

AKTIONSPLAN

STUDIEN



Stein und Erden, Glas

Transform.Industry – Transformationspfade und
FTI Fahrplan für eine klimaneutrale Industrie 2040

Wien, Jänner 2024

Erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds

transform.industry

Aktionsplan Branche Stein und Erden, Glas

Ausschreibung	Energieforschung 2020
Projektstart	01.10.2021
Projektende	31.07.2023
Auftragnehmer (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology GmbH (Koordinator) Österreichische Energieagentur, Montanuniversität Leoben und Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz
Ansprechpartner	Christian Schützenhofer (Projektkoordinator, AIT)
E-Mail	christian.schuetzenhofer@ait.ac.at

Einleitung und Hintergrund	03
1.0 Status-Quo	04
1.1 Allgemeine Brancheninformation	04
1.2 Spezifische Brancheninformation	08
2.0 Transformationspfade	10
2.1 Zusammenfassung der sektorspezifischen Szenarien-Ergebnisse	10
2.2 Investitionsbedarfe und Stranded Assets	15
2.3 Branchenspezifische Schlüsseltechnologien	17
2.4 Handlungsempfehlungen	22
Literaturverzeichnis	23
Kontaktdaten	24

Einleitung und Hintergrund

Innerhalb der kommenden zwei Jahrzehnte wird Österreich zu einem klimaneutralen Land umgebaut. Die Transformation ist eine gewaltige Herausforderung, besonders in der Industrie. Damit der Umbau erfolgreich wird, braucht es große Mengen erneuerbarer Energie, Investitionen in Produktionsprozesse, die zum Teil noch neu entwickelt werden müssen, sowie einen Innovationsvorsprung im internationalen Wettbewerb.

Das Projekt *transform.industry* liefert Antworten auf die Frage, wie diese Transformation der Industrie in Österreich gelingen kann.

transform.industry ist ein Forschungsprojekt, das den produzierenden Sektor beim Weg in die Klimaneutralität unterstützt. Das Projektteam rund um AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Österreichische Energieagentur, Montanuniversität Leoben und Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz zeigt auf, wie sich Klimaschutz, Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit in unterschiedlichen Bereichen der österreichischen Industrie miteinander vereinbaren lassen.

Eine Bestandsaufnahme in 13 Branchen und die Identifikation von Schlüsseltechnologien, mit denen Treibhausgasemissionen verhindert oder entfernt werden können, bilden das Fundament des Projekts. Anhand von Transformationsszenarien werden der Investitions- und Energiebedarf sowie volkswirtschaftliche und ökologische Effekte abgeschätzt. Auf dieser Basis entwickeln die ExpertInnen gemeinsam mit VertreterInnen der industriellen Praxis einen strategischen Forschungs-, Technologie- und Innovationsfahrplan. Weiters sprechen sie Handlungsempfehlungen aus, welche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um innovative Schlüsseltechnologien „Made in Austria“ entwickeln und zur Marktreife bringen und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie weiter ausbauen können.

Die F&E-Dienstleistung ist im Auftrag des Klima- und Energiefonds entstanden und mit Mitteln des Energieforschungsprogramms 2020 finanziert.

1.0 Status-Quo

1.1 Allgemeine Brancheninformation

Aus Abbildung 1 lässt sich eine verhältnismäßig sehr ähnliche Entwicklung von Produktionswert und Bruttowertschöpfung der Branche ablesen. 2009 kam es in Folge der Finanzkrise zu einem merklichen Rückgang

des Produktionswertes und der Wertschöpfung, dies wird auch durch den Verlauf des Produktionsindex deutlich sichtbar.

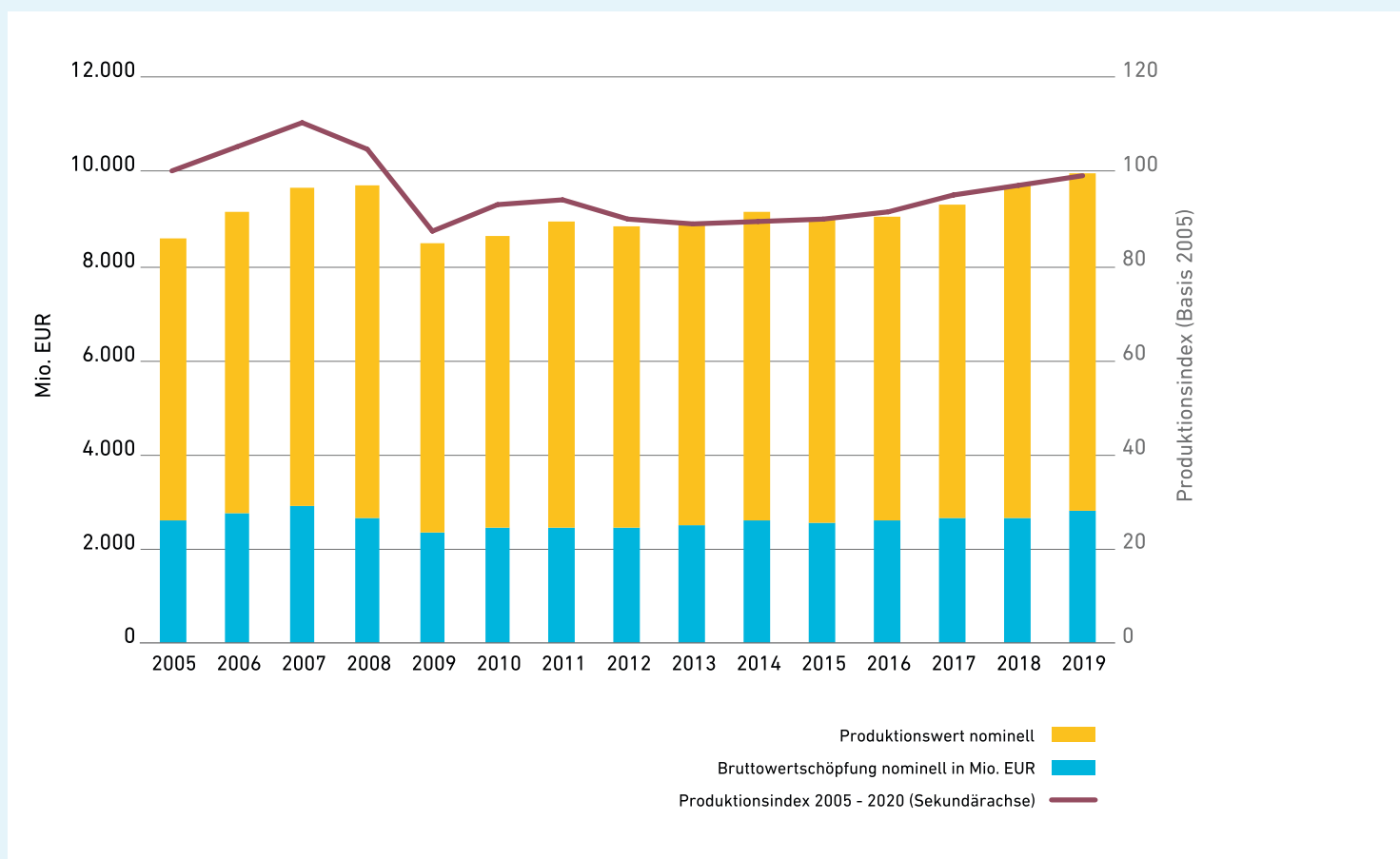


Abbildung 1
Wirtschaftliche Entwicklungen Branche
Steine und Erden, Glas, Quelle: [1]

Die Anzahl an Erwerbstätigen in der Branche nahm seit 2008 stetig ab und stagnierte ab 2016. Dem gegenüber blieb die Anzahl an Unternehmen seit 2010 weitgehend

stabil, es gab keine größeren Schwankungen in der Unternehmenszahl zwischen 2010 und 2019.

