

Energieflexibler Betrieb von Carbon-Capture-Anlagen in der Zementindustrie

Yvonne Eboumbou Ebongue^{1,2*}, Alexander Sauer^{1,2}

¹Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP, Universität Stuttgart, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland

²Fraunhofer-Institut für Produktion und Automatisierung IPA, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland

*Nachwuchsautorin

yvonne.eboumbou.ebongue@ipa.fraunhofer.de

yvonne.eboumbou-ebongue@eep.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Die zunehmende Dringlichkeit der Defossilisierung der Industrie steht im Einklang mit dem wachsenden globalen Druck, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Aktuellen Schätzungen zufolge ist die Zementproduktion derzeit für etwa 7,4 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich. In Industrie- und Energieerzeugungsprozessen ist die Technologie des Carbon Capture Utilization and Storage wegweisend bei der Reduktion von CO₂-Emissionen.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Dekarbonisierung der Zementindustrie mithilfe des energieflexiblen Betriebs von Carbon-Capture-Anlagen. Die Umsetzung der identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Zementindustrie bietet vielfältige Möglichkeiten zur Optimierung des Energieverbrauchs und zur Anpassung an sich ändernde energetische Randbedingungen. Über solche Maßnahmen könnten Carbon-Capture-Anlagen als flexible Verbraucher in die Zementindustrie integriert werden. Dies hätte nicht nur Auswirkungen auf die CO₂-Reduktion, sondern würde die Zementproduktion zu einem adaptiven, energieeffizienten System machen, das zur Stabilität und Nachhaltigkeit des gesamten Energiesystems beiträgt. Das Ziel ist ein integriertes Energiesystem, in dem Carbon-Capture-Anlagen nicht nur Verbraucher sind, sondern als flexible Akteure agieren, die sich dynamisch an die sich ändernden Bedingungen im Energiesektor anpassen können. Damit leisten sie einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Reduktion und zur Flexibilität des Energiesystems.

Keywords: Carbon Capture, Dekarbonisierung, Energieflexibilität, Zementindustrie

1 Einleitung

Die Defossilisierung der Industrie gewinnt zunehmend an Bedeutung, da der globale Druck zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen stetig zunimmt. Industrielle Prozesse gelten als wesentliche Quellen für Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emissionen, wobei die Produktion von Gütern wie Zement, Stahl und Chemikalien bedeutende Anteile an den Gesamtemissionen aufweisen [1, 2]. Die Umstellung auf CO₂-arme oder CO₂-freie Produktionsprozesse ist entscheidend, um die globalen Klimaziele zu erreichen und die negativen Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen. Die Motivation zur Defossilisierung der Industrie ist sowohl ökologisch als auch ökonomisch begründet. Eine nachhaltige Umgestaltung der industriellen Prozesse kann nicht nur dazu beitragen, die Umweltauswirkungen zu mindern, sondern auch die

Innovationsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Industrie in einer zunehmend kohlenstoffarmen Wirtschaft stärken. Nach neuesten Schätzungen ist die heutige Zementproduktion für etwa 7,4 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich [3]. Dieser Anteil verdeutlicht die wichtige Rolle der Zementindustrie bei der Emissionsminderung zur Eindämmung des Klimawandels. Obwohl die Zementindustrie die CO₂-Emissionen pro Tonne Zement in den letzten Jahrzehnten deutlich reduziert hat, verzeichnet sie weltweit eine Zunahme der Produktionsaktivitäten aufgrund des anhaltenden Wirtschaftswachstums und der steigenden Nachfrage nach Zement als Baustoff [1]. Die weltweite Zementproduktion beläuft sich derzeit auf etwa 4100 Millionen Tonnen pro Jahr, und es wird erwartet, dass die Nachfrage nach Zement aufgrund des Bevölkerungswachstums und der zunehmenden Urbanisierung bis 2060 auf fast 4600 Millionen Tonnen Zement pro Jahr ansteigen wird [2].

Die Industrie steht daher vor der Herausforderung, innovative Technologien und effiziente Prozesse zu entwickeln, um die CO₂-Emissionen weiter zu minimieren und gleichzeitig die steigenden Produktionskapazitäten zu bedienen. Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) ist ein Verfahren zur Reduzierung von CO₂ aus Industrie- und Energieerzeugungsprozessen [1]. Die Integration von Carbon Capture (CC)-Anlagen in die Zementindustrie gilt als Ansatz, um das Net Zero Szenario zu erreichen [2,3]. Die Integration solcher CC-Anlagen ist in vielen Fällen aufgrund der Investitionen und der Betriebskosten jedoch noch unwirtschaftlich [4],[5]. Zusätzlich muss Energie aufgewandt werden, um die Emissionen zu reduzieren. In diesem Spannungsfeld des steigenden Zementbedarfs kann die energieflexible Einbindung von CC-Anlagen in Produktionssysteme eine Lösung darstellen.

Energieflexibilität nach der VDI-Richtlinie 5207 ist die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und prozesseffizient an Änderungen des Energiemarkts anzupassen [6]. Anhand der Reaktion auf volatile Energiepreise hat Energieflexibilität das übergeordnete Ziel, die Energiekosten zu senken. Energieflexibilitätsmaßnahmen sind konkrete und bewusste Eingriffe in industrielle Prozesse, die zu einer Veränderung des Verbrauchs am Netzanschlusspunkt führen.

