
1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Der Klimawandel verschärft sich durch den starken Anstieg der Treibhausgasemissionen und bedroht in erheblichem Maße die Umwelt, die Wirtschaft und die Lebensqualität der Menschen.¹ Die globale Temperatur erreichte im Jahr 2024 Rekordwerte und lag erstmals 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau. Im Vergleich zum Durchschnitt der Periode 1991 bis 2020 wurde eine Abweichung von 0,72 °C verzeichnet, während die Temperatur im Vergleich zur vorindustriellen Zeit um 1,60 °C höher lag. Dieses Jahr stellt somit einen beispiellosen Meilenstein im Klimawandel dar.² Es wurden zahlreiche Strategien zur Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau verabschiedet und Anstrengungen unternommen, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, wie es das Übereinkommen von Paris vorsieht. Eine dieser Strategien, die die Dekarbonisierung des Energiesektors, die Verbesserung der Energieeffizienz, die Elektrifizierung der Industrie und die Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung umfasst³, zielt nicht nur auf die Eindämmung des Klimawandels ab, sondern auch auf die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung in einer Reihe von Sektoren, die von den daraus resultierenden Veränderungen am meisten betroffen sind. Dieser Wandel hin zu einer grünen Zukunft führt zwangsläufig zu strukturellen Veränderungen, die sowohl Herausforderungen als auch Chancen in verschiedenen Sektoren mit sich bringen.⁴ Sie eröffnet Chancen, insbesondere für Unternehmen, die das Innovationspotenzial der Digitalisierung ausschöpfen, stellt aber auch Herausforderungen dar, insbesondere für Unternehmen, die stark in traditionellen Branchen verankert sind.⁵ Hinsichtlich der Notwendigkeit, sich zu verändern und weiterzuentwickeln, gibt es drei Optionen, die Unternehmen in Betracht ziehen sollten:

- **Die Unternehmen sperren zu:** Einige Unternehmen könnten nicht über das Potenzial verfügen, in Zukunft neue Chancen zu schaffen, und könnten vor einer un-

¹ Vgl. Majedul Islam (2022), S. 22

² Quelle: <https://www.preventionweb.net/publication/2024-annual-climate-summary-global-climate-highlights-2024> (zugegriffen: 23.03.2025)

³ Vgl. Sundaramoorthy et al. (2023), S. 2 f.

⁴ Vgl. Abdulghani/Winkler (2023), S. 312

⁵ Vgl. Abdulghani/Winkler (2025), S. 1304

gewissen Zukunft stehen, wenn sich die Marktnachfrage weg von kohlenstoffintensiven Produkten und Dienstleistungen entwickelt, was schließlich zu ihrer Schließung führen könnte.

- **Verlagerung des Unternehmens woandershin:** Andere entscheiden sich möglicherweise dafür, ihre derzeitigen Geschäftsmodelle in Regionen zu verlagern, in denen die Umweltvorschriften weniger streng sind oder die Marktdynamik eine ganz andere ist.
- **Förderung von Innovation und Entwicklung:** Vorausschauende Unternehmen können neue digitale Lösungen oder Produkte entwickeln, die auf eine kohlenstoffneutrale Zukunft ausgerichtet sind, indem sie vorhandene Ressourcen, Potenziale, Kernkompetenzen und digitale Technologien nutzen.

Unternehmen, die Pfad 3 folgen und Innovation durch digitale Transformation anstreben, müssen sich anpassen, um langfristig kohlenstofffrei und wettbewerbsfähig zu werden. Dies kann durch die Entwicklung und Implementierung innovativer digitaler Technologien erreicht werden.

