

Future Energy
Lab

BERICHT

Digitale Energiesteuerung und Emissionsreduktion durch zonale Analysen

Pilotprojekt ECO zone

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel: +49 30 66 777-0
Fax: +49 30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de

Internet:

www.dena.de
www.future-energy-lab.de

Autorinnen und Autoren:

Wernicke, Lennart, dena
Kieweg, Simon, dena
Zimmermann, Hendrik, dena

Kalitzky, Thomas, Qantic GmbH
Schlüter, Cheyenne, Qantic GmbH
Beucker, Severin, Borderstep Institut
Hinterholzer, Simon, Borderstep Institut

Konzeption & Gestaltung:

Heimrich & Hannot GmbH

Stand: Dezember 2024

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.

Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): Pilotprojekt
ECO zone – Digitale Energiesteuerung und Emissionsreduktion
durch zonale Analyse



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz**

Die Veröffentlichung dieser Publikation erfolgt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) unterstützt die Bundesregierung in verschiedenen Projekten zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele im Rahmen der Energiewende.

Inhalt

Vorwort	5
Executive Summary	7
1. Einleitung und Projektüberblick	10
1.1 Motivation des Projekts	11
1.2 Zielsetzung	12
1.3 Neuheitsgrad und Innovationscharakter	12
2. Netzengpässe und Abregelung erneuerbarer Energien	14
2.1 Technischer Hintergrund zu Netzengpässen	15
2.2 Emissionssteigerung durch Netzengpassmanagement und Redispatch	15
2.3 Regionale Unterschiede der Stromerzeugung und langsamer Netzausbau als Treiber von Abregelungen	18
2.4 Bedeutung von Lastverschiebungen und anderen Flexibilitätsoptionen	19
3. Methodik zur Ermittlung der Emissionsfaktoren	20
3.1 Bestehende Ansätze zur Bilanzierung strombedingter Emissionen	21
3.2 Konzept der marginalen Emissionen	21
3.3 Zonenkonzept bei ECO zone	22
4. Anwendung von ECO zone	24
4.1 Website und API	25
4.2 Open-Source-Projekt	28
5. Übersicht über die Anwendungsfelder	29
5.1 Rechenzentren	30
5.2 Dynamische Stromtarife	31
5.3 Grüner Wasserstoff	33
5.4 Weitere Anwendungsfelder	34

6.	Potenziale zur Emissionsreduktion durch Lastverschiebungen	35
6.1	Technische Potenziale	36
6.2	Ökonomische Potenziale	37
7.	Fallstudie zu Potenzialen einer räumlichen Lastverschiebung in Rechenzentren	38
7.1	Räumliche und zeitliche Lastverlagerung in Rechenzentren als Flexibilitätsoption	39
7.2	Anforderungen und technische Voraussetzungen für die Lastverschiebung in Rechenzentren	39
7.2.1	Hohe Hardware-Reservekapazitäten (Redundanzen) als Voraussetzung für die Lastverlagerung	39
7.2.2	Virtualisierung der IT-Hardware für die verteilte und dynamische Bereitstellung von Services	40
7.2.3	Verschiedene Anwendungstypen und die Auswirkungen ihrer Charakteristika auf die Verschiebbarkeit	41
7.2.4	Existierende Ansätze und Modelle zur Lastverlagerung in Rechenzentren	41
7.3	Erhebung und Abstimmung von Beispieldaten der Lastverlagerung	42
7.3.1	Modellannahmen und Bezug zu realen Rechenzentren	42
7.3.2	Beschreibung der Effekte durch die Lastverlagerung für ausgewählte Server	43
7.4	Ermittlung der Potenziale der Lastverlagerung	43
7.4.1	Skalierung auf die ausgewählten Rechenzentren und Ergebnisse	43
7.4.2	Potenzialeinschätzung	44
8.	Handlungsempfehlungen	47
9.	Schlussfolgerungen und Ausblick	49
	Quellen	51
	Glossar	53

Vorwort

Die Energiewende ist eine ganzheitliche Herausforderung auf verschiedenen Ebenen. So erfordert sie nicht nur technologische Innovationen, sondern zusätzlich ein Umdenken bei der Art und Weise, wie wir Energie erzeugen, verteilen, zwischenspeichern und nutzen.

Ein wesentliches Ziel ist ein vollständig dekarbonisiertes Energiesystem. Doch auf dem Weg dorthin sind einige Hürden zu nehmen. Ein zentrales Problem ist die Unausgewogenheit der Lastverteilung im Stromnetz: Hohe Windenergie-Erträge im Norden und eine konzentrierte industrielle Nachfrage im Süden bei einem gleichzeitig unzureichend ausgebauten Stromnetz führen dazu, dass die Überproduktion an erneuerbar erzeugtem Strom im Norden nicht vollständig abtransportiert werden kann, während im Süden gleichzeitig fossile Kraftwerke hochgefahren werden müssen, um den residualen Energiebedarf zu decken. Dieser Zustand ist ineffizient, unwirtschaftlich und nicht nachhaltig.

Ein Ansatz, diese Hürden zu überwinden, liegt im Konzept der zonalen marginalen Emissionen – einer Methode, die die CO₂-Emissionen geografisch differenziert quantifiziert. Dabei werden nicht nur die durchschnittlichen Emissionen des gesamtdeutschen Energiemix berechnet, sondern die tatsächlichen Auswirkungen individueller Verbrauchsentscheidungen auf das Netz abgebildet. Jede zusätzliche Kilowattstunde Strom, die in einem bestimmten Moment verbraucht wird, kann je nach aktuellem Auslastungszustand des Netzes und der Region entweder aus erneuerbaren Quellen stammen oder fossile Kraftwerke beanspruchen – mit jeweils unterschiedlichen resultierenden CO₂-Emissionen. In Deutschland, wo das Stromnetz aufgrund fehlender Übertragungsleitungen durch eine starke Nord-Süd-Dynamik in Hinsicht auf Erzeugung und Verbrauch geprägt ist, kann ein Überangebot von erneuerbarer Energie im Norden bei einem gleichzeitig hohen Bedarf an Energie im Süden zu einer Verstärkung der Netzengpässe führen. Höhere CO₂-Emissionen und zusätzliche Kosten für den Redispatch-Prozess sind das Ergebnis. Lastverschiebungen, sowohl räumlich als auch zeitlich, bieten Möglichkeiten, die Nutzung fossiler Kraftwerke zu minimieren, damit Emissionen gezielt zu senken sowie Netzengpässe zu vermeiden und Redispatch-Kosten zu verringern. Indem der Stromverbrauch dorthin verlagert wird, wo gerade ein Überangebot an erneuerbaren Energien besteht – oder auf Zeiten, in denen diese Energie besonders reichlich verfügbar ist –, lassen sich Netzengpässe vermeiden und fossile Kraftwerke in anderen Regionen entlasten.

Frühere Publikationen des Future Energy Lab haben sich bereits intensiv mit dem Thema der effizienten Nutzung erneuerbar erzeugten Stroms beschäftigt: Der Bericht „Energy Sharing in Deutschland: Vom Konzept zur energiewirtschaftlichen Umsetzung“ verdeutlicht, wie trotz der bestehenden regulatorischen Hürden durch die Schaffung von Energy Sharing Communities die direkte Teilhabe an erneuerbaren Energien ermöglicht werden kann und das deutsche Stromnetz so entlastet wird (dena, 2024a). Auch der Abschlussbericht „Datenanalysen und künstliche Intelligenz im Stromverteilnetz“ hebt hervor, wie Netzbetreiber durch den Einsatz von KI und Datenanalysen ihre Netze effizienter betreiben und in Richtung Klimaneutralität transformieren können (dena, 2023a). Die Studie „Das dezentralisierte Energiesystem im Jahr 2030“ untersucht das Potenzial des Peer-to-Peer-Stromhandels und zeigt auf, wie dieser zur Kostensenkung und besseren Integration erneuerbarer Energiequellen beitragen kann und dadurch Effizienzen hebt, die bisher nicht berücksichtigt werden (dena, 2023b).

Das Modell ECO zone zielt ebenfalls darauf ab, die Netzeffizienz zu steigern: Indem es regionale und zeitliche Faktoren differenziert betrachtet, wird eine intelligente Lastverschiebung möglich und der Stromverbrauch ökonomisch wie ökologisch sinnvoll steuerbar. Durch die präzise Erfassung der marginalen Emissionen in verschiedenen Zonen des deutschen Stromnetzes, insbesondere entlang der Nord-Süd-Achse, bietet das Modell eine Grundlage für eine Lastverschiebung: Die zonale Analyse schafft eine wesentliche Grundlage dafür, den

Stromverbrauch in Echtzeit gezielt so zu steuern, dass er in Regionen und auf Zeiten mit einem Überangebot an erneuerbarer Energie verlagert werden kann. Bei einer konsequenten Umsetzung von Lastverschiebungen hätten nach eigenen Schätzungen im Jahr 2023 rund 3,5 Millionen Tonnen CO₂ eingespart werden können.¹ So können sowohl Unternehmen als auch Haushalte ihr Verbrauchsverhalten optimieren, CO₂-Emissionen reduzieren und gleichzeitig zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen. Die Visualisierungslösung des Modells ECO zone leistet einen wichtigen Beitrag zur Erschließung dieses theoretischen Potenzials, indem es Unternehmen und Haushalten eine einfache Möglichkeit bietet, Emissionsdaten zu analysieren und ihr Verbrauchsverhalten daran auszurichten. Zur Demonstration der Effektivität von Lastverschiebungen wurde im Rahmen einer Fallstudie das Modell ECO zone genutzt, um die Verlagerung digitaler Workloads zwischen zwei beispielhaften Rechenzentren in Frankfurt am Main und Paderborn zu simulieren. Diese Lastverschiebung führte über den Zeitraum von einem Jahr theoretisch zu einer CO₂-Einsparung von 193 Tonnen – was dem jährlichen CO₂-Ausstoß von etwa 25 Personen in Deutschland entspricht –, ohne dass physische Maßnahmen oder zusätzliche Erneuerbare-Energien-Anlagen erforderlich wären.

Das Projekt ECO zone ist ein Beispiel dafür, wie das Future Energy Lab digitale Innovationen in die Praxis überführt. Das Future Energy Lab der Deutschen Energie-Agentur (dena) sieht seine Aufgabe darin, die Potenziale digitaler Technologien für die integrierte Energiewende zu identifizieren und zu fördern. Hier werden digitale Lösungen entwickelt, die nicht nur technische Herausforderungen adressieren, sondern auch die Potenziale von Innovationen für eine nachhaltige Energieversorgung nutzbar machen. Dabei liegt der Fokus auf der Zusammenarbeit mit Start-ups, etablierten Unternehmen sowie Stakeholdern aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft, um sektorübergreifende Lösungen zu erarbeiten. Ein besonderer Dank gilt in diesem Projekt den Partnern des aktuellen Vorhabens, der Qantic GmbH, dem Borderstep Institut und der Clustify GmbH, deren Expertise und engagierte Zusammenarbeit maßgeblich zum Erfolg dieses Projekts beigetragen haben.

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung dieses Projekts, das einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Transformation des deutschen Energiesystems leistet. Mit diesem Bericht möchten wir Ihnen nicht nur die Ergebnisse des Projekts präsentieren, sondern Sie zudem einladen, gemeinsam mit uns die nächsten Schritte in Richtung einer klimafreundlicheren und digitalen Energiewirtschaft zu gehen.



Hendrik Zimmermann
Teamleiter
Digitale Technologien
Deutsche Energie-Agentur



Lennart Wernicke
Experte
Digitale Technologien
Deutsche Energie-Agentur

¹ Die genannten Einsparungen von rund 3,5 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2023 basieren auf einer Abschätzung des theoretischen Potenzials, das sich ergibt, wenn Lastverschiebungen konsequent entlang der Emissionsfaktoren umgesetzt werden. Dabei wurden Annahmen getroffen, die unter anderem den Anteil erneuerbarer Energien und die durchschnittlichen Emissionen der Stromversorgung betreffen. Dieser Wert entspricht etwa 0,5 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen Deutschlands im Jahr 2023 und verdeutlicht die Bedeutung gezielter Lastverlagerung als Maßnahme zur Dekarbonisierung.

Executive Summary

Die Energiewende in Deutschland stellt die Industrie vor komplexe Herausforderungen. Der Ausbau erneuerbarer Energien, geprägt von einem starken Ausbau von Windkraft im Norden bei einer bestehenden starken Konzentration der deutschen Industrie im Süden, führt zu einer großen Herausforderung für das deutsche Stromnetz: Netzengpässe, die zu einer ineffizienten Verteilung des Stroms aus erneuerbaren Energien führen. Während im Norden oft ein Überschuss an Windenergie besteht, müssen im Süden fossile Kraftwerke hochgefahren werden, um eine erhöhte Nachfrage zu decken. Dies führt nicht nur zu gesteigerten CO₂-Emissionen, sondern verursacht auch erhebliche Redispatch-Kosten. Besonders energieintensive Branchen wie die Stahl-, Chemie- oder Zementindustrie stehen dabei bereits heute unter Druck, ihre Effizienz zu steigern und Emissionen zu reduzieren. Gleichzeitig werden zukunftsorientierte Sektoren wie Rechenzentren und Elektrolyseure zunehmend relevant, da sie durch ihre hohe Flexibilität bei der Lastverschiebung neue Potenziale zur Integration erneuerbarer Energien bieten. Digitale Innovationen schaffen hier Ansätze, um kurzfristige Lastverschiebungen gezielt anzureizen, beispielsweise durch die Einführung dynamischer Stromtarife. Auch Standortentscheidungen können künftig stärker an regional differenzierten Emissionswerten ausgerichtet werden, um eine bessere Integration erneuerbarer Energien zu ermöglichen und eine Optimierung im Spannungsfeld zwischen Betriebseffizienz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu erzielen.

Im Rahmen des dena-Projekts ECO zone, dessen Ergebnisse der vorliegende Bericht zusammenfasst, wurde ein Modell für eine zonale Analyse marginaler Emissionen erstellt, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Die im Projekt entwickelte Anwendung ermöglicht eine benutzerfreundliche Visualisierung der marginalen Emissionen, sowohl zeitlich als auch regional differenziert, basierend auf geografischen und strukturellen Unterschieden im deutschen Stromnetz. Verbraucherinnen und Verbrauchern sowie Unternehmen wird es somit erleichtert, ihren Stromverbrauch gezielt in emissionsärmere Zeiten oder Regionen zu verlagern. Die Programmierschnittstelle (API) eröffnet zudem die Möglichkeit, die Daten in Energiemanagementsysteme und Smart-Home-Lösungen zu integrieren und den Energieverbrauch automatisiert zu optimieren. Durch den Open-Source-Ansatz fördert das Projekt eine breite Kollaboration, die nicht nur die Transparenz und Flexibilität erhöht, sondern auch weitere Innovationen im Bereich der Emissionsreduktion unterstützt.

Durch das Ziel, eine markt- und netzdienliche Verteilung der Energie sicherzustellen, unterstützt das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) finanzierte und vom Future Energy Lab der Deutschen Energie-Agentur durchgeführte Projekt ECO zone die Klimaziele der Bundesregierung.

Zusammen mit den Partnern Qantic GmbH, Borderstep Institut und Clustify GmbH zeigt das Future Energy Lab mit dem Projekt ECO zone die Potenziale von digitalen Technologien für die Energiewende und wie sie in die Praxis überführt werden können. Das Projekt veranschaulicht, wie durch intelligente Steuerung und Lastverschiebung sowohl die CO₂-Emissionen gesenkt werden können als auch die Netzstabilität erhöht werden kann. Die gezielte Nutzung erneuerbarer Energien trägt dabei nicht nur zur Kostensenkung bei, sondern auch zur Erreichung der deutschen Klimaziele.

Um die spezifischen Herausforderungen der verschiedenen Branchen besser angehen zu können, bietet das Modell ECO zone einen flexiblen Ansatz für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen. Dies gilt insbesondere für energieintensive Unternehmen, die mit hohen Anforderungen an ihre Nachhaltigkeitsstrategien konfrontiert sind und Maßnahmen der freiwilligen Lastverschiebung als geeignete Möglichkeit ansehen, um ihr Portfolio zu verbessern. Im Vordergrund der Betrachtungen stehen Unternehmen aus der IKT sowie wichtige Akteure aus dem zukünftigen Energiesystem wie Elektrolyseure, da diese beiden Gruppen über ein sehr großes Potenzial verfügen, ihre Lasten flexibel zu verschieben, und daher als Zielgruppen für die Anwendung des Modells ECO zone besonders geeignet sind.

Die präzise Differenzierung der Emissionsdaten bildet eine informative Grundlage, die es Stakeholdern ermöglichen soll, ihre Lasten gezielt zu verschieben und so nicht nur die Effizienz ihrer Energienutzung zu erhöhen, sondern auch ihren Beitrag zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung glaubwürdig zu dokumentieren und zukünftig steigende Kosten durch die CO₂-Bepreisung zu vermeiden. Aufgrund des Open-Source-Charakters des entwickelten Modells kann dieses flexibel in verschiedene bestehende Systeme und Prozesse eingebettet werden, um weitere Optimierungspotenziale zu heben.

Im Folgenden sind die spezifischen Vorteile und Handlungsempfehlungen für die jeweiligen Stakeholder zusammengefasst.

Vorteile des Modells ECO zone für Stakeholder

Eine effiziente Lastverschiebung auf Basis des Modells ECO zone kann auf volkswirtschaftlicher Ebene zu sinkenden Redispatch-Kosten führen und langfristig niedrigere Netzentgelte für Verbraucherinnen und Verbraucher ermöglichen. Darüber hinaus ergeben sich aus der Anwendung des Modells ECO zone weitere spezifische Vorteile für einzelne Akteursgruppen, die im Folgenden genannt werden:

1. Betreiber von Rechenzentren:

- Durch den Einsatz des Modells ECO zone können Rechenzentren nicht zeitkritische oder geografisch flexible Berechnungen auf Zeiten oder bei Vorhandensein der nötigen Betriebsmittel in Zonen mit einem Überschuss an erneuerbaren Energien verlagern.
- Dies reduziert den CO₂-Fußabdruck und kann durch die mittelbar verringerten Redispatch- und Strombezugskosten auch zu Einsparungen bei den Betriebskosten führen.

2. Betreiber von Elektrolyseuren:

- Das Modell ECO zone ermöglicht die Wasserstoffproduktion bevorzugt in Phasen hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien, was Emissionen senken kann und zudem die Abregelung von Windkraftanlagen reduziert.
- Die Anwendung des Modells ECO zone erschließt neue Erlösquellen durch die Zertifizierung von grünem Wasserstoff nach RED II und fördert die emissionsreduzierende und kosteneffiziente Standortwahl von Elektrolyseuren.

3. Anbieter dynamischer Stromtarife:

- Die Integration von zonalen Emissionsdaten in dynamische Tarifsysteme ermöglicht es, Endkundinnen und Endkunden emissionsarme Verbrauchsentscheidungen zu erleichtern und Anreize für die Nutzung erneuerbarer Energien zu schaffen. Für die Anbieter solcher Tarife ergibt sich die Möglichkeit, die Kundenzufriedenheit und -bindung insbesondere bei umweltbewussten Zielgruppen zu steigern.

4. ESG-Reporting:

- Außerdem bietet das Modell ECO zone Unternehmen, die ihre ESG-Ziele verfolgen, eine präzise Grundlage für die genaue Berichterstattung über CO₂-Emissionen. Die detaillierte Erfassung von Emissionen nach Region und Zeitpunkt ermöglicht es, die spezifischen Emissionen, die aus dem eigenen Handeln resultieren, nicht nur genauer zu berechnen, sondern auch gezielt zu reduzieren. Unternehmen können damit ihr Nachhaltigkeits-Reporting stärken und ihren Beitrag zur Dekarbonisierung fundiert dokumentieren.

5. Private Verbraucherinnen und Verbraucher

- Das Modell kann zudem von interessierten privaten Verbraucherinnen und Verbrauchern genutzt werden, die ihren Stromverbrauch in emissionsärmere Zeiträume verlagern möchten, um ihren ökologischen Fußabdruck und damit ihre Einwirkung auf die Umwelt eigenständig zu verringern.

Technologische Voraussetzungen

- Das Modell ECO zone wird über eine Webanwendung inklusive API-Anbindung bereitgestellt und kann nahtlos in bestehende Energiemanagementsysteme integriert werden.
- Zur Umsetzung von Lastverschiebungen sind automatisierte Steuerungen hilfreich, aber nicht zwingend erforderlich. Alternativ kann die Steuerung über Anreize aus dynamischen Tarifen erfolgen. Hierzu ist eine digitalisierte Erfassung des Energieverbrauchs durch intelligente Messsysteme zur Abrechnung des Tarifs nötig.
- Durch technische Ansteuerbarkeit lassen sich weitere verbrauchsseitige Flexibilitäten einbeziehen.

Handlungsempfehlungen auf Basis der im Projekt gewonnenen Einsichten

Handlungsempfehlungen zu den politischen Rahmenbedingungen

- **Infrastruktur mit Nachdruck modernisieren:** Derzeitige Anstrengungen des Gesetzgebers und seiner Organe bezüglich Smart Meter-Rollout, Stromnetz-, Speicher- und Glasfaserkabelausbau und der flächendeckenden Digitalisierung des Energiesystems sollten mit höchster Priorität weiter vorangetrieben werden. Nur wenn diese Infrastrukturprojekte erfolgreich umgesetzt werden, können allgemeine Potenziale der Energiewende und spezifische Potenziale wie die Emissionsreduktion anhand von ECO zone vollumfänglich ausgeschöpft werden.
- **Öffentlichkeitsarbeit zu Flexibilitätsnotwendigkeiten und CO₂-Preis-Entwicklung:** Die Öffentlichkeits- und Aufklärungsarbeit sollte massiv ausgebaut werden: Die Dynamisierung des Stromnetzes wird mittelfristig alle deutschen Verbraucherinnen und Verbraucher betreffen und bedeutet eine Abkehr von gewohnten Abläufen bei der Stromnutzung und –bezahlung. Je früher und unmissverständlicher die Öffentlichkeit über Zusammenhänge aufgeklärt und auf Veränderungen vorbereitet wird, desto reibungsloser kann die Transformation des Energiesektors gelingen. Hierzu gehört auch, dass Wirtschaft und Bevölkerung deutlich offensiver auf den zukünftig steigenden CO₂-Preis hingewiesen werden sollte.
- **Emissionsfaktoren als Entscheidungskriterium:** Der Gesetzgeber sollte den Faktor der Emissionsreduktion in seinen Entscheidungen bezüglich des Energiesystems berücksichtigen und in Verwaltung, Vergabeverfahren, Erteilung von Subventionen, etc. als eigenständiges und entscheidendes Kriterium berücksichtigen.
- **Standortförderung anhand lokaler marginaler Emissionen:** Standortförderung und Wirtschaftsraumentwicklung sollten auch anhand der Höhe lokaler marginaler Emissionen erfolgen.
- **Verpflichtendes Emissionsmonitoring:** Sowohl innerhalb der staatlichen Verwaltung als auch bei öffentlichen Vergaben sollte Emissionsmonitoring verpflichtend sein.
- **Ausweitung des ESG-Reportings:** Die Bundesregierung sollte für ESG-Reporting werben und mit ihren Organen beispielhaft vorgehen.

- **Regionalisierung der Kostenkomponenten des Strompreises:** Der Gesetzgeber sollte untersuchen, ob eine Regionalisierung der Kostenkomponenten des Strompreises basierend auf Emissionsfaktoren perspektivisch ein gangbarer Weg für die CO₂-Neutralität ist. Energiepolitische Instrumente, die dafür in der Vergangenheit unter anderem bislang diskutiert wurden, sind zum Beispiel eine Regionalisierung und Dynamisierung von Netzentgelten oder eine komplexe Gebotszonenanpassung für Großhandelspreise.
- **Forschung in den Bereichen Carbon Aware Computing und geografische Lastverlagerung in Rechenzentren** sollte gezielt gefördert werden, ebenso Virtualisierungen und das dynamische Scheduling in Rechenzentren. So können perspektivisch Workloads zwischen den Instanzen verschiedener Cloud-Anbieter verschoben werden.