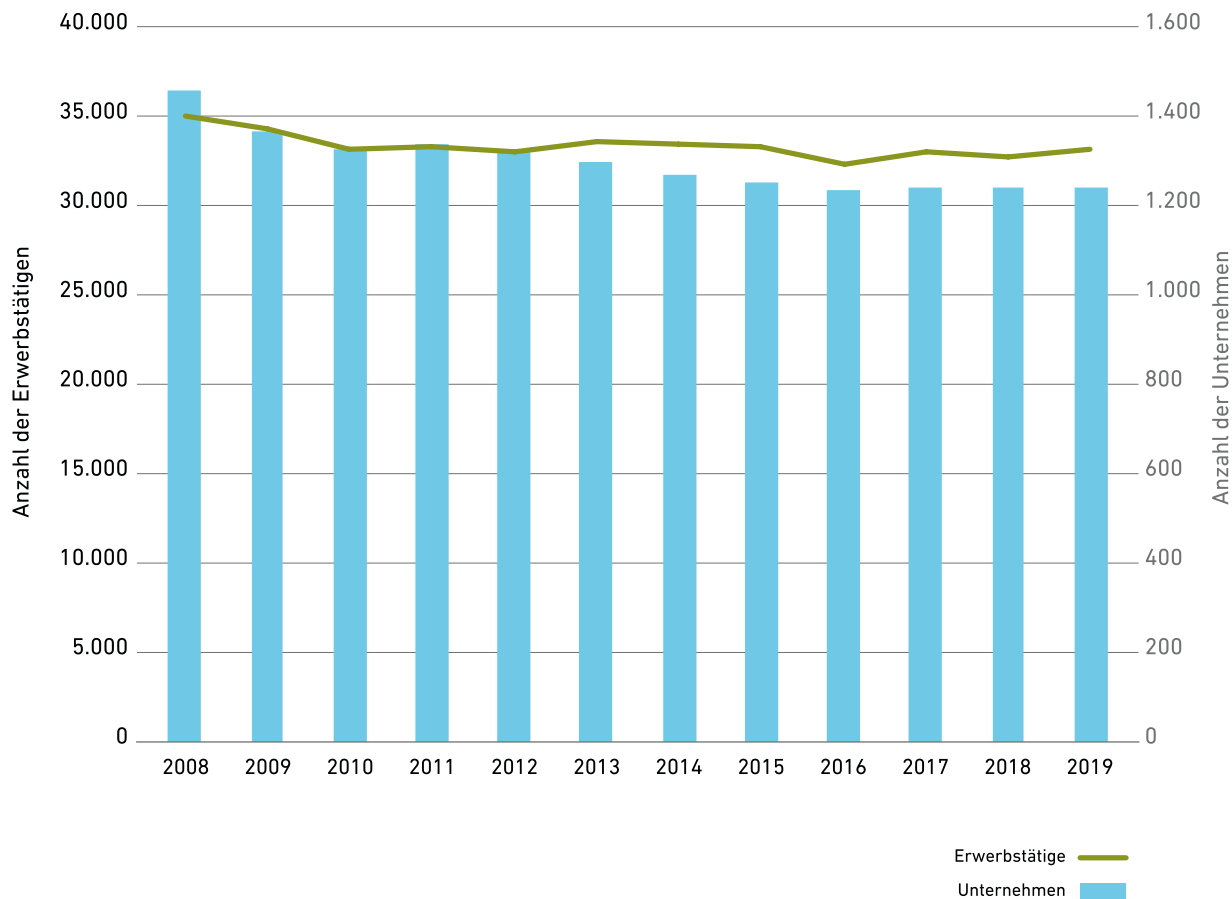


Abbildung 2
Entwicklungen Erwerbstätige und Unternehmen
Branche Steine und Erden, Glas, Quelle: [1]

Der Energieeinsatz in Abbildung 3 zeigt einen relativ stabilen Verlauf zwischen 2008 und 2019. Generell ist eine Abnahme der Energieträger Öl und Kohle zu beobachten, während Strom, Abfälle und Gas kontinuierlich zugenommen haben. Auffallend ist der starke

Rückgang an den erneuerbaren Energieträgern zwischen 2017 und 2019, dieser Rückgang war besonders durch eine Reduktion von biogenen Brenn- und Treibstoffen getrieben.

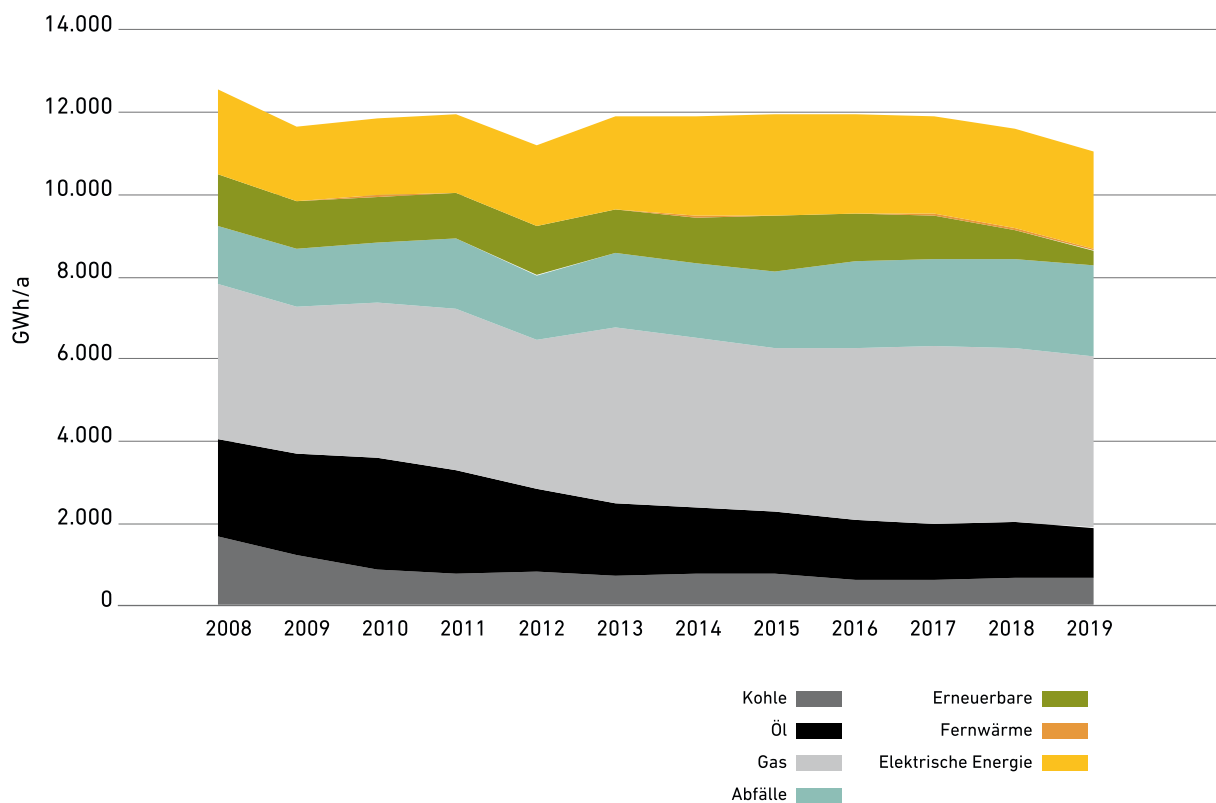


Abbildung 3
Energieeinsatz Branche Steine und Erden, Glas, Quelle: [2]

Die Treibhausgasemissionen der Branche Steine und Erden, Glas verliefen seit 2009 sehr stabil. Rund die Hälfte der Treibhausgase wurden durch prozessbedingte Emissionen verursacht. Die Emissionen aus Gas nahmen seit 2009 leicht zu, während die Emissionen aus Öl und Kohle merklich abnahmen.

