *Was ist ein Intraday-Energiemarkt?*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.gridx.ai/de/knowledge/was-ist-ein-intraday-energiemarkt>.

- [42] Next Kraftwerke, *Intraday-Handel: Funktion und Bedeutung*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/intraday-handel>.
- [43] Interconnector Deutschland AG, *Strom-Terminmarkt: Produkte, Handel und Bedeutung*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.interconnector.de/wissen/strom-terminmarkt/>.
- [44] Next Kraftwerke, *Terminmarkt: Funktionsweise und Produkte*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/terminmarkt>.
- [45] Enpal, *Was ist der Terminmarkt für Strom?*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.enpal.de/strom/terminmarkt>.
- [46] Energiehandelsverband (EHA), *Stromhandel in Deutschland: OTC und Börse im Vergleich*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.eha.net/blog/details/stromhandel-deutschland.html>.
- [47] Deutscher Bundestag, *Strommarkt und Merit-Order-Prinzip*, Online, S. 4, Zugriff am 04.06.2025, 2022. Adresse: <https://www.bundestag.de/resource/blob/918822/abb4747668630cbe6d457512d42265c4/WD-5-121-22-pdf-data.pdf>.
- [48] Energas GmbH, *Terminmarkt und Spotmarkt: Unterschiede und Bedeutung*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://energas-gmbh.de/terminmarkt-und-spotmarkt/>.
- [49] regelleistung.net, *Frequency Containment Reserve (FCR): Grundlagen*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.regelleistung.net/de-de/Grundlagen/Arten-der-Regelreserve/Frequency-Containment-Reserve-FCR>.
- [50] Next Kraftwerke, *Primärreserve (Primärregelleistung)*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/primaerreserve-primaerregelleistung>.
- [51] 50Hertz, *Regelreservearten: FCR, aFRR, mFRR*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.50hertz.com/Markt/Regelreserve/Regelreservearten>.
- [52] regelleistung.net, *Automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR)*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.regelleistung.net/de-de/Grundlagen/Arten-der-Regelreserve/automatic-Frequency-Restoration-Reserve-aFRR>.
- [53] Next Kraftwerke, *Sekundärreserve: Funktion und Marktmechanismen*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/sekundaerreserve>.
- [54] regelleistung.net, *Manual Frequency Restoration Reserve (mFRR)*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.regelleistung.net/de-de/Grundlagen/Arten-der-Regelreserve/manual-Frequency-Restoration-Reserve-mFRR>.
- [55] EnBW, *Merit-Order-Prinzip: Funktionsweise und Kritik*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/kohleausstieg/merit-order.html>.
- [56] Next Kraftwerke, *Residuallast: Definition und Bedeutung im Strommarkt*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/residuallast>.

- [57] Baunetz Wissen, *Power-to-X-Technologien in der Energiewende*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/fachwissen/erneuerbare-energien/power-to-x-technologien-5560444>.
- [58] Ariadne-Projekt, *Flexibilitätsbedarf im zukünftigen Energiesystem*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: https://ariadneprojekt.de/media/2024/02/Ariadne-Analyse_FlexibilitaetEnergiesystem_Februar2024.pdf.
- [59] H.-W. Schiffer, *Einführung in die Energiewirtschaft*, 9. Auflage. Springer Vieweg, 2023, ISBN: 978-3-658-41747-5.
- [60] Bundesnetzagentur, *Strompreisentwicklung 2022*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.smard.de/page/en/topic-article/5892/211180>.
- [61] BDEW, *Strompreisanalyse Mai 2025*, Online, S. 18, Zugriff am 04.06.2025, 2025. Adresse: https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-Strompreisanalyse_05-2025.pdf.
- [62] Bundesnetzagentur, *Netzentwicklungsplan 2025-2037/2045*, Online, S. 66, Zugriff am 04.06.2025, 2025. Adresse: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2025-04/Genehmigung%20Szenariorahmen%202025_0.pdf.
- [63] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Bestandteile der Strompreise*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2023. Adresse: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/strompreise-bestandteile.html>.
- [64] Bundesnetzagentur, *Monitoringbericht Energie 2024*, Online, S. 188–192, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2024.pdf>.
- [65] Netztransparenz, *Spotmarktpreis nach § 3 Nr. 42a EEG*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.netztransparenz.de/de-de/Erneuerbare-Energie-n-und-Umlagen/EEG/Transparenzanforderungen/Marktpr%C3%A4mie/Spotmarktpreis-nach-3-Nr-42a-EEG>.
- [66] M. Linnemann, *Energiewirtschaft für (Quer-)Einsteiger*. Springer Vieweg, 2023, S. 258–, ISBN: 978-3-658-43555-4.
- [67] Bundesministerium der Justiz, *EnWG §13: Sicherheit und Zuverlässigkeit der Elektrizitätsversorgung*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2023. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/__13.html.
- [68] Bundesministerium der Justiz, *EnWG §13a: Netz- und Systemsicherheit*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2023. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/__13a.html.
- [69] Bundesnetzagentur, *Monitoringbericht Energie 2024*, Online, S. 143f., Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2024.pdf>.
- [70] regelleistung.net, *Ausschreibungsergebnisse Regelenergie (FCR, aFRR, mFRR, ABLA), Q1 2025*, Online, Zugriff am 04.06.2025, 2025. Adresse: <https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tendering-files/?productTypes=FCR%2CaFRR%2CmFRR%2CABLA&markets=ENERGY&fileTypes=RESULTS&dateRange=2025-01-01%2C2025-03-31>.