Wichtigste Handlungsempfehlungen an privatwirtschaftliche Akteure

- **Ausrichtung des Workload-Managements auf dynamische Energiepreise und Emissionsfaktoren:** Durch die gezielte Anpassung des Stromverbrauchs an dynamische Tarife und regionale Emissionsfaktoren können private Akteure, insbesondere Rechenzentren, deutliche Emissionseinsparungen erreichen.
- **Förderung von Lastverschiebung bei energieintensiven Prozessen:** Bei industriellen Anwendungen wie Elektrolyseuren oder Kühlanlagen sollten die Betriebszeiten emissionsarm geplant und dynamisch gesteuert werden, um Kosten und Emissionen zu senken.
- **Nutzung der Website und API von ECO zone für eine emissionsarme Steuerung:** Die Integration der Daten aus ECO zone in bestehende Energiemanagementsysteme unterstützt eine direkte Anpassung des Verbrauchs an aktuelle Emissionswerte, was private Akteure befähigt, ihren ökologischen Fußabdruck gezielt zu reduzieren.

1. Einleitung und Projektüberblick

Der Ausbau und die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien (EE) in Deutschland erfordern einen Ausbau der Stromnetze. Zusätzlich ist ein effizienter Umgang mit Netzengpässen entscheidend. Aufgrund solcher Engpässe müssen EE-Anlagen häufig abgeregelt werden, weil ihr Strom nicht ins Netz eingespeist werden kann, während gleichzeitig in anderen Regionen Deutschlands fossile Kraftwerke im Rahmen des Redispatch-Prozesses hochgefahren werden müssen, um den Strombedarf zu decken. Die Bundesnetzagentur bezifferte das Volumen der Engpassmanagementmaßnahmen im Jahr 2023 auf 34.297 Gigawattstunden, was Kosten von 3,1 Milliarden Euro verursachte (SMARD.de, 2024).

Ein oft ignoriertes Aspekt dieser Maßnahmen ist die damit verbundene Erhöhung der CO₂-Emissionen, da EE-Anlagen abgeschaltet und fossile Kraftwerke, insbesondere Kohlekraftwerke, hochgefahren werden. Die Abregelung betrifft aktuell vor allem klimafreundliche Windkraftanlagen (Onshore und Offshore), während fossile Kraftwerke derzeit die Hauptquelle für die lasterhöhenden Maßnahmen darstellen.

Würde es gelingen, den Stromverbrauch zeitlich und räumlich in Regionen mit überschüssigen erneuerbaren Energien zu verlagern oder durch temporäre Lastreduktion das Hochfahren fossiler Kraftwerke zu vermeiden, könnten signifikante Mengen an CO₂-Emissionen eingespart werden. Allerdings sind die wirtschaftlichen Anreize für solche netzdienlichen (s. Kapitel 1.3) und emissionsreduzierenden Maßnahmen durch Lastverschiebung derzeit begrenzt. Mit § 13k Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) „Nutzen statt Abregeln“ befindet sich aber mittlerweile ein Konzept in der Erprobungsphase (Bundesnetzagentur, 2024).

Alternativ hierzu setzt der Ansatz des Projekts ECO zone auf freiwillige Anreize für Marktteilnehmer, insbesondere bei Unternehmen, die ökologisch sensibilisierte Kundengruppen ansprechen oder im Rahmen der Nachhaltigkeitsberichterstattung (ESG-Reporting) ambitionierte Klimaziele verfolgen. Hierdurch schafft ECO zone bereits heute einen allgemeinen Rahmen für Lastverschiebungen, der auch für Anwendungen gilt, die nicht dem kleinen Anwendungsbereich von „Nutzen statt Abregeln“ zuzuordnen sind. Um die Zusammenhänge der Emissionsvermeidungspotenziale im Engpassmanagement zu verdeutlichen, wurde im Projekt ein innovatives Konzept zur Darstellung marginaler zonaler Emissionen entwickelt. Dieses Konzept ermöglicht eine verursachungsgerechte Erfassung der Emissionen und bietet Marktakteuren die Möglichkeit, sie durch Lastverschiebungen zu reduzieren. Im Rahmen des Projekts ECO zone wurde eine Webanwendung mit einer API-Schnittstelle entwickelt, die in bestehende Anwendungen zur Lastverschiebung integriert werden kann. Erste Schätzungen legen nahe, dass bei einer konsequenten Umsetzung im Jahr 2023 rund 3,5 Millionen Tonnen CO₂ hätten eingespart werden können – eine Größenordnung, die den jährlichen Emissionen

von Industrien wie der Glas- oder Papierherstellung oder Kokereien in Deutschland entspricht.²

Im Folgenden werden zunächst die Motivation sowie die Zielsetzung und der Innovationscharakter des Projekts ECO zone vorgestellt. Daraufhin werden in Kapitel 2 technische Aspekte von Netzengpässen und der Abregelung von EE-Erzeugungsanlagen erläutert, um den Leserinnen und Lesern die theoretischen Hintergründe der marginalen zonalen Emissionen näherzubringen, bevor in Kapitel 3 tiefergehend auf die genutzte Methodik zur Ermittlung der marginalen Emissionen eingegangen wird. Um den Neuheitsgrad von ECO zone zu unterstreichen und den Leserinnen und Lesern eine Kontextualisierung zu bieten, werden daher neben der erarbeiteten Methodik von ECO zone zusätzlich bereits bestehende Ansätze zur Bilanzierung strombedingter Emissionen vorgestellt und voneinander differenziert.

Anschließend wird in Kapitel 4 die Anwendung von ECO zone inklusive der im Projekt entwickelten Website und der hierüber zu erreichenden API vorgestellt sowie auf den Open-Source-Charakter des Projekts eingegangen. In Kapitel 5 werden mögliche Anwendungsfelder, wie die Rechenzentrumsbranche, dynamische Stromtarife, Produktionseinheiten von grünem Wasserstoff und weitere, analysiert und die Einflussmöglichkeiten von ECO zone skizziert. Darauf folgend wird in Kapitel 6 auf die technischen und ökonomischen Potenziale der ermittelten Anwendungsfelder eingegangen, bevor in Kapitel 7 in einer detaillierten Fallstudie die tatsächlichen Auswirkungen der Implementierung von ECO zone in den Betrieb zweier Rechenzentren betrachtet werden.

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Projekt ECO zone fasst Kapitel 8 die Handlungsempfehlungen zu den regulatorischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie die an privatwirtschaftliche Akteure zusammen. Zum Schluss zieht Kapitel 9 ein abschließendes Resümee über die Anwendbarkeit, die Relevanz und die Erfolgchancen des Projekts und geht auf nötige politische und technische Neuerungen ein, um eine erfolgreiche Umsetzbarkeit des Projekts und damit eine stärkere Nutzung von erneuerbaren Energien zu fördern.

1.1 Motivation des Projekts

Die Abregelung erneuerbarer Energien aufgrund von Netzengpässen tritt auf, wenn die Kapazität des Stromnetzes nicht ausreicht, um die erzeugte Energie aus erneuerbaren Quellen wie Wind- oder Solarkraft in vollem Umfang zu transportieren und auch keine Alternativen wie Speicher oder flexible Last zur Verfügung stehen. Diese Engpässe entstehen in Regionen, in denen das Netz durch mangelnden Netzausbau nicht genügend Leitungen oder Kapazitäten hat, um diese Energie zu den Verbrauchszentren zu leiten.

² Eigene Berechnung auf der Basis der EE-Abregelungsmengen und durchschnittlichen Emissionen der allgemeinen Stromversorgung

Typischerweise ist dies ein Problem in Deutschland in der Nord(ost)-Süd(west)-Verteilung: Im Norden wird durch Off-shore- und Onshore-Windparks häufig mehr Strom produziert, als über das Netz transportiert werden kann, während im Süden, wo der Energiebedarf aufgrund einer größeren Dichte an industriellen Verbrauchern höher ausfällt, fossile Kraftwerke zugeschaltet werden müssen, um den anfallenden Bedarf zu decken. Um das Netz zu stabilisieren und Überlastungen zu vermeiden, wird die Einspeisung von erneuerbar erzeugtem Strom zeitweise reduziert oder ganz gestoppt – dies nennt man „Abregelung“ im Rahmen des Einspeisemanagements bzw. Redispatch.

Dieser Vorgang führt dazu, dass potenziell umweltfreundliche Energie nicht genutzt wird, obwohl sie verfügbar wäre. Stattdessen müssen konventionelle Kraftwerke in anderen Regionen hochgefahren werden, was zu höheren CO₂-Emissionen führt. Ferner resultieren daraus zusätzliche Kosten für den Redispatch, da nicht nur die Stromerzeugung in fossilen Kraftwerken mit höheren Produktionskosten verbunden ist, sondern auch die Abregelung der EE-Anlagen deren Betreibern finanziell vergütet werden muss, da sie aufgrund des Redispatch den erzeugten Strom nicht ins Netz einspeisen und somit nicht vermarkten können. Diese Abregelungen sind somit ein Hindernis für die Nutzung erneuerbarer Energien sowie für die Dekarbonisierung des Energiesektors.

Die Motivation für die Betrachtung von Zonen im Stromnetz ergibt sich aus der Notwendigkeit, die vorangehend beschriebenen regionalen Unterschiede in der Energieerzeugung und -nutzung sowie die daraus resultierenden Netzengpässe besser zu verstehen und effizienter zu steuern.

Die Analyse der Emissionen durch den zusätzlichen Verbrauch einer weiteren Kilowattstunde Strom innerhalb dieser Zonen ermöglicht es, regionale Unterschiede, insbesondere die Nord-Süd-Verteilung in Deutschland, gezielt zu berücksichtigen. In nördlichen Regionen Deutschlands, wo viel Windenergie produziert wird, könnte eine gezieltere Steuerung von Verbrauchseinrichtungen durch betriebswirtschaftlich sinnvolle Lasterhöhung Abregelungen verringern. In südlichen Regionen, die noch häufig auf fossile Energie angewiesen sind, kann durch eine gezielte Verbrauchsreduktion in Zeiten von Netzengpässen der Bedarf an konventionellen Kraftwerken verringert werden.

Das im Projekt entwickelte Zonenkonzept schafft die Möglichkeit, ein intelligentes, dynamisches Management von Energieflüssen zu etablieren. Dadurch können erneuerbare Energien optimal genutzt und Netzengpässe reduziert und der Redispatch-Aufwand kann minimiert werden.

Insgesamt wird hierdurch eine gezielte, lokal abgestimmte Steuerung des Stromverbrauchs in Form von Lastverschiebungen ermöglicht, was sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile bietet. Dies ist ein wichtiger Schritt hin zu einer nachhaltigeren und effizienteren Energieverteilung.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Projekts war die Konzeption, Berechnung und Bereitstellung von Emissionsfaktoren³, die in zeitlicher und räumlicher Dimension ausreichend hoch aufgelöst sind, um Emissionsreduktionen durch Lastverschiebungen wirkungsvoll zu initiieren. Dabei werden Verbräuche gezielt von Zeiträumen mit hohen spezifischen Emissionen auf emissionsärmere Zeiten verlagert. In einigen Fällen können auch räumliche Lastverschiebungen zwischen verschiedenen Zonen zu einer Reduktion der Emissionen beitragen (siehe Fallbeispiel Rechenzentren, Kapitel 7). Die Emissionsfaktoren werden durch eine Webanwendung inklusive API potenziellen Nutzerinnen und Nutzern bereitgestellt, die sie wiederum eingängig und intuitiv zur Planung von Lastverschiebungsmaßnahmen mit ihren eigenen Prozessen verknüpfen können, beispielsweise durch die Implementierung der Anwendung ECO zone in bestehende Energiemanagementsysteme. Eine Vielzahl von Anwendungen in den Bereichen Industrie, Handel und Dienstleistungen sowie in Privathaushalten sind für solche Lastverschiebungen geeignet. Im Rahmen des Projekts wurden Schwerpunktbereiche identifiziert, die gezielt im begleitenden Fachkreis untersucht wurden. Diese Schwerpunkte umfassen Rechenzentren, dynamische Stromtarife und grünen Wasserstoff und werden in Kapitel 5 ausführlich beschrieben. Im Projekt werden für diese Bereiche Potenziale aufgezeigt und Handlungsempfehlungen abgeleitet (siehe Kapitel 8). Darüber hinaus wird in Kapitel 7 anhand einer Fallstudie das Potenzial im Bereich der Rechenzentren quantifiziert.

1.3 Neuheitsgrad und Innovationscharakter

Während es bereits andere Projekte zur hochauflösenden Erfassung von Emissionen gibt, hebt sich das vorliegende Konzept durch die Berücksichtigung von Netzengpässen ab (vgl. hierzu Electricity Maps, 2024). Anstatt sich an politischen Grenzen zu orientieren, richtet sich dieses Projekt nach den technischen Rahmenbedingungen des Energiesystems. Dadurch werden neben der Emissionsreduktion netzdienliche Anreize geschaffen, die im Folgenden aufgeführt werden. Netzdienlichkeit bzw. Netzorientiertheit wird hierbei als ein Agieren definiert, das „einen Beitrag zum Erhalt eines störungsfreien Netzbetriebs zur Vermeidung von Netzengpässen“ leistet (vgl. dena 2024b). In diesem Sinne leistet Netzdienlichkeit einen Beitrag zu einem sicheren, wirtschaftlichen, effizienten und ökologischen Betrieb des zunehmend

³ Bei den Emissionsfaktoren handelt es sich grundsätzlich um spezifische Emissionen [kgCO₂e/MWh] der Stromversorgung, die es einem Verbraucher ermöglichen sollen, die Emissionsintensität des verbrauchten Stroms einzuschätzen.

auf erneuerbare Energien gestützten Energiesystems. Während bestehende Ansätze ihren Fokus ausschließlich auf die ökologische oder effiziente Betriebsweise des Stromnetzes legen, ermöglicht das Eco zone-Modell durch die zusätzliche Berücksichtigung von Netzengpässen einen sichereren Betrieb des Netzes. Fehlanreize, die bei anderen Methoden auftreten und potenziell kritische Netzsituationen verschärfen könnten, werden weitgehend vermieden. Das ECO zone-Modell bietet in diesem Sinne ein zusätzliches Instrument für Netz- und Marktdienlichkeit, fördert darüber hinaus allerdings auch einen nachhaltigen, ökologischen Betrieb. Die Verbindung von ökologischen, ökonomischen und netzdienlichen Anreizen ist wesentliches Element von ECO zone, das in Standardansätzen fehlt.

Zusätzlich bietet ECO zone mittel- bis langfristige Anreize für die Ansiedlung von Verbrauchern in Regionen mit einer hohen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien. Das verbessert die EE-Integration und fördert eine zunehmend auf erneuerbaren Energien basierende Versorgung im Sinne des EnWG. Die gezielte Ansiedlung energieintensiver Verbraucher (z. B. von Rechenzentren) in diesen Regionen erhöht den direkten Verbrauch von lokal erzeugtem EE-Strom. Dies reduziert die Notwendigkeit zur Abregelung von Wind- und Solarenergie, steigert die Effizienz der Energieversorgung und unterstützt so die langfristige Stabilität und Nachhaltigkeit des Energiesystems.

Es gibt Projekte, die grundsätzlich ähnliche Ziele wie das Projekt ECO zone verfolgen, wie die Reduzierung des Hochfahrens fossiler Kraftwerke durch Lastverschiebungen. Jedoch weisen diese Ansätze wesentliche Unterschiede zu dem vorliegenden Konzept auf:

- Sie bieten meist keine Schnittstellen (APIs) zur Integration in Energiemanagementsysteme oder Smart-Home-Lösungen (Ökoheld, 2024).
- Es fehlen detaillierte Emissionsfaktoren, sodass ein Monitoring der Emissionen oder der erzielten Emissionsreduktionen nicht möglich ist.
- Oft bleibt die genaue Methodik der Berechnungen intransparent oder es bestehen Abhängigkeiten von bestimmten Stromanbietern, was eine unabhängige Nutzung erschwert (Youle, 2024).

Eine vergleichbare Anwendung zu marginalen Emissionsraten im Strommarkt ist von PJM in den USA umgesetzt worden (PJM Interconnection, 2024).

Der Ansatz des Projekts ECO zone, der auf freiwilliger Lastverschiebung zur Emissionsreduktion auf Basis zentraler Emissionsfaktoren basiert, unterscheidet sich auch grundlegend von § 13k EnWG („Nutzen statt Abregeln“). Während § 13k EnWG gezielt finanzielle Anreize bietet, um einen klar definierten, vergleichsweise kleinen Kreis von Nutzern zur flexiblen Steuerung ihres Energieverbrauchs zu motivieren, setzt der Ansatz von ECO zone auf eine breite freiwillige Teilnahme.

Die wichtigsten Unterschiede sind:

	§ 13k EnWG	ECO zone
Ziel	Anreize zur Nutzung von überschüssigem, erneuerbar produziertem Strom, um eine Abregelung von EE-Erzeugungsanlagen zu verhindern	
Zielgruppen	Primär Neuanlagen aus den Bereichen Power-to-Heat und Elektrolyse	Alle Unternehmen und Privathaushalte, die durch Lastverschiebung ihren CO ₂ -Fußabdruck aktiv reduzieren möchten
Anreize	Ökonomischer Anreiz durch einen besonders günstigen Vorzugspreis für die Abnahme von überschüssigem Strom aus EE-Erzeugung und finanzielle Incentivierung für das Vermeiden von Abregelung	Ideeller Anreiz, Nutzung für individuelle Entwicklung, Imagekampagnen etc. Gegebenenfalls ökonomischer Anreiz durch Integration in das ESG-Reporting

2. Netzengpässe und Abregelung erneuerbarer Energien

In diesem Abschnitt werden einige grundlegende Konzepte erläutert, die für das Verständnis dieses Projekts entscheidend sind. Es werden die bestehenden Maßnahmen zur Vermeidung von Netzengpässen beleuchtet, die regelmäßig zur Abregelung von erneuerbaren Energien führen, insbesondere der sogenannte Redispatch. Außerdem werden die technischen Hintergründe erklärt, die zu Netzengpässen führen, wie zum Beispiel die ungleichmäßige geografische Verteilung von Stromerzeugung und -verbrauch. Abschließend wird auf die Bedeutung von Lastverschiebungen eingegangen und dargelegt, wie sie zu einer Reduktion von Engpässen und von Emissionen eingesetzt werden können.

2.1 Technischer Hintergrund zu Netzengpässen

Die Betriebsplanung von Übertragungsnetzen erfordert eine präzise Vorausberechnung möglicher Überlastungen. Dabei werden Grenzwertverletzungen für wesentliche Netzelemente wie Leitungen und Transformatoren ermittelt, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Grenzwertverletzungen entstehen, wenn die elektrischen Grenzen eines Netzelements überschritten werden, was zu einer Überlastung oder einem Ausfall führen kann. Üblicherweise ist in der Betriebsplanung die maximal zulässige Stromstärke (I_{max}) ein entscheidender Parameter – sie gibt die maximal zulässige Stromstärke in Kiloampere (kA) an, die ein Netzelement, wie zum Beispiel eine Leitung oder ein Transformator, sicher übertragen kann, ohne dass es zu thermischen Schäden kommt (Schwab, 2015). Um eine einfache Vergleichsmöglichkeit bieten zu können, wird die Belastung eines Betriebsmittels in Prozent seiner maximalen Strombelastbarkeit angegeben (Thurner et al., 2018).

$$\text{loading_percent} = \frac{i_{ka}}{i_{max_ka} \cdot df \cdot \text{parallel}} \cdot 100$$

Ein hoher Prozentwert deutet auf eine starke Beanspruchung des Betriebsmittels hin, ab einem bestimmten Grenzwert (z. B. 80 Prozent) müssen Netzbetreiber präventive Maßnahmen einleiten, um eine prospektive Überlastung zu verhindern.

Hinzu kommt, dass Übertragungsnetze in der Regel N-1-sicher betrieben werden. Das N-1-Kriterium besagt, dass das Netz so betrieben wird, dass der Ausfall eines beliebigen Netzelements (z. B. einer Freileitung) keine Grenzwertverletzung der verbleibenden Netzinfrastruktur verursacht. Dies garantiert, dass auch im Falle eines unvorhergesehenen Ausfalls die Grenzwerteinhaltung und somit die Versorgungssicherheit gewährleistet bleiben.

In den europäischen Betriebsplanungsprozessen DACF (Day-Ahead Congestion Forecast) und IDCF (Intra-Day Congestion Forecast) führen Netzbetreiber umfangreiche Simulationen durch, um mögliche Grenzwertverletzungen vorherzusagen. Dabei werden verschiedene Ausfallszenarien analysiert, um die Robustheit des Netzes zu überprüfen. Die sogenannte

Ausfallvariantenrechnung (Contingency Analysis) untersucht, wie sich der Ausfall einzelner Netzelemente auf das gesamte Übertragungsnetz auswirkt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Berechnungen wird ermittelt, ob Redispatch-Maßnahmen notwendig sind.

Für die Engpassbehebung werden unter anderem Optimierungsverfahren eingesetzt, wie beispielsweise die Gemischtganzzahlige lineare Optimierung. In solchen Verfahren werden komplexe Lastflüsse im Übertragungsnetz simuliert und hinsichtlich einer optimalen Lösung modelliert, die die Netzbelastung reduziert (Scheufeld, 2019). Im Rahmen dieser Optimierungen werden auch Nebenbedingungen berücksichtigt, die sicherstellen, dass die Netzbelastungen innerhalb der zulässigen Grenzen bleiben, zum Beispiel die Austauschleistungen an den Grenzen zu benachbarten Netzbetreibern. Über die Zielfunktion werden die Kosten für die Redispatch-Maßnahmen minimiert. Maßnahmen der Digitalisierung im Netzbereich führen perspektivisch dazu, dass der Netzbetrieb effizienter gestaltet und Redispatchmaßnahmen weiter reduziert werden könnten.

2.2 Emissionssteigerung durch Netzengpassmanagement und Redispatch

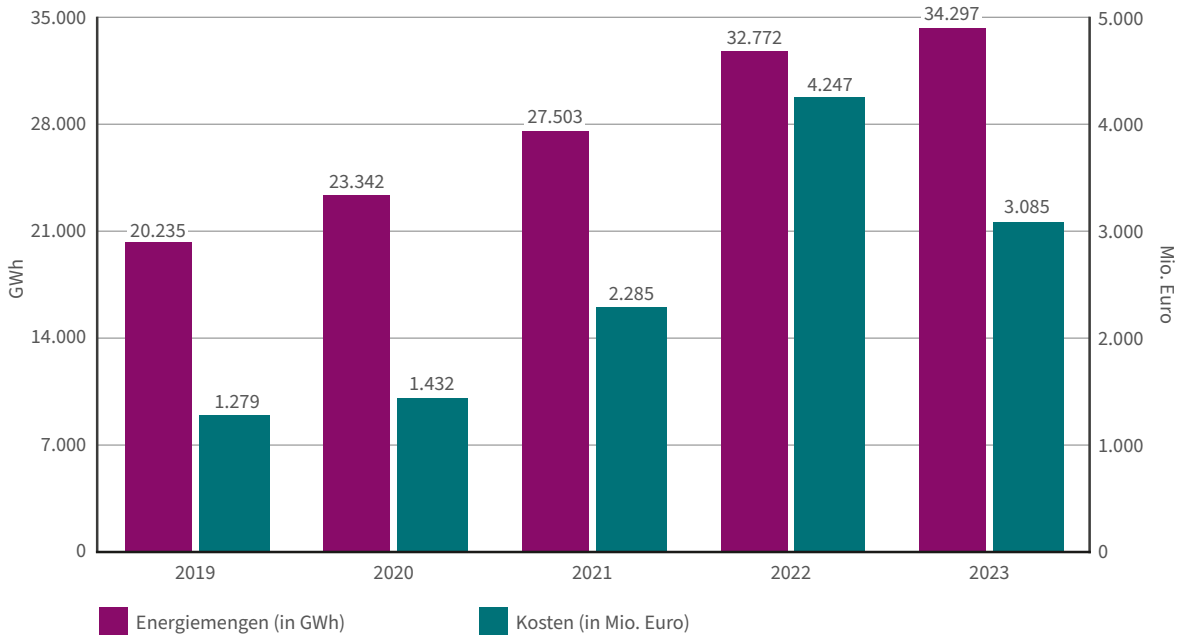
Redispatch-Maßnahmen sind die wichtigste Methode, die von den Netzbetreibern angewendet wird, um Überlastungen im Betrieb des Stromnetzes zu verhindern. Dabei handelt es sich um eine Anforderung zur Anpassung der Wirkleistungseinspeisung von Energieerzeugungseinheiten. Vor dem Engpass – in Richtung des Leistungsflusses gesehen – erfolgt eine Absenkung der Wirkleistungseinspeisung eines oder mehrerer Kraftwerke bzw. von EE-Anlagen, während gleichzeitig die Wirkleistungseinspeisung anderer Kraftwerke hinter dem Engpass erhöht wird. Dadurch bleibt die Gesamtleistungseinspeisung im Netz nahezu unverändert, während der Engpass beseitigt bzw. vermieden wird.