Ein wichtiger Teil dieser Branche ist die Zementindustrie, diese hatte zwischen 2010 und 2018 einen steigenden

Trend in ihren Emissionen war durchschnittlich für knapp die Hälfte der Branchenemissionen verantwortlich.

Die Branche Steine und Erden, Glas war 2019 für knapp über 16% der gesamten Treibhausgasemissionen des produzierenden Bereichs verantwortlich, an den gesamt-österreichischen Emissionen hatte die Branche einen Anteil von ca. 6%.

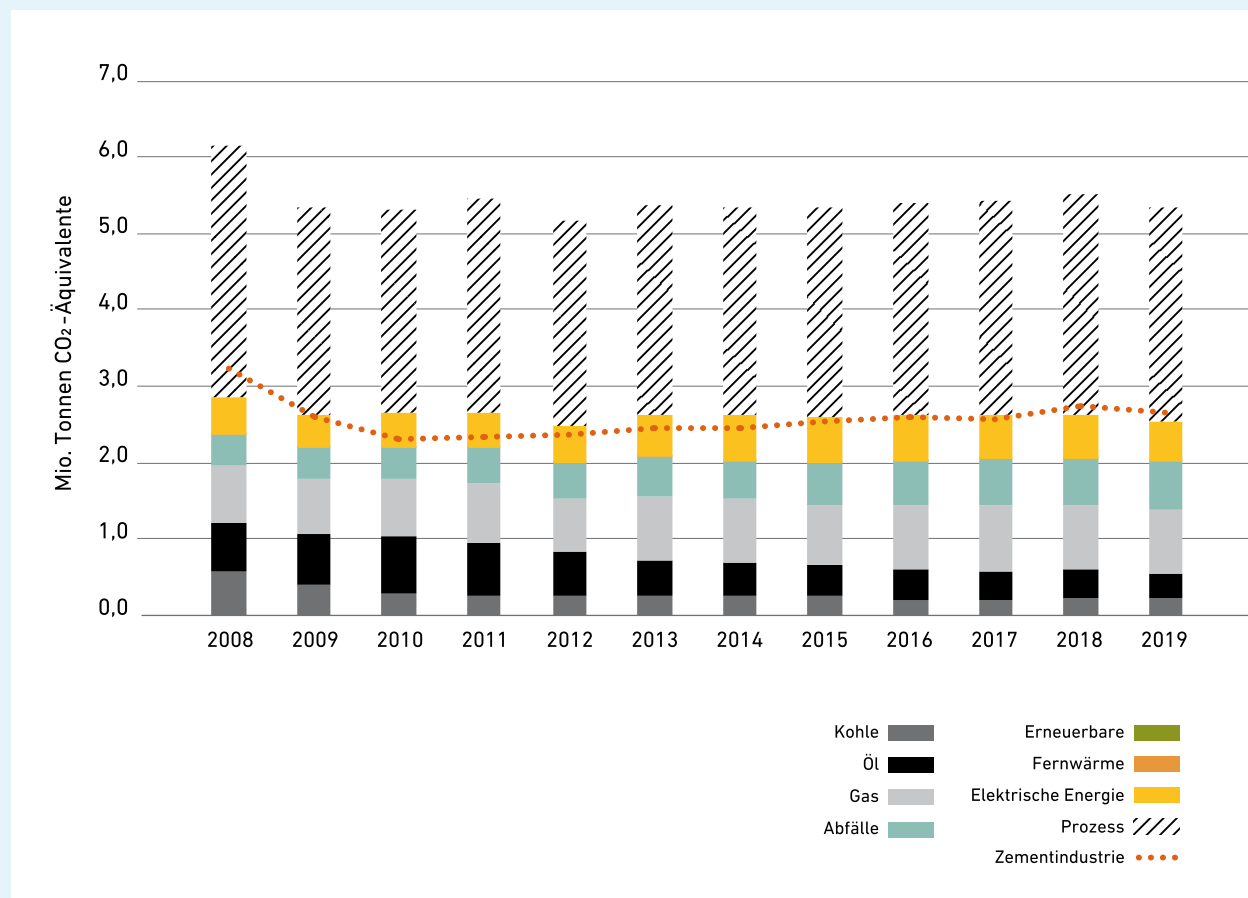


Abbildung 4

Treibhausgasemissionen Branche Steine und Erden, Glas,

Quelle: [2,3], eigene Berechnungen, Europäische Union

1.2 Spezifische Brancheninformation

Die Branche Steine und Erden, Glas lässt sich in mehrere Subbranche unterteilen: Tonprodukte, refraktäre Produkte, Glas und Glasprodukte, Zement, Kalk, Beton, Keramik und Gips. International wird dieser Branche die Verarbeitung von natürlichen Rohstoffen wie Sand, Stein, Ton und refraktäres Material (Magnesia) zu Halbfertig- oder Fertigprodukten wie Kalk, Zement und Beton zugeschrieben [4,5].

In Österreich war Die Branche Stein und Erden, Glas mit einem Energieverbrauch von ca. 11 TWh für ca. 7% des gesamten industriellen Energieverbrauchs im Jahr 2019 verantwortlich [6]. Die primären Energieträger (Abbildung 3) sind fossile Brennstoffe, insbesondere Erdgas, das vor allem in Industrieöfen für den Hochtemperaturwärmebedarf eingesetzt wird, gefolgt von Strom (22%) und alternativen Brennstoffen (20%) sowie einem geringen Anteil an biogenen Brennstoffen (3%). Alternative Brennstoffe wie Altholz, Altpapier, Fleisch- und Knochenmehl, Altreifen und Altöl werden derzeit in der Zementherstellung verwendet und umfassen sowohl fossile als auch biogene Stoffe.

Mit insgesamt 5,4 Mio. t CO₂ Äquivalente an klimarelevanten Treibhausgasemissionen (Abbildung 4) ist die Branche der zweitgrößte industrielle Emittent in Österreich. Die Emissionen der Branche Stein und Erden, Glas stammen aus zwei Quellen: Bei etwa 60% der Emissionen handelt es sich um prozessbedingte Emissionen aus der Umwandlung von mineralischen Rohstoffen (z. B. Umwandlung von Kalkstein CaCO₃ zu CaO und CO₂). Rund 40% haben ihren Ursprung in der Verbrennung fossiler Brennstoffe.

Da die Zementherstellung für mehr als 60% der Emissionen der Branche verantwortlich ist, stellt diese Teilbranche auch das Kernergebnis des untenstehend beschriebenen Benchmarkings dar. Tabelle 1 fasst die Benchmarking-Daten der Zementproduktion sowie der Branche Stein und Erden, Glas auf EU- und österreichischer Ebene für Energieverbrauch und Emissionen zusammen. Wie in Abbildung 5 dargestellt, liegt der CO₂-Emissionsfaktor der österreichischen Produktion unter dem EU-Durchschnitt. Dies ist vor allem auf die Verwendung alternativer Brennstoffe als Ersatz für fossile Brennstoffe (ca. 80% bei der Zementherstellung) zurückzuführen, was den höchsten Anteil an der Verwendung von alternativen Brennstoffen in der EU darstellt.

Produkt	Europa – EU 27			Österreich		
	Produktion (Mio. t)	Spezifischer Energieverbrauch (GJ/t Produkt)	Spezifische Emissionen (tCO ₂ -Äquivalente/t Produkt)	Produktion (Mio. t)	Spezifischer Energieverbrauch (GJ/t Produkt)	Spezifische Emissionen (tCO ₂ -Äquivalente/t Produkt)
Steine, Erden, und Glas Branche	229,55* [7]	6,05 [8]	0,82 [7]	6,54 a [7]	5,54 [9]	0,68 [7]
Zement	173 [7]	3,87 [10,11]	0,663 [7]	5,23 [12]	4,3 [12]	0,52 [12]

* die Produktion von Zement, Kalk und Glas

Tabelle 1

Benchmark die Branche Steine und Erden, Glas und Zementindustrie für das Jahr 2019.