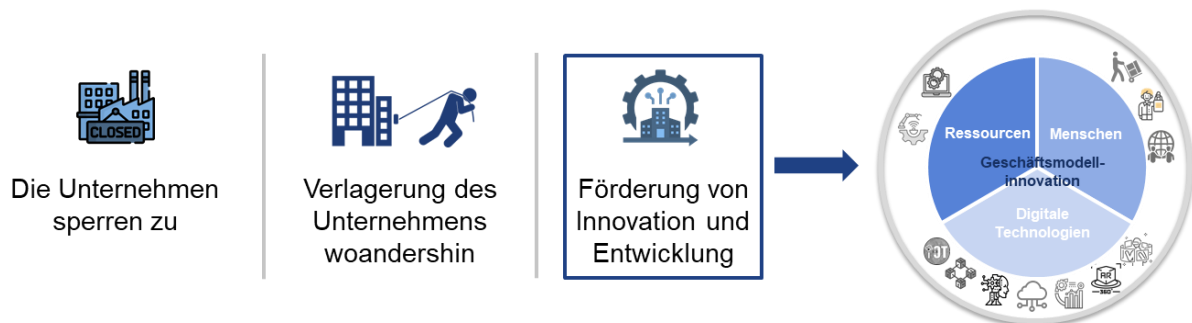


Abbildung 1: Handlungsoptionen für vom Kohleausstieg betroffene Unternehmen⁶

Die digitale Transformation ist für Unternehmen von entscheidender Bedeutung, da sie einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung nationaler Entwicklungsziele leistet und gleichzeitig langfristiges Wachstum, CO₂-Neutralität und Produktivität fördert. Die Integration von digitalen Technologien ermöglicht es Unternehmen, ihre Geschäftsabläufe, ihre Entwicklung von Innovationen und ihre Geschäftsbeziehungen zu stärken, wodurch sowohl wirtschaftliche als auch soziale Vorteile entstehen.⁷

Die digitale Transformation bietet Unternehmen die Möglichkeit, Nachhaltigkeitsprozesse in ihre Geschäftsabläufe zu integrieren, die Energieeffizienz zu steigern und die

⁶ Quelle: Abdulghani/Winkler (2025), S. 3

⁷ Vgl. Ma/Tao (2023), S. 2

Umweltbelastung zu verringern.⁸ Mit Hilfe von digitalen Technologien können Unternehmen beispielsweise den Energieverbrauch verbessern, Verschwendung minimieren und datenbasierte Geschäftsentscheidungen für eine nachhaltige Produktion treffen. Durch die Integration dieser Technologien kann nicht nur die Umweltverträglichkeit verbessert, sondern auch die betriebliche Effizienz und die Rentabilität gesteigert werden. Allerdings umfasst die digitale Transformation mehr als nur die Einführung von digitalen Technologien. Hierzu zählen technologischer Wandel, Unternehmensstruktur und Mitarbeiterqualifikationen, die alle eine Schlüsselrolle für den Transformationsprozess spielen.⁹ Außerdem stellen sowohl die Strategie als auch die Optimierung von Geschäftsprozessen entscheidende Bausteine für eine ganzheitliche und zukunftsfähige digitale Transformation dar.¹⁰

Für die Umsetzung einer erfolgreichen digitalen Transformation, die den Zielen der Dekarbonisierung entspricht, sind Führungskräfte auf einen klar definierten Roadmap oder Rahmen angewiesen, der sie dabei unterstützt, die aktuellen Fähigkeiten ihres Unternehmens zu bewerten, Schwachstellen zu identifizieren und die Hauptbereiche für Verbesserungsbedarf und Weiterentwicklung zu bestimmen.¹¹ Ein solches Framework sind die digitalen Reifegradmodelle, die von einer vielfältigen Gruppe von Experten nicht nur aus der Forschung, sondern auch aus der Praxis (beispielsweise von IMPULS, Forrester, PWC, IBM, KPMG, Acatech und Deloitte) in den letzten Jahren zunehmend entwickelt wurden. Das digitale Reifegradmodell ist ein wertvolles Instrument für Unternehmen, um bestehende digitale Kompetenzen zu bewerten und den Reifegrad für die digitale Transformation zu messen. Es bietet einen strukturierten Ansatz, um den Fortschritt der digitalen Bemühungen zu bewerten und Bereiche für Entwicklung und Verbesserung zu identifizieren.¹² Das digitale Reifegradmodell ist ein Tool zur Bewertung und Verbesserung der digitalen Reife eines Unternehmens, das eine Reihe von Dimensionen umfasst. Einige dieser Modelle beziehen sich speziell auf Dimensionen wie Strategie, Kunden, Produkte und Dienstleistungen und Technologie. Die Reifegrade dieser Modelle variieren typischerweise zwischen 3 und 6 und werden oft auf einer fünfstufigen Skala dargestellt, die den Fortschritt einer Organisation von der Basisebene bis zur digitalen Evolution anzeigt. Dieser Ansatz bietet nicht nur die Möglichkeit, den aktuellen digitalen Reifegrad zu bewerten, sondern auch strategische

⁸ Vgl. Martínez-Peláez et al. (2023), S. 1

⁹ Vgl. Schallmo/ Williams (2021), S. 4 f.