Die Frage, wie die Dekarbonisierung der Zementindustrie von Energieflexibilität profitieren kann, ist von entscheidender Bedeutung und Kernthema dieses Beitrags. Hierfür wurden Energieflexibilitätsmaßnahmen hinsichtlich ihrer technischen Anwendbarkeit und hinsichtlich ihres wirtschaftlichen Nutzens innerhalb der Zementproduktion bewertet. Daraus lässt sich das Potenzial des energieflexiblen Betriebs von CC-Anlagen in der Zementindustrie ableiten.

2 Die Zementherstellung

Die Zementherstellung besteht aus den Prozessschritten Rohmahlung, Klinkerherstellung und Zementproduktion [6]. Eine Übersicht der Zementherstellung mitsamt der Prozesse in einem Zementwerk ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Mahlen des Rohmaterials erfolgt in der Regel im Verbund mit der kontinuierlichen Klinkerproduktion, um Abwärme aus dem Prozess zur Trocknung des Rohmaterials effizient zu nutzen. Das Rohmehl wird dabei im Gegenstrom zu den heißen Abgasen in einem Wärmetauscher vorgewärmt. Aus Klinker und anderen Hauptbestandteilen wird das Endprodukt Zement hergestellt. Diese Prozesse können durch vor- und nachgeschaltete Lager und Silos unter bestimmten Bedingungen und zeitlich begrenzt voneinander entkoppelt werden [6]. Daraus ergeben sich Potenziale für einen flexiblen Anlagenbetrieb für Teilprozesse der Zementherstellung.

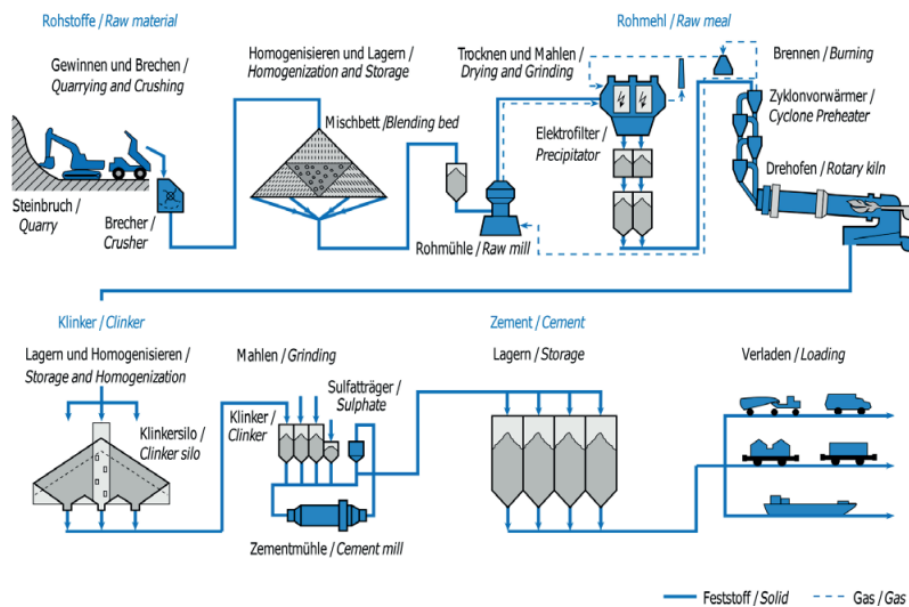


Abbildung 1: Übersicht der Prozesse in einem Zementwerk nach [8]

2.1 Energiebedarf der Zementherstellung

Bei der Zementherstellung wird thermische Energie überwiegend für die Zementmahlung und den Klinkerbrennprozess benötigt. Dieser Vorgang erfordert 87 Prozent des gesamten Energiebedarfs [7]. Es wird elektrische Energie für den Betrieb der Mahl- und Verladeanlagen verwendet. Mit durchschnittlich 51 kWh elektrischer Energie pro Tonne Zement ist die Zementmahlung in großen Zementmühlen der Prozess im Zementwerk, bei dem durchschnittlich der größte Anteil an elektrischer Energie eingesetzt wird. Die Verteilung des Energiebedarfs nach Prozessschritten ist in Abbildung 22 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass innerhalb der Zementproduktion ca. 65 Prozent der Emissionen auf prozessbedingte Faktoren zurückzuführen sind, während die restlichen 35 Prozent aus Energiequellen stammen [8].