Auf der Website Netztransparenz.de, die gemeinschaftlich von den deutschen Übertragungsnetzbetreibern betrieben wird, werden die tagesscharfen Redispatch-Maßnahmen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber veröffentlicht (Netztransparenz.de, 2024). Diese Informationen werden fortlaufend (mindestens täglich, in der Regel mehrmals täglich) aktualisiert und enthalten sowohl durchgeführte als auch geplante Maßnahmen für den folgenden Tag in 15-Minuten-scharfer Auflösung.

Weitere Informationen zu den Redispatch-Maßnahmen in 2022 finden sich auf der Seite der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur, 2024).

Aus den veröffentlichten Maßnahmen wird ersichtlich, dass es besonders häufig zu Situationen kommt, bei denen die Leistung aus EE-Anlagen (z. B. Offshore-Wind) im Norden

Maßnahmenvolumen und Kosten des Netzengpassmanagements



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf www.smard.de/page/home/topic-article/444/213590, 2024

Abbildung 1: Maßnahmenvolumen und Kosten des Netzengpassmanagements

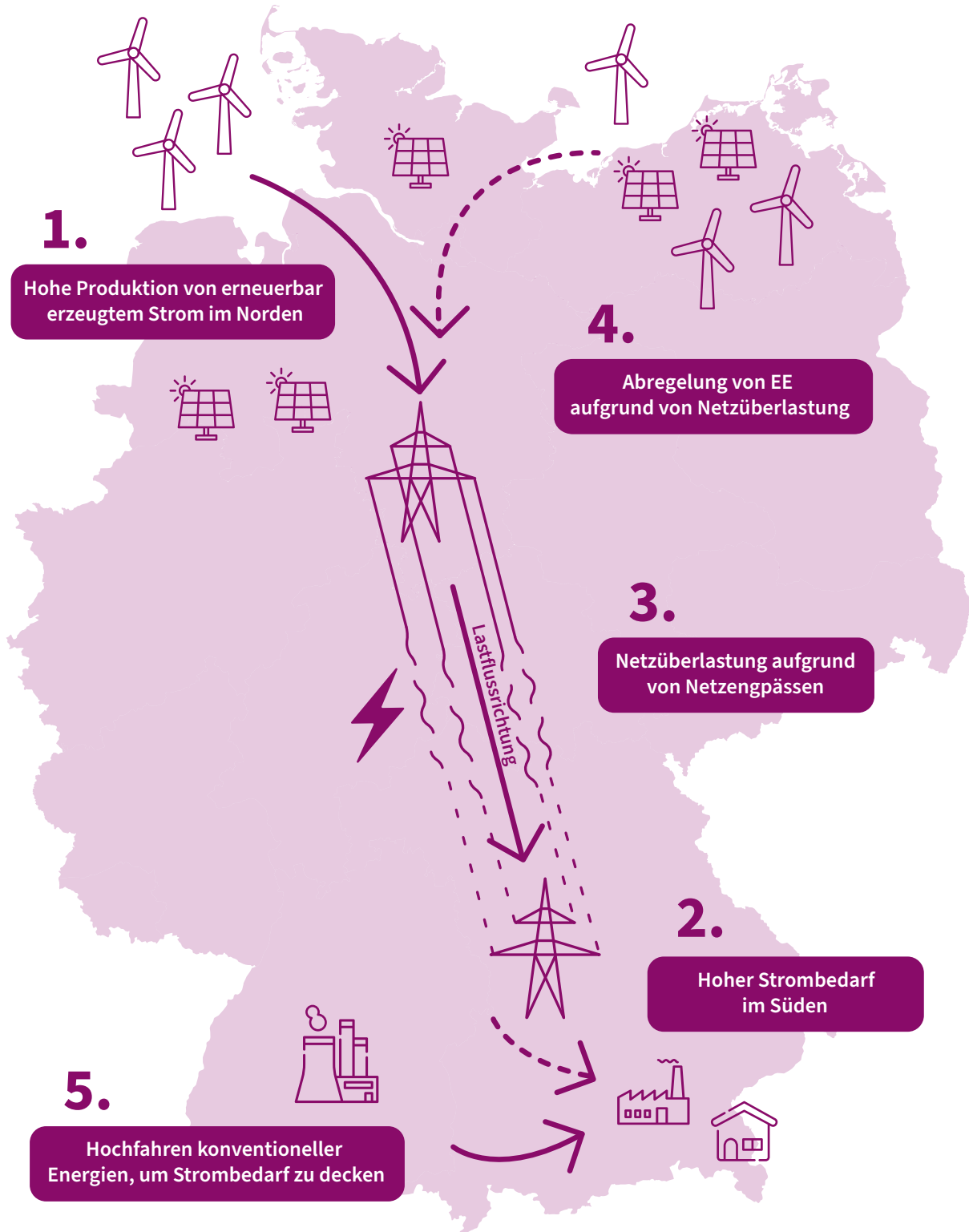
reduziert wird, um einem Engpass entgegenzuwirken, und gleichzeitig eine entsprechende Erhöhung der Erzeugung aus fossilen Kraftwerken im Süden angefordert wird.

Hierdurch ergeben sich Mehremissionen, da zur Deckung des Verbrauchs im Süden nicht oder nur teilweise auf den im Norden erzeugten EE-Strom zurückgegriffen werden kann, sondern fossile Kraftwerke genutzt werden müssen. Selbst wenn relativ emissionsarme Kraftwerke wie hocheffiziente Gas- und Dampf-Kombikraftwerke (GuD) zum Einsatz kämen, würden sich signifikante Mehremissionen durch den Redispatch ergeben, da der Strom aus emissionsfreier EE-Erzeugung teilweise oder gar vollständig ungenutzt bleibt. In der Praxis wird das Problem noch dadurch verschärft, dass es sich

bei den im Redispatch hochgefahrenen Kraftwerken überwiegend um emissionsreiche Kohlekraftwerke handelt (Bundesnetzagentur, 2022, S. 15).

Nach dem Konzept der zonalen marginalen Emissionen wird jede zusätzlich verbrauchte Einheit Strom im Norden als emissionsfrei bewertet, da sie kalkulatorisch zu einer Verringerung der im Redispatch zu drosselnden EE-Leistung führt. Jede weniger verbrauchte Einheit Energie wird im Süden mit dem Emissionsfaktor des im Redispatch angeforderten Kraftwerks bewertet. Hierdurch wird die heterogene räumliche Verteilung von Verbrauch und Erzeugung sachgerecht berücksichtigt, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

Netzengpass bei Netzüberlastung zwischen Nord- und Süddeutschland



Quelle: Eigene Darstellung, dena, 2024

Abbildung 2: Netzengpass bei Netzüberlastung zwischen Nord- und Süddeutschland

2.3 Regionale Unterschiede der Stromerzeugung und langsamer Netzausbau als Treiber von Abregelungen

Erneuerbare Energien, insbesondere Windkraft und Photovoltaik, sind in Deutschland geografisch ungleich verteilt. Windkraftanlagen werden primär in den windreichen Regionen im Norden und Nordosten des Landes installiert, da dort die Windverhältnisse etwas günstiger sind und bereits in niedrigen Höhen hohe Erträge zu erwarten sind. Diese Regionen umfassen vor allem die Küstengebiete der Nord- und Ostsee sowie das flache Binnenland in Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen. Im Süden und Westen des Landes hingegen ist das Windaufkommen etwas schwächer, was für den Bau von Windkraftanlagen bedeutet,

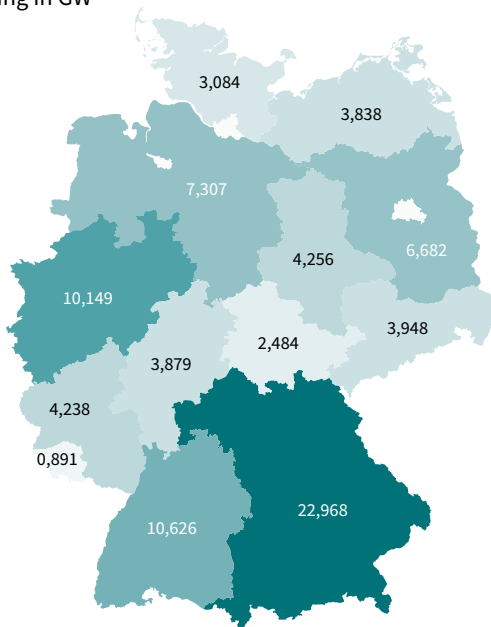
dass sie mit höheren Türmen errichtet werden müssen, um vergleichbare Erträge zu erwirtschaften, was mit höheren Investitionskosten einhergeht.

Die Photovoltaik hingegen konzentriert sich stärker auf den sonnigeren Süden und Südwesten Deutschlands, wo es in Regionen wie Bayern und Baden-Württemberg überdurchschnittlich viele Solaranlagen gibt. Die geografischen Bedingungen machen diese Regionen besonders geeignet für die Solarstromerzeugung, während im Norden weniger Solarstrom produziert wird.

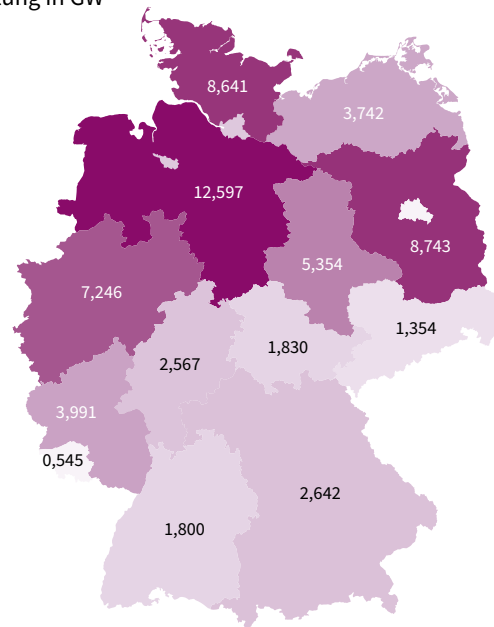
In Abbildung 3 sind die vorhandenen Kapazitäten von Windkraft und Photovoltaik in den Bundesländern dargestellt (Angaben in Megawatt Nennleistung).

Installierte Leistung von Photovoltaik und Windkraft nach Bundesländern (in GW)

Installierte Photovoltaik – Leistung in GW



Installierte Windkraft – Leistung in GW



Quelle: Daten basierend auf Bundesnetzagentur: Monitoringbericht 2023 (Stand: Dezember 2023) und Marktstammdatenregister (Datenstand: 19.03.2024) sowie (Hintemann et al., 2022)

Abbildung 3: Verteilung von Photovoltaik und Windkraft auf die Bundesländer (installierte Leistung in GW)

Die ungleiche räumliche Verteilung von Wind- und Solarenergie führt zu erheblichen Herausforderungen für das Stromsystem. Im Norden wird deutlich mehr Strom durch Windkraft produziert, als lokal verbraucht werden kann. Diese Überproduktion muss über große Entfernungen in die verbrauchsstarken Regionen im Süden Deutschlands transportiert werden, wo der Strombedarf aufgrund von Industrie und Bevölkerungsdichte höher ist. Dies erfordert den Ausbau des bestehenden Hoch- und Höchstspannungsnetzes (Drehstrom) sowie von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ), um die räumliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Verbrauch zu überbrücken. Der Netzausbau verläuft jedoch langsamer als in früheren Netzentwicklungsplänen vorgesehen, was zu Engpässen und ineffizienter Nutzung der erneuerbaren Energiequellen führen kann (Löschel et al., 2024, S. 10 f.).

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der zeitlichen Schwankung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Wind- und Solarenergie sind wetterabhängig und unterliegen daher starken Schwankungen. Während es an windigen Tagen im Norden zu einer Überproduktion von Windstrom kommen kann, unterschreitet die Produktion in windstillen Phasen teilweise deutlich den regionalen Verbrauch. Ebenso variiert die Solarstromerzeugung im Tages- und Jahresverlauf: Während im Sommer zur Mittagszeit oft ein Überangebot an Solarstrom besteht, sinkt die Produktion in den Abendstunden und im Winter stark ab. Diese zeitlichen Schwankungen machen es notwendig, flexible Lösungen für die Speicherung, Verteilung und Nutzung des Stroms zu finden.

Insgesamt stellt die räumliche und zeitliche Verteilung der erneuerbaren Stromerzeugung eine der größten Herausforderungen der deutschen Energiewende dar. Sie erfordert nicht nur technische Innovationen, sondern auch politische und gesellschaftliche Anstrengungen, um eine zuverlässige und klimafreundliche Energieversorgung für die Zukunft zu gewährleisten.

2.4 Bedeutung von Lastverschiebungen und anderen Flexibilitätsoptionen

Um den Herausforderungen der räumlichen und zeitlichen Diskrepanzen von Stromerzeugung und -verbrauch zu begegnen, werden grundsätzlich mehrere Ansätze verfolgt. Der Netzausbau ist eine der wichtigsten Maßnahmen, um Strom von den Erzeugungszentren im Norden zu den Verbraucherschwerpunkten im Süden zu transportieren. Gleichzeitig spielt der Ausbau von Speicherkapazitäten eine entscheidende Rolle. Batterien, Pumpspeicherkraftwerke und in Zukunft auch die Umwandlung von überschüssigem Strom in Wasserstoff, als Power-to-Gas bezeichnet, könnten dazu beitragen, die Energie

besser über längere Zeiträume zu speichern und bei Bedarf bereitzustellen.

Darüber hinaus gewinnen flexible Stromverbraucher und intelligente Netze an Bedeutung. Mithilfe digitaler Technologien können Verbrauch und Erzeugung besser aufeinander abgestimmt werden. Hierbei wird gesteuert, wann und wo Strom produziert bzw. verbraucht wird. So kann erneuerbar erzeugter Strom in Zeiten genutzt werden, in denen er in großen Mengen zur Verfügung steht. Außerdem kann im Falle von Netzengpässen der Verbrauch räumlich näher an den Ort der Erzeugung verlagert werden, also vor einen Netzengpass⁴. Elektrische Verbraucher können sich somit netzdienlich verhalten, wenn sie ihren Stromverbrauch je nach Erzeugungs- und Netzzustand zeitlich verschieben oder sogar räumlich an einen anderen Ort verlagern können (siehe hierzu auch Definition von Flexibilität gemäß WindNODE in WindNODE Konsortium, 2021).

In welchen Verhältnissen die verschiedenen oben genannten Maßnahmen zum zeitlichen und räumlichen Ausgleich beitragen können, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im Netzausbau sind dies unter anderem sehr umfangreiche und langwierige Genehmigungsverfahren, bei den Stromspeichern die Investitionskosten und entsprechende Lernkurven durch Skalierung der Technologie. Grundsätzlich ist Forschung und Entwicklung notwendig, um die Technologiereife zu erhöhen und mit Pilotprojekten die Praxistauglichkeit der Technologien zu demonstrieren. Möglichkeiten zeitlicher Lastverschiebungen, bei denen der Verbrauch netz- oder marktdienlich angepasst wird, liegen in der Industrie, in Wohnquartieren, bei der Mobilität sowie bei Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.

Das Projekt ECO zone initiiert Lastverschiebungen mittels zentraler Analysen, durch die sich Netzengpässe reduzieren lassen, sich die Netzstabilität steigern lässt und sich Gesamtemissionen und Redispatch-Kosten senken lassen. Hierbei stellen die Lastverschiebungen ein wirkungsvolles Mittel zum Ausgleich der regionalen und zeitlichen Diskrepanzen in der Versorgung mit erneuerbaren Energien dar. Ein wesentlicher Aspekt bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren, die für die Lastverschiebung zugrunde gelegt werden, ist die sachgerechte Erfassung der regionalen Erzeugungssituation und von Netzengpässen.

⁴ „Vor einen Netzengpass“ bezieht sich auf die Energieflussrichtung im Stromnetz. Das heißt in Bezug auf einen Netzengpass, dass ein Verbraucher günstiger positioniert ist, wenn er netztopologisch näher an der Strom einspeisung (z. B. aus Windkraft) liegt als der Netzengpass.

3. Methodik zur Ermittlung der Emissionsfaktoren

Ein wesentliches Ziel des Projekts besteht darin, Akteure durch die Bereitstellung geeigneter Emissionsfaktoren zu netz-, markt- und umweltdienlichen Lastverschiebungen zu motivieren. Dabei sollen Lasten gezielt von Zeiten (und Regionen) mit hohen Emissionsfaktoren in solche mit niedrigeren Emissionsfaktoren verlagert werden. Die Emissionsfaktoren müssen daher sowohl die zeitliche als auch die räumliche Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien angemessen widerspiegeln. Während die zeitliche Verfügbarkeit im Wesentlichen durch die Fluktuation der EE-Erzeugung bestimmt wird, wurde die räumliche Verfügbarkeit durch eine Analyse der Netzsituation und potenzieller Netzengpässe ermittelt.

Im Folgenden wird erläutert, wie diese Aspekte in das Konzept von ECO zone zur Emissionserfassung integriert werden. Zunächst wird der Ansatz ECO zone in die bestehenden Methoden zur Bilanzierung strombedingter Emissionen eingeordnet. Anschließend wird das Konzept marginaler Emissionen vorgestellt, das besonders geeignet ist, um die Wechselwirkungen zwischen Lastverschiebungen und der Abregelung von EE zu verdeutlichen. Abschließend erfolgt die Beschreibung des zonalen Konzepts, das die Engpasssituation im Stromnetz berücksichtigt.

3.1 Bestehende Ansätze zur Bilanzierung strombedingter Emissionen

Die Bilanzierung der durch Stromverbrauch verursachten CO₂-Emissionen spielt eine immer größere Rolle, insbesondere im Hinblick auf Nachhaltigkeitsberichte (ESG-Reporting) und umweltbewusstes Handeln. Es gibt bereits verschiedene Ansätze, die sich jedoch in ihrer Methodik, ihrem Detaillierungsgrad und ihrer geografischen Abdeckung unterscheiden.

Landesweite Emissionsfaktoren

Einige kommerzielle Anbieter stellen stundenscharfe Emissionsfaktoren für ganz Deutschland zur Verfügung. Diese Daten basieren auf dem landesweiten Strommix und zeigen die Emissionsintensität zu verschiedenen Zeiten. Allerdings berücksichtigen diese Ansätze keine Netzengpässe, die in Deutschland regelmäßig auftreten. Netzdynamiken werden in landesweiten Emissionsfaktoren nicht abgebildet, was zu Ungenauigkeiten in der CO₂-Bilanz führen kann.

Regionale Ansätze und Ampelsysteme

Verschiedene regionale Projekte setzen auf Ampelsysteme, um den Nutzerinnen und Nutzern zu signalisieren, wann Strom „grüner“ ist, basierend auf der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien in bestimmten Zeitfenstern. Diese Ansätze haben jedoch zwei Hauptschwächen:

- Mangelnde Transparenz bei der CO₂-Reduktion: Diese Systeme bieten keine konkrete Quantifizierung der tat-

sächlich eingesparten Emissionen. Für Nutzerinnen und Nutzer, insbesondere Unternehmen, die präzise CO₂-Daten für ihr ESG-Reporting benötigen, ist diese Intransparenz ein Nachteil.

- Geografische Einschränkung: Solche Ansätze sind oft auf bestimmte Regionen beschränkt und bieten keine flächendeckenden Lösungen für ganz Deutschland.

3.2 Konzept der marginalen Emissionen

Marginale Emissionen sind ein Konzept, um die Umweltauswirkungen eines spezifischen Verhaltens oder einer Entscheidung im Zusammenhang mit der Stromnutzung zu bewerten. Es unterscheidet sich vom Konzept der durchschnittlichen Emissionen. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden liegt in der Betrachtungsweise der Verantwortung für CO₂-Emissionen.

Durchschnittliche Emissionen berücksichtigen die Emissionen auf der Grundlage einer gleichmäßigen Verteilung auf alle Netznutzer. Wenn beispielsweise der Strommix eines Netzes zu 50 Prozent aus erneuerbaren Energien und zu 50 Prozent aus fossilen Brennstoffen besteht, wird angenommen, dass jeder Verbraucher einen durchschnittlichen CO₂-Fußabdruck hat, der diesem Strommix entspricht. Diese Methode der Berechnung kann nützlich sein, um allgemeine Umweltauswirkungen zu verstehen, berücksichtigt jedoch die tatsächlichen Veränderungen im Stromnetz nicht, die durch individuelle Entscheidungen ausgelöst werden.

Im Gegensatz dazu konzentrieren sich marginale Emissionen auf die kausale Beziehung zwischen einer spezifischen Handlung und den damit verbundenen Emissionen.

Das bestehende Strommarktdesign ist darauf ausgelegt, den Verbrauch mit den günstigsten verfügbaren Kraftwerken zu decken. Das bedeutet, dass Strom zunächst von den Kraftwerken geliefert wird, die die niedrigsten Betriebskosten haben. Dies sind in der Regel die erneuerbaren Energien. Mit steigendem Strombedarf müssen jedoch zunehmend teurere Kraftwerke zugeschaltet werden, da die günstigeren bereits ausgelastet sind.

Diese teureren Kraftwerke verwenden oft Brennstoffe, die höhere Kosten verursachen, und/oder sie arbeiten mit geringerer Effizienz. Das sogenannte marginale Kraftwerk ist dasjenige, das als Letztes zugeschaltet wird, um einen zusätzlichen Verbrauch zu decken, oder das als Erstes heruntergefahren wird, wenn der Verbrauch sinkt. Da dieses Kraftwerk in der Einsatzreihenfolge das teuerste ist, handelt es sich häufig auch um das ineffizienteste und emissionsintensivste Kraftwerk im Netz. Wenn das marginale Kraftwerk fossile Brennstoffe nutzt, führt die Entscheidung des Verbrauchers zu zusätzlichen CO₂-Emissionen. Diese zusätzlichen Emissionen werden in unserem Ansatz denjenigen zugeschrieben, die die

Entscheidung zur Erhöhung des Stromverbrauchs getroffen haben, und nicht auf alle Netznutzer gleichmäßig verteilt.

Das Konzept der marginalen Emissionen bietet daher eine genauere Möglichkeit, die Auswirkungen individueller Entscheidungen auf den CO₂-Fußabdruck zu bewerten. Es ermöglicht eine präzisere Zuweisung von Verantwortung und dient als Grundlage für eine umweltbewusste Entscheidungsfindung. Dies ist besonders nützlich, wenn es darum geht, dynamische Verbrauchsmuster oder Lastverschiebungen und ihren Einfluss auf die Umwelt zu bewerten, da es eine detailliertere Perspektive auf die tatsächlichen Auswirkungen bietet, die durch konkrete Handlungen ausgelöst werden.⁵

3.3 Zonenkonzept bei ECO zone

Ein zonales Emissionskonzept bezieht sich auf eine Strategie oder ein System zur Steuerung und Reduzierung von Emissionen, im vorliegenden Fall von Treibhausgasemissionen. Es werden geografische oder funktionale Zonen verwendet, um die Emissionsquellen differenziert zu behandeln. Das Konzept von zonalen Emissionsfaktoren wurde beispielsweise in der wissenschaftlichen Literatur für Italien untersucht (Beltrami et al., 2022). Das in diesem Zusammenhang erarbeitete Forschungspapier widmet sich der Schätzung saisonaler und zonaler marginaler Emissionsfaktoren (MEFs). Für Deutschland fanden bereits ähnliche Betrachtungen der marginalen Emissionen statt, die jedoch keine zonale Differenzierung aufweisen (Seckinger & Radgen, 2021). Das im Projekt ECO zone entwickelte Konzept ist sowohl abzugrenzen von Betrachtungen, die keinerlei räumliche Unterteilung vornehmen und gesamtdeutsche Durchschnittswerte ermitteln, als auch von Konzepten, die nur die verfügbaren Energiequellen innerhalb eines sehr engen regionalen Raums genauer betrachten und einen generellen Vorrang lokaler Erzeugung postulieren, ohne die Potenziale und Restriktionen im gesamten deutschen Stromnetz (z. B. die Verfügbarkeit von Windstrom aus entfernter liegenden Anlagen) genauer abzubilden.