- [71] Netztransparenz, *Aktivierte Regelleistung 2024*, Online, CSV-Auszug, Zugriff am 04.06.2025, 2024. Adresse: <https://www.netztransparenz.de/de-de/Regelenergie/Daten-Regelreserve/Aktivierte-Regelleistung>.
- [72] Deutsche Übertragungsnetzbetreiber, *Präqualifikationsbedingungen für FCR, aFRR und mFRR in Deutschland*, Online, S. 9, 24, 26, 28, 32ff. Zugriff am 10.05.2025, 2024. Adresse: https://www.regelleistung.net/xsproxy/api/StaticFiles/Regelleistung/Infos_f%C3%BCr_Anbieter/Wie_werde_ich_Regelenergieanbieter_Pr%C3%A4qualifikation/Pr%C3%A4qualifikationsbedingungen_FCR_aFRR_mFRR/PQ-Bedingungen-2024_07_05.pdf.
- [73] regelleistung.net, *Präqualifikationsverfahren*, Abgerufen am 30.06.2025, regelleistung.net, 2025. besucht am 30. Juni 2025. Adresse: <https://www.regelleistung.net/de-de/Anbieter-werden/Pr%C3%A4qualifikationsverfahren>.
- [74] A. M. Antonopoulos und D. A. Harding, *Bitcoin und Blockchain – Grundlagen und Programmierung*, 3. Köln: O'Reilly, 2024, S. 4–5, Deutsche Übersetzung von Peter Klicman, ISBN: 978-3-96009-247-6.
- [75] B. W. Contributors, *Block Hashing Algorithm*, https://en.bitcoin.it/wiki/Block_hashing_algorithm, Zugriff am 11.06.2025, 2025.
- [76] D. Frumkin, D. White, T. Cohoon, M. Gronowska, Z. Voell und M. Kuchar, *BRAIINS INSIGHTS: Bitcoin Mining Handbook*, S. 29, 2022. besucht am 11. Juni 2025. Adresse: https://cdn.prod.website-files.com/5e5fcd39a7ed2643c8f70a6a/63ebadbe407c5bc4621f0d2a_Handbook%5C%20I_web%5C%20verze_3.pdf.
- [77] Cointelegraph. „Bitcoin Miner Bestände sinken – Was steckt dahinter?“, besucht am 11. Juni 2025. Adresse: <https://de.cointelegraph.com/news/bitcoin-miner-bestande-sinken-was-steckt-dahinter>.
- [78] H. Index. „Bitcoin Hashprice Index“, besucht am 11. Juni 2025. Adresse: <https://data.hashrateindex.com/network-data/bitcoin-hashprice-index>.
- [79] H. Vranken, „Sustainability of Bitcoin and Blockchains“, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Jg. 28, S. 1–9, 2017, S. 4–5. DOI: 10.1016/j.cosust.2017.04.011. besucht am 11. Juni 2025.
- [80] H. Index. „ASIC Breakeven Efficiency“, besucht am 11. Juni 2025. Adresse: <https://data.hashrateindex.com/asic-index-data/breakeven-efficiency>.
- [81] B. Insights. „Cost to Mine 1 BTC: Outputs & Charts“, besucht am 11. Juni 2025. Adresse: <https://academy.braiins.com/en/mining-insights/cost-to-mine/outputs-and-charts/>.
- [82] C. Sefrin, *Energiewende und Bitcoin-Mining: Ein effizienter Weg zur Netzstabilität?*, Online, Zugriff am 17.05.2025, 2024. Adresse: <https://www. adesso.de/de/news/blog/energiewende-und-bitcoin-mining-ein-effizienter-weg-zur-netzstabilitaet.jsp>.
- [83] I. für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE), *Ökobilanzieller Vergleich der Primärregelung durch stationäre Großbatteriespeicher und Kohlekraftwerke*, Online, Studie am Institut für Energie- und Klimaforschung, Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE), Forschungszentrum Jülich, unterstützt von Younicos, 2015. Adresse: <https://www.energie-klimaschutz.de/oekobilanzi-grossbatteriespeicher/>.

- [84] 21energy, *Weltweit beste Bitcoin Heizungen & Handel von Bitcoin Miners*, Online, Zugriff am 13.05.2025, 2024. Adresse: <https://21energy.com/de>.
- [85] Terahash.space, *Terahash.space – Übersicht und Analyse von Bitcoin-Mining*, Online, Zugriff am 19.05.2025, 2024. Adresse: <https://terahash.space/>.
- [86] Braiins, *Braiins Pool – Bitcoin Mining Pool*, Online, Zugriff am 16.05.2025, 2024. Adresse: <https://pool.braiins.com>.
- [87] Hashman, *Hashman – The ultimate Bitcoin miner companion*, Online, Zugriff am 18.05.2025, 2024. Adresse: <https://www.hashman.app/>.
- [88] Foreman, *Foreman Dashboard – Monitoring and management for cryptocurrency mining*, Online, Zugriff am 20.05.2025, 2025. Adresse: <https://dashboard.foreman.mn/login/>.
- [89] L. A. Barroso, U. Hölzle und P. Ranganathan, *The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines* (Synthesis Lectures on Computer Architecture), Third Edition. Springer International Publishing, 2022, ISBN: 978-3-031-01761-2.
- [90] Terahash.space, *Terahash Energy realisiert mit finnischem Fernwärmenetzbetreiber die modernste Bitcoin-Mining-Anlage der Welt und geht neue Schritte*, Online, Zugriff am 25.05.2025, 2024. Adresse: <https://terahash.space/terahash-energy-realisiert-mit-finnischem-fernwaermenetzbetreiber-die-modernste-bitcoin-mining-anlage-der-welt-und-geht-neue-schritte/>.
- [91] Euronews.next, *A Bitcoin miner and tulip grower team up to reduce costs*, Online, Zugriff am 26.05.2025, 2022. Adresse: <https://www.euronews.com/next/2022/12/14/a-bitcoin-miner-and-tulip-grower-team-up-to-reduce-costs>.
- [92] J. Li, *An NYC bathhouse is mining Bitcoin to heat its pools—and score a “rebate” on its \$20,000-a-month energy bill*, Online, Zugriff am 27.05.2025, 2023. Adresse: <https://fortune.com/crypto/2023/12/21/bathhouse-nyc-bitcoin-mining-pools/>.
- [93] regelleistung.net, *Anbieter von Regelleistung*, https://www.regelleistung.net/xspproxy/api/staticfiles/regelleistung/startseite/anbieter_regelleistung_2024-02-01.pdf, Abgerufen am 30.06.2025. Liste präqualifizierter Anbieter für FCR, aFRR und mFRR, 2024.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich – Charlie Noah Fritzsche – an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder anderweitig veröffentlicht.

Mittweida, 05. August 2025

Ort, Datum

Charlie Noah Fritzsche