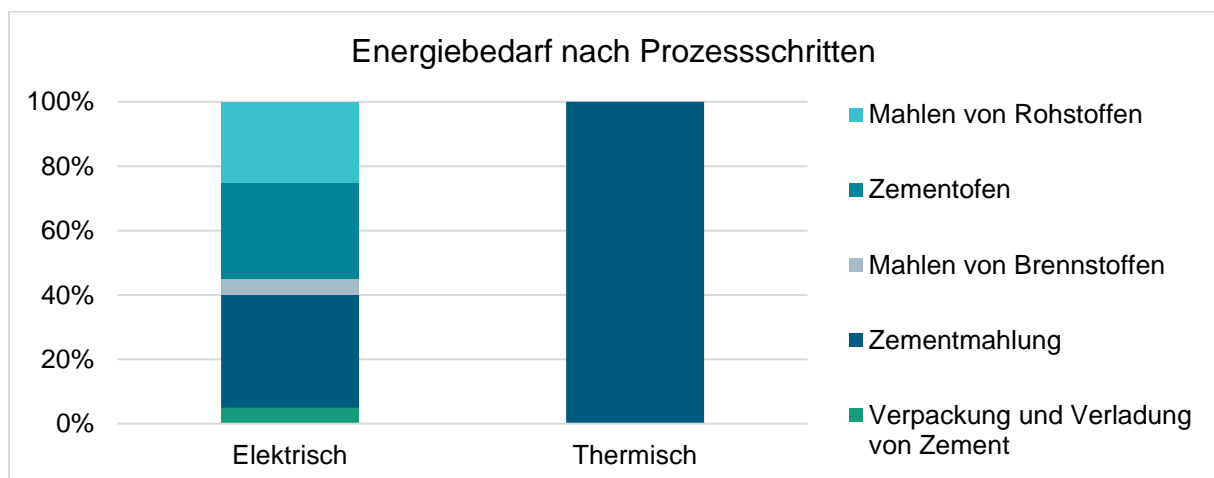


Abbildung 2: Energiebedarf nach Prozessschritten der Zementherstellung [7]

2.2 Dekarbonisierung der Zementindustrie

In Bezug auf die Zementindustrie gibt es zunehmende wissenschaftliche und technische Anstrengungen bei der Reduzierung von CO₂-Emissionen. Diese konzentrieren sich auf die Entwicklung von Ansätzen zur Verbesserung der Energieeffizienz, den Einsatz alternativer Brennstoffe und die Implementierung von Technologien zur CO₂-Abtrennung [9]. Abbildung 33 zeigt, wie gehandelt werden muss, um in der Zementindustrie das Net-Zero-Szenario mit dem Zielwert von 450 kg CO₂ pro Tonne Zement erreichen zu können und sowohl die energiebedingten als auch den prozessbedingten Emissionen zu minimieren.

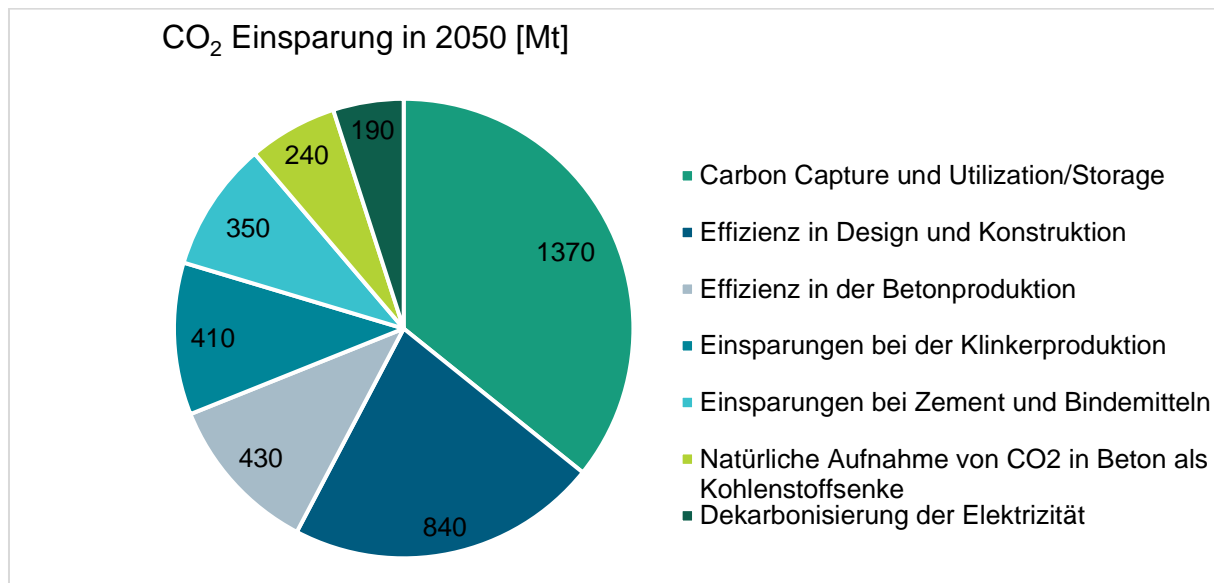


Abbildung 3: CO₂ Einsparung bei der Zementherstellung mit Hilfe verschiedener Ansätze in der Zementindustrie [7]