Das Zonenkonzept von ECO zone bezieht sich auf die nord-südliche Verteilung und berücksichtigt die Besonderheiten der Netzstabilität und der Stromflüsse zwischen den Regionen in Deutschland, insbesondere im Hinblick auf die Verteilung erneuerbarer Energien von Norden nach Süden. Das Zonenkonzept, das im Projekt ECO zone genutzt wird, nimmt also eine Zweiteilung der deutschen Netzstruktur vor, die in einer Aufteilung der deutschen Stromversorgungslandschaft in eine Nord- und eine Südzone resultiert. Die detaillierte Definition der Nord- und der Südzone entspringt der Zonenaufteilung der ENTSO-E Bidding Zone Variante A und hilft dabei, Netzengpässe, die aufgrund der geografischen Konzentration von Windenergie im Norden und des höheren Strombedarfs

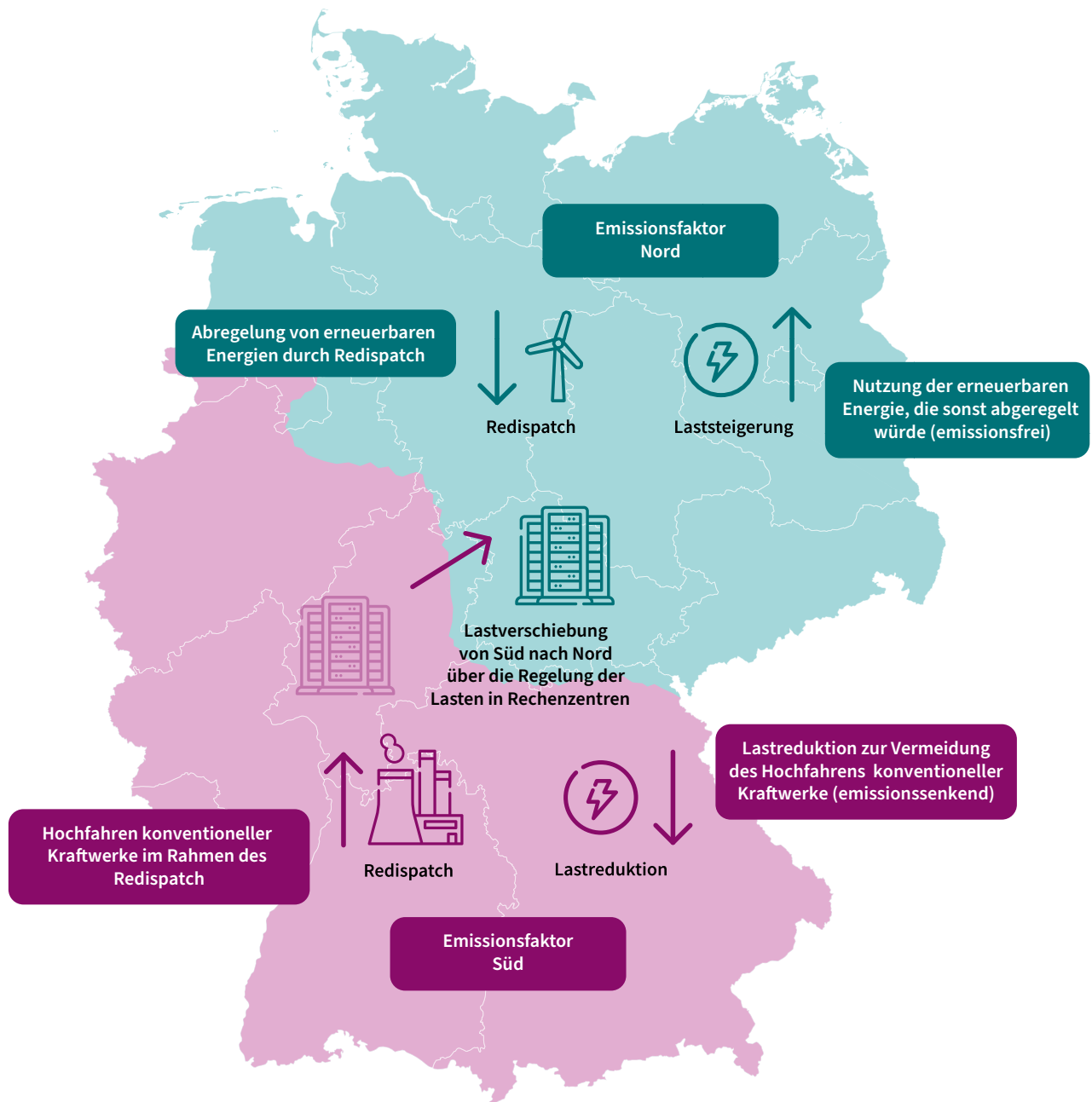
im Süden entstehen, besser zu managen (ENTSO-E, 2024a; TenneT, 2024).

Es ist jedoch wichtig, zu betonen, dass im Rahmen des Projekts auch andere Zonenkonzepte geprüft wurden. Dazu zählt beispielsweise ein Zonenkonzept, das in der zweiten dena-Netzstudie vorgestellt wurde (dena, 2010). Diese und weitere Studien liefern alternative Ansätze zur Zonenaufteilung, indem sie unterschiedliche geografische, technische und marktwirtschaftliche Kriterien für die Optimierung der Netzsteuerung einbeziehen.

Im Projekt wurden ausschließlich öffentlich zugängliche Daten genutzt, um Transparenz sicherzustellen. Sie bilden die Grundlage für die Berechnung der zonalen Emissionsfaktoren. Ein wichtiger Baustein ist die DIN SPEC 914104, die detaillierte Informationen zur Berechnung von CO₂-Emissionen im Stromsektor sowie Emissionsfaktoren für unterschiedliche Erzeugungsarten bereitstellt. Außerdem wird auf Daten der ENTSO-E Transparency Platform zurückgegriffen, die umfassende Informationen zur Stromerzeugung und -übertragung in Europa bietet (ENTSO-E, 2024b). Darüber hinaus nutzt das Projekt die veröffentlichten Redispatch-Maßnahmen auf Netztransparenz.de, um Netzengpässe in die Emissionsberechnungen zu integrieren (Netztransparenz.de, 2024).

⁵ Vgl. die Darstellung zu marginalen Emissionen auf Electricitymaps.com: <https://www.electricitymaps.com/blog/marginal-emissions-what-they-are-and-when-to-use-them>

Lastverschiebung von Süd nach Nord über den Anreiz von zonalen Emissionsfaktoren



Quelle: Eigene Darstellung, dena, 2024

Abbildung 4: Lastverschiebung von Süd nach Nord über den Anreiz von zonalen Emissionsfaktoren

4. Anwendung von ECO zone

Aus technischer Perspektive umfasst das Projekt ECO zone eine Website, eine API und ein Open-Source-Projekt, die gemeinsam eine flexible und transparente Nutzung der Emissionsdaten ermöglichen.

Die Website dient als zentrale Plattform, auf der Nutzer in Echtzeit oder für bestimmte Zeiträume die CO₂-Intensität verschiedener Stromzonen einsehen können. Die Emissionsdaten werden hier in einer benutzerfreundlichen Oberfläche visualisiert, was eine einfache Analyse und Anpassung des eigenen Stromverbrauchs ermöglichen soll. Dies unterstützt sowohl Verbraucherinnen und Verbraucher als auch Unternehmen dabei, ihre Lasten gezielt in emissionsärmere Zeiträume oder Regionen zu verschieben.

Die API ermöglicht es, diese Emissionsdaten direkt in andere Anwendungen und Systeme zu integrieren. Dadurch können beispielsweise Energiemanagementsysteme oder Smart-Home-Lösungen in Echtzeit auf aktuelle Emissionswerte reagieren und den Energieverbrauch entsprechend anpassen. Dies erleichtert es Unternehmen sowie Entwicklerinnen und Entwicklern, die Vorteile der Lösung ECO zone in ihren eigenen Prozessen zu nutzen.

Das Projekt ist zudem als Open-Source-Software verfügbar, was Transparenz in Bezug auf die verwendeten Methoden und Berechnungen gewährleistet. Dies ermöglicht es der IT-Gemeinschaft, den Quellcode einzusehen und anzupassen und aktiv an der Weiterentwicklung der Anwendung mitzuwirken. Durch die offene Lizenz wird eine Zusammenarbeit gefördert, die nicht nur den Funktionsumfang der Anwendung erweitert, sondern auch die Anpassung an spezifische Bedürfnisse verschiedener Zielgruppen erleichtert.

Im Folgenden werden Website, API und Open-Source-Projekt detaillierter beschrieben und Beispiele für die konkrete Anwendung gegeben.

4.1 Website und API

Die Webanwendung und die API, erreichbar unter <https://future-energy-lab.de/projects/eco-zone/>, ermöglichen den Zugriff auf zeitlich hochaufgelöste Daten zu zonalen Emissionsfaktoren. Die Anwendung bietet den Nutzerinnen und Nutzern eine Oberfläche zur Visualisierung und Analyse von CO₂-Emissionen unter Berücksichtigung von Netzengpässen. Sie stellt Emissionsdaten für verschiedene geografische Zonen in einer Auflösung von 15 Minuten zur Verfügung. Zudem sind die Daten in unterschiedlichen Dateiformaten zum Download verfügbar.

Die API bietet Unternehmen die Möglichkeit, die Emissionsdaten in eigene Anwendungen zu integrieren. Damit können zum Beispiel dynamische Steuerungen von Stromverbräuchen in Smart Homes und Rechenzentren oder bei der

Elektromobilität in Echtzeit optimiert werden, um netz- sowie marktdienliche und emissionsarme Entscheidungen zu treffen.

Stromkundinnen und Stromkunden können die Website und die API von ECO zone in einem mehrstufigen Prozess nutzen, um ihren Stromverbrauch effizienter zu gestalten und die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Der Ablauf könnte folgendermaßen aussehen:

1. Informieren und Verstehen

- Die Nutzerinnen und Nutzer besuchen die Website von ECO zone, um sich über die Grundlagen der Emissionsreduktion durch Lastverschiebungen zu informieren.
- Die Website erklärt, wie sich Lastverschiebungen positiv auf die CO₂-Bilanz auswirken können, indem Verbräuche von Zeiten hoher Emissionswerte auf Zeiten niedriger Emissionen verlagert werden.
- Durch die Visualisierung der aktuellen und historischen Emissionsdaten erhalten die Nutzerinnen und Nutzer ein besseres Verständnis für die Schwankungen der Emissionswerte im Tages- und Wochenverlauf und können eine erste Einschätzung treffen, ob sie hierauf verbrauchsseitig reagieren könnten.

2. Analyse der Emissionspotenziale

- Die Nutzerinnen und Nutzer verwenden die visualisierten Daten auf der Website, um ihr eigenes Potenzial zur Emissionsreduktion genauer zu bewerten.
- Sie identifizieren, zu welchen Zeiten und in welchen Regionen die Emissionen am niedrigsten sind, und analysieren, ob sich ihr Verbrauchsverhalten entsprechend anpassen lässt.
- So können sie beispielsweise entscheiden, ob es sinnvoll ist, energieintensive Prozesse in emissionsarme Zeiträume zu verschieben.

3. Planung mit der API

- Die Nutzerinnen und Nutzer integrieren die API von ECO zone in ein bestehendes Energiemanagementsystem (EMS).
- Die API liefert tagesaktuelle Emissionsdaten sowie Prognosen für den Folgetag, die das EMS zur Planung von Lastverschiebungen nutzt.
- Das EMS bezieht die Daten kontinuierlich über die API und analysiert, wann es sinnvoll ist, den Stromverbrauch zu erhöhen oder zu reduzieren.

4. Automatisierte Lastverschiebung

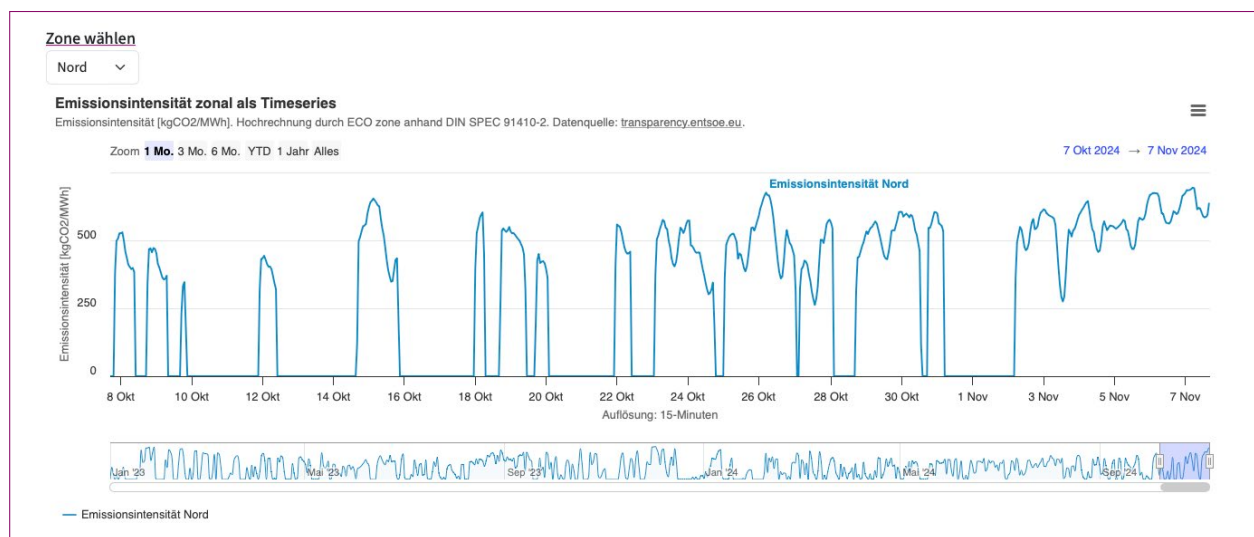
- Basierend auf den API-Daten und den definierten Flexibilitätsteuert das EMS automatisch die Lasten.
- Beispielsweise kann ein Rechenzentrum nicht zeitkritische Rechenprozesse in die Phasen verschieben, in denen die Emissionswerte am niedrigsten sind.
- Dadurch wird der Betrieb effizienter, da die Lasten auf Zeiten niedriger Emissionen verlagert werden, ohne dass manuell eingegriffen werden muss.

5. Erstellung einer Emissionsbilanz

- Das EMS oder ein weiteres System nutzt die historischen Emissionsdaten, um eine genaue Bilanz der CO₂-Emissionen zu erstellen.
- Durch die Kombination der gemessenen Verbrauchswerte mit den entsprechenden Emissionsdaten können die Nutzerinnen und Nutzer nachvollziehen, wie viel CO₂ durch ihren Verbrauch verursacht wurde. Es kann auch eine alternative Baseline ohne Lastverschiebung bewertet und aus der Differenz der Effekt der Lastverschiebung ermittelt werden.
- Diese Bilanz kann für interne Nachhaltigkeitsberichte oder zur Erfüllung von ESG-Vorgaben genutzt werden.

Dieser mehrstufige Prozess zeigt, wie die Website und die API von ECO zone es Stromverbrauchern ermöglichen, systematisch ihren Stromverbrauch an den aktuellen Emissionswerten auszurichten und so aktiv zur Reduktion der CO₂-Emissionen beizutragen.

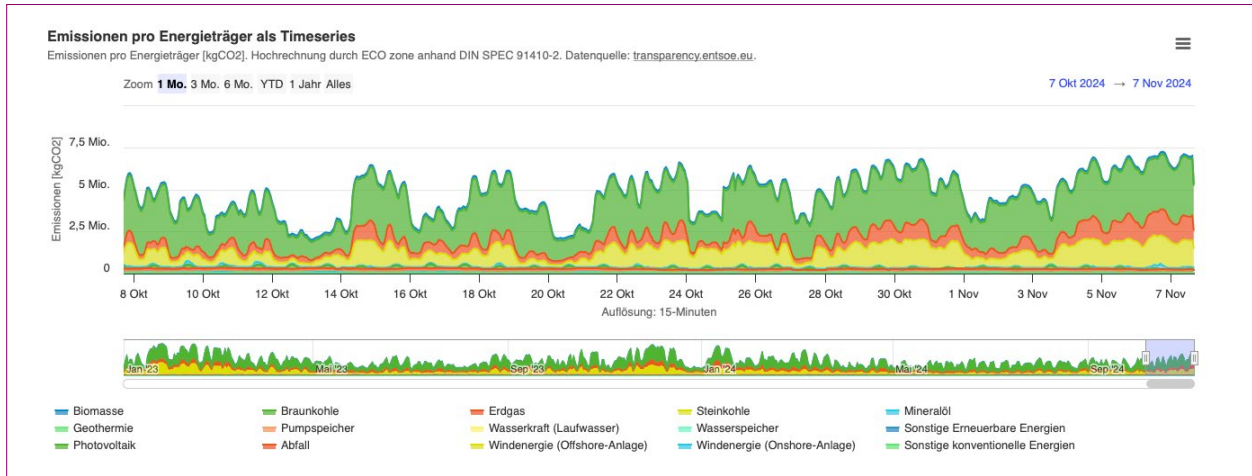
Im Folgenden wird der Emissionsverlauf für die Nordzone aus dem gewählten Zonenkonzept dieses Projekts gezeigt, wie auf der Website dargestellt. Über das Dropdown-Menü im oberen linken Bereich können die Nutzer die ausgewählte Zone variieren. Außerdem kann die Zeitauswahl interaktiv verändert werden. Über das Menü werden zudem verschiedene Download-Formate als Bild oder Datei bereitgestellt.



Quelle: Eigene Darstellung, dena, 2024

Abbildung 5: Emissionsintensität als Timeseries

Darüber hinaus werden Hintergrundinformationen und Zwischenergebnisse dargestellt, die zur Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse beitragen sollen. Das folgende Beispiel zeigt die Emissionen je Energieträger für die Nordzone:



Quelle: Eigene Darstellung, dena, 2024

Abbildung 6: Emissionen pro Energieträger als Timeseries

Auf der Website ist außerdem eine ausführliche Dokumentation enthalten, die es Entwicklerinnen und Entwicklern ermöglicht, die API zu nutzen. Über die API sind alle Daten, die über die Website bereitgestellt werden, zur Einbindung in andere Anwendungen verfügbar:

default ^

- GET /api/timeseries/redispatch Get Timeseries Redispatch
- GET /api/timeseries/emission-intensity Get Emission Intensity
- GET /api/timeseries/emission-intensity-zonal Get Emission Intensity For Region

Parameters Try it out

Name	Description
region * required	region
start	start
end	end

Responses

Code	Description	Links
200	OK	No links

Media type: application/json

Example Value:

```
[{"string"}]
```

- GET /api/timeseries/generation Get Generation
- GET /api/timeseries/emissions Get Generation

Quelle: Eigene Darstellung, dena, 2024

Abbildung 7: API von ECO zone

4.2 Open-Source-Projekt

Das Projekt ECO Zone wird als Open-Source-Projekt auf GitHub bereitgestellt.⁶ Es steht unter der MIT-Lizenz, die es erlaubt, den Quellcode frei zu nutzen, zu modifizieren und weiterzuverbreiten, solange die ursprünglichen Urheberrechte gewahrt bleiben. Diese offene Lizenz fördert die Transparenz und ermöglicht es der Community, das Projekt nach ihren Bedürfnissen anzupassen und weiterzuentwickeln.

Durch die Veröffentlichung als Open-Source-Projekt schafft ECO zone nicht nur Vertrauen in die Qualität und Zuverlässigkeit der bereitgestellten Daten und Tools, sondern eröffnet auch die Möglichkeit, dass Entwicklerinnen und Entwickler und Organisationen an der kontinuierlichen Verbesserung des Projekts mitwirken können.

⁶ <https://github.com/ECO-zone/eco-zone>

5. Übersicht über die Anwendungsfelder

Analog zu den bereits auf dem Markt verfügbaren Lösungen für deutschlandweite durchschnittliche Emissionsfaktoren können Unternehmen die Lösung, die ECO zone ihnen bietet, nutzen, um die Emissionsverfolgung im Rahmen ihres ESG-Reporting zu unterstützen.

Ein weiterer Anwendungsfall besteht bei Unternehmen, die ECO zone über eine API in ihre Produkte integrieren oder ihre Produkte erweitern möchten, darin, umweltfreundlichere Endprodukte für ihre Endkundinnen und Endkunden anzubieten und sich dadurch vom Wettbewerb abzuheben oder die Kundenbindung zu stärken. Es folgen einige Beispiele:

- Anbieter von Smart-Home-Lösungen (z. B. Telekom, Bosch, Homematic) oder von Wärmepumpensteuerungen (z. B. Viessmann) könnten ihre Anwendungen entsprechend erweitern.
- Anbieter im Bereich E-Mobilität könnten durch entsprechende Angebote zum emissionsarmen und netzdienlichen Laden umweltbewusste Kundinnen und Kunden binden.

Zusätzlich können Anbieter von Smart-Home-Lösungen die Anwendung dazu nutzen, ihre bestehenden Lösungen um Funktionen zu erweitern, die Emissionsreduktionen bei Kundinnen und Kunden initiieren und unabhängig überwachen lassen. Das Gleiche gilt für Anbieter im Bereich der Elektromobilität.

Die durch das Projekt bereitgestellten zeitlich und räumlich differenzierten Emissionsfaktoren können generell dazu genutzt werden, Emissionsreduktionen durch zeitliche Lastverschiebungen zu initiieren, bei denen Verbräuche gezielt von Zeiträumen hoher spezifischer Emissionen in Zeiten niedriger Emissionen verlagert werden. Darüber hinaus können auch in Einzelfällen räumliche Lastverschiebungen zwischen den betrachteten Zonen zu Emissionsverringerungen beitragen.

Im Rahmen der Projektarbeit wurden Schwerpunktbereiche zu den Lastverschiebungen identifiziert, die gezielt im begleitenden Fachkreis zum Projekt untersucht wurden. Hierbei wurden insbesondere die drei Bereiche „Rechenzentren“, „Dynamische Stromtarife“ und „Grüner Wasserstoff“ als Handlungsfelder identifiziert und tiefgreifend analysiert.

Es ergeben sich für die eruierten Anwendungsfälle einige Potenziale und Restriktionen, die es in der Umsetzung zu beachten gilt: Grundvoraussetzung für die Umsetzbarkeit ist generell ein technisches Potenzial im Sinne einer zeitlichen bzw. örtlichen Flexibilität des Verbrauchs. Partizipationsmöglichkeiten vieler Marktteilnehmer sind neben der technischen Umsetzbarkeit zusätzlich durch ihr ökonomisches Potenzial limitiert. Aufgrund preissensitiver oder kostenintensiver Betriebsweisen ist die Bereitschaft einiger möglicher Zielgruppen, freiwillige Maßnahmen zur Lastverschiebung durchzuführen, begrenzt.

Es ergeben sich folglich zwei Determinanten, namentlich technische und ökonomische Umsetzbarkeit, die es für eine freiwillige Lastverschiebung zu beachten gilt (siehe hierzu Kapitel 6). Besteht genügend Flexibilität, können Betreiber geeigneter Anlagen auf Datenbasis des Projekts ECO zone tagesaktuelle und zonenspezifische Emissionswerte in einer Auflösung von 15 Minuten heranziehen, um Lasten potenziell an die aktuellen Gegebenheiten im Stromnetz anzupassen.

5.1 Rechenzentren

Rechenzentren bieten ein Potenzial zur Lastverschiebung durch die Flexibilisierung von nicht zeitkritischen Rechenaufgaben (**zeitliche Lastverschiebung**). Wenn Betreiber über mehrere Standorte verfügen, können sie ihre Aufgaben auch räumlich verlagern, um Emissionen zu minimieren (**räumliche Lastverschiebung**).

Der Betrieb von Rechenzentren ist energieintensiv und aufgrund ihrer hohen Stromnachfrage für die Analyse von Lastverschiebungen interessant. Rechenzentren könnten mithilfe des Modells ECO zone ihre Lastverteilung so steuern, dass die Last bevorzugt in Zeiten oder Regionen ausgeführt wird, in denen der Strommix besonders emissionsarm ist. Dies kann entweder durch die zeitliche Verschiebung von nicht kritischen Rechenoperationen oder durch die geografische Verlagerung von Aufgaben auf Rechenzentren in anderen Zonen mit geringeren Emissionen erfolgen.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Betriebsweise vieler Rechenzentren in der Regel auf eine maximale Auslastung der Infrastruktur ausgerichtet. Hierdurch ist das Potenzial zur Lastverschiebung begrenzt, da ein technisches Potenzial zur Lastverschiebung voraussetzt, dass es ausreichend Zeiten geringer Auslastung gibt, in die Lasten verschoben werden können. Andererseits werden aus Sicherheitsgründen Redundanzen in der Infrastruktur vorgehalten, die wiederum das technische Potenzial für Lastverschiebungen erhöhen.