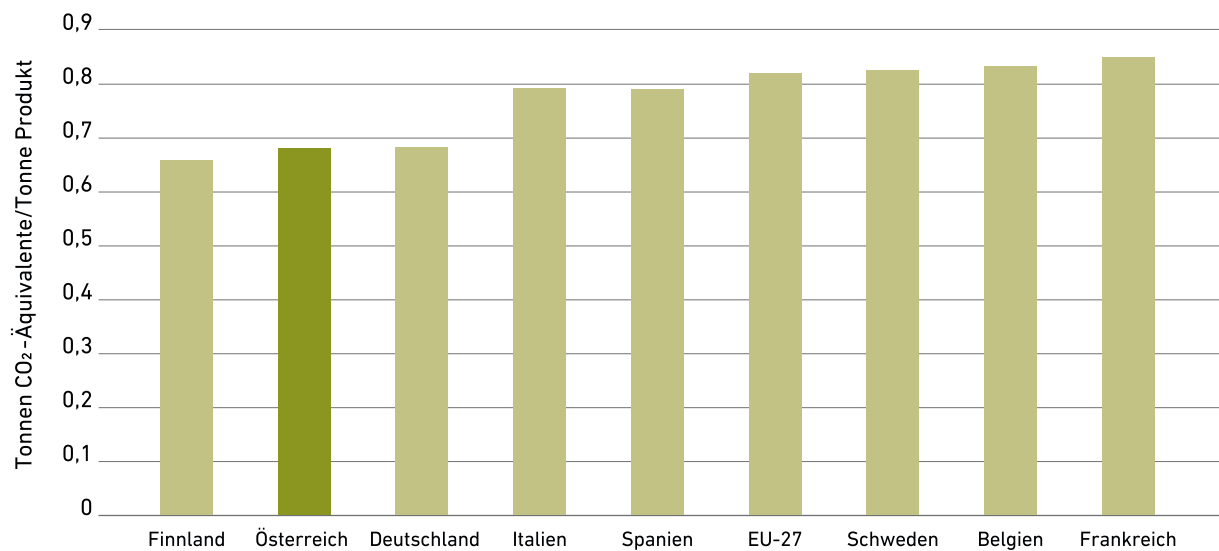


Abbildung 5
Vergleich der spezifischen Emissionen in ausgewählten europäischen
Ländern je Tonne Produkt der Branche Steine und Erden, Glas

2.0 Transformationspfade

Die Erkenntnisse zur Transformation vom Status Quo hin zur Klimaneutralität in der Branche Steine und Erden, Glas wurden mit einem mehrstufigen Ansatz gewonnen. Zuerst wurden ausgehend vom Energieeinsatz 2020, der den Übergang zwischen der historischen Betrachtung in Abschnitt 1 zum zukünftigen Energieeinsatz darstellt, zukünftig eingesetzte Energieträger und -mengen für unterschiedliche Entwicklungspfade in Fünfjahresschritten bis 2040 in vier Szenarien modelliert, vgl. Abschnitt 2.1. Ein Überblick zu den Entwicklungspfaden wird im folgenden Abschnitt gegeben, Details zu den Annahmen für die ausgearbeiteten Szenarien finden sich im Gesamtbericht wieder. Auf den Ergebnissen der Szenarien aufbauend wurden volkswirtschaftliche Effekte der einzelnen Entwicklungspfade analysiert, vgl. Abschnitt 2.2. Durch die Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte wurden die branchenspezifischen Schlüsseltechnologien identifiziert und weitere innovationspolitische Handlungsempfehlungen abgeleitet, vgl. Abschnitt 2.3 bzw. 2.4.

2.1 Zusammenfassung der sektorspezifischen Szenarien-Ergebnisse

Basierend auf den bisherigen Entwicklungen der Nutzung von Energie und unter der Annahme klimaneutraler Energiebereitstellung bis 2040 wurde in vier Szenarien bzw. technologischen Entwicklungspfaden ermittelt, wie sich der Bedarf an klimaneutralen Energieträgern innerhalb der Branche Steine und Erden, Glas entwickelt. Die gewählten Szenarien bilden dabei verschiedene Ansätze und Trends ab, wie die Klimaneutralität in der Industrie erreicht werden kann. Allen Szenarien gemein ist die Annahme einer konstant moderaten Wirtschaftsentwicklung bei gleichbleibenden Erzeugungsmengen von Grundstoffen. Die Annahmen und Entwicklungspfade der einzelnen Szenarien werden im Folgenden in der Diskussion der Ergebnisse für die Branche kurz vorgestellt.

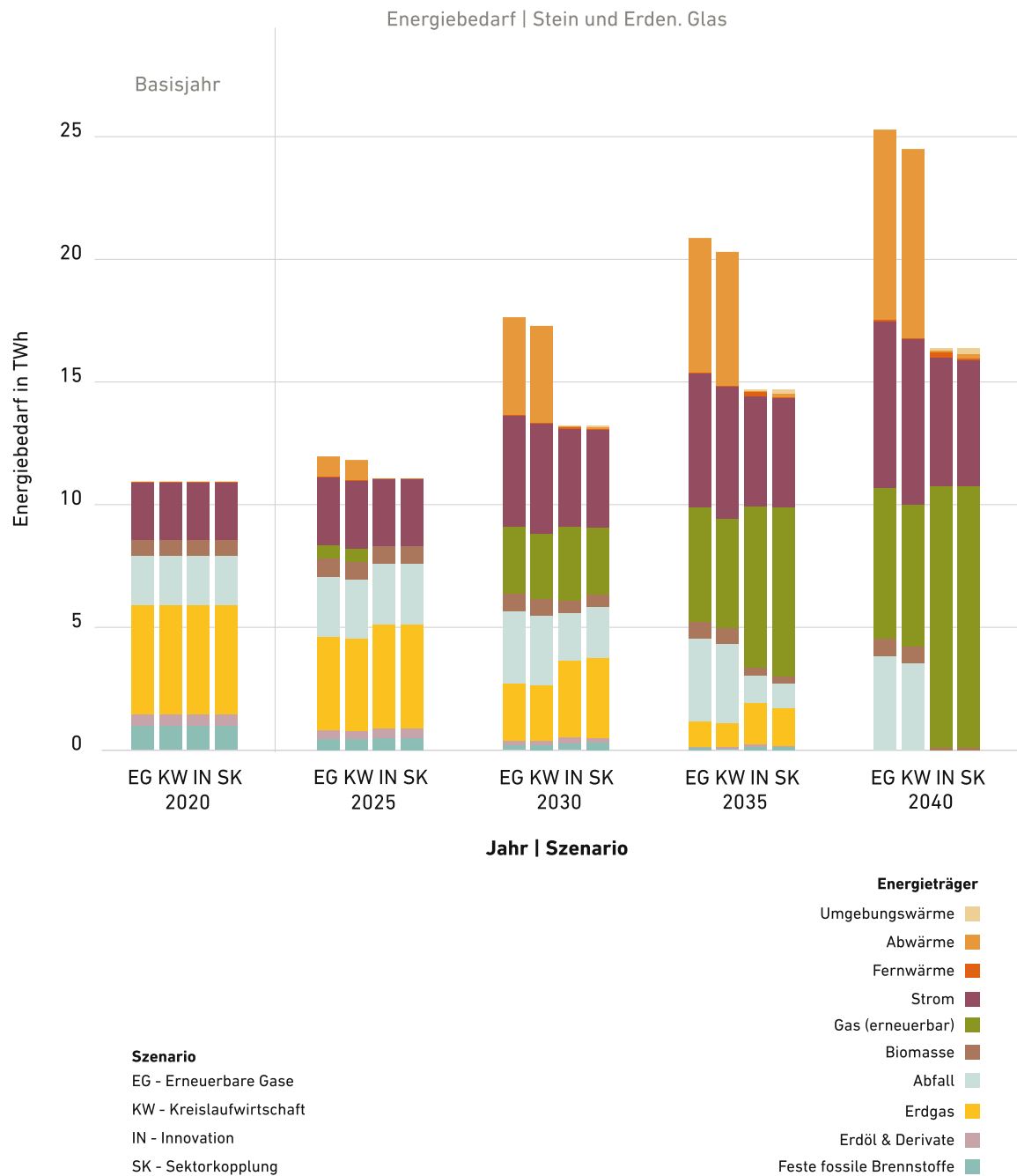


Abbildung 6
Energieverbrauch der Branche Steine und Erden, Glas gegliedert
nach Energieträger und je Szenario über die Jahre