2.2.1 Dekarbonisierung der energiebedingten Emissionen

Eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung der energiebedingten Emissionen ist die Integration erneuerbarer Energiequellen in das Energiesystem von Zementwerken [10]. Die Nutzung erneuerbarer Energien zur Deckung des Strombedarfs der Anlagen verringert die Abhängigkeit von kohlenstoffintensiven Energieträgern und trägt zur Reduzierung der Gesamtemissionen bei. Die Klinkerproduktion, ein besonders energieintensiver Prozess, profitiert von fortschrittlichen Technologien zur Ofensteuerung, die den thermischen Wirkungsgrad verbessern und sowohl den Energieverbrauch als auch die CO₂-Emissionen reduzieren. Hier besteht die Möglichkeit, die thermische Energieeffizienz durch den Einsatz fortschrittlicher Technologien zu erhöhen. So deckten alternative Brennstoffe wie Wasserstoff im Jahr 2019 bereits durchschnittlich 69 Prozent des Wärmeenergiebedarfs der deutschen Zementindustrie [11]. Eine weitere Möglichkeit zur Dekarbonisierung der energiebedingten Emissionen ist die Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, mit denen überschüssige Wärme aus Produktionsprozessen zurückgewonnen und zur Materialerwärmung genutzt werden kann. Diese Maßnahmen reduzieren den Bedarf an extern zugeführter Energie und helfen, den Gesamtenergieverbrauch zu senken. Darüber hinaus können in den Anlagen moderne Prozessleitsysteme und Automatisierungstechnologien eingesetzt werden. Diese Systeme ermöglichen eine genauere Steuerung der Energieflüsse und Prozessparameter in Echtzeit, wodurch eine optimierte Nutzung von elektrischer und

thermischer Energie erreicht werden kann. Durch die Feinabstimmung der Betriebsbedingungen bei der Zementherstellung können Energieverluste minimiert und die Gesamteffizienz des Energiesystems gesteigert werden. Alle Zementwerke in Deutschland optimieren daher kontinuierlich die Effizienz ihrer Anlagen und betreiben zertifizierte Energiemanagementsysteme nach ISO 50001 [11]. Verschiedene verfahrenstechnische Innovationen ermöglichen heute eine sehr effiziente Nutzung der thermischen Energie (Wirkungsgrad 70 bis 80 Prozent). Auch die Effizienz der Stromnutzung liegt auf einem hohen Niveau.

2.2.2 Dekarbonisierung der prozessbedingten Emissionen

Um die Dekarbonisierung der prozessbedingten Emissionen voranzutreiben, konzentriert die Zementindustrie ihre Anstrengungen auf mehrere Ansätze [7]. Dazu gehören die verstärkte Substitution von Klinker durch die Herstellung von Mischzementen sowie der vermehrte Einsatz von alternativen Brennstoffen und Rohstoffen. Die Einbeziehung von Abfallbrennstoffen als nachhaltige Alternative zu herkömmlichen fossilen Brennstoffen wird durch fortschrittliche Verbrennungssteuerungssysteme erleichtert, die zur Verringerung der CO₂-Bilanz beitragen. Darüber hinaus wird der Übergang zu alternativen, kohlenstoffärmeren Brennstoffen wie Wasserstoff erforscht und durch nachhaltige Brennstoffhandhabungs- und Verbrennungstechnologien unterstützt. Eine effiziente und umweltfreundliche Betonherstellung wird auch durch den Einsatz moderner Produktionsansätze erreicht. Dazu gehören optimierte Betonrezepturen, die den Zementgehalt reduzieren, ohne die Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen. Umweltfreundliche Bestandteile und Zusatzstoffe werden in den Produktionsprozess integriert, wodurch die Umweltbelastung durch Betonprodukte deutlich reduziert wird [11]. Automatisierung und Robotertechnik steigern die Effizienz der Zementherstellung bei gleichzeitiger Minimierung des Ressourcenverbrauchs [9]. Die Förderung von Alternativen zum traditionellen Portlandklinkerzement ist einer der wichtigsten Beiträge zur Emissionsreduktion [12]. Dazu gehören der Einsatz alternativer Bindemittel und die Reduzierung des Klinkeranteils in Zementrezepturen. Die Einbeziehung innovativer zementgebundener Materialien wird durch fortschrittliche Mischtechnologien unterstützt. Dieser Wandel in der Zementproduktion wird anhand von Kennzahlen wie dem Klinker-Bindemittel-Verhältnis genau gemessen und beschleunigt den Fortschritt in Richtung der Nachhaltigkeitsziele.

Carbon Capture Utilization and Storage zur Dekarbonisierung der Zementindustrie

Carbon Capture Utilization and Storage ist eine Technologie zur Reduzierung von Kohlendioxidemissionen aus Industrie- und Energieerzeugungsprozessen [13, 14]. Die Nutzung von CCUS-Technologien in der Zementindustrie gilt als Ansatz zur signifikanten Reduzierung von CO₂-Emissionen, da die Technologien sowohl prozess- als auch energiebedingte Emissionen reduzieren können [15]. Dieser Ansatz umfasst drei Hauptbereiche: Capture (Abtrennung), Utilization (Nutzung) und Storage (Speicherung). Im ersten Schritt, der Abtrennung, wird CO₂ aus industriellen Abgasen oder Emissionen abgetrennt, bevor es in die Atmosphäre gelangt. Dabei kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, darunter physikalische, chemische oder biologische Ansätze [16]. Post-Combustion-Capture-Technologien können an den Quellenpunkten, wie etwa den Klinkeröfen, installiert werden, um das CO₂ aus den Abgasen zu separieren und anschließend sicher zu lagern oder

anderweitig zu nutzen. Das abgetrennte CO₂ kann dann in der Nutzungsphase für verschiedene Zwecke verwendet werden. Es kann beispielsweise zur Herstellung von Kraftstoffen, chemischen Produkten oder auch als Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Ist eine direkte Nutzung nicht möglich, wird das abgetrennte CO₂ gespeichert, um es langfristig und sicher aus der Atmosphäre zu entfernen. Dies geschieht typischerweise durch die Einlagerung in unterirdische geologische Formationen wie leere Erdgasfelder oder tiefere Gesteinsschichten, was als CO₂-Speicherung oder geologische CO₂-Sequestrierung bezeichnet wird [17].