Zwar beruht die Lastverschiebung gemäß des Modells ECO zone auf einer freiwilligen Partizipation, jedoch können bereits heute über das ESG-Reporting monetäre Vorteile erzielt werden. Für das ESG-Reporting müssen Unternehmen detaillierte Einblicke in ihre Nachhaltigkeitsstrategien in einem ganzheitlichen Bezug auf Umwelt, Soziales und ihre Betriebsführung (Environmental Social Governance, kurz: ESG) geben. Damit soll es Stakeholdern erleichtert werden, anhand von Kriterien der Nachhaltigkeit Investitionsentscheidungen zu treffen. Durch das ESG-Reporting werden Unternehmen EU-weit zur Berichterstattung verpflichtet, wodurch die Nachhaltigkeit in den Fokus rückt und Transparenz gefördert wird, indem eine einheitliche und somit vergleichbare Grundlage für Investitions- und Kaufentscheidungen diverser Interessengruppen geschaffen wird. Die freiwillige Netzdienlichkeit und die gezielte Nutzung erneuerbarer Energien mithilfe von ECO zone können

also das ESG-Reporting positiv beeinflussen und die Wertigkeit des Unternehmens im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit steigern, wodurch das Interesse potenzieller Investoren und die Wahrscheinlichkeit zusätzlicher Investitionen erhöht werden.

Neben dem ESG-Reporting können die freiwillige Netzdienlichkeit und die Nutzung erneuerbarer Energien auch für Imagekampagnen marketingtechnisch genutzt werden, um weitere Zielgruppen anzusprechen oder bestehenden Zielgruppen, die für das Thema Nachhaltigkeit sensibilisiert sind, einen zusätzlichen Mehrwert zu bieten. Die Emissionsreduktion mittels Lastverschiebung gemäß dem Modell ECO zone lässt sich als eine Maßnahme des sogenannten „Carbon Aware Computing“ kategorisieren.

Für die Betreiber von Rechenzentren bestehen zudem weitere Möglichkeiten zur Anwendung der Daten des Projekts ECO zone: So können beispielsweise historische Daten für betriebswirtschaftliche Analysen genutzt und der Einfluss von Standort und Betriebsweise auf die Wirtschaftlichkeit von Projekten kann vorab eruiert werden. Die Daten, die durch das Modell ECO zone bereitgestellt werden, eignen sich aufgrund der zonenspezifischen Auflösung der CO₂-Emissionen somit zusätzlich für energietechnische Standortanalysen und können die Überlegungen zur Standortwahl für den Bau neuer Rechenzentren fundiert beeinflussen. Mithilfe von ECO zone können Betreiber also bereits während der Projektplanungsphase geeignete Standorte identifizieren und so die Wirtschaftlichkeit ihres Projekts erhöhen.

Im Rahmen des begleitenden Fachkreises des Pilotprojekts wurde auf die Einbindung großer Rechenzentren in Wärmenetze aufmerksam gemacht. Hierbei fungieren die Rechenzentren aufgrund ihrer hohen Abwärme und ihrer meist kontinuierlichen Betriebsweise als statische Wärmequelle im Wärmenetz. Auf diese Weise kommt ein weiterer, die Lastverschiebung

potenziell begrenzender Faktor hinzu: Es können Situationen auftreten, in denen zwar die Potenziale einer Lastverschiebung bestehen, sie jedoch aufgrund der Einbindung in das Wärmenetz nicht oder nur anteilig genutzt werden können. Auch durch Latenz- und Sicherheitsanforderungen, beispielsweise im Rahmen des Bundesdatenschutzgesetzes, wird das theoretisch hohe Potenzial einiger Rechenzentren zur räumlichen Lastverschiebung praktisch begrenzt.

Das Lastverschiebungspotenzial von Rechenzentren ist also vom Gesamtsystem aus IT, Kühlung, Stromversorgung, Abwärme, Latenz und Sicherheit abhängig. Es lässt sich jedoch festhalten, dass zum Betrieb von Rechenzentren allgemein ein Bedarf an emissionsarmem und perspektivisch emissionsfreiem Strom besteht. Die Lastverschiebung in bzw. zwischen Rechenzentren wird grundsätzlich bereits in einigen Projekten adressiert und ist technisch möglich (siehe hierzu die Fallstudie in Kapitel 7).

Anwendungen mit Künstlicher Intelligenz (KI) könnten für die Lastverschiebung eine besondere Relevanz zukommen, insofern sie nicht latenzkritisch sind. Bei KI-Anwendungen sind insbesondere die Trainingsprozesse der Modelle in der Regel nicht zeitkritisch. Beim Training wird anhand großer Datenmengen versucht, optimale Gewichtungsfaktoren und Parameter zu bestimmen, um das KI-Modell bestmöglich zu parametrieren. Diese Trainingsprozesse sind sehr ressourcenintensiv, sowohl in Bezug auf die benötigte Hardware (wie GPUs (Graphics Processing Units) und TPUs (Tensor Processing Units)) als auch hinsichtlich der Rechenzeit. Zusätzlich gewinnt die automatisierte Modellauswahl zunehmend an Bedeutung. In diesem Vorprozess werden verschiedene KI-Modelle getestet, um das am besten geeignete Modell für die jeweilige Anwendung zu identifizieren. Auch dieser Vorgang erfordert erhebliche Rechenkapazitäten, ist jedoch in der Regel nicht zeitkritisch und kann in emissionsarme Zeiten oder Regionen mit mehr verfügbarem erneuerbar erzeugtem Strom verschoben werden.

Vorteile:

- CO₂-Reduktion durch gezielte Verlagerung von Aufgaben in emissionsarme Zonen und/oder Zeiten

Einsatzmöglichkeiten:

- Flexibilisierung der Rechenlast, insbesondere bei Anwendungen, die nicht latenzkritisch sind (z. B. KI-Training)

Zusätzliche Anwendungen:

- Standortanalysen für neue Rechenzentren basierend auf den Emissionsdaten, um die Nachhaltigkeit zu optimieren

5.2 Dynamische Stromtarife

Im Bereich dynamischer Stromtarife können Stromanbieter durch das Modell ECO zone zusätzliche Dienstleistungen zur Verfügung stellen, die insbesondere in den Augen von ökologisch bewussten Kundengruppen einen Mehrwert darstellen. Sie können sich dadurch auf dem Markt von der Konkurrenz abheben.

Bestehende dynamische Tarifmodelle basieren in aller Regel auf Strombörsenpreisen (vgl. dena 2024b). Außerdem sind Tarife im Markt zu finden, welche sich auf die gesamtdeutschen Emissionen beziehen. Mit ECO zone lassen sich neue Tarifmodelle realisieren.

Wenn dynamische Tarife ausschließlich auf Strombörsenpreisen basieren oder Emissionen lediglich anhand gesamt-

deutscher Emissionsfaktoren bewertet werden, können Fehlanreize entstehen: Verbraucherinnen und Verbraucher könnten aufgrund niedriger Strompreise oder vermeintlich geringerer Emissionswerte im deutschen Strommix ihren Verbrauch steigern. Befinden sie sich jedoch in einer Region, in der aufgrund von Netzengpässen die Versorgung mit erneuerbar erzeugtem Strom schwierig ist und daher hauptsächlich fossile Kraftwerke den Bedarf decken, führt der erhöhte Verbrauch, der durch die Anreize der flexiblen Tarife ausgelöst wird, zu einem Anstieg der fossilen Stromerzeugung. Dies erhöht die gesamtdeutschen Stromemissionen, sodass die Verbraucherinnen und Verbraucher trotz guter Absichten zur Karbonisierung des Energiesystems beitragen. Werden die Tarife hingegen an den zonalen Emissionen von ECO zone ausgerichtet, lässt sich dieser Fehlanreiz vermeiden.

Anstelle eines Signals, welches lediglich die Emissionswerte für die deutsche Erzeugungslandschaft und gegebenenfalls notwendige Stromimporte widerspiegelt, bietet das Modell ECO zone zonenspezifische Emissionsfaktoren. In einer Zone, in der die aktuelle Stromerzeugung im Vergleich temporär keine Emissionen aufweist, können Verbraucherinnen und Verbraucher ihren Stromverbrauch erhöhen, ohne ihren ökologischen Fußabdruck zu vergrößern. In Regionen mit höheren Emissionswerten hingegen haben sie die Möglichkeit, ihr Verhalten anzupassen und Lasten wenn möglich zu reduzieren, das heißt zeitlich zu verschieben. Dies führt nicht nur zu einer Stabilisierung des Stromnetzes und zu einer Verringerung des Redispatch-Bedarfs, sondern stärkt auch das Bewusstsein der Endkundinnen und Endkunden für eine nachhaltige Energiewirtschaft. Zudem ermöglicht es Privatpersonen eine indirekte Teilnahme an der Energiewende und am Klimaschutz, selbst wenn sie keine eigenen nachhaltigen Erzeugungsanlagen wie Photovoltaik-Anlagen besitzen.

Neben den ideellen energie- und klimapolitischen Vorteilen einer zonenspezifischen Emissionsbewertung im Kontext dynamischer Stromtarife gibt es auch Überlegungen, über monetäre Vergütung von netz- oder marktdienlichem Verhalten finanzielle Anreizstrukturen zu schaffen. Derzeit erhalten Endkundinnen und Endkunden einen einheitlichen Strompreis für ganz Deutschland. Würde der Strompreis jedoch, analog zu den Emissionswerten, regional differenziert berechnet, könnten die oben erwähnten Fehlanreize durch gesamtdeutsche Preissignale vermieden werden. Gleichzeitig könnten Akteure, die durch nachhaltiges Verhalten zur Netzstabilität beitragen, finanzielle Vorteile genießen. Bei der hiesigen Betrachtung handelt es sich jedoch um eine rein technische, netzdienliche Perspektive. Aspekte wie volkswirtschaftlicher Nutzen, Sozialverträglichkeit und regional-spezifische, zum Teil sehr unterschiedliche Kosten-Nutzen-Abwägungen sind Aufgabe, Verantwortung und unter der Entscheidungshoheit der Politik. Neben einer technischen Perspektive bedarf es dabei der zusätzlichen Perspektiven von Ökonominen und Ökonomen, Kommunen und weiteren Akteuren.

In Privathaushalten ist eine Teilnahme an Lastverschiebungsmaßnahmen nur dann langfristig sinnvoll, wenn das Tarifsignal in eine automatisierte Steuerung der Verbrauchseinrichtungen integriert wird. So lassen sich Ermüdungseffekte bei der manuellen Anpassung des Verbrauchs vermeiden. Dies ist besonders in einem zukünftigen Energiesystem wichtig, in dem Verbräuche wie die durch Mobilität und Wärmeversorgung elektrifiziert sein müssen.

Vorteile:

- Berücksichtigung der lokalen Verfügbarkeit von Grünstrom bzw. von Transportengpässen durch zonale Emissionswerte und Förderung netzdienlichen Verhaltens

Einsatzmöglichkeiten:

- Automatisierte Steuerung von IoT und Smart-Home-Geräten, Wärmepumpen und Ladestationen für Elektrofahrzeuge
- Durch die Nutzung dynamischer Tarife können energieintensive Produktionsschritte auf Zeiten niedriger Strompreise verlagert werden, wodurch Betriebskosten reduziert und Lastspitzen vermieden werden.

Monetäre Anreize:

- Potenzial für finanziellen Mehrwert bei emissionsarmen Zeiten durch angepasste Strompreise.
- Verbraucherinnen und Verbraucher können durch dynamische Tarife spezielle Rabatte erhalten, wenn sie ihren Verbrauch gezielt auf Zeiten niedriger Emissionen verlagern.

Zusätzliche Anwendungen:

- Möglichkeit zur gezielten Steuerung zur Optimierung von Ladezeiten in der E-Mobilität

5.3 Grüner Wasserstoff

Ähnlich wie bei Rechenzentren können die von ECO zone bereitgestellten Daten bereits in der Planungsphase eines Wasserstoffprojekts für Standort- und Wirtschaftlichkeitsanalysen genutzt werden. Dies ermöglicht eine optimierte und realistischere Einschätzung der Rentabilität schon in der Projektierungsphase.

Wasserstoffprojekte sind derzeit in der Regel sehr kostenintensiv. Aufgrund der hohen Investitionen ist es für diese Projekte oft schwierig, betriebliche Faktoren über den Strompreis hinaus zu berücksichtigen. Elektrolyseure, die zur Produktion von Wasserstoff eingesetzt werden, können jedoch unter bestimmten Umständen von der Flexibilisierung ihrer Betriebszeiten profitieren. Grüner Wasserstoff ist dabei aufgrund seiner emissionsfreien Herstellung wertvoller als sogenannter blauer oder grauer Wasserstoff.⁷ Neben der Möglichkeit, durch direkten Strombezug aus einer EE-Anlage grünen Wasserstoff zu produzieren, kann dieser auch dann als grün qualifiziert werden, wenn der für die Wasserstoff-erzeugung genutzte Strom als vollständig grün bilanziert werden kann. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn nachgewiesen wird, dass durch die Nutzung des Stroms zur Wasserstofferzeugung die Abregelung einer EE-Anlage verhindert bzw. in hinreichendem Maße reduziert wurde. Im Rahmen von § 13k des Energiewirtschaftsgesetzes („Nutzen statt Abregeln“) wird hierfür ein regulatorischer Rahmen ent-

wickelt, der sogar einen ökonomischen Anreiz zur Nutzung des ansonsten überschüssigen EE-Stroms bietet. Er ist allerdings nur für Neuanlagen, die nach dem 31. Dezember 2023 installiert wurden, vorgesehen. Für Altanlagen kann jedoch ein Anreiz entstehen, über die im Projekt Eco zone entwickelten Emissionsfaktoren eine Zertifizierung als Grünstrom zu erwirken.

Gemäß RED II (Renewable Energy Directive II) muss für die Zertifizierung von grünem Wasserstoff entweder ein Energiesystem vorliegen, das zu über 90 Prozent aus erneuerbaren Energien gespeist wird, ein direkter Stromabnahmevertrag (Power Purchase Agreement, PPA) zwischen der Wasserstoffproduktionseinheit und einer oder mehreren Erneuerbare-Energien-Anlagen bestehen oder es muss nachgewiesen werden, dass durch den Betrieb des Elektrolyseurs die Abregelung von EE-Anlagen vermieden wird. ECO zone bietet hier einen klaren Mehrwert, indem es die Vermeidung von Redispatch-Maßnahmen durch gezielte Anpassungen der Elektrolyseurleistung quantifiziert. Unter den Bedingungen der RED II könnte mithilfe der Daten aus dem Modell ECO zone mehr grüner Wasserstoff hergestellt werden. Betreiber von Elektrolyseuren könnten nachweisen, dass durch ihren Betrieb die Abregelung von EE-Anlagen vermieden wird. Dies würde es ihnen ermöglichen, den produzierten Wasserstoff als grün zu zertifizieren, da der Einsatz von erneuerbaren Energien nachgewiesen wird und damit die Anforderungen von RED II erfüllt werden.

Vorteile:

- Förderung von grünem Wasserstoff und Vermeidung von Abregelungen von Erneuerbare-Energien-Anlagen

Einsatzmöglichkeiten:

- Nachweis der netzdienlichen Fahrweise zur Zertifizierung als grüner Wasserstoff nach RED II
- Elektrolyseure können so gesteuert werden, dass die Produktion flexibel auf Phasen hoher EE-Verfügbarkeit abgestimmt wird, was die Kosten senkt und die Nutzung erneuerbarer Energien maximiert.

Standortanalysen:

- Daten zur Standortwahl und Wirtschaftlichkeitsanalysen basierend auf zonalen Emissionen

Zusätzliche Anwendungen:

- Die Erzeugung von grünem Wasserstoff kann gezielt mit der Nutzung industrieller Abwärme kombiniert werden (z. B. durch Vorwärmung des Elektrolysewassers oder durch Anwendung von Hochtemperatur-Elektrolyse), um die Gesamteffizienz und Nachhaltigkeit der Anlage weiter zu steigern.

⁷ Grüner Wasserstoff wird durch die Elektrolyse von Wasser hergestellt, bei der elektrischer Strom eingesetzt wird, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Dieser Prozess ist emissionsfrei, wenn der dafür verwendete Strom aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind, Solar oder Wasserkraft stammt. Grüner Wasserstoff gilt als besonders umweltfreundlich und spielt eine Schlüsselrolle bei der Energiewende, da er in verschiedenen Sektoren zur Reduktion von CO₂-Emissionen beiträgt, etwa in der Industrie, Mobilität und Wärmeversorgung.

Blauer Wasserstoff hingegen wird durch Dampfreformierung von Erdgas produziert, wobei der dabei entstehende CO₂-Ausstoß durch Carbon Capture and Storage (CCS) abgeschieden und gespeichert wird. Dieser Prozess verhindert, dass das CO₂ in die Atmosphäre gelangt, was die Klimabelastung im Vergleich zu grauem Wasserstoff verringert. Trotzdem bleibt die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen wie Erdgas bestehen, was blauen Wasserstoff zu einer Übergangslösung auf dem Weg zur vollständigen Nutzung von grünem Wasserstoff macht.

Grauer Wasserstoff entsteht ebenfalls durch die Dampfreformierung von Erdgas, allerdings wird das CO₂, das bei diesem Prozess freigesetzt wird, in die Atmosphäre abgegeben. Dadurch ist die Herstellung von grauem Wasserstoff besonders emissionsintensiv und umweltschädlich. Diese Form des Wasserstoffs ist derzeit am weitesten verbreitet, wird aber aufgrund der hohen CO₂-Emissionen zunehmend kritisch betrachtet.

5.4 Weitere Anwendungsfelder

ECO zone kann in eine Vielzahl weiterer Anwendungsfelder integriert werden, um Emissionsreduktionen und Netzstabilität zu fördern. Im Folgenden werden weitere mögliche Anwendungsfelder skizziert.

Wärme- und Kälteanwendungen: Flexibilisierung der Nutzung von Heiz- und Kühlsystemen durch emissionsoptimierte Steuerung

Laststeuerung in Industrieprozessen: Gezielte Nutzung von emissionsarmem Strom und Vermeidung von Abregelungen erneuerbarer Energien

EE-Fahrzeugladung: Optimierung der Ladezeiten von Elektrofahrzeugen basierend auf zonalen Emissionsfaktoren (siehe dynamische Tarife)

Applikationen für Endnutzerinnen und Endnutzer: Unterstützung beim Engpassmanagement durch Verbraucherinnen und Verbraucher sowie größere Datentransparenz für die Zivilgesellschaft

Vorteile: Förderung der Akzeptanz der Energiewende und des Verständnisses von Lastverschiebung und ihrer Bedeutung für die Netzstabilität

Die Integration von ECO zone in weitere Anwendungsfelder kann folglich das Bewusstsein für netzdienliches Verhalten und emissionsarme Entscheidungen in Industrie und Gesellschaft stärken. Außerdem können über die gesamte Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft hinweg Synergien ermöglicht werden. Im Expertenbeirat des Projekts ECO zone wurde beispielsweise bereits auf die Integrationsmöglichkeit von ECO zone in bestehende Applikationen wie die Strom-Gedacht-App von TransnetBW hingewiesen. Über bestehende Schnittstellen könnten hier beide Anwendungen ihre jeweilige Reichweite und ihren Informationsgehalt erhöhen und so Verbraucherinnen und Verbrauchern, dem Verbraucherschutz, der Wissenschaft und der kritischen Öffentlichkeit einen Mehrwert bieten.

6. Potenziale zur Emissions- reduktion durch Lastverschiebungen

In den vorangehend beschriebenen Anwendungsfeldern stellt die Lastverschiebung ein zentrales Instrument dar, um den Stromverbrauch an die fluktuierende Erzeugung aus erneuerbaren Energien anzupassen und somit eine sichere und emissionsarme Stromversorgung zu gewährleisten. In diesem Modell wird die Flexibilität der Stromnachfrage einerseits dazu genutzt, auf Schwankungen im Energieangebot zu reagieren, andererseits aber auch, um proaktiv Netzengpässe zu vermeiden. Die Lastverschiebung ist somit ein Mittel, um die Abregelung von erneuerbaren Energien zu verhindern, die Nutzung von Grünstrom zu erhöhen und die Gesamtemissionen der Stromversorgung zu verringern. Die Potenziale der Lastverschiebung lassen sich generell in zwei Kategorien einteilen: technische Potenziale und ökonomische Potenziale.

6.1 Technische Potenziale

Die technischen Potenziale der Lastverschiebung umfassen alle theoretisch machbaren Möglichkeiten, Lasten zeitlich oder räumlich zu verlagern, um die Energieversorgung zu stabilisieren und den Anteil erneuerbarer Energien am Strommix zu maximieren. Im Folgenden werden die Determinanten beschrieben, die die Höhe des technischen Potenzials bestimmen:

1. Flexibilität der Nachfrage:

Technisch gesehen gibt es zahlreiche Verbraucher, deren Lasten zeitlich verschoben werden können. Beispiele dafür sind industrielle Produktionsprozesse, Heiz- und Kühlsysteme mit entsprechenden thermischen Trägheiten, Rechenzentren und Elektrolyseure. Solange der Strombedarf nicht zeitkritisch ist, können diese Lasten verlagert werden.

Beispiele für nicht zeitkritische Lasten, die sich gut für eine Lastverschiebung eignen, seien hier noch einmal zusammenfassend genannt:

- Nicht zeitkritische Berechnungen wie Datenanalysen, Training von KI-Modellen, Rendering-Prozesse oder Backups können flexibel auf Zeiten mit niedrigen Emissionen verschoben werden.
- Bestimmte Produktionsschritte, wie Trocknungsprozesse oder die Kühlung von Anlagen, sind teilweise nicht zeitkritisch und können entsprechend angepasst werden.
- Das Laden von Elektroautos über Nacht oder während weniger belasteter Netzzeiten kann geplant werden, ohne den Komfort der Nutzerinnen und Nutzer zu beeinträchtigen.
- Die Speicherung von Wärme oder Kälte in thermischen Speichern oder indirekt durch die Gebäudehülle erlaubt eine flexible Nutzung (Wärmepumpen und Klimaanlagen) der Geräte zu emissionsarmen Zeiten.

- Geräte wie Waschmaschinen und Geschirrspüler in Privathaushalten können zeitgesteuert eingesetzt werden, um sie in Zeiten niedrigerer Emissionen zu betreiben.
- Die Herstellung von Wasserstoff aus Strom durch Elektrolyseure ist in der Regel nicht zeitkritisch und kann verschoben werden, sofern im Energiesystem ausreichend Kapazitäten zur Speicherung von Wasserstoff zur Verfügung stehen.

In der Regel kommt es nach einer Lastreduktion zu Nachholeffekten bzw. nach einer flexiblen Lasterhöhung zu der Notwendigkeit, die Last in Folgeperioden entsprechend absenken zu müssen. Es muss bei der Betrachtung darauf geachtet werden, dass diese Nachholeffekte bzw. Absenkungsphasen nicht ihrerseits zu netztechnischen Problemen führen.

Neben der bereits beschriebenen zeitlichen Lastverschiebung kann in einigen Bereichen auch Potenzial für eine räumliche Lastverschiebung bestehen. Voraussetzung hierfür ist die Georedundanz⁸, wie sie häufig bei Rechenzentren besteht (siehe Kapitel 7).

2. Integration erneuerbarer Energien:

Ein weiterer technischer Aspekt, der das Potenzial zur Lastverlagerung determiniert, ist die Möglichkeit, durch die Flexibilität der Nachfrage (siehe 1.) die fluktuierende Erzeugung der erneuerbaren Energien besser nutzen zu können. Durch die gezielte Verschiebung von Lasten auf Zeiten hoher Verfügbarkeit von erneuerbar erzeugtem Strom (z. B. bei viel Wind oder Sonnenschein) kann der Anteil erneuerbarer Energien im Netz maximiert und gleichzeitig die Abregelung von EE-Anlagen minimiert werden. Wichtig hierbei ist jedoch, dass die technischen Flexibilitäten der Verbraucher zu den netzseitigen Anforderungen passen. Liegen die Flexibilitäten der Nachfrage (siehe 1.) zeitlich in Phasen von überschüssiger EE-Produktion und kann eine gegebenenfalls notwendige Absenkung des Verbrauchs (Nachholeffekt) vollständig in eine Phase niedriger EE-Produktion verlagert werden, so kann das gesamte technische Potenzial der verbrauchsseitigen Flexibilität genutzt werden. Andernfalls reduziert sich das Potenzial entsprechend.