¹⁰ Vgl. Mohammed Hitham et al. (2023), S. 824

¹¹ Vgl. Abdulghani/Winkler (2025), S. 1304 f.

¹² Vgl. Aras/Büyükközkcan (2023), S. 3

Wege zur Transformation hin zu nachhaltigeren und zukunftsorientierten Geschäftsmodellen zu identifizieren.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die digitale Transformation hat sich zu einer grundlegenden Strategie entwickelt, die in verschiedenen Industrien zur Verbesserung von Geschäftsprozessen, zur Steigerung der Effizienz und zur Förderung von Innovation eingesetzt wird. Unternehmen führen verstärkt digitale Technologien ein, um bestehende Geschäftsmodelle zu optimieren und neue, nachhaltigere Geschäftsmodelle zu schaffen. Ein wesentlicher Aspekt der digitalen Transformation liegt in ihrer Fähigkeit, einen Beitrag zu den globalen Nachhaltigkeitsbemühungen zu leisten, insbesondere hinsichtlich der Reduzierung von Treibhausgasemissionen und der Erreichung von Dekarbonisierungszielen.

Die Digitalisierung kann einen signifikanten Beitrag zum Erreichen einer dekarbonisierten Wirtschaft leisten, denn Unternehmen stehen unter steigendem Druck von regulatorischen Behörden, sowie Investoren und Konsumenten, sich klimafreundlich auszurichten. Aus diesem Grund ist die Einbeziehung der digitalen Transformation in nachhaltigkeitsorientierte Strategien essentiell geworden. Für eine erfolgreiche digitale Transformation hin zur Dekarbonisierung ist es erforderlich, dass Führungskräfte die Kompetenzen ihrer Organisation bewerten und deren Entwicklung kompetent steuern, indem sie mit einem strategischen Ansatz einen klaren Weg vorgeben.

Für eine strukturierte Herangehensweise an die digitale Transformation ist es unerlässlich, den aktuellen Digitalisierungsgrad eines Unternehmens zu erfassen und potenzielle Optimierungspotenziale zu identifizieren. Digitale Reifegradmodelle liefern ein Framework, um zu bewerten, welche Fortschritte ein Unternehmen bei der Einführung digitaler Technologien macht. Diese Modelle unterstützen Führungskräfte dabei, den Status quo zu evaluieren, präzise Ziele zu definieren und eine strategische Roadmap für die Transformation zu skizzieren. Obwohl eine Vielzahl von digitalen Reifegradmodellen existiert, fokussieren diese sich in erster Linie auf die Steigerung der betrieblichen Effizienz, die Förderung von Innovation und technologischem Fortschritt, ohne jedoch Nachhaltigkeitsziele und die Dekarbonisierung der Wirtschaft ausdrücklich zu behandeln.

Forschungsfragen:

Die Hauptforschungsfrage der Dissertation lautet: „Wie kann die Integration von digitalen Reifegradmodellen in digitale Transformationsstrategien die Fähigkeit von Unternehmen zur Erreichung ihrer Dekarbonisierungsziele verbessern?“. Um dieses Thema umfassend zu untersuchen, werden in der Dissertation folgende Teilfragen behandelt:

- Welche Rolle spielen neu entstehende digitale Technologien zur Unterstützung der Dekarbonisierung in verschiedenen Sektoren?
- Was sind die entscheidenden Erfolgsfaktoren für Unternehmen bei der digitalen Transformation zur Dekarbonisierung?
- Wie können Unternehmen ihren aktuellen Stand bewerten und Verbesserungsmöglichkeiten in Bezug auf Digitalisierung und Dekarbonisierung identifizieren?

Zielformulierung:

Das Hauptziel dieser Dissertation besteht in der Entwicklung eines Digital Decarbonization Maturity Models, das als strategisches Framework zur Steuerung des digitalen Transformationsprozesses durch die effiziente Integration der Digitalisierung in die Dekarbonisierungsbemühungen dient.