3 Energieflexibler Betrieb von CCUS in der Zementindustrie

Bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) im Unternehmen wird zwischen verschiedenen Zeithorizonten unterschieden. Dies hat zur Folge, dass die einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen innerhalb des Produktionsbetriebes auf unterschiedlichen Organisationsebenen innerhalb des Betriebes ansetzen. Abbildung 44 zeigt, welche Maßnahmen welchen Zeithorizont einnehmen und welcher Organisationsebene sie zuzuordnen sind. Es wird unterschieden zwischen EFM auf Produktionsebene, auf Produktionsmanagementebene und auf Unternehmensmanagementebene [6]. Darüber hinaus können EFM nach ihrer Art charakterisiert werden. Neben organisatorischen Maßnahmen gibt es auch technische Maßnahmen. Voraussetzungen zur Flexibilisierung des Energiesystems sind die intelligente Kopplung der Energiesektoren und die Flexibilisierung der Verbraucher, um mit der sich veränderten Versorgungslage zurechtzukommen. Die Analyse verschiedener Flexibilisierungsmaßnahmen in der Zementindustrie liefert ein umfassendes Bild darüber, wie der Energieverbrauch der Zementherstellung optimiert werden kann. Carbon Capture Utilization and Storage ist heute noch unwirtschaftlich [4],[5]. Mit Hilfe von Energieflexibilität können Energiekosten bei der Zementherstellung eingespart werden. Diese eingesparten Energiekosten können für den flexiblen Betrieb der CC-Anlagen verwendet werden. Daher ist ein energieflexibler Betrieb von CC-Anlagen in das Energiesystem der Zementindustrie zu empfehlen.

3.1 Qualitative Bewertung der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Zementindustrie

Das Energieflexibilisierungspotenzial hängt von standortspezifischen Faktoren eines Zementwerkes ab [18]. Zu diesen Faktoren zählen im Wesentlichen die Anzahl und Kapazität der Zementmühlen, die zeitliche Auslastung der Zementmühlen im Jahresverlauf sowie die gesamte Silokapazität eines Zementwerkes. Während ein kurzzeitiges Abschalten der Mühlen technisch möglich ist, erfordert das Anfahren der Mühlen insbesondere bei Zementmühlen, eine Aufwärmphase und eine ausreichend lange Betriebszeit, um einen stabilen Produktionsbetrieb zu erreichen und das Material ausreichend zu trocknen. Darüber hinaus ist eine ungeplante, kurzfristige Mahlprozessunterbrechung mit organisatorischem Aufwand verbunden. Für einen effektiven und stabilen Mühlenbetrieb mit gesicherter Produktqualität wird auch nach einer Kurzabschaltung ein Dauerbetrieb von mindestens vier Stunden angesetzt. Gleichzeitig sollte ein kurzfristiger Stillstand auf ca. ein bis zwei Stunden begrenzt werden, um eine zu starke Abkühlung der Mühlen und Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden. Darüber hinaus spielen Randbedingungen wie der Standort des Zementwerkes,

die lokale Baukonjunktur beziehungsweise Lieferverpflichtungen, aber auch zementwerksinterne Planungszeiträume wie Mühlenrevisionstermine eine Rolle bei der Bewertung des Lastflexibilisierungspotenzials [10]. Die Anwendbarkeit der Energieflexibilitätsmaßnahmen nach VDI-Richtlinie 5207 ist in Abbildung 4 dargestellt.

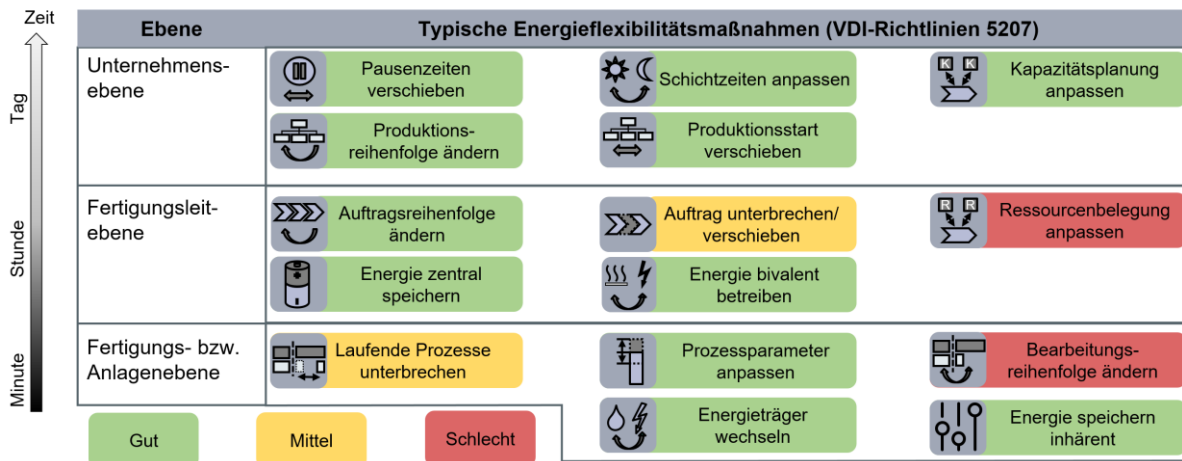


Abbildung 4: Anwendbarkeit von Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Zementindustrie