3. Räumliche Restriktionen durch Netzengpässe:

Netzengpässe entstehen häufig, wenn lokal mehr Strom erzeugt wird, als vor Ort verbraucht oder abtransportiert werden kann. Es kommt in diesem Fall zu einem räumlich begrenzten Überangebot von erneuerbaren Energien. Verbrauchsseitige Flexibilitäten (siehe 1.) können genutzt werden, um durch zusätzlichen Verbrauch eine Nutzung der erneuerbaren Energien zu gewährleisten und eine Abregelung zu vermeiden. Allerdings ist dies nur relevant, wenn diese Flexibilitäten räumlich nah genug an der Erzeugung liegen und dort auch genutzt werden können. Ohne eine netzseitige Lage vor dem

⁸ Georedundanz bei Rechenzentren besteht, wenn zwei Rechenzentren an voneinander entfernten Standorten denselben Datenstand besitzen und jederzeit die Funktion des jeweils anderen Rechenzentrums übernehmen können.

Engpass kann sich durch den zusätzlichen Verbrauch die Netzengpasssituation verschärfen. Das verbrauchsseitige Potenzial an Flexibilität muss also auch räumlich zu den netzseitigen Anforderungen zur Kompensation der Fluktuation der erneuerbaren Energien passen.

4. Technologische Voraussetzungen:

Für die Umsetzung der Lastverschiebung werden moderne Technologien und Anwendungen benötigt wie intelligente Messsysteme, flexible Stromtarife, automatisierte Steuerungen und Netzüberwachungsinstrumente. Diese Technologien ermöglichen die Fernsteuerung und Koordination der Lastverschiebung im Energiesystem. Es gibt in diesem Sinne auch verbrauchsseitige Flexibilitäten, die ein theoretisches technisches Potenzial besitzen, allerdings durch mangelnde technische Fähigkeit zur Ansteuerbarkeit nicht geeignet sind.

Ein Beispiel hierfür sind Lastverschiebungen durch Haushaltsgeräte. Es könnte sich beispielsweise aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Emissionsfaktoren lohnen, eine Waschmaschine nicht wie geplant zwischen 20 und 22 Uhr, sondern zwischen 5 und 7 Uhr laufen zu lassen. Selbst wenn der Haushalt über einen dynamischen Tarif verfügt, der eine solche Lastverschiebung zur Emissionsreduktion incentiviert, hängt die tatsächliche Umsetzbarkeit davon ab, ob die erforderlichen technischen Voraussetzungen vorhanden sind. Fehlen diese, dann müsste die Waschmaschine manuell um 5 Uhr gestartet werden, was das Potenzial erheblich einschränkt, da dies für die meisten Verbraucherinnen und Verbraucher unzumutbar wäre. Verfügt die Waschmaschine jedoch über eine Zeitvorwahl, könnte das Potenzial bereits besser genutzt werden. Allerdings wäre auch hierbei ein manueller Eingriff nötig, was die Nutzung des Potenzials weiterhin einschränken würde. Das volle Potenzial ließe sich erst dann ausschöpfen, wenn die Waschmaschine über eine smarte Steuerung verfügt, die es ermöglicht, selbstständig die optimale Nutzungszeit anhand eines dynamischen Tarifs zu ermitteln und sich entsprechend automatisch zu steuern. Auch im Bereich von Industrie, Gewerbe und Dienstleistungen lassen sich zahlreiche Beispiele finden, in denen das Potenzial im Wesentlichen durch die Digitalisierung der Prozesse beeinflusst wird.

6.2 Ökonomische Potenziale

Dieser Abschnitt legt den Fokus auf wirtschaftliche Gesichtspunkte und Kosten-Nutzen-Abwägungen. Obwohl theoretisch viele Prozesse technisch verschiebbar sind, ist dies nicht immer wirtschaftlich sinnvoll. Die ökonomischen Potenziale der Lastverschiebung hängen stark von den Kosten-Nutzen-Verhältnissen, Anreizen und Marktbedingungen ab.

1. Kosten der Flexibilität:

Die Verschiebung von Lasten ist oft mit zusätzlichen Kosten verbunden, sei es durch höhere Betriebskosten, Effizienzverluste oder Produktionsausfälle. Akteure müssen daher abwägen, ob der Nutzen der Lastverschiebung – etwa in Form von Einsparungen bei den CO₂-Emissionen – die damit verbundenen Kosten übersteigt. Es ist abzusehen, dass sich die Zahl der Fälle, in denen diese Abwägung zugunsten einer Lastverschiebung ausfällt, aufgrund tendenziell steigender CO₂-Preise zukünftig erhöhen wird.

2. Anreize und Marktmechanismen:

Für die Umsetzung von Lastverschiebungsmaßnahmen sind Anreize hilfreich. Durch § 13k EnWG („Nutzen statt Abregeln“) werden finanzielle Anreize geboten, um Unternehmen zur flexiblen Steuerung ihres Energieverbrauchs zu motivieren. Allerdings unterliegt dies strengen Rahmenbedingungen. Für viele der betrachteten Anwendungsfälle besteht kein direkter marktwirtschaftlicher Anreiz für eine konsequent emissionsreduzierende und netzdienliche Lastverschiebung.

3. Vermarktung ökologischer Vorteile:

Eine Vergrößerung des ökonomischen Potenzials ergibt sich aus der steigenden Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten und Dienstleistungen. Unternehmen, die ihren Stromverbrauch durch Lastverschiebung an den Einsatz erneuerbarer Energien anpassen, können dies in ihrem ESG-Reporting nutzen, um sich als nachhaltiger Anbieter zu positionieren und so Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Eine entsprechende Relevanz lässt sich auch aus dem gestiegenen Marktanteil von Ökostromanbietern ableiten: Während der Marktanteil 2008 noch bei etwa 4 Prozent lag, hat er sich bis 2023 auf rund 24 Prozent erhöht. Ein signifikanter Teil des gelieferten Ökostroms entfällt auf den Haushaltssektor, der im Jahr 2022 etwa 43 Prozent des Gesamtanteils ausmachte. Der verbleibende Anteil des Ökostroms wurde an Unternehmen, die öffentliche Hand und andere Endverbraucher geliefert, was auch die Relevanz des Themas außerhalb des privaten Bereichs verdeutlicht (Bundesnetzagentur, 2023; Umweltbundesamt, 2024).

7. Fallstudie zu Potenzialen einer räumlichen Lastverschiebung in Rechenzentren

7.1 Räumliche und zeitliche Lastverlagerung in Rechenzentren als Flexibilitätsoption

Rechenzentren sind ein Wirtschaftszweig mit häufig enorm hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Prozesse und die Verfügbarkeit ihrer Dienste, wodurch ein Abschalten oder Herunterfahren von Produktionsanlagen erschwert ist. Dennoch haben Rechenzentren inhärente Flexibilitätspotenziale, die sich jedoch in ihrer Aktivierungszeit und möglichen Dauer sehr stark unterscheiden und letzten Endes auch abhängen vom Typ der technischen (physischen) Ausstattung des Rechenzentrums sowie der dort laufenden Anwendungen. In Abbildung 8 sind verschiedene inhärente Flexibilitätsoptionen von Rechenzentren schematisch dargestellt, wobei sie nach ihrer Aktivierungszeit und möglichen Dauer angeordnet sind. Im oberen Teil sind entsprechende Anwendungsbereiche für solche Flexibilitäten ebenfalls nach typischen Zeithorizonten angeordnet.

Hardwareseitige Flexibilität ergibt sich aus den häufig vorhandenen und steuerbaren Systemen der unterbrechungsfreien Stromversorgung mit ihren Batterien sowie den Notstromaggregaten mit Diesel, die in vielen Fällen auch durch Brennstoffzellen, teilweise sogar auf Basis von Wasserstoff, ersetzt werden (Swinhoe, 2024). Hierbei ist zu beachten, dass die Verbrennung von Diesel sehr klimaschädlich ist und der Einsatz von Brennstoffzellen in diesem Bereich im Vergleich zu Batterien sehr ineffizient. Durch thermische Speicher kann die Kälte aus Kälteanlagen in Flüssigkeiten gespeichert werden. Dies erfolgt gegebenenfalls mit Phasenübergang wie beim Eisspeicher und wird in modernen Supercomputern bereits eingesetzt (Behr, 2024). Hierdurch können Kälteanlagen beispielsweise nachts bei niedrigen Außentemperaturen besonders effizient laufen oder auch dann, wenn die Situation im Stromsystem gerade günstig ist.

Bei der softwareseitigen Flexibilität gibt es einerseits Möglichkeiten, Workloads zeitlich zu verschieben bzw. zu

verzögern, beispielsweise wenn gewisse Dienste (z. B. Backup-Prozesse) zwar regelmäßig laufen müssen, aber gewisse Freiheiten von einigen Minuten bis Stunden bestehen, bis sie abgeschlossen sein müssen.

Da Rechenzentren in der Regel größtenteils digitale Services online über das Internet anbieten, ist es Nutzerinnen und Nutzern häufig egal (bzw. latenzabhängig), von welchem Rechenzentrum oder Ort dieser Dienst bereitgestellt wird. Da bei Rechenzentren häufig hohe Redundanzen in der Kapazität vorliegen, können Dienste zum Teil hin zu anderen Rechenzentren verlagert werden, an deren Standort zu diesem Zeitpunkt grüner Strom in größeren Mengen verfügbar ist. Diese Prozesse benötigen jedoch einen Indikator als Input, der die Differenzen in der Treibhausgasintensität des Stroms darstellt, um auch tatsächlich ökologisch und netzseitig sinnvolle Lastverlagerungen zu ermöglichen. Im Projekt ECO zone wird dieser Indikator bereitgestellt. Mit dieser Fallstudie wird beispielhaft für ein realistisches Rechenzentrum anhand von Beispieldaten das Potenzial dieser Lastverlagerung untersucht.

7.2 Anforderungen und technische Voraussetzungen für die Lastverschiebung in Rechenzentren

7.2.1 Hohe Hardware-Reservekapazitäten (Redundanzen) als Voraussetzung für die Lastverlagerung

Rechenzentren haben häufig enorm hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit ihrer Dienste. Hierfür wurden Verfügbarkeitsklassen definiert, die zwischen 30 Minuten (Tier 4) und 28,5 Stunden (Tier 1) Ausfallzeit pro Jahr gewährleisten sollen.⁹ Diese Verfügbarkeitsklassen bauen jedoch stark auf Redundanzen auf, da die Verfügbarkeit eines Rechenzentrums maßgeblich von der Implementierung von Redundanzen abhängt. Redundanzen stellen sicher, dass bei Ausfall einer Komponente eine andere sofort übernimmt, um den Betrieb aufrechtzuerhalten.

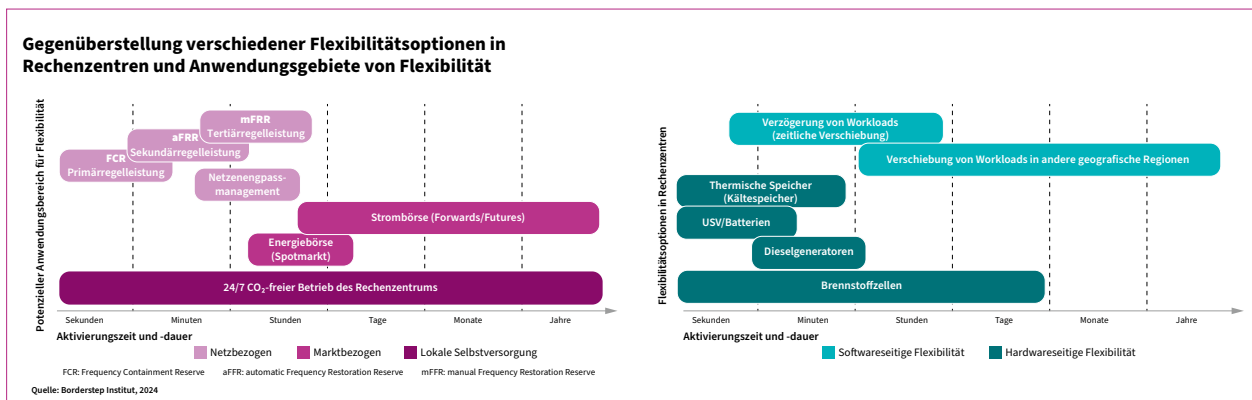


Abbildung 8: Gegenüberstellung verschiedener Flexibilitätsoptionen in Rechenzentren und Anwendungsgebiete von Flexibilität

⁹ Die Tier-Klassifikation wurde vom Uptime Institute eingeführt, um einen Standard zur Vergleichbarkeit der Verfügbarkeit von Rechenzentren zu schaffen (Uptime Institute, 2024).

Redundanzen betreffen nicht nur die physische Infrastruktur wie Stromversorgung, Kühlung und Netzwerke, sondern auch die IT-seitige Infrastruktur, zum Beispiel durch gespiegelte Server, Datenbanken oder georedundante Datenspeicher. Mehr Redundanzen führen zu einer höheren Verfügbarkeit und damit zu einer höheren Verfügbarkeitsklasse im Tier-Modell.

Neben den Redundanzen sind viele Rechenzentren, insbesondere eigene Unternehmensrechenzentren (On-Premises), typischerweise so ausgelegt, dass sie bei starkem Wachstum ihrer Services oder auch bei einer unerwartet hohen Belastung verzögerungsfrei funktionieren und dabei die Redundanzanforderungen nicht verletzen.

Hohe Reserven für den schwankenden bzw. skalierenden Betrieb sowie Anforderungen an lokale Redundanzen und Georedundanz führen in der Regel zu einer äußerst schlechten Auslastung der vorhandenen IT-Hardware¹⁰, die je nach Dienst zwischen 5 und 60 Prozent liegen kann (Erfahrungswerte aus Interviews und Befragungen des Borderstep Instituts).

Nimmt man an, dass keine separate IT-Hardware für Lastverschiebung beschafft werden soll, so stellen vor allem diese freien Kapazitäten im bestehenden IT-Betrieb die ökonomische Grundlage für eine mögliche Lastverschiebung dar, so dass bei einem Rechenzentrum mit hoher CO₂-Intensität die Workload nur so weit reduziert werden kann, wie gleichzeitig bei einem anderen Rechenzentrum mit niedriger CO₂-Intensität die Workload aufgrund freier Kapazitäten erhöht werden kann.

Weitere (Hardware-)Voraussetzungen sind eine kontinuierliche Hochgeschwindigkeits-Datenverbindung zwischen diesen Rechenzentren sowie eine kompatible IT-Hardware in beiden Rechenzentren, die anhand ihrer Spezifikationen (insbesondere CPU-Typ/GPU, RAM, Netzwerkanbindung, Storage) zur Ausführung der Workloads geeignet ist.

7.2.2 Virtualisierung der IT-Hardware für die verteilte und dynamische Bereitstellung von Services

Virtualisierung ist eine Schlüsseltechnologie in modernen Rechenzentren, die es ermöglicht, physische Hardware in mehrere virtuelle Maschinen (VMs) zu partitionieren, wodurch mehrere Betriebssysteme und Anwendungen auf derselben physischen Hardware gleichzeitig ausgeführt werden können. Diese Abstraktionsschicht zwischen der Hardware und den darauf laufenden Anwendungen bietet eine erhöhte Flexibilität und Ressourceneffizienz. Virtualisierung sorgt dafür, dass Rechenressourcen besser ausgelastet werden, indem Workloads flexibel auf verschiedene physische Server verteilt werden können, je nach Bedarf und Verfügbarkeit. Mit sogenannten Containern kann auf Betriebssystemlevel eine weitere Virtualisierungsschicht geschaffen werden, die

abstrakte Hardwareressourcen für einzelne isolierte (Teil-)Anwendungen bereitstellt.

Im Zusammenhang mit der Verlagerung von Workloads in verschiedene Regionen ist die Virtualisierung entscheidend, da sie es ermöglicht, Workloads schnell und effizient zwischen verschiedenen Servern und sogar Rechenzentren zu migrieren. Dank der Virtualisierung können Anwendungen und Dienste unabhängig von der zugrunde liegenden Hardware oder dem geografischen Standort betrieben werden. Dies ermöglicht es, die Workload dynamisch an die Standorte zu verlagern, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine günstigere Energiebilanz aufweisen, etwa durch die Nutzung von lokal verfügbaren erneuerbaren Energiequellen. Dieses Potenzial virtualisierter Ressourcen im Internet im Zusammenspiel mit den geografisch unterschiedlich verfügbaren erneuerbaren Energien wurde bereits in den frühen Jahren des Cloud Computing erkannt und diskutiert (unter anderem Zhang et al., 2011).

Dynamisches Scheduling ist eine softwarebasierte Methode zur Steuerung und Verteilung von Workloads in Abhängigkeit von variablen Faktoren wie Ressourcenauslastung, Stromverbrauch oder Netzwerkverfügbarkeit. Im Gegensatz zu statischen Scheduling-Methoden, bei denen Aufgaben nach festen Regeln auf Server verteilt werden, ermöglicht dynamisches Scheduling eine flexible und adaptive Zuweisung von Ressourcen. Dies ist besonders relevant für das sogenannte Carbon Aware Computing, bei dem die Verteilung der Workload an den Energiemix der jeweiligen Region angepasst wird. Durch dynamisches Scheduling kann eine Workload in eine Region mit einem höheren Anteil an erneuerbaren Energien oder geringeren CO₂-Emissionen verschoben werden. Ein solcher Carbon Aware Scheduler ist derzeit Gegenstand vieler Projekte und Initiativen, einige davon werden in Asadov et al. (2023) beschrieben.

In einer global verteilten Infrastruktur können diese Technologien genutzt werden, um Workloads kontinuierlich in Regionen mit einem optimalen Energiemix zu verschieben. Beispielsweise kann dynamisches Scheduling eine hohe Workload während der Tagesstunden in einem sonnenreichen Gebiet mit Solarenergie ausführen lassen und sie anschließend in eine Region mit starker nächtlicher Windkraftproduktion verlagern. Hierbei wird die Virtualisierung eingesetzt, um die nötige Flexibilität zu schaffen, Workloads ohne komplexe Hardwareinterventionen zu migrieren.

Zusammengefasst stellen Virtualisierung und dynamisches Scheduling die technischen Grundlagen dar, um Workloads dynamisch an die energetischen und umweltbezogenen Gegebenheiten eines Standorts anzupassen. Sie ermöglichen es, in Echtzeit auf Veränderungen im Energiemix zu reagieren,

10 In diesem Bericht wird die IT-Auslastung mit der mittleren Auslastung der installierten CPUs definiert. In Rechenzentren sind daneben weitere Größen für die Auslastung verbreitet, beispielsweise in Bezug auf die elektrische Anschlussleistung oder die Flächenbelegung (insbesondere Colocation).

den Anteil erneuerbarer Energien im Betrieb von Rechenzentren zu maximieren und so einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks von Cloud-Infrastrukturen zu leisten.

7.2.3 Verschiedene Typen digitaler Anwendungen und ihre Möglichkeiten zur Lastverlagerung

Die Verschiebbarkeit von Cloud-Anwendungen zwischen unterschiedlichen geografischen Standorten hängt stark vom Anwendungstyp sowie von verschiedenen technischen und betrieblichen Faktoren ab. Batch-Verarbeitungssysteme, wie große Datenanalysen oder wissenschaftliche Berechnungen, sind oft gut verschiebbar, da sie in der Regel keine strengen Echtzeitanforderungen erfüllen müssen und flexibel geplant werden können, um Zeiten und Orte mit überschüssiger erneuerbarer Energie zu nutzen. Die Verlagerung interaktiver Webanwendungen ist komplexer. Während statische Webinhalte bei ausreichender Bandbreite im Backend von verschiedenen Orten aus bereitgestellt werden können, erfordern dynamische Inhalte oft eine niedrige Latenz, was die Verlagerungsmöglichkeiten einschränkt. Video- und Audio-Streaming-Dienste können teilweise verlagert werden. Die Bereitstellung von Inhalten erfolgt oft über bereits verteilte Content Delivery Networks (CDNs), während Backend-Prozesse wie Transkodierung flexibler verlagert werden können. IoT- und Edge-Computing-Anwendungen erfordern oft eine Verarbeitung in der Nähe der Datenquelle, was die Verlagerungsmöglichkeiten einschränkt. Dennoch können einige Aufgaben, wie die Langzeitanalyse von Daten, in entferntere Rechenzentren mit grünem Strommix verlagert werden.

Mehrere Faktoren beeinflussen die Möglichkeiten zur geografischen Verlagerung von Cloud-Anwendungen. Die Netzwerklatenz ist ein kritischer Faktor, insbesondere für interaktive Anwendungen. Je kleiner die erlaubten Signal-Latenzen, desto begrenzter sind die Verlagerungsmöglichkeiten, da mit der Entfernung (maximale Signalgeschwindigkeit ist Lichtgeschwindigkeit), vor allem aber auch mit der Routing-Komplexität (Anzahl notwendiger Netzwerk-Hops) die Signallaufzeit zunimmt. Gesetzliche Vorschriften zur Datenspeicherung und -verarbeitung können die Verlagerung von Anwendungen über Landesgrenzen hinweg einschränken, was Aspekte der Datenlokalität und -souveränität betrifft. Die verfügbare Netzwerkbandbreite zwischen Standorten beeinflusst die Praktikabilität der Verlagerung datenintensiver Anwendungen. Nicht zuletzt spielt die Anwendungsarchitektur eine wichtige Rolle: Mikroservicebasierte Architekturen (sogenannte Cloud-Native-Anwendungen) ermöglichen eine flexiblere Verlagerung einzelner Komponenten im Vergleich zu monolithischen Anwendungen.

7.2.4 Existierende Ansätze und Modelle zur Lastverlagerung in Rechenzentren

Wie zuvor bereits erwähnt, gibt es in Asadov et al. (2023) eine Beschreibung der wichtigsten Ansätze von Carbon Aware

Computing. Im Folgenden werden diese Ansätze und ihre Merkmale kurz zusammengefasst:

1. Carbon Aware Computing von Google

Google hat eine Methode entwickelt, bei der Workloads sowohl zeitlich als auch geografisch verschoben werden, um von niedriger Kohlenstoffintensität des Stroms zu profitieren. Ein zentraler Bestandteil ist die Vorhersage der Kohlenstoffintensität für den nächsten Tag, kombiniert mit einem Algorithmus, der flexible Arbeitslasten in Zeitfenster mit geringerer CO₂-Intensität verlagert. Diese Methodik reduziert nicht nur Emissionen, sondern optimiert auch die Lastspitzen (Peak Shaving).

2. Carbon Aware Kubernetes von Microsoft

Microsoft hat einen erweiterten Kubernetes-Scheduler implementiert, der die Marginal Operating Emission Rate (MOER) berücksichtigt, um die Treibhausgasintensität eines Rechenzentrums zu bewerten. Der Algorithmus priorisiert die Verteilung der Workloads auf Knoten mit geringerem CO₂-Ausstoß, was die Gesamtbelastung durch Emissionen verringern soll (Buchanan et al., 2023). Ein solcher Scheduler ist auf einen kontinuierlichen Dateninput mit den regionalen marginalen Emissionswerten angewiesen, so wie sie beispielsweise über die Schnittstelle von ECO zone bereitgestellt werden.

3. CarbonScaler

CarbonScaler konzentriert sich auf das zeitliche und geografische Verschieben von rechenintensiven Aufgaben, insbesondere im Bereich des maschinellen Lernens (ML) und wissenschaftlicher Berechnungen. Durch die Verlagerung auf Zeiten und in Regionen mit niedriger Kohlenstoffintensität kann eine signifikante Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks erreicht werden.