Das Hauptziel dieser Dissertation besteht in der Entwicklung eines Digital Decarbonization Maturity Models, das als strategisches Framework zur Steuerung des digitalen Transformationsprozesses durch die effiziente Integration der Digitalisierung in die Dekarbonisierungsbemühungen dient.

Die Ziele der Arbeit:

- Untersuchung und Analyse des Potenzials der zentralen digitalen Technologien sowie Bewertung ihrer Rolle und Auswirkungen bei der Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks.
- Identifizierung und Analyse der kritischen Erfolgsfaktoren, einschließlich der internen und externen Bedingungen, die für eine dekarbonisierende Unternehmenstransformation erforderlich sind.
- Bereitstellung einer strukturierten Herangehensweise für Unternehmen, um ihre digitale und Nachhaltigkeitsbereitschaft zu bewerten, Lücken zu erkennen und zielgerichtet Verbesserungsmaßnahmen zu implementieren.

Zusammen werden diese Forschungsziele einen strukturierten, umsetzbaren Ansatz für die Gestaltung der digitalen Transformation zur Unterstützung der Dekarbonisierung liefern und wertvolle Erkenntnisse und Modelle sowohl für die strategische Planung als auch für die praktische Umsetzung liefern.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das zweite Kapitel liefert die theoretischen Grundlagen für das Verständnis der Themenkomplexe (Digitale Transformation und Dekarbonisierung). Die Treiber der digitalen Transformation bzw. die Herausforderungen und Hemmnisse bei der Umsetzung

der digitalen Transformation werden behandelt. Es werden die Schlüsselstrategien zur Dekarbonisierung vorgestellt, wobei der enge Zusammenhang zwischen den Konzepten verdeutlicht, auf welche Weise eine höhere digitale Reife die Transformation und die Dekarbonisierungsbemühungen vorantreibt und somit Innovation und Nachhaltigkeit in Unternehmen fördert.

Das dritte Kapitel konzentriert sich auf die Überschneidung von Digitalisierung und Dekarbonisierung, insbesondere auf die Identifizierung und Analyse der am weitesten verbreiteten digitalen Technologien wie IoT, KI und Blockchain, um nur einige zu nennen. Ihre potenziellen Anwendungen in Schlüsselsektoren wie Fertigung, Energie und Verkehr werden wir bewerten und aufzeigen, wie sie zur Senkung der Kohlenstoffemissionen beitragen und gleichzeitig einen wirtschaftlichen und sozialen Mehrwert schaffen können. Dieses Kapitel befasst sich auch mit den Herausforderungen, die mit dem Einsatz dieser Technologien verbunden sind, einschließlich technischer, regulatorischer und organisatorischer Hindernisse, und gibt Empfehlungen, wie diese Hindernisse überwunden werden können. Abschließend wird ein Roadmap für den Einsatz digitaler Technologien vorgestellt, der mit den Dekarbonisierungszielen im Einklang steht und einen strukturierten und strategischen Ansatz für eine nachhaltige digitale Transformation unterstützt. Danach wird am Beispiel einer fortschrittlichen digitalen Integration die Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) näher beleuchtet. Es wird ein konzeptuelles Modell für die Integration von KI in die Kreislaufwirtschaft vorgestellt, wobei die wichtigsten Voraussetzungen identifiziert und ausgewählte KI-Modelle vorgestellt werden, die für diesen Bereich relevant sind. Wir werden die Vorteile der KI-gesteuerten Kreislaufwirtschaft auf drei Ebenen bewerten - auf der Mikroebene (einzelne Organisationen), auf der Mesoebene (regionale Systeme) und auf der Makroebene (nationale und globale Ebene) - und dabei die ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen berücksichtigen. Darüber hinaus werden wir die Herausforderungen bei der Implementierung von KI in der Kreislaufwirtschaft untersuchen und diese Herausforderungen zur besseren Analyse und zum besseren Verständnis in Gruppen einteilen.