Abbildung 6 zeigt eine Verteilung des Energieverbrauchs nach Energieträgern in der Branche Steine und Erden, Glas. Vor allem die Einführung von Technologien zur Kohlenstoffabscheidung führt in allen Szenarien zu einem Anstieg des Energieverbrauchs. Dabei unterscheiden sich jedoch die benötigten Energieträger und Energiemengen je nach eingesetzter Technologie signifikant. Insbesondere der Einsatz der Aminwäsche in den Szenarien erneuerbare Gase (EG) und Kreislaufwirtschaft (KW) erfordert eine erhebliche Menge an zusätzlicher Wärmeenergie und Elektrizität für den Betrieb der Abscheidungsanlagen. Infolgedessen hat die Aminwäsche als dem Drehrohrofen nachgeschaltete Lösung erhebliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Sektors, wie in der Abbildung dargestellt. Durch ein bis 2040 weiter verbessertes Klinker/Zement Verhältnis von 0,54 (2019: 0,66) durch den Einsatz von Substitutionsmaterialien wie Recyclingzement und -beton können sowohl Energiebedarf als auch Emissionen (durch einen verringerten Einsatz von Primärrohstoffen) im Szenario KW im Vergleich zum Szenario EG verringert werden.

Die Szenarien Innovation (IN) und Sektorkopplung (SK) weisen im Vergleich zu den Szenarien EG und KW einen geringeren Energiebedarf auf. Dies liegt insbesondere daran, dass hier die Oxyfuel-Technologie eingesetzt wird, die lediglich zusätzlichen Strom für eine Luftzerlegungsanlage (Air Separation Unit – ASU) und eine CO₂-Reinigungsanlage zum Betrieb benötigt. Während der spezifische Energiebedarf zur Abscheidung der geogenen Emissionen der Branche daurch deutlich verringert wird, ist jedoch der erhöhte Aufwand für die Integration der Technologie in den bestehenden Produktionsprozess hervorzuheben.

In allen betrachteten Szenarien ist ein Trend zur Substitution fossiler Energieträger durch elektrische Wärmepumpen bei Temperaturen unter 200 °C, Biomasse für Temperaturen zwischen 200 bis 500 °C und Biomethan für den Hochtemperaturbedarf über 500 °C erkennbar.

Abbildung 7 zeigt die Verteilung des Energieverbrauchs auf der Grundlage von Nutzenergiekategorien innerhalb der Branche Steine und Erden, Glas. Ein erheblicher Teil der Energie wird für Prozesswärme über 200 °C aufgewendet, insbesondere in Brennöfen (z. B. Drehrohrofen bei der Zementherstellung, Glasschmelzöfen, Kalköfen usw.). In den Szenarien EG und KW entfällt ein beträchtlicher Teil des Energieverbrauchs auf den Energiebedarf für Anlagen zur Kohlenstoffabscheidungsanlagen auf Basis der Nutzenergiekategorien. Dies ist auf den Einsatz der Aminwäsche zurückzuführen, die eine erhebliche Menge an Energie erfordert.

Auch Standmotoren und Verkehrsmittel machen einen beträchtlichen Teil des Energieverbrauchs in diesem Sektor aus. Auf Raumheizung und Prozesswärme unter 200 °C entfällt nur ein kleiner Teil des Energieverbrauchs, was ihren relativ geringen Beitrag zum Gesamtenergieverbrauch im Vergleich zu anderen Kategorien verdeutlicht.

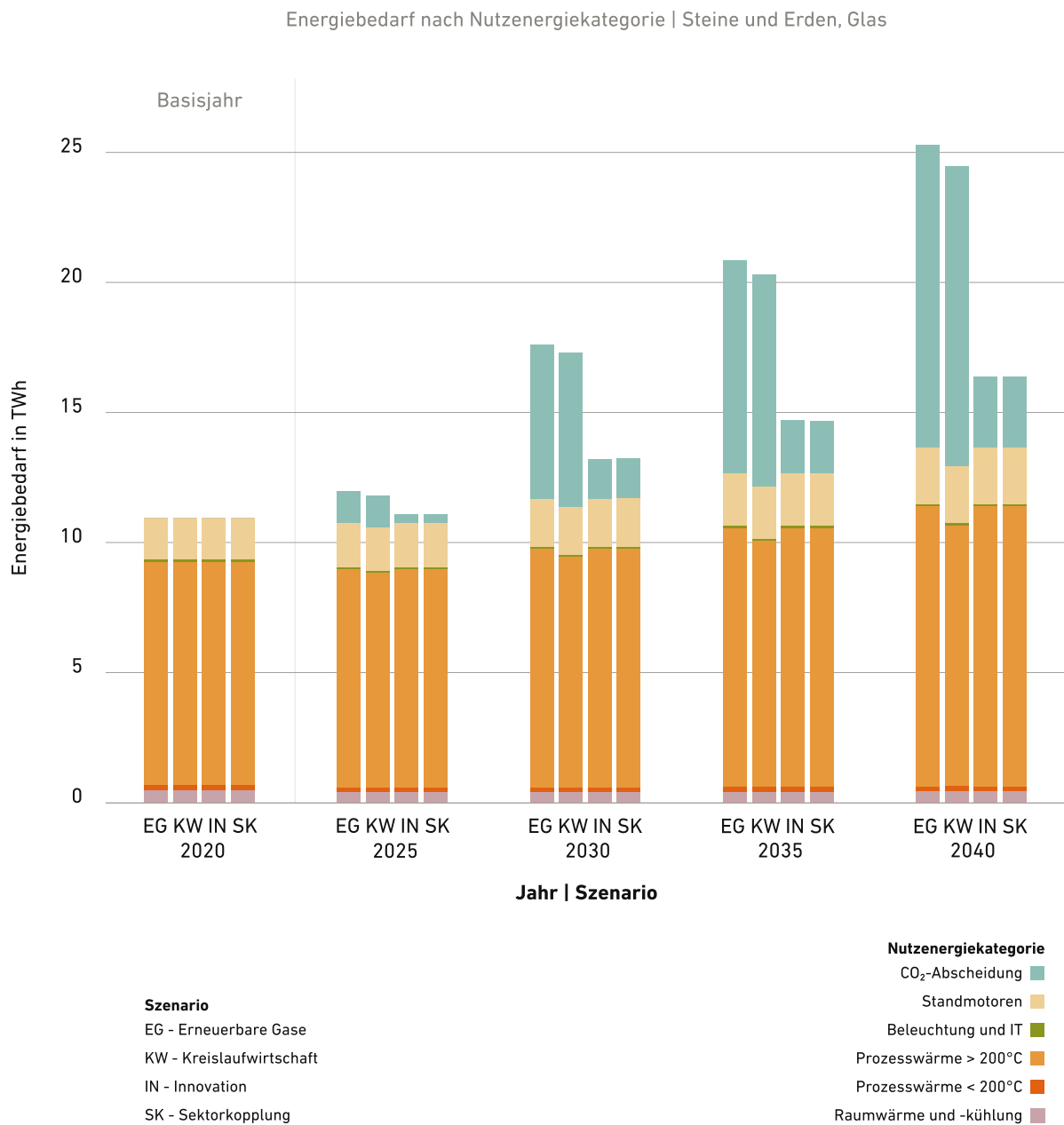


Abbildung 7
Energieverbrauch der Branche Steine und Erden, Glas nach Nutzenergie
für den Status Quo 2020 und je Szenario über die Jahre