4. CarbonExplorer

CarbonExplorer ist ein von Meta initiiertes Open Source Tool, das zum Ziel hat, die Treibhausgasemissionen von Rechenzentren und IT (inklusive Grauer Energie / Embodied Emissions) zu minimieren. Dabei können je nach Ort unterschiedliche Ansätze (mehr oder weniger EE-Erzeugung, mehr oder weniger Batteriespeicher oder auch Carbon Aware Scheduling) zum optimalen Ziel führen. Dadurch sollen Investitionsentscheidungen für unterschiedliche Ansätze vereinfacht werden, um einen kostengünstigen und auch schnellen Weg zu möglichst geringen Emissionen zu identifizieren.

5. GreenCourier

Dieser Softwareansatz setzt auf das im Cloud-Bereich immer häufiger genutzte Bereitstellungsmodell Function as a Service (FaaS), auch Serverless Computing genannt. In diesem Modell können Entwicklerinnen und Entwickler Code ausführen, ohne sich um die Verwaltung von Servern zu kümmern. Die Infrastruktur wird dynamisch von einem Cloud-Anbieter bereitgestellt und skaliert, sodass sich die Entwicklerinnen und Entwickler keine Gedanken darum machen müssen. In

diesem Segment bietet sich Carbon Aware Computing besonders an, denn die Zuordnung von Hardwareressourcen zu einem Online-Dienst erfolgt bereits vollautomatisiert. Die Konfiguration des Scheduler (wie in vorherigen Beispielen gezeigt) liegt hierbei allerdings beim Rechenzentrums- bzw. Cloud-Betreiber. Ebenso wie in den vorherigen Beispielen ist der kontinuierliche Input von regionalen Emissionsfaktoren für Strom (wie aus ECO zone) notwendig, damit diese Optimierung nach Treibhausgasen möglich ist.

6. Carbon Aware Kubernetes Scheduler by Piontek et al.

Dieser Scheduler fokussiert sich darauf, nicht kritische Aufgaben so zu verschieben, dass sie möglichst niedrige CO₂-Emissionen verursachen, ohne dabei Service Level Agreements (SLAs) zu verletzen. Dabei können Aufgaben bis zu 24 Stunden verzögert werden, bevor sie ausgeführt werden müssen.

7. Karmada und KEDA

Karmada erweitert Kubernetes um eine räumliche Lastverschiebung basierend auf der Kohlenstoffintensität. KEDA fügt eine ereignisgetriebene automatische Skalierung basierend auf Echtzeit-Kohlenstoffdaten hinzu, was die Anzahl der ausgeführten Dienst-Replikas dynamisch anpasst, um Emissionen zu reduzieren.

Diese Ansätze konzentrieren sich auf die Optimierung der Workload-Verteilung basierend auf der Kohlenstoffintensität, entweder durch zeitliche Verschiebung (bei vorhergesagten Zeiten mit geringerer CO₂-Belastung) oder durch geografische Verlagerung in Regionen mit einem höheren Anteil an erneuerbaren Energien.

Es konnte gezeigt werden, dass bereits eine Vielzahl an technischen Ansätzen existieren, die die Verschiebung von Workloads zwischen Rechenzentren zumindest theoretisch ermöglichen. Verschiebungen über die Grenzen der individuellen Cloud-Umgebungen der Anbieter sind heute noch relativ schwierig, aber auch daran arbeiten Forschungsprojekte wie beispielsweise FLUIDOS (Asadov et al., 2023). Die Besonderheit des Ansatzes von ECO zone liegt in der Bottom-up-Bereitstellung von dynamischen Emissionsfaktoren auf einer sehr granulareren geografischen Ebene. ECO zone stellt eine wichtige Grundlage dafür dar, im stark wachsenden Markt der Rechenzentren nicht nur zwischen Weltregionen, sondern auch innerhalb eines Landes wie Deutschland anhand von marginalen Emissionsfaktoren zu erkennen, an welchen Orten das momentane Energiedargebot auf erneuerbaren Energien basiert und wo es eher CO₂-intensiv ist.

7.3 Erhebung und Abstimmung von Beispieldaten der Lastverlagerung

7.3.1 Modellannahmen und Bezug zu realen Rechenzentren

Um das Potenzial von Lastverschiebungen zu ermitteln, werden zwei beispielhafte Rechenzentrumsstandorte verwendet,

einer in der Nähe von Paderborn und einer in Frankfurt am Main. Es wird modelliert, welche Potenziale sich aus einer konkreten Lastverschiebung zwischen diesen beiden Standorten ergeben könnten. Wesentliche Charakteristika dieser Standorte (Lage innerhalb Deutschlands sowie Anschlusswerte) werden von realen Rechenzentren übernommen, während öffentlich nicht zugängliche Informationen wie die genaue IT-Ausstattung oder die exakte Zeitreihe der Leistungsaufnahme möglichst realitätsnah modelliert werden.

Modellannahmen und Vereinfachungen

Informationstechnik

- Es werden in beiden Rechenzentren die gleichen Servertypen mit den gleichen Chips eingesetzt, die gleichermaßen effizient die Workloads verarbeiten können. Würde in der Realität die Workload auf einen älteren Server bzw. Chip verlagert, würde die Ausführung typischerweise mehr Zeit benötigen, um die gleiche Rechenlast zu bearbeiten, was häufig einen höheren Energiebedarf verursachen kann.
- Für beide Rechenzentren wird eine IT-Anschlussleistung von 300 kW angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass im Normalzustand die IT-Auslastung durchgehend bei 40 Prozent liegt.
- Die Workloads werden ohne Verzögerung von einem Standort an den anderen verlagert und hochgefahren. In der Realität hängt dies unter anderem von der Netzwerkgeschwindigkeit zwischen den Rechenzentren ab.
- Wenn ein Server seine Workload abgibt, gibt er sie vollständig an das andere Rechenzentrum und geht dann in den Idle-Zustand. Das heißt, er geht in einen Wartezustand, der vergleichbar mit dem Standby von Elektrogeräten im Haushalt weiterhin etwas Energie benötigt, um jederzeit abrufbar zu bleiben.

Rechenzentrums-Infrastruktur

- Es wird für beide Standorte eine Kühlinfrastruktur unterstellt, die die gleiche Power Usage Effectiveness (PUE) von 1,3 aufweist.
- Dieser Infrastruktur-Overhead von 30 Prozent enthält Energie für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, Brandschutz, Leitungsverluste und Beleuchtung, aber auch für Lüftung und Kälteerzeugung. Ein Teil davon ist statisch (18 Prozent Overhead), ein anderer Teil (Kälteerzeugung/Chiller) ist abhängig von der Außentemperatur (12 Prozent Overhead). Hierfür werden stündliche Wetterdaten der den Rechenzentrums-Standorten nahe gelegenen Wetterstationen Frankfurt (DWD Station ID 1424) und Bad Lippspringe (DWD Station ID 3028) des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2024) verwendet.
- Dabei hat die Lastverlagerung keinen Einfluss auf die Infrastruktureffizienz. Die Momentan-PUE wird also nicht durch Lastverlagerung beeinträchtigt. Wird der IT-Stromverbrauch heruntergefahren, skaliert auch der Infrastrukturverbrauch proportional.
- Die Leistungsaufnahme der Kälteerzeugung wird auf Chiller 150 kW begrenzt.

- Es werden für die Standorte die Emissionsdaten Nord/Süd von ECO zone (<https://future-energy-lab.de/projects/eco-zone/>) herangezogen.
- Betrachtungszeitraum: 01.01.2023, 00:00 Uhr, bis 31.12.2023, 23:45 Uhr (viertelstündlich)
- Einheitliche Workload: Es wird angenommen, dass auf den Servern nicht latenzkritische Workloads (z. B. Videoverarbeitung oder nicht zeitkritische Datenbankdienste) ausgeführt werden.
- Hysterese: Bei weniger als 5 g/kWh Differenz zwischen den beiden Regionen wird keine Verlagerung vorgenommen. Es wird angenommen, dass die Datenübertragung (Virtuelle Maschinen/Container sowie gegebenenfalls Übertragung der Nutzerdaten im Betrieb) durch Mehrverbräuche im Datennetz (Router/Switches) ansonsten die Einsparungen negieren würde.

7.3.2 Beschreibung der Effekte durch die Lastverlagerung für ausgewählte Server

In Rechenzentren verhält sich die Stromaufnahme von Servern nicht proportional zur Workload, was auf verschiedene technische und betriebliche Faktoren zurückzuführen ist. Selbst im Idle-Zustand, also wenn der Server keine oder nur sehr geringe Rechenlast trägt, wird eine signifikante Menge an Strom verbraucht. Dies lässt sich auf mehrere Ursachen zurückführen.

Zunächst liegt das Verhalten an den internen Komponenten der Server, die auch bei geringer Auslastung ständig aktiv bleiben. Hauptverursacher sind Prozessoren (CPUs), Netzteile, Lüfter und Speichereinheiten, die im Grundbetrieb eine konstante Mindestleistung benötigen. Prozessoren moderner Server sind oft darauf ausgelegt, auch im Leerlauf bestimmte Funktionen aufrechtzuerhalten, wie das Monitoring von Systemzuständen oder das Halten von Daten in Cache-Speichern. Dies resultiert in einem konstanten Stromverbrauch, selbst wenn die CPU keine Nutzlast verarbeitet. Während Stromsparmodi wie „Sleep“ oder „C-States“ diese Last reduzieren können, wird weiterhin eine Basismenge an Energie benötigt, um die Hardware in einem betriebsbereiten Zustand zu halten.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Ineffizienz von Netzteilen. Sie sind darauf ausgelegt, unter Volllast den besten Wirkungsgrad zu erreichen, was bedeutet, dass sie bei niedrigen Lasten oft weniger effizient arbeiten und daher einen höheren Stromverbrauch relativ zur Nutzlast verursachen. Ein Netzteil mit einem Wirkungsgrad von 90 Prozent bei Volllast kann unter geringerer Last beispielsweise nur noch einen Wirkungsgrad von 70 Prozent oder weniger aufweisen, was den Stromverbrauch auch im Leerlauf erhöht.

Auch Peripheriekomponenten wie Netzwerkkarten, RAID-Controller und Speicherlaufwerke tragen zur Grundlast bei.

Diese Komponenten bleiben ebenfalls aktiv, um schnell auf Anfragen reagieren zu können, was wiederum zu einem kontinuierlichen Stromverbrauch führt. Die physische Kühlung der Server ist ein weiterer Aspekt. Selbst bei geringer Auslastung müssen Lüfter und Klimasysteme laufen, um die Wärme abzuführen, die auch im Idle-Zustand erzeugt wird.

Ein häufig übersehener Faktor ist die Tatsache, dass moderne Server oft für höhere Lasten ausgelegt sind. Da, wie bereits in Kapitel 7.2 (Anforderungen und technische Voraussetzungen für die Lastverschiebung in Rechenzentren) beschrieben, Rechenzentren eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit garantieren müssen, werden Server so konfiguriert, dass sie zu jedem Zeitpunkt schnell skalieren und hohe Workloads bewältigen können. Diese Architektur erfordert jedoch, dass bestimmte Komponenten auch im Leerlauf aktiv bleiben, um eine schnelle Reaktionsfähigkeit zu gewährleisten, was wiederum den Stromverbrauch erhöht.

In Abbildung 9 sind die Auslastung in Form von Rechenleistung pro Watt und die Stromaufnahme-Kennlinie eines leistungsstarken Servers (4 Blade-Nodes, 4 x AMD EPYC 9754, je 128 Cores, 768 GB RAM) dargestellt¹¹. Diese nicht proportionale Leistungskurve wird bei der Simulation der Lastverlagerung berücksichtigt, um beispielsweise auch die Effekte von Idle-Stromverbrauch (bei vollständigem Offloading) zu berücksichtigen. Zum Beispiel beträgt bei der oben angegebenen IT-Auslastung von 40 Prozent die elektrische Leistungsaufnahme 54 Prozent (708 W) bezogen auf die maximale Leistungsaufnahme (1.313 W).

7.4 Ermittlung der Potenziale der Lastverlagerung

7.4.1 Skalierung auf die ausgewählten Rechenzentren und Ergebnisse

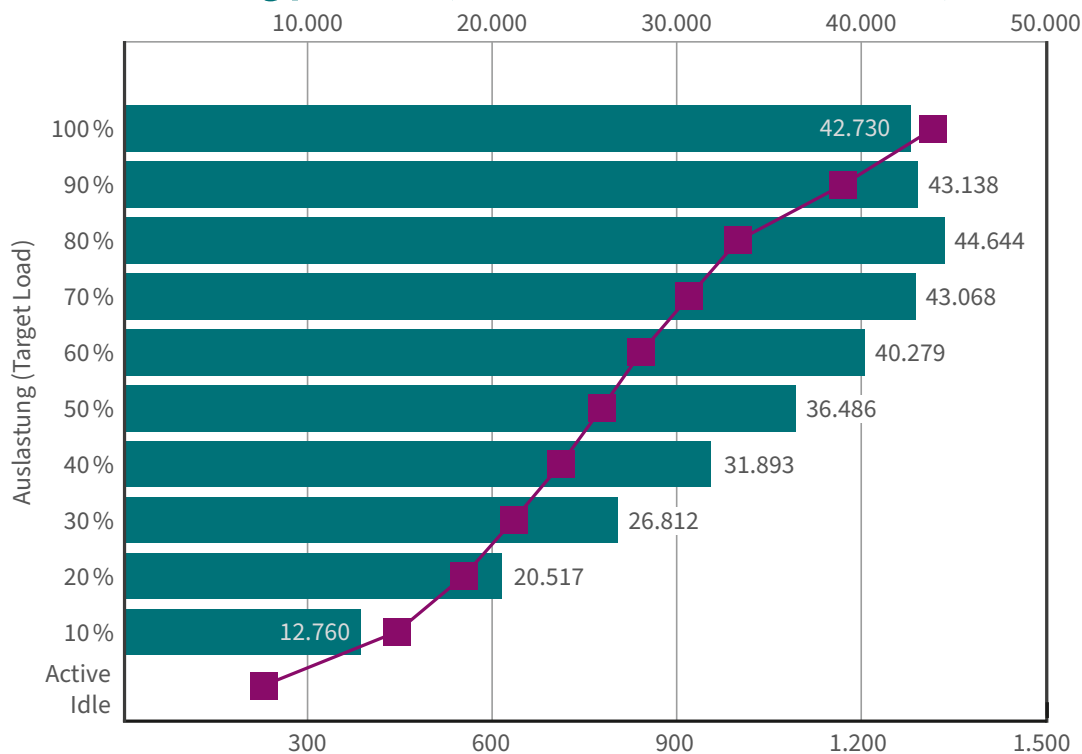
In Abbildung 10 und 11 sind die Leistungsverläufe der beiden Rechenzentren dargestellt. Klar erkennbar ist bei beiden Standorten im Normalbetrieb (petrol) die etwas höhere Leistungsaufnahme im Sommer aufgrund höherer Temperaturen.

Relativ klar zeigen sich auch die wesentlich häufigeren Lasterhöhungen (lila) im angepassten Betrieb am Standort Paderborn, während zeitgleich am Standort Frankfurt die Workloads reduziert werden. Dies ist direkt auf die wesentlich niedrigeren marginalen Emissionsfaktoren des nördlicheren Standorts zurückzuführen, die sich aus den Daten von ECO zone für die Standorte Nord und Süd ergeben.

Dennoch gibt es auch im Sommer einige Tage, an denen Workload von Nord nach Süd verlagert wird, wo vermutlich aufgrund hoher Photovoltaik-Einspeisung an einzelnen Tagen niedrigere Emissionswerte vorliegen.

¹¹ Die SPECpower_ssj2008 Benchmark belastet einen Server über mehrere Minuten in verschiedenen Stufen (Idle – 100 Prozent) mit einer speziellen Workload, die sowohl CPU als auch RAM beansprucht und einen Online-Dienst simuliert.

Rechenleistung pro Watt (Performance to Power Ratio)



Durchschnittliche Leistungsaufnahme (W) (Average Active Power)

Quelle: SPEC, 2024

Abbildung 9: Das Profil der Leistungsaufnahme (horizontale Achse) eines leistungsstarken Servers (lila) über verschiedene Auslastungsstufen (vertikale Achse)

Diese häufigeren Verlagerungen von Süd nach Nord führen in der Gesamtbilanz über das gesamte Jahr auch zu höheren Stromverbräuchen in dem Rechenzentrum im Norden und gleichzeitig zu niedrigeren Stromverbräuchen in dem Rechenzentrum im Süden (siehe Abbildung 12). Die Gesamtsumme des Stromverbrauchs ist im angepassten Betrieb etwas niedriger, was auf die nicht proportionalen Zusammenhänge von Workload und Stromverbrauch zurückzuführen ist (siehe Kapitel 7.3.2). Einerseits entsteht durch den Idle-Stromverbrauch auch bei den Servern, von denen die Workload ausgelagert wird, ein Nachteil. Gleichzeitig arbeiten die höher ausgelasteten Server bei der Konsolidierung auf einem wesentlich effizienteren Betriebspunkt. Weitere kleine Nichtproportionalitäten in der Infrastruktur, die in der Realität zusätzliche Trade-offs der Lastverlagerung darstellen könnten, werden in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Bilanziert man die CO₂-Emissionen des Stromverbrauchs dieser Standorte mit den hier zugrunde gelegten lokalen dynamischen Emissionsfaktoren, angelehnt an die DIN SPEC 91410-2 (2021), kann das Potenzial der Lastverschiebung zur Reduktion von CO₂-Emissionen dargestellt werden. Im aktuell betrachteten Beispiel wird ersichtlich (Abbildung 13), dass es im Vergleich der beiden Standorte bereits im Normal-

betrieb erheblich höhere Emissionen am südlichen Standort gibt, obwohl im Normalbetrieb an beiden Standorten gleich viel Strom verbraucht wird. Eine Reduktion der Emissionen findet ebenfalls vor allem am südlichen Standort statt, denn der Standort im Norden hat durch die zusätzliche Workload tendenziell höhere Stromverbräuche, wie zuvor ersichtlich wurde. Die Gesamtreaktion von CO₂-Emissionen beträgt in diesem Beispiel 193 Tonnen CO₂ innerhalb von einem Jahr, was bemerkenswert ist, denn hierfür wurden weder zusätzliche Erneuerbare-Energien-Anlagen installiert noch physische Effizienzmaßnahmen in den Rechenzentren getroffen. Diese Einsparungen resultieren allein aus der Verlagerung von digitalen Workloads an einen anderen Ort in Abhängigkeit vom Energiemix.

7.4.2 Potenzialeinschätzung

Die theoretische Modellierung einer Lastverlagerung zwischen Rechenzentren, wie sie in dieser Fallstudie beschrieben wird, zeigt vielversprechende Ansätze zur Reduktion von CO₂-Emissionen durch das sogenannte Carbon Aware Computing auf Basis von dynamischen Emissionsfaktoren des Projekts ECO zone. Die Übertragung dieser Konzepte in die Praxis ist möglich, insbesondere dadurch, dass Virtualisierung und dynamisches Scheduling in Rechenzentren im Kontext von

Leistungsprofil Paderborn: Normalbetrieb und angepasster Betrieb

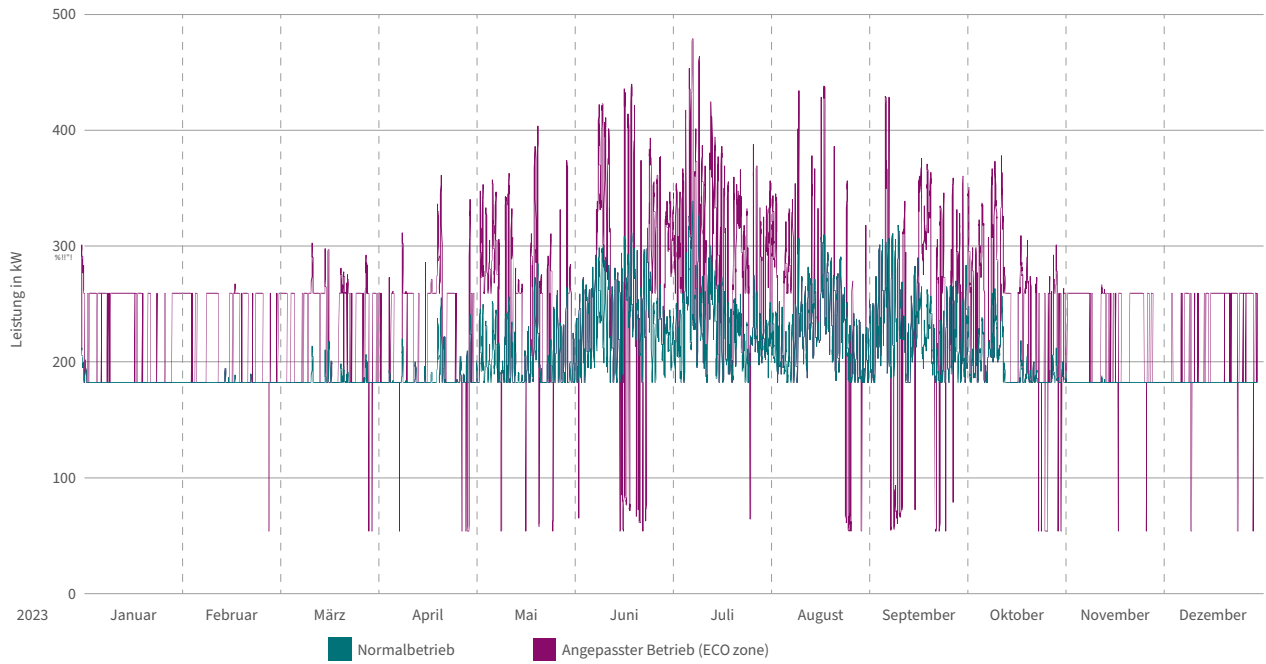


Abbildung 10: Leistungsprofil Paderborn: Normalbetrieb und angepasster Betrieb

Leistungsprofil Frankfurt: Normalbetrieb und angepasster Betrieb

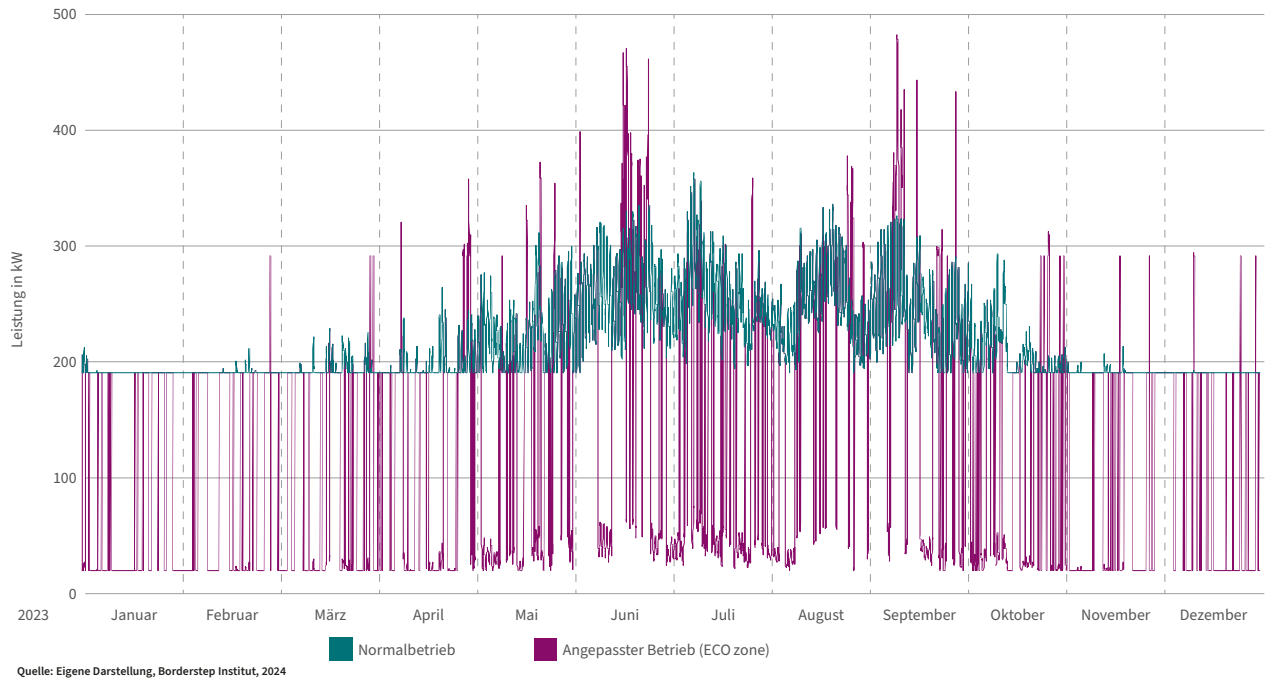


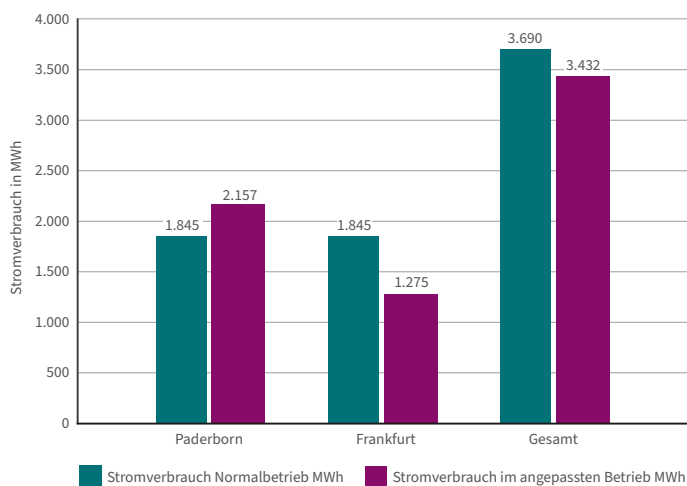
Abbildung 11: Leistungsprofil Frankfurt: Normalbetrieb und angepasster Betrieb

Cloud Computing mittlerweile weit verbreiteter Standard sind. Insbesondere in Ländern wie Deutschland oder heterogenen Kontinenten wie Europa mit geografisch sehr unterschiedlichem Anteil an erneuerbaren Energien (insbesondere Wind und Photovoltaik) kann so der CO₂-Ausstoß signifikant gesenkt werden, ohne physische Änderungen an der Rechenzentrums-Infrastruktur vorzunehmen.