Das vierte Kapitel beginnt mit einer Fallstudie über die deutsche Lausitz, wo die traditionellen kohlebasierten Industrien im Rahmen der nationalen Dekarbonisierungsstrategie einem Strukturwandel unterzogen werden. In diesem Kapitel wird untersucht, wie die Unternehmen in der Region den Übergang zu einer grüneren Wirtschaft bewältigen, und es werden die Faktoren untersucht, die für eine erfolgreiche Unternehmenstransformation in diesem Kontext entscheidend sind. Wir entwickeln ein konzeptionelles Modell für die dekarbonisierungsbedingte Unternehmenstransformation, das Un-

ternehmen entlang kohleabhängiger Wertschöpfungsketten als Leitfaden dient. Darüber hinaus wird eine SWOT-Analyse der Region Lausitz einen Einblick in die Stärken, Schwächen, Chancen und Bedrohungen geben, die den Wandel der Region hin zu einer dekarbonisierten Zukunft beeinflussen. Danach wird der Schwerpunkt auf die Vorbereitungsphase der digitalen Transformation verlagert, wobei die Bedeutung der strategischen Planung vor der Implementierung digitaler Technologien betont wird. Um die digitale Transformation effektiv zu steuern, sollen Unternehmen ihren aktuellen Stand bewerten und Entwicklungsmöglichkeiten innerhalb des dualen Kontexts von Digitalisierung und Dekarbonisierung identifizieren. Die bestehende digitale Reifegradmodelle werden überprüft und auf dieser Grundlage ein neues Reifegradmodell für die digitale Dekarbonisierung vorgeschlagen. Dieses Modell soll Unternehmen einen strukturierten Ansatz bieten, um ihre Bereitschaft für die digitale Transformation zu bewerten, die mit den Dekarbonisierungszielen übereinstimmt, so dass sie digitale Strategien mit größerer Klarheit und Zielsetzung planen und umsetzen können. Zur Entwicklung und Validierung des Modells wird ein Design-Science-Research-Ansatz verfolgt.

Mit diesen Kapiteln bietet die Dissertation ein umfassendes Framework und praktische Einsichten für die Steuerung der digitalen Transformation, die sowohl nachhaltig als auch strategisch mit den Dekarbonisierungszielen abgestimmt ist, und leistet damit einen Beitrag zum laufenden Diskurs über Umweltverantwortung im digitalen Zeitalter.

Die oben beschriebenen Abschnitte werden von einem abschließenden Teil eingefasst. In der Einleitung wird das Forschungsthema definiert, die Motivation für die Forschung dargelegt und die Forschungsziele erläutert. Der sechste Abschnitt enthält eine Zusammenfassung der Arbeit, in der die Forschungsziele und -fragen nochmals aufgegriffen und behandelt werden. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der zentralen Erkenntnisse und hebt hervor, inwiefern die Ziele der Dissertation durch die Ergebnisse erreicht wurden. Im Rahmen der kritischen Bewertung der Ergebnisse erfolgt eine Untersuchung der Zuverlässigkeit, Grenzen und Relevanz im Kontext der Forschung. Im Anschluss erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Implikationen. Zudem wird untersucht, inwiefern sie zum bestehenden Wissen beitragen und welche potenziellen Auswirkungen sie auf Theorie oder Praxis haben. Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation haben eine Reihe von pragmatischen Empfehlungen hervorgebracht, die darauf abzielen, den Interessengruppen die erforderlichen Informationen bereitzustellen, um fundierte Maßnahmen zu ergreifen. Darüber hinaus enthält die vorliegende Arbeit Forschungsvorschläge sowie neue Richtungen, die auf der aktuellen Dissertation aufbauen könnten. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die behandelten Themen.