- **Laufende Aufträge unterbrechen:** Bestimmte Produktionsschritte in der Zementherstellung können zeitweise unterbrochen werden, um den Energieverbrauch zu reduzieren, insbesondere in Spitzenzeiten mit hohen Energiekosten oder geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energien.
- **Prozessparameter anpassen:** Im Zementherstellungsprozess können Prozessparameter wie Temperaturen und Drücke angepasst werden. Dies kann den Brennprozess in den Öfen betreffen, um den Energieverbrauch zu optimieren. Durch die Feinabstimmung dieser Parameter kann der Brennprozess effizienter gestaltet werden.
- **Bearbeitungsreihenfolge ändern:** Produktionsprozesse müssen oft in einer bestimmten Reihenfolge ablaufen, um Qualitätsstandards zu erfüllen. Eine Änderung der Reihenfolge hat erhebliche Auswirkungen auf die Produktqualität und die Effizienz der Produktionsprozesse in der Zementindustrie.
- **Energieträger wechseln:** In der Zementindustrie können verschiedene Energieträger und bivalente Technologien für den Brennprozess eingesetzt werden. Je nach Verfügbarkeit und Kosten können unterschiedliche Energieträger wie Kohle, Erdgas, alternative Brennstoffe oder erneuerbare Energien eingesetzt werden. Dieser Wechsel ermöglicht eine flexible Anpassung des Brennstoffs an die Marktbedingungen.
- **Energie inhärent speichern:** Durch Wärmerückgewinnungssysteme in Zementwerken kann die bei verschiedenen Prozessschritten freigesetzte Wärme aufgefangen, gespeichert und wiederverwendet werden. Diese Wärme kann zur Vorwärmung von Rohstoffen oder zur Erzeugung von Dampf oder Strom genutzt werden, wodurch der Gesamtenergieverbrauch gesenkt wird.

- **Auftragsreihenfolge ändern:** Im Zementherstellungsprozess kann die Reihenfolge der Produktion von Zementsorten oder bestimmten Chargen angepasst werden. So können energieintensive Prozesse optimiert werden, indem sie zu Zeiten niedriger Energiekosten oder hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien durchgeführt werden.
- **Aufträge unterbrechen/verschieben:** Es ist möglich, die Produktion zeitweise zu unterbrechen oder zu verlangsamen. Dies kann in Zeiten hoher Energiekosten oder geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energien erfolgen.
- **Ressourcenbelegung anpassen:** Das kurzfristige Ab- und Wiederanfahren von Zementmühlen erfordert aufgrund der Aufwärmzeiten, der Betriebsstabilität und der Qualitätsanforderungen an das Endprodukt einen erheblichen technischen und organisatorischen Aufwand.
- **Energie zentral speichern:** Die Zementindustrie kann in Energiespeichersysteme investieren. Diese Systeme können Wärme oder Strom speichern, die während des Zementherstellungsprozesses erzeugt wird. Die gespeicherte Energie kann dann zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden, um den Energieverbrauch zu senken oder Spitzen im Energiebedarf abzufedern.
- **Energie bivalent betreiben:** Die Zementindustrie kann verschiedene Brennstoffe oder Energiequellen verwenden, um den Brennprozess in den Öfen zu betreiben. Die Flexibilität, zwischen verschiedenen Energiequellen zu wechseln, ermöglicht es, den Brennstoff je nach Kosten oder Verfügbarkeit anzupassen.
- **Pausenzeiten verschieben:** Bei der Zementherstellung können Pausenzeiten verschoben oder angepasst werden, um energieintensive Prozesse in Zeiten zu legen, in denen die Energiekosten niedriger oder erneuerbare Energiequellen besser verfügbar sind. Dies ermöglicht eine flexiblere Nutzung der Energieressourcen. Dabei wird der Zementherstellungsprozess nicht unterbrochen.
- **Schichtzeiten anpassen:** Durch die Anpassung von Arbeitszeiten oder Schichtplänen in Zementwerken können Produktionsschritte in Zeiten mit niedrigerer Energiekostenstruktur oder höherer Verfügbarkeit erneuerbarer Energien gelegt werden. Dies ermöglicht einen flexibleren Einsatz von Energieträgern. Jedoch sind höhere Personalkosten durch Schichtzuschläge zu beachten.
- **Kapazitätsplanung anpassen:** Die Anpassung der Produktionskapazitäten an die Energieverfügbarkeit oder -kosten kann zur Optimierung des Energieverbrauchs beitragen. Dies kann bedeuten, dass bestimmte Produktionsanlagen oder -kapazitäten nur zu bestimmten Zeiten aktiviert werden, um die Energieeffizienz zu maximieren. Eine langfristig andauernde Überkapazität ist aus Investitionsgründen jedoch nicht anzustreben.
- **Produktionsreihenfolge ändern:** Die Produktionsreihenfolge verschiedener Zementsorten oder Chargen kann angepasst werden, um energieintensive Prozesse

zu günstigeren Zeiten durchzuführen. Die Verschiebung von Produktionsphasen kann dazu beitragen, den Energieverbrauch zu optimieren und Kosten zu senken.