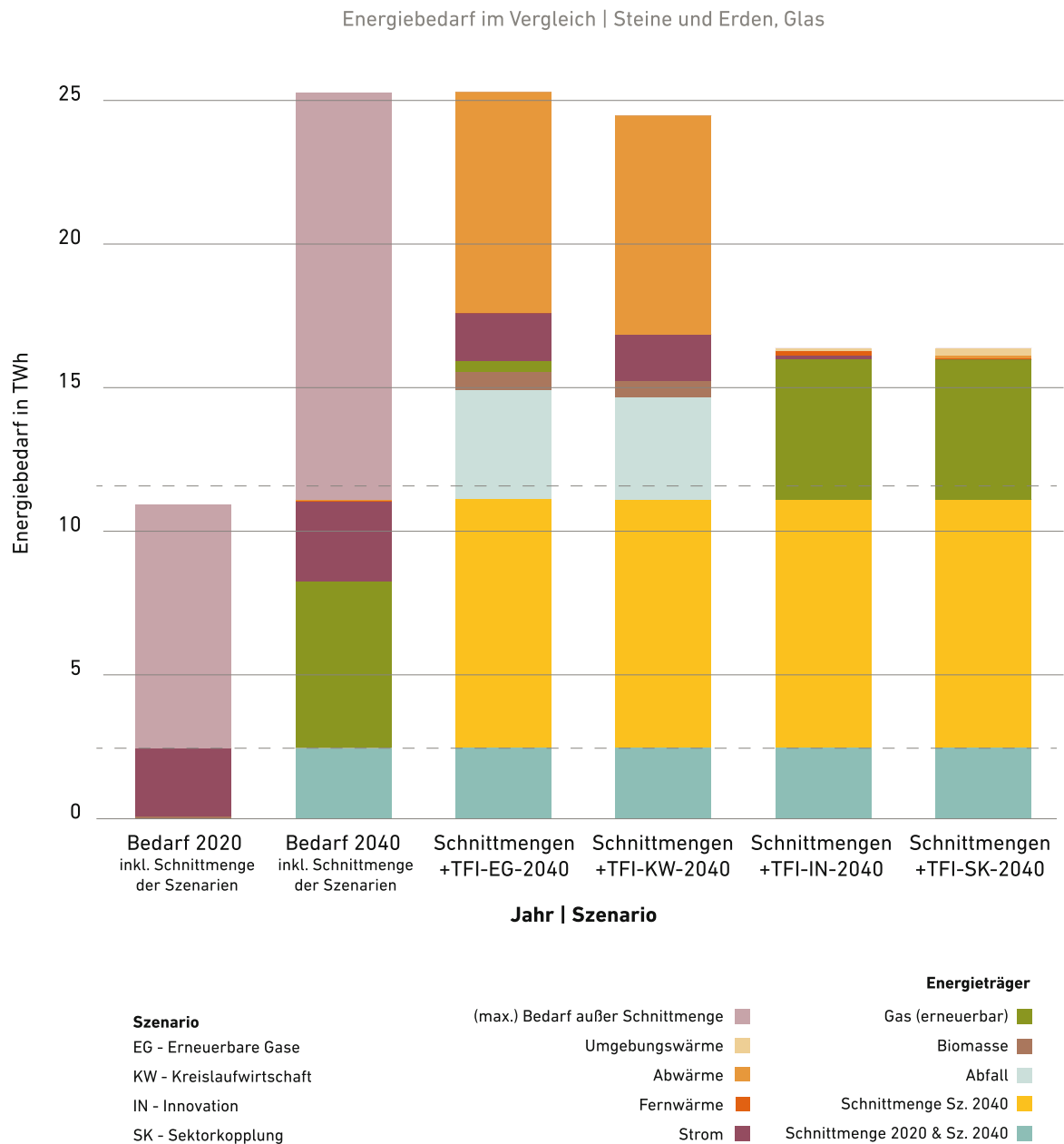


Abbildung 8

Vergleich der Schnittmengen des eingesetzten Energieträgermixes gemäß Modellergebnis: Erste Säule modell-unabhängiger Anteil im Jahr 2020. Zweite Säule modell-unabhängiger Anteil im Jahr 2040, drei bis sechs: Varianz der Szenarien

Ein Vergleich des Energieverbrauchs der verschiedenen Szenarien innerhalb der Branche Steine und Erden, Glas ist in *Abbildung 8* dargestellt. Die Auswirkungen von Technologien zur Kohlenstoffabscheidung, die Schlüsseltechnologien zur Emissionsverringern sind, sind in allen Szenarien offensichtlich. In den Szenarien EG und KW führt der Einsatz der Aminwäsche als Kohlenstoffabscheidungstechnologie zu einem höheren Gesamtenergiebedarf, insbesondere für Wärmeenergie, im Vergleich zu den Szenarien IN und SK, die die Oxyfuel-Technologie verwenden.

Diese Maßnahmen tragen zur Verringerung der CO₂-Emissionen insbesondere in der Zementindustrie bei. Darüber hinaus ist die Substitution fossiler Energieträger durch Biomethan für Prozesswärme über 200 °C eine wichtige Maßnahme zur Verringerung der CO₂-Emissionen in dem Sektor. Diese Substitution ist in *Abbildung 8* dargestellt. In den Szenarien EG und KW wird die Verbrennung von Abfällen (alternative Brennstoffe) fortgesetzt, während er in den Szenarien IN und SK durch Biomethan ersetzt wird. Derzeit werden bei der Zementherstellung alternative Brennstoffe verwendet, die einen erheblichen Anteil an fossilen Komponenten und einen begrenzten Anteil an biogenen Stoffen enthalten. Um die mit fossilen Energieträgern verbundenen Emissionen wirksam zu verringern, müssen diese vorhandenen alternativen Abfallbrennstoffe durch erneuerbare Ressourcen ersetzt werden.

2.2 Investitionsbedarfe und Stranded Assets¹

Die in den Leistungs- und Strukturdaten der Statistik Austria erfassten Gesamtinvestitionen in der Branche Steine und Erden, Glas lagen in den Jahren 2008–2019 bei durchschnittlich ca. 404 Mio. € pro Jahr mit nahezu kontinuierlicher Zunahme ab 2014. Davon entfielen durchschnittlich 95 % auf Investitionen in Sachanlagen.

Bei Beibehalten aktueller Prozessketten und entsprechender Fortschreibung dieser Investitionszyklen würde sich damit ein Gesamtvolumen an Investitionen in Sachanlagen von ca. 3,1 Mrd. € bis 2030 bzw. ca. 6,9 Mrd. € bis 2040 ergeben. Im Vergleich dazu betragen die ermittelten Investitionskosten für die Transformation, die in erster Linie die Bereitstellung von Raumwärme betreffen, je nach Szenario, bis zu 419 Mio. € pro Jahr bzw. in Summe bis zu 3,8 Mrd. € bis 2040 (siehe *Abbildung 9*). Davon betreffen, je nach eingesetzter Technologie für die CO₂-Abscheidung, rd. 55–75 % direkte Investitionen für Equipment, der Rest bezieht sich auf indirekte Investition, wie z. B. Engineering, periphere Komponenten, oder Bautätigkeiten. Nicht enthalten sind hier Kosten für eine nachgelagerte Nutzung oder Speicherung des abgetrennten CO₂.