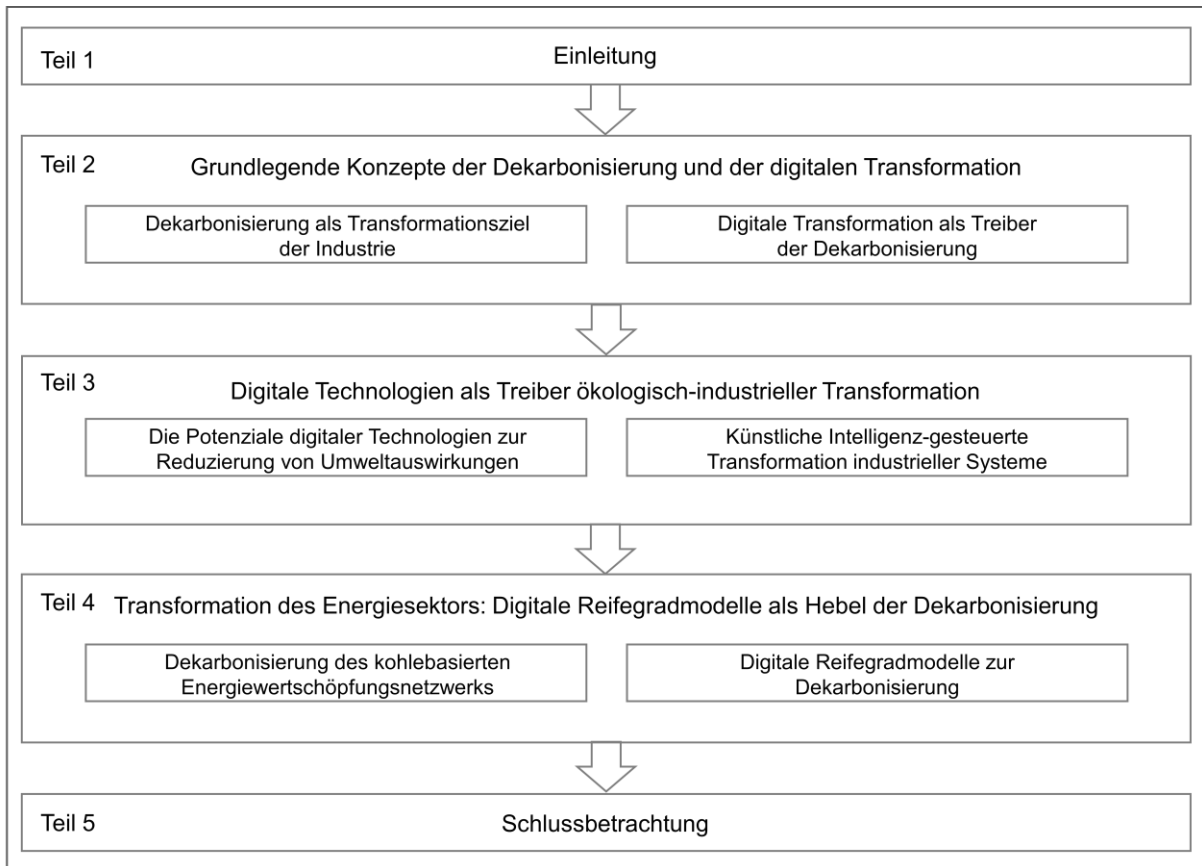


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit¹³

¹³ Quelle: Verfasser

2 Grundlegende Konzepte der Dekarbonisierung und der digitalen Transformation

In diesem Teil werden die Konzepte der Dekarbonisierung und der digitalen Transformation untersucht und deren Abhängigkeiten und Implikationen für Unternehmen aufgezeigt. Zunächst wird die Dekarbonisierung als wesentlicher Schritt zur Nachhaltigkeit betrachtet, Schlüsselstrategien zur Dekarbonisierung und branchenspezifische Ansätze zur digitalen Dekarbonisierung werden vorgestellt.

Darüber hinaus wird die digitale Transformation definiert, die durch technologische Innovationen, Wettbewerbsdruck am Markt und steigende Kundenerwartungen getrieben wird. Des Weiteren werden die Herausforderungen und Hindernisse der digitalen Transformation erörtert.

2.1 Dekarbonisierung als Transformationsziel der Industrie

2.1.1 Begriffsabgrenzung und strategische Bedeutung der Dekarbonisierung

Dekarbonisierung ist im Grunde genommen der Prozess der Reduzierung der Kohlendioxidemissionen (CO₂) pro erzeugter Energieeinheit oder innerhalb eines bestimmten Sektors oder der gesamten Wirtschaft im Laufe der Zeit.¹⁴ Sie bildet die Grundlage für den Übergang zu kohlenstoffarmen Aktivitäten, die von der Integration erneuerbarer Energien bis hin zur Verankerung von Nachhaltigkeit in allen Handlungen reichen.¹⁵ Das Kernziel der Dekarbonisierungsmaßnahmen ist die Verringerung der gesamten mit menschlichen Aktivitäten verbundenen Kohlendioxidemissionen und damit die Verringerung der Abhängigkeit der Wirtschaft von fossilen Brennstoffen.¹⁶ Dies erfordert ein programmatisches und dauerhaftes Engagement zur umfassenden Reduzierung der Treibhausgasemissionen in allen Bereichen der Gesellschaft.¹⁷