- **Produktionsstart verschieben:** Die Flexibilität, den Startzeitpunkt der Zementproduktion anzupassen, ermöglicht es, Produktionsprozesse so zu planen, dass sie zu Zeiten mit geringerem Energiebedarf oder günstigeren Energiekosten durchgeführt werden.

Die Anpassung von Prozessparametern wie Temperaturen und Drücken in den Produktionsabläufen bietet eine Möglichkeit, den Brennprozess flexibler zu gestalten und damit den Energieverbrauch zu optimieren. Ebenso ermöglicht der Wechsel zwischen verschiedenen Energieträgern eine flexible Anpassung an Marktbedingungen, indem, je nach Verfügbarkeit und Kosten, unterschiedliche Brennstoffe eingesetzt werden können. Auch die Wärmerückgewinnung erweist sich als vorteilhaft, da sie die in den verschiedenen Produktionsphasen freigesetzte Wärme in Form von thermischer Energie wiederverwendet, um den Gesamtenergieverbrauch zu senken.

CC-Anlagen in der Zementindustrie können in vielerlei Hinsicht von der Flexibilisierung der Energieversorgung profitieren. Zum einen können Flexibilitätsmaßnahmen es sowohl CC-Anlagen als auch den mit elektrischer Energie betriebenen Prozessschritten ermöglichen, ihre Betriebszeiten an die Verfügbarkeit günstigerer Energiepreise anzupassen. CC-Anlagen werden folglich zeitgleich mit dem Zementherstellungsprozess betrieben, sodass die CO₂-Emissionen dann anfallen, wann sie direkt eingefangen werden können. Das bedeutet, dass CC-Anlagen in Zeiten niedriger Energiekosten oder hoher erneuerbarer Energieproduktion höhere Betriebszeiten erreichen, um mehr CO₂ abzutrennen. Gleichzeitig können sie ihre Aktivitäten reduzieren, wenn die Energiekosten hoch und erneuerbare Energien weniger verfügbar sind. Darüber hinaus können diese Anlagen von überschüssiger elektrischer und thermischer Energie profitieren, die möglicherweise in anderen Teilen des Zementwerks erzeugt wird. Dies kann dazu beitragen, die Energiekosten für den Betrieb der CC-Anlagen zu senken. Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Zementindustrie bieten folglich eine vielversprechende Perspektive für die Integration von CC-Anlagen als flexible Verbraucher in das Energiesystem.

3.2 Quantitative Bewertung des energieflexiblen Betriebs von CCUS in der Zementindustrie

Sauer et al. ermittelten ein Lastflexibilisierungspotenzial von 10 Prozent pro Jahr für gesamten Stromeinsatz in einem durchschnittlichen deutschen Zementwerk bei mittlerer Mühlenauslastung von 51 Prozent [[6]. Das bedeutet, dass dieses Werk in der Lage ist, 10 Prozent seines Stromverbrauchs zu variieren oder zu verschieben, um auf Marktanforderungen oder Netzbedingungen zu reagieren, ohne die Hauptproduktion zu beeinträchtigen. Auf Basis dieser Erkenntnis kann das Flexibilisierungspotenzial von CC-Anlagen in der Zementindustrie bestimmt werden. Zur Herstellung einer Tonne Zement werden in Deutschland aktuell 877 kWh Energie benötigt [11]. Eine CC-Anlage benötigt zur Abtrennung einer Tonne CO₂, je nach Abtrennungstechnologie und CO₂ Konzentration, zwischen 130 kWh und 400 kWh elektrischer Energie [19]. Damit das Net-Zero-Szenario mit 460 kg CO₂ pro Tonne Zement realisiert wird, muss eine CC-Anlage 180 kg CO₂ pro Tonne

Zement abtrennen. Dafür werden zwischen 23 kWh und 72 kWh elektrischer Energie benötigt. Unter der Annahme, dass die CC-Anlage zeitgleich mit dem Mühlenwerk betrieben wird, können zwischen 2,3 kWh und 7,2 kWh elektrische Energie flexibilisiert werden. Diese Annahme kann getroffen werden, da CO₂ nur während des Mühlenbetriebs anfällt und sowohl der Mühlenbetrieb als auch die CC-Anlage zu Zeiten günstiger Energiekosten betrieben werden. Deutschlandweit werden pro Jahr in etwa 33 Millionen Tonnen Zement produziert [20]. Insgesamt können deutschlandweit demnach 75,9 GWh bis 23,76 GWh elektrische Energie pro Jahr flexibilisiert werden. Diese Flexibilität ermöglicht es, die CO₂-Abtrennung mit den Spitzen- und Niedriglastzeiten des Zementwerks zu synchronisieren, was einen flexiblen Betrieb der CC-Anlage und potenziell niedrigere Energiekosten ermöglicht.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Implementierung verschiedener Flexibilitätsmaßnahmen in die Produktionsprozesse der Zementindustrie bietet viele Möglichkeiten, den Energieverbrauch zu flexibilisieren und die Produktion an sich ändernde Energiebedingungen anzupassen. Die Integration von CC-Anlagen in diese flexiblen Strukturen ist ein möglicher Ansatz für die nachhaltige Gestaltung des Energiesystems. CC-Technologien benötigen für ihren Betrieb erhebliche Energiemengen, insbesondere bei der Abtrennung von CO₂ aus industriellen Prozessen. Durch die Anpassung von Produktionsparametern, den Wechsel zwischen verschiedenen Energieträgern, die Nutzung von Energiespeichern und die flexible Steuerung von Produktionsprozessen können CC-Anlagen als energieflexible Verbraucher in das Energiesystem integriert werden. In Zeiten niedriger Energiekosten oder hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien können diese Anlagen ihre CO₂-Abtrennungskapazität erhöhen. Umgekehrt können sie in Zeiten hoher Energiekosten oder geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energien ihre Kapazitäten reduzieren oder vorübergehend aussetzen, um den Energieverbrauch zu optimieren und die Betriebskosten zu senken. Damit kann die Zementindustrie nicht nur einen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten, sondern auch als Teil eines adaptiven, energieeffizienten Systems zur Stabilisierung und Nachhaltigkeit des Gesamtnetzes beitragen. Die Zukunftsperspektive ist daher ein integriertes Energiesystem, in dem CC-Anlagen nicht nur als Verbraucher, sondern als flexible Akteure agieren, die sich an die sich ständig ändernden Bedingungen im Energiesektor anpassen können und gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten.