Aufgrund der primären Anwendung von fossilen Energieträgern in dieser Branche für die Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme (insbesondere Klinkerherstellung im Drehrohrofen bei > 1200 °C), ist hier in erster Linie von einer Substitution dieser durch erneuerbare Energieträger, wie Biomethan, Biomasse und biogene Abfälle, auszugehen. Das Risiko für Stranded Investments durch Erneuerung oder Revision bestehender Anlagen wird daher als gering angesehen, trotz insgesamt hoher durchschnittlicher Einsatzdauern entsprechender Anlagen (z. B. 70 Jahre für Drehrohrofen). Darüber hinaus resultieren etwa 60 % der Emissionen in dieser Branche aus der Umwandlung der eingesetzten mineralischen Rohstoffe. Investitionen zum Abscheiden und Verwerten dieser THG-Emissionen werden hinsichtlich Klimaneutralität der Branche als notwendig erachtet, jedoch wird nicht erwartet, dass diese mit Investitionen in den Anlagenbestand in wesentlichem Ausmaß konkurrieren und damit zu Fehlinvestitionen führen. Da die Kosten für die Abscheidetechnologien aber einen überwiegenden Teil

¹ *Stranded Assets* bezeichnen Investitionsgüter, die einen unerwartet hohen Wertverlust haben und vorzeitig abgeschrieben werden müssen

des Investitionsbedarfs in dieser Branche ausmachen, ist eine entsprechende Reduktion der Primärerzeugung durch Kreislaufwirtschaft jedenfalls auch aus dieser Perspektive anzustreben. Allerdings haben die getätigten Kostenabschätzungen auch gezeigt, dass die Wahl der Abscheidetechnologie einen signifikanten Einfluss auf

den notwendigen Investitionsbedarf hat. So sind für die Abscheidung mittels Aminwäsche, neben deutlich höherem Energiebedarf, aus aktueller Sicht die ermittelten Investitionskosten beinahe doppelt so hoch wie für den Oxyfuel-Prozess.



Abbildung 9

Notwendiger Investitionsbedarf für die Transformation (Bandbreite aus den Szenarien) in der Branche Steine & Erden, Glas

2.3 Branchenspezifische Schlüsseltechnologien

Die in den Entwicklungspfaden berücksichtigten Maßnahmen für die unterschiedlichen Nutzenergiekategorien (Anwendungsbereiche) wurden in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst und hinsichtlich folgender Kriterien verglichen:

- Emissionsreduktions-Potenzial im in der Branche,
- Investitionsbedarf bzw. Energiekosten im Vergleich zu Alternativen für den Anwendungsbereich,

- Primärenergiereduktions-Potenzial und
- Reifegrad der Maßnahme.

Aus diesen Kriterien wurde unter Berücksichtigung der Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte eine Bewertung jeder Maßnahme vorgenommen.

Anwendungsbereich	Kurzbezeichnung Maßnahme	Emissionsreduktionspotenzial in der Branche bzw. branchenübergreifend (hoch, mittel, niedrig)	Invest-Bedarf in Relationen zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Energiekosten in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Primärenergie-reduktionspotenzial in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (hoch, mittel, niedrig)	Reifegrad (vor-marktreif, marktreif, marktverfügbar, etabliert)	Klassifikation der Maßnahme (empfehlenswert, bedingt empfehlenswert, nicht empfehlenswert)
Raumwärme	Integration Wärmepumpen – Nutzung Umgebungswärme oder industrielle Abwärme (standortintern oder -übergreifend)	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert
	Direkte Wärmerückgewinnung (standortintern oder -übergreifend)	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert
	Erhalt/Ersatz aller Bestandsstruktur & Energieträgerwechsel für fossile Energieträger (erneuerbare Gase – grüner H ₂ oder erneuerbares CH ₄)	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Etabliert	Empfehlenswert
Prozesswärme <200 °C	Erhalt/Ersatz aller Bestandsstruktur & Energieträgerwechsel für fossile Energieträger (erneuerbare Gase – grüner H ₂ oder erneuerbares CH ₄)	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Etabliert	Bedingt empfehlenswert
	Erhalt Bestandsstruktur für biogenen Energieträger	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Etabliert	Bedingt empfehlenswert
	Vergasung biogener Rohstoffe und Einsatz in anderen Branchen	Niedrig	Günstig	Mittel	Niedrig	Vor-marktreif	Bedingt empfehlenswert
	Elektrifizierung bzw. Integration Hochtemperatur-Wärmepumpe	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Vor-marktreif	Empfehlenswert
	Branchen-übergreifende direkte Abwärmenutzung	Niedrig	Günstig	Günstig	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert



Anwendungsbereich	Kurzbezeichnung Maßnahme	Emissionsreduktionspotenzial in der Branche bzw. branchenübergreifend (hoch, mittel, niedrig)	Invest-Bedarf in Relationen zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Energiekosten in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (günstig, mittel, teuer)	Primärenergie-reduktionspotenzial in Relation zu Alternativen im Anwendungsbereich (hoch, mittel, niedrig)	Reifegrad (vor-marktreif, marktreif, marktverfügbar, etabliert)	Klassifikation der Maßnahme (empfehlenswert, bedingt empfehlenswert, nicht empfehlenswert)
Prozesswärme > 200 °C	Erhalt Bestandsstruktur & Energieträgerwechsel für fossile Energieträger (erneuerbare Gase – grüner H ₂ oder erneuerbares CH ₄)	Hoch	Günstig	Teuer	Niedrig	Etabliert	Empfehlenswert
	Erhalt Bestandsstruktur für feste Energieträger wie Biomasse oder Ersatzbrennstoffe	Hoch	Günstig	Mittel	Niedrig	Etabliert	Empfehlenswert
Standmotoren	Selbstfahrende Arbeitsmaschinen: Ersatz von Dieselantrieben durch BEV bzw. FCEV	Niedrig	Teuer	Mittel	Niedrig	Vor-marktreif	Empfehlenswert
Prozess-emissionen	Technologie zur Kohlenstoff-abscheidung – Aminwäsche	Hoch	Teuer	Teuer	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert
	Technologie zur Kohlenstoff-abscheidung – Oxyfuel	Hoch	Teuer	Teuer	Niedrig	Marktverfügbar	Empfehlenswert
	Ersatz von Klinker durch Ersatzmaterialien (recycelter Zement, Beton usw.)	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Vor-marktreif	Empfehlenswert

Tabelle 2
Branchenspezifische Schlüsseltechnologien
in der Branche Steine und Erden, Glas

Der folgende Abschnitt fokussiert auf die wichtigsten Technologien – die sogenannten No-regret-Technologien – die sich erheblich auf die Emissionsminderung und die Energieeffizienz in der Branche Steine und Erden, Glas auswirken. Die Hauptquelle der CO₂-Emissionen der Branche sind prozessbedingte Emissionen, die durch die chemischen Reaktionen in den Öfen verursacht werden, und der Rest sind brennstoffbedingte Emissionen. In der Branche ist die Zementherstellung von großer Bedeutung für den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen, da sie für mehr als 60% der Emissionen des Sektors verantwortlich ist. Bei der Zementherstellung ist der Prozess der Klinkerherstellung der

Hauptverursacher prozessbedingter Emissionen. Daher ist die Suche nach Möglichkeiten zur Beseitigung prozessbedingter Emissionen, die ein fester Bestandteil des Produktionsprozesses sind, eines der größten Hindernisse in diesem Sektor. Darüber hinaus ist die Branche Steine und Erden, Glas auf die Hochtemperaturwärmebereitstellung in Öfen angewiesen (siehe Abbildung 6), wobei fossile Energieträger derzeit mehr als 50% der in Öfen verwendeten Energie ausmachen (siehe Abbildung 5). Daher konzentriert sich dieser Abschnitt auf Technologien zur Verringerung der Prozessemissionen und den Übergang zu alternativen Energieträgern für Hochtemperatur-Prozesswärme.

Energieträgerwechsel für Prozesswärmebereitstellung

Kriterium	Beschreibung
Relevanz für die Branche Steine und Erden, Glas	Bei diesem Ansatz wird der Brennstoffverbrauch von fossilen Energieträgern und alternativen Abfallbrennstoffen, die einen hohen Anteil an fossilen Stoffen enthalten für Prozesswärme durch die Verbrennung erneuerbarer Energieträger wie Biomethan, Wasserstoff, biogenen Ursprungs usw. in geeigneten Feuerungsanlagen ersetzt.
Vorteile	– Nutzung bestehender Anlagen und Infrastruktur, vor allem für den Einsatz von Biomethan
Nachteile	– Hoher Bedarf an erneuerbaren Gasen – Vergleichsweise hohe Energieträgerkosten – Verbrennungstemperaturen steigen bei hohem Wasserstoffgehalt im Brennstoff, wodurch die Stickoxidemissionen ohne nachfolgende Reinigung zunehmen – Eine Umrüstung bestehender Anlagen bei der Nutzung von Wasserstoff ist notwendig
Herausforderungen	– Verfügbarkeit erneuerbarer Gase, inkl. Importkapazitäten – Einsetzbarkeit von Gas mit hohem Wasserstoff-Anteil bzw. reinem Wasserstoff – Ersatz der Brenner in Bestandsanlagen – Technische Rahmenbedingungen der Lieferinfrastruktur (Gasnetz) müssen gegeben sein
Technische Rahmenbedingungen und Umsetzung	– Technology-Readiness-Level: 9 – Bei Wasserstoffeinsatz: Abgasnachbehandlung möglicherweise erforderlich – Eine Anpassung bestehender Anlagen für die Nutzung von Wasserstoff ist notwendig

Tabelle 3

Schlüsseltechnologie Energieträgerwechsel für Prozesswärmebereitstellung: Eigenschaften der Technologie

CO₂-Abscheidung mittels Aminwäsche

Kriterium	Beschreibung
Relevanz für die Branche Steine, Erden und Glas	Bei der Aminwäsche handelt es sich um eine End-of-Pipe-Kohlenstoffabscheidungstechnologie, bei der CO ₂ nach der Verbrennung mithilfe eines Aminlösungsmittels als Absorber aus den Rauchgasen entfernt wird. Es handelt sich dabei um eine Post-Combustion-Abscheidungstechnologie, die in Bezug auf den Stand der Technik am weitesten fortgeschritten ist.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Abscheidungseffizienz (CO₂-Abscheidungsrate > 90 %) – Etablierte Technologie für End-of-Pipe Lösung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher Energiebedarf (hauptsächlich thermische Energie) für die Lösungsmittelregeneration – Abbau und Gerätekorrosion – Verlust der Sorptionskapazität über mehrere Zyklen (Lösungsmittelabbau)
Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> – Bereitstellung der erforderlichen Infrastruktur für den Transfer des abgeschiedenen CO₂ zur Speicherung oder Nutzung – Erfordert eine umfassende Rauchgasreinigung vor der Abscheidung (Rauchgasvorbehandlung mit Entfernung von SO₂, NO_x und Staubpartikeln)
Technische Rahmenbedingungen und Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> – TRL: 7 [13] – Das Aminwaschverfahren kann als Post-Combustion-Technologie zur CO₂-Abscheidung in die Zementherstellung integriert werden. – Herausforderungen sind die hohen Kapital- und Betriebskosten, der Energieverbrauch, der Lösungsmittelabbau und die Abgasemissionen, die es zu bewältigen gilt.

Tabelle 4

Schlüsseltechnologie CO₂-Abscheidung Aminwäsche:
Eigenschaften der Technologie

CO₂-Abscheidung mittels Oxyfuel

Kriterium	Beschreibung
Relevanz für die Branche Steine, Erden, Glas	Oxyfuel ist eine Pre-Combustion-Technologie zur CO ₂ -Abscheidung, bei der reiner Sauerstoff anstelle von Luft zur Verbrennung von Energieträgern verwendet wird. Bei dieser Technologie kann neben der Verbesserung der Energieträgereffizienz auch eine hohe CO ₂ -Abscheidungseffizienz aufgrund des erhöhten CO ₂ -Partialdrucks erreicht werden.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Abscheidungseffizienz (CO₂-Abscheidungsrate > 90 %) – Geringerer (bei partiellem Oxyfuel-Einsatz)/kein (bei vollständigem Oxyfuel-Einsatz) zusätzlicher Wärmebedarf. – Reduzierter Stickstoffgehalt im Rauchgas – Steigerung der Ofenkapazität und -effizienz
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Erhöhter Energieverbrauch aufgrund der CO₂-Reinigungseinheit sowie der Luftzerlegungseinheit (die hochreinen Sauerstoff (95 %) liefert), – Komplexe Nachrüstungen im Kernprozess – Erhöhte Konstruktions- und Wartungsanforderungen; Änderungen im Anlagenbetrieb, insbesondere im Ofen und Kühler.
Herausforderungen	<ul style="list-style-type: none"> – Bereitstellung der erforderlichen Infrastruktur für den Transfer des abgeschiedenen CO₂ zur Speicherung oder Nutzung – Bedarf an zusätzlichen Komponenten (z. B. Luftzerlegungsanlage oder Import aus einer Elektrolyseanlage) – Die Integration dieser Technologie in bestehende Anlagen ist relativ komplex, da sie stark in den Produktionsprozess integriert ist – Neue Vorwärmer und Vorkalzinerer erforderlich (bei der Zementherstellung). – Die Steuerung der Sauerstoffkonzentration ist notwendig, um übermäßige Schäden am Zementofen zu vermeiden und die NO_x-Emissionen aufgrund der zunehmenden thermischen NO_x-Bildung zu kontrollieren.
Technische Rahmenbedingungen und Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> – Aktueller Entwicklungsstand: TRL 6 [13] – Das Oxyfuel-Verfahren ist eine vielversprechende Technologie zur Verringerung der CO₂-Emissionen in der Zementindustrie. – Es kann in die bestehende Infrastruktur des Zementwerks integriert werden, erfordert jedoch im Vergleich zur Aminwäsche erhebliche Änderungen am Verbrennungsprozess des Zementwerks, einschließlich der Hinzufügung einer Luftzerlegungsanlage und Änderungen an Brenner und Brennkammer. – Aufgrund einiger Einschränkungen, wie den hohen Kapitalkosten für die Sauerstoffherzeugung und der Notwendigkeit einer groß angelegten CO₂-Speicher- und Transportstrategie, sind weitere Analysen erforderlich, um die Technologie zu optimieren und ihre Kosten vor einem groß angelegten Einsatz zu senken. – Neue Oxyfuel-Brennerkonzepte können den Einsatz von bis zu 100 % Biomasse und anderer alternativer Energieträger ermöglichen. Dies befindet sich jedoch noch in der Entwicklungsphase. [14]

Tabelle 5

Schlüsseltechnologie CO₂-Abscheidung Oxyfuel:

Eigenschaften der Technologie

2.4 Handlungsempfehlungen

Zusätzlich zu den allgemeinen Handlungsempfehlungen für die gesamte Industrie können für diese Branche folgende spezifische Empfehlungen formuliert werden:

Handlungsfeld	Empfehlungen
Förderung von F&E	<ul style="list-style-type: none"> – Forschungsinfrastruktur und F&E-Bedarf von TRL 6 bis zur Skalierungen bei CO₂ Abscheidung durch Aminwäsche und Oxyfuel – Förderung anwendungsorientierter Entwicklung vor allem in Bezug auf die Integration neuer Technologie in bestehende Anlagen
Anreize und Förderungen von Investitionen	<ul style="list-style-type: none"> – Politikmaßnahmen zur Investitionssicherheit für Low-Carbon Zementproduktion durch CAPEX (Zuschüsse) und OPEX-Förderungen
Energieinfrastrukturen und Energiebereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> – Etablieren bzw. Anpassen von Lieferinfrastrukturen und von Infrastrukturen für branchenübergreifende Abwärmenutzung – Bei Wasserstoff sind bestehender Anlagen anzupassen
Bereitstellung von Material und Rohstoffen	<ul style="list-style-type: none"> – Umstellung von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energieträger wie Biomasse, Biomethan und Wasserstoff: Die Herausforderung besteht in der Verfügbarkeit einer ausreichenden Menge an erneuerbaren Energiequellen
Auf- und Ausbau von Infrastrukturen	<ul style="