Mehrere Quellen heben verschiedene Facetten dieser Definition hervor. Im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung von Gebäuden bezieht sie sich beispielsweise auf die Revolution der Bereitstellung zuverlässiger, erschwinglicher und nachhaltiger Energie durch die Integration erneuerbarer Energien und Speichersysteme in dezentrale Energiesysteme (DES).¹⁸ Sie erfordert auch den Einsatz intelligenter Technologien durch eine umfassende und effektive Planung und den Betrieb von DES, einschließlich

¹⁴ Vgl. Ferdous et al. (2024), S. 2

¹⁵ Vgl. Zhu et al. (2023), S. 12; Vgl. Elavarasan et al. (2022), S. 1

¹⁶ Vgl. Liu et al. (2024), S. 3

¹⁷ Vgl. Gantioler et al. (2023), S. 7

¹⁸ Vgl. Zhu et al. (2023), S. 3

einer optimalen Dimensionierung der Komponenten und fortschrittlicher Betriebsstrategien, um eine tiefgreifende Dekarbonisierung von Gebäuden zu fördern. Im weiteren Sinne ist die Dekarbonisierung im Energiesektor ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einer Netto-Null-Energiezukunft, was bedeutet, dass die emittierten CO₂-Emissionen durch die aus der Atmosphäre entnommene Menge effektiv ausgeglichen werden.¹⁹ Dies beinhaltet die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen wie Solar-, Wind-, Wasser- und Geothermie, die im Vergleich zu fossilen Brennstoffen deutlich weniger CO₂-Emissionen verursachen.

Darüber hinaus hat sich das Konzept der Dekarbonisierung der Lieferkette als kritischer Bereich herauskristallisiert, da erkannt wurde, dass erhebliche Emissionen nicht nur aus direkten Betriebsabläufen stammen, sondern auch in globalen Lieferketten eingebettet sind.²⁰ Die Bemühungen zur Dekarbonisierung der Lieferkette umfassen einen vielschichtigen Ansatz, der darauf abzielt, die Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Lieferkette drastisch zu reduzieren. Dazu gehören direkte Maßnahmen zur Senkung der Emissionen aus Transport und Logistik, die Einführung nachhaltiger Beschaffungs- und Fertigungsprozesse sowie die Integration von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, um Abfall zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu maximieren. Außerdem werden digitale Zwillinge (DT) eingesetzt, um die Transparenz zu erhöhen, eine präzise Verfolgung der Emissionen zu ermöglichen und datengestützte Entscheidungen zu erleichtern.

Im Kontext städtischer Gebiete umfassen die Bemühungen zur Dekarbonisierung die Einführung verschiedener Maßnahmen zur Eindämmung der Emissionen und zur Bewältigung der zunehmenden Urbanisierung und des steigenden Energiebedarfs.²¹ Dazu gehört auch die Bekämpfung der Emissionen von Gebäuden, die einen erheblichen Teil der Gesamtemissionen ausmachen, sowie des Verkehrs.

Die Bedeutung der Dekarbonisierung ergibt sich aus der dringenden globalen Priorität, den zunehmenden Klimawandel zu bekämpfen.²² Treibhausgasemissionen aus menschlichen Aktivitäten haben zu einem Ungleichgewicht in den natürlichen Kreisläufen geführt, was wiederum die globale Erwärmung und den Klimawandel zur Folge hat.²³ Die Dekarbonisierung ist daher unerlässlich, um den Klimawandel einzudämmen und

¹⁹ Vgl. Ferdous et al. (2024), S. 2

²⁰ Vgl. Mubarik et al. (2025), S. 3

²¹ Vgl. Soares et al. (2025), S. 1

²² Vgl. Mubarik et al. (2025), S. 1

²³ Vgl. Elavarasan et al. (2022), S. 1