Im nächsten Schritt sollen die EFM simuliert, bewertet und priorisiert werden. Neben der minimal und maximal zu flexibilisierenden Leistung je EFM wird hierbei der minimale und maximale Aktivierungszeitraum der EFM beschrieben. Dieser beschreibt die Dauer einer möglichen Flexibilisierung. Technische Machbarkeitsstudien und Kosten-Nutzen-Analysen sind nötig, um die am besten geeigneten Maßnahmen für den Betrieb von CC-Anlagen zu identifizieren.

Literatur

- [1] E. Bellmann und P. Zimmermann. "Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie: Hintergrund und Handlungsoptionen." Zugriff am: 1. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf
- [2] G. Habert *et al.*, "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries," *Nat Rev Earth Environ*, Jg. 1, Nr. 11, S. 559–573, 2020. doi:

- 10.1038/s43017-020-0093-3. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-0093-3>
- [3] Umweltbundesamt. "Dekarbonisierung der Zementindustrie." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet_zementindustrie.pdf
- [4] K. Purr und H.-J. Garvens. "Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization." Zugriff am: 10. Januar 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2021_hgp_ccu_final_bf_out_0.pdf
- [5] Jones Christopher. "The future regulatory framework applicable to Carbon Capture and Storage Infrastructure - issues for discussion." Zugriff am: 10. Januar 2024. [Online.] Verfügbar: https://cadmus.eui.eu/bitstream/handle/1814/76181/RSC_PB_2023_23.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] A. Sauer, E. Abele und H. U. Buhl. "Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung | SynErgie." [Online.] Verfügbar: https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/urn_nbn_de_0011-n-5659211.pdf
- [7] F. Birol. "Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
- [8] M. G. Plaza, S. Martínez und F. Rubiera, "CO₂ Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations," *Energies*, Jg. 13, Nr. 21, S. 5692, 2020. doi: 10.3390/en13215692. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5692>
- [9] M. Schneider. "Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>
- [10] F. Ausfelder, Seitz, Antje und S. von Roon. "Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik, Potenziale, Hemmnisse." Zugriff am: 1. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/SynErgie-Flexibilita%CC%88tsoptionen-Grundstoffindustrie.pdf>
- [11] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ). "Zementindustrie im Überblick 2020/2021." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2020-2021>
- [12] WWF Deutschland. "Zementproduktion: Orientierungsrahmen für Unternehmensdialoge." Zugriff am: 21. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: https://pathwaystoparis.com/wp-content/uploads/2022/11/PtP_OR_Zementproduktion-1.pdf
- [13] Y. Eboumbou Ebongue. "Bewertung von Verfahren zur Erreichung der CO₂-Negativität in der Produktion." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.degruyter.com/journal/key/zwf/118/9/html>
- [14] Malischek, Raimund, Baylin-Stern, Adam und McCulloch Samantha. "Transforming Industry through CCUS." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/transforming-industry-through-ccus>
- [15] M. Voldsund *et al.*, "Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production: Part 1: Technical Evaluation," *Energies*, Jg. 12, Nr. 3, S. 559, 2019. doi: 10.3390/en12030559. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/3/559>
- [16] UNECE Sustainable Energy Programme. "Technology brief carbon capture use and storage (CCUS)." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_EN_final.pdf
- [17] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. "Carbon Neutrality in the UNECE Region: Technology Interplay under the Carbon Neutrality Concept." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf
- [18] F. Ausfelder, S. von Roon und A. Seitz. "Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie 2: Analysen, Technologien, Beispiele." Zugriff am: 1. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: <https://>

synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/09/SynErgie-Flexibilita%CC%88tsoptionen-Grundstoffindustrie-II.pdf

- [19] S. Lübbers, Hobohm Jend, Thormeyer, Christoph und H. Dambeck. "Technische CO₂-Senken: Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negativemissionstechnologien Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität." Zugriff am: 22. November 2023. [Online.] Verfügbar: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Prognos_final.pdf
- [20] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ). "Umweltdaten der deutschen Zementindustrie: 2022." Zugriff am: 15. Januar 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2022.pdf