Allerdings gibt es auch Limitationen, die beachtet werden müssen. Eine zentrale Herausforderung ist die Abhängigkeit von Netzwerkgeschwindigkeiten und Latenzen zwischen den Rechenzentren. Die Performance von besonders latenzkritischen Anwendungen könnte durch die geografische

Verlagerung beeinträchtigt werden, was die Verschiebbarkeit einschränkt. Auch die gesetzlichen Anforderungen, wie etwa die Datenlokalität und die Datensouveränität, können internationale Verschiebungen verhindern. Ein weiteres Hindernis besteht in der Notwendigkeit von freien IT-Ressourcen in den Zielrechenzentren, da die Lastverschiebung nur dann ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, wenn sie ohne zusätzliche Hardware (bzw. insgesamt schlechtere Auslastung) erfolgen kann. Denkbar wäre eventuell auch in diesem Kontext das längere Verwenden von älterer IT-Hardware oder das Aufbereiten (Refurbish) von IT-Hardware zu diesem Zweck, denn bei extrem niedrigen CO₂-Emissionsfaktoren nimmt die Bedeutung der Effizienz der Hardware ab.

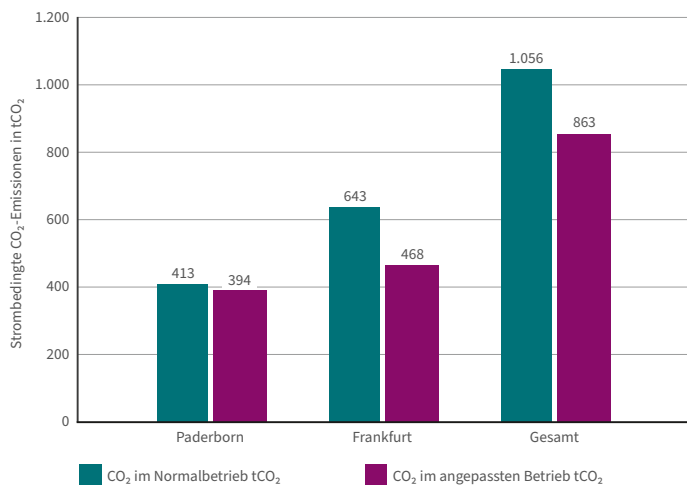
Energiemengen im Normalbetrieb und im angepassten Betrieb (2023)



Quelle: Eigene Darstellung, Borderstep Institut, 2024

Abbildung 12: Stromverbrauch der beiden Standorte jeweils für den Normalbetrieb und den CO₂-optimierten angepassten Betrieb

CO₂-Emissionen des Stromverbrauchs im Normalbetrieb und im angepassten Betrieb (2023)



Quelle: Eigene Darstellung, Borderstep Institut, 2024

Abbildung 13: CO₂-Emissionen im Normalbetrieb und im durch ECO zone optimierten Betrieb

8. Handlungs- empfehlungen

Handlungsempfehlungen zu den politischen Rahmenbedingungen

- **Infrastruktur mit Nachdruck modernisieren:** Derzeitige Anstrengungen des Gesetzgebers und seiner Organe bezüglich Smart Meter-Rollout, Stromnetz-, Speicher- und Glasfaserkabelausbau und der flächendeckenden Digitalisierung des Energiesystems sollten mit höchster Priorität weiter vorangetrieben werden. Nur wenn diese Infrastrukturprojekte erfolgreich umgesetzt werden, können allgemeine Potenziale der Energiewende und spezifische Potenziale wie die Emissionsreduktion anhand von ECO zone vollumfänglich ausgeschöpft werden.
- **Öffentlichkeitsarbeit zu Flexibilitätsnotwendigkeiten und CO₂-Preis-Entwicklung:** Die Öffentlichkeits- und Aufklärungsarbeit sollte massiv ausgebaut werden: Die Dynamisierung des Stromnetzes wird mittelfristig alle deutschen Verbraucherinnen und Verbraucher betreffen und bedeutet eine Abkehr von gewohnten Abläufen bei der Stromnutzung und -bezahlung. Je früher und unmissverständlicher die Öffentlichkeit über Zusammenhänge aufgeklärt und auf Veränderungen vorbereitet wird, desto reibungsloser kann die Transformation des Energiesektors gelingen. Hierzu gehört auch, dass Wirtschaft und Bevölkerung deutlich offensiver auf den zukünftig steigenden CO₂-Preis hingewiesen werden sollte.
- **Emissionsfaktoren als Entscheidungskriterium:** Der Gesetzgeber sollte den Faktor der Emissionsreduktion in seinen Entscheidungen bezüglich des Energiesystems berücksichtigen und in Verwaltung, Vergabeverfahren, Erteilung von Subventionen, etc. als eigenständiges und entscheidendes Kriterium berücksichtigen.
- **Standortförderung anhand lokaler marginaler Emissionen:** Standortförderung und Wirtschaftsraumentwicklung sollten auch anhand der Höhe lokaler marginaler Emissionen erfolgen.
- **Verpflichtendes Emissionsmonitoring:** Sowohl innerhalb der staatlichen Verwaltung als auch bei öffentlichen Vergaben sollte Emissionsmonitoring verpflichtend sein.
- **Ausweitung des ESG-Reportings:** Die Bundesregierung sollte für ESG-Reporting werben und mit ihren Organen beispielhaft vorangehen.
- **Regionalisierung der Kostenkomponenten des Strompreises:** Der Gesetzgeber sollte untersuchen, ob eine Regionalisierung der Kostenkomponenten des Strompreises basierend auf Emissionsfaktoren perspektivisch ein gangbarer Weg für die CO₂-Neutralität ist. Energiepolitische Instrumente, die dafür in der Vergangenheit unter anderem bislang diskutiert wurden, sind zum Beispiel eine Regionalisierung und Dynamisierung von Netzentgelten oder eine komplexe Gebotszonenanpassung für Großhandelspreise.
- **Forschung in den Bereichen Carbon Aware Computing und geografische Lastverlagerung in Rechenzentren** sollte gezielt gefördert werden, ebenso Virtualisierungen und das dynamische Scheduling in Rechenzentren. So können perspektivisch Workloads zwischen den Instanzen verschiedener Cloud-Anbieter verschoben werden.

Empfehlungen an privatwirtschaftliche Akteure

- **Stromverbraucher** wie **Rechenzentren** sollten ihre Workload-Management-Systeme stärker auf dynamische Energiepreise, orientiert an Emissionsfaktoren, ausrichten. Sie sollten ihre Stromnachfrage verstärkt auf Zeiten und an Orte mit niedrigen Emissionsfaktoren verlagern.
- Dasselbe gilt zum Beispiel auch für **Elektrolyseure, Wärme- und Kälteanwendungen sowie weitere industrielle Prozesse.**
- Auch **private Verbraucherinnen und Verbraucher** sollten ihren Stromverbrauch verstärkt auf emissionsärmere Zeiten verlagern, beispielsweise bei der Elektrofahrzeugladung.
- Alle diese Akteure können hierfür die Webanwendung des Modells ECO zone inklusive API-Anbindung nutzen und nahtlos in ihre Energiemanagementsysteme integrieren.
- Die Rechenzentrumsbranche, insbesondere **Cloud-Anbieter, Colocation-Dienstleister und Hosting-Firmen**, sollte Branchenstandards für einheitliche Cloud-Instanzen (anbieterübergreifend) entwickeln.
- **Branchenverbände** sollten den Austausch von Best Practices hinsichtlich der Lastverschiebung fördern und sich für regulatorische Maßnahmen einsetzen, die dies erleichtern.
- **Energieversorger** sollten verstärkt dynamische Stromtarife in den Markt bringen, die auf Emissionsfaktoren basieren. Dabei sollten die dynamischen Tarifsysteme an regionale Emissionsfaktoren angepasst werden.
- **Unternehmen, die ihre ESG-Ziele verfolgen**, sollten ihre Berichterstattung über CO₂-Emissionen mithilfe von zonalen marginalen Emissionsfaktoren verbessern und ihre CO₂-Emissionen auf dieser Basis gezielt reduzieren.
- **Universitäre und private Forschung** sollte verstärkt die Bereiche Carbon Aware Computing und geografische Lastverlagerung in Rechenzentren, Elektrolyseuren und anderen (Groß-)Verbrauchern erforschen.

9. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Energiewende in Deutschland ist ein umfassendes politisches, wirtschaftliches und gesellschaftliches Projekt, das darauf abzielt, den Übergang von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energiequellen zu vollziehen. Dabei spielt insbesondere das Stromsystem eine zentrale Rolle. Ein Kernziel ist es, den Anteil von erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung kontinuierlich zu steigern und bis 2045 eine klimaneutrale Energieversorgung sicherzustellen. Um hohe Mengen erneuerbarer Energien in das Energiesystem integrieren zu können, ist neben anderen Maßnahmen eine Flexibilisierung der Energienutzung gemäß der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien notwendig.

Das Projekt ECO zone kann hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. Durch die Entwicklung eines Modells für zonale marginale Emissionen und die Bereitstellung einer zugehörigen Webanwendung und API bietet das Projekt eine innovative Lösung zur Optimierung des Stromverbrauchs im Sinne einer intelligenten, netzdienlichen, wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Steuerung des deutschen Energiesystems. Der Ansatz ermöglicht es, Lasten gezielt auf Zeiten und in Regionen mit niedrigen Emissionsfaktoren zu verschieben und so sowohl die Integration von erneuerbaren Energien als auch die Netzstabilität zu fördern.

ECO zone adressiert zentrale Herausforderungen der Energiewende, indem es die Emissionsreduktion durch Lastverschiebungen nicht nur theoretisch darstellt, sondern praktisch umsetzbar macht. Die Berücksichtigung von Netzengpässen stellt sicher, dass Maßnahmen nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern auch netzdienlich sind und somit zur Verringerung von Redispatch-Maßnahmen und den damit verbundenen Kosten beitragen.

Die im Projekt entwickelte Methodik und die bereitgestellten Daten bieten eine Grundlage für eine breitere Nutzung und Weiterentwicklung. Mit dem Open-Source-Ansatz wird Transparenz gefördert und zur gemeinschaftlichen Weiterentwicklung eingeladen. So kann ECO zone langfristig einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung des Energiesektors leisten und die Umstellung auf ein zukunftsfähiges, erneuerbares Energiesystem unterstützen.

Es bestehen bereits zahlreiche technische Potenziale zur Nutzung der Emissionsfaktoren aus ECO zone, um netzdienliche Lastverschiebungen in Industrie, Gewerbe und Haushalten wirkungsvoll umzusetzen. Der Abbau technischer Hürden, die durch fehlende Fernsteuerbarkeit oder das Fehlen von Energiemanagementsystemen auf der Verbraucherseite bedingt sind, könnte die Nutzung der Potenziale deutlich verbessern. Eine fortlaufende Sensibilisierung der Akteure hinsichtlich der Klimafreundlichkeit ihres Handelns bietet zusätzlich ein vielversprechendes Zukunftspotenzial.

Regulatorische und gesetzliche Rahmenbedingungen könnten die tatsächliche Umsetzbarkeit dieser Potenziale weiter verbessern. Mehrere energiepolitische Instrumente sind derzeit in der Diskussion, wie beispielsweise eine Regionalisierung und Dynamisierung der Netzentgelte, eine komplexe Anpassung der Gebotszonen für den Großhandel oder auch eine Vergütung von netzdienlichem Verhalten. Diese werden derzeit intensiv in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft untersucht und besprochen. Das ECO zone-Modell kann zu diesen Diskussionen eine geeignete Datengrundlage beisteuern für eine netz-, markt- und umweltdienliche Anwendung, wodurch sich klimapolitische Ziele leichter mit ökonomischen und versorgungs- und sicherheitspolitischen Zielen vereinbaren und harmonisieren lassen.

Die Fallstudie zur Umsetzbarkeit im Bereich der Rechenzentren zeigt, dass geografische Lastverlagerungen auf Basis von lokal unterschiedlichen dynamischen Emissionsfaktoren ein wirksames Instrument zur Unterstützung der Energiewende sein können. Durch die Verlagerung von digitalen Workloads zwischen verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen Anteilen erneuerbarer Energien lassen sich die CO₂-Emissionen ohne zusätzliche physische Effizienzmaßnahmen in Rechenzentren signifikant reduzieren. Dies unterstreicht das Potenzial, Flexibilität der digitalen Infrastruktur stärker bei der Dekarbonisierung des Energiesystems mitzudenken.

Jedoch erfordert die Umsetzung dieser Strategie auch in diesem spezifischen Bereich die Erfüllung mehrerer technischer und politischer Voraussetzungen. Zunächst sollten technische Standards für die Virtualisierung und das dynamische Scheduling in Rechenzentren weiter gefördert werden, insbesondere um Workloads beispielsweise zwischen den Instanzen verschiedener Cloud-Anbieter zu verschieben. Hier könnte eine verstärkte Forschungsförderung seitens der öffentlichen Hand, zum Beispiel durch gezielte Programme der Forschungsförderung auf Bundesebene und des nächsten Forschungs-Rahmenprogramms auf EU-Ebene, dazu beitragen, innovative Lösungen wie Carbon Aware Computing und geografische Lastverlagerung zu skalieren und durch Piloten und Demonstratoren in der Praxis zu implementieren.

Die Rechenzentrumsbranche selbst, insbesondere Cloud-Anbieter, Colocation-Dienstleister und Hosting-Firmen, könnte durch die Entwicklung von Branchenstandards für einheitliche Cloud-Instanzen (anbieterübergreifend) und einen stärkeren Fokus auf Nachhaltigkeit vorangehen. Dabei sollten Unternehmen ihre Workload-Management-Systeme stärker auf die Verfügbarkeit von grünem Strom ausrichten. Branchenverbände könnten dies unterstützen, indem sie den Austausch von Best Practices fördern und sich für regulatorische Rahmenbedingungen einsetzen, die die Umsetzung solcher Maßnahmen erleichtern.

Quellen

Acun, B., Lee, B., Kazhamiaka, F., Maeng, K., Chakkavarthy, M., Gupta, U., ... Wu, C.-J. (2023). Carbon Explorer: A Holistic Approach for Designing Carbon Aware Datacenters. Proceedings of the 28th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, Volume 2, 118–132. <https://doi.org/10.1145/3575693.3575754>

Asadov, N., Pinto, C., Moro, L., Coppolo, M., Franzil, M., & Coroama, V. (2023): D6.1 COST-EFFECTIVE AND ENERGY-AWARE INFRASTRUCTURE. Berlin. Abgerufen von <https://www.fluidos.eu/wp-content/uploads/sites/86/2024/07/D6.1.pdf>

Behr, S. (2024): New Standards for Data Center Sustainability Set at Germany's University of Göttingen. Abgerufen am 25. September 2024 von Dotmagazine – joining the dots in the Internet industry Website: <https://www.dotmagazine.online/issues/digital-responsibility-sustainability/transformation-more-sustainability/data-center-sustainability-gottingen>

Beltrami, F., Fontini, F., Giulietti, M., & Grossi, L. (2022): The Zonal and Seasonal CO2 Marginal Emissions Factors for the Italian Power Market. Environmental and Resource Economics, 83(2). doi:10.1007/s10640-021-00567-9.

Bundesnetzagentur (2024): Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen (NSM). Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/NSA/start.html>

Bundesnetzagentur (2023): Monitoringbericht 2023. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Monitoringberichte/start.html>

Bundesnetzagentur (2022): Ganzjahreszahlen 2022 zum Engpassmanagement. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Engpassmanagement/Ganzjahreszahlen2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2024a): Energy Sharing in Deutschland: Vom Konzept zur energiewirtschaftlichen Umsetzung.

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2024b): Was sind dynamische Stromtarife? Preismodelle, Zielwirkungen und Umsetzungsfragen zeitvariabler bzw. dynamischer Energiepreise und Netzentgelte in der aktuellen Debatte – Gutachten der Consentec GmbH inkl. Einordnung der dena.

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023a): Datenanalysen und künstliche Intelligenz im Stromverteilnetz.

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023b): Das dezentralisierte Energiesystem im Jahr 2030.

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2010): dena-Netzstudie II: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung.

DIN SPEC 91410-2 Energieflexibilität – Teil 2: Identifizierung und Bewertung von Flexibilität in Gebäuden und Quartieren (2021). Berlin. <https://doi.org/10.31030/3249462>

DWD (2024): Deutscher Wetterdienst (DWD) Open Data. Abgerufen am 27. September 2024 von https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/

Electricity Maps (2024): Company Website. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.electricitymaps.com>

ENTSO-E (2024a): Bidding Zone Review. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von https://www.entsoe.eu/network_codes/bzr/

ENTSO-E (2024b): Transparency Platform. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show>

Hintemann, R., Graß, M., Hinterholzer, S., & Grothey, T. (2022): Rechenzentren in Deutschland: Aktuelle Marktentwicklungen, Stand 2022. Berlin: Bitkom. Abgerufen von Bitkom-Website: <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Rechenzentren-in-Deutschland-2022>

Netztransparenz.de. (2024): Redispatch. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.netztransparenz.de/de-de/Systemdienstleistungen/Betriebsfuehrung/Redispatch>

Löschel, D. A., Grimm, D. V., Matthes, D. F., & Weidlich, D. A. (2024): Monitoringbericht 2024. Berlin, Bochum, Freiburg, Nürnberg. Abgerufen von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/monitoringbericht-expertenkommission-zum-energiewende-monitoring.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Ökoheld (2024): Projektwebsite. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.bayernwerk.de/de/fuer-zuhause/oekoheld.html>

PJM Interconnection (2024): Marginal emissions primer. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.pjm.com/-/media/etools/data-miner-2/marginal-emissions-primer.ashx>

Schwab, A. (2015): Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. 4. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.

Scheufeld, O. (2019): Der Redispatch-Ermittlungs-Server (RES): Ein innovatives Werkzeug für die Betriebsplanung. ETG Kongress 2019.

Seckinger, N., & Radgen, P. (2021): Dynamic prospective average and marginal GHG emission factors – Scenario-based method for the German power system until 2050. *Energies*, 14(9), 2527. <https://doi.org/10.3390/en14092527>

SMARD.de (2024): Marktanalyse und Strommarktdaten. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/213590>

SPEC (2024): SPECpower_ssj2008 results. Abgerufen am 27. September 2024 von https://www.spec.org/power_ssj2008/results/res2024q2/power_ssj2008-20240327-01387.html

Swinhoe, D. (2024): Equinix to explore hydrogen fuel cells at Dublin data center –Update. Abgerufen am 25. September 2024 von <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/equinix-deploys-hydrogen-fuel-cell-at-dublin-data-center/>

TenneT (2024): Bidding Zone Review: TSOs investigate alternative bidding zone configurations. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.tennet.eu/news/bidding-zone-review-tsos-investigate-alternative-bidding-zone-configurations>

Thurner, L., Scheidler, A., Schäfer, F., Meinert, J., & Braun, M. (2018): Pandapower – An open-source Python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6510-6521.

Umweltbundesamt (2024): Mit Ökostrom das Klima schützen. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/haushalt-wohnen/oekostrom#--3>

Uptime Institute (2024): Tier Classification System. Abgerufen am 25. September 2024 von Uptime Institute Website: <https://uptimeinstitute.com/tiers>

WindNODE-Konsortium (2021): Synthesebericht. Flexibilität, Markt und Regulierung. Berlin: WindNODE-Verbundkoordination.

Youle (2024): Youle App. Abgerufen am 31. Oktober 2024 von <https://www.gp-joule.com/de/so-geht-energiewende/die-neue-app-youle/>

Zhang, Y., Wang, Y., & Wang, X. (2011): Greenware: Greening cloud-scale data centers to maximize the use of renewable energy. In *Middleware 2011* (S. 143–164). Springer. Abgerufen von http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-25821-3_8

Glossar

Batch-Verarbeitungssystem	Ein System zur automatisierten Abarbeitung großer Datenmengen oder Berechnungen ohne Echtzeitanforderungen, häufig in festgelegten Zeitintervallen
Carbon Aware Computing	Rechnergestützte Systeme, die Workloads auf Basis der CO ₂ -Intensität des Energieverbrauchs steuern, um Emissionen durch Anpassung an den Energiemix zu minimieren
Carbon Aware Scheduler	Ein Scheduling-Algorithmus, der Workloads in Abhängigkeit von der Kohlenstoffintensität des Energieangebots zeitlich und räumlich verteilt, um Emissionen zu verringern
Containern	Eine Methode der Virtualisierung, bei der Anwendungen und ihre Abhängigkeiten isoliert in Containern ausgeführt werden, was portabel und ressourcenschonend ist
Content Delivery Networks (CDNs)	Verteilte Netzwerke zur schnellen Bereitstellung von Webinhalten durch geografisch nahe Server, was Latenzen und Netzwerkauslastung reduziert
Dienst-Replikas	Mehrere Instanzen eines Dienstes, die zur Lastverteilung und Redundanz in verteilten Systemen genutzt werden
Dynamisches Scheduling	Ein flexibles Scheduling-Verfahren, das Workloads an die aktuelle Ressourcenauslastung und Energieverfügbarkeit anpasst
Function as a Service (FaaS)	Ein Cloud-Computing-Dienst, bei dem Code als isolierte Funktionen ohne Verwaltung der Infrastruktur ausgeführt wird, häufig nutzungsbasiert abgerechnet
Hysterese	Ein Mechanismus, der bei Schwellenwerten die Entscheidung verlangsamt, um unnötiges Umschalten zu vermeiden, zum Beispiel bei der Temperaturregelung in Kühlsystemen
Mikroservicebasierte Architekturen (Cloud-Native-Anwendungen)	Eine Anwendungsarchitektur, bei der einzelne Funktionen als separate, lose gekoppelte Dienste ausgeführt werden, was Flexibilität und Skalierbarkeit erhöht
Monolithische Anwendungen	Softwarearchitektur, bei der alle Funktionen einer Anwendung eng miteinander integriert und als eine Einheit bereitgestellt werden
Netzwerk-Hopping	Die Übertragung von Daten über verschiedene Netzwerke oder Knoten, was Latenzen beeinflusst und die Verteilung großer Datenmengen ermöglicht
Service Level Agreements (SLAs)	Vertragliche Vereinbarungen, die die erwartete Leistung und Verfügbarkeit eines Dienstes zwischen Dienstanbieter und Nutzer festlegen
Transkodierung	Die Konvertierung von Mediendateien in andere Formate oder Auflösungen, um sie an verschiedene Endgeräte und Bandbreiten anzupassen
Virtualisierung	Eine Technologie, die es ermöglicht, mehrere virtuelle Maschinen auf einem physischen Server zu betreiben, wodurch Ressourcen effizienter genutzt und Workloads flexibler verwaltet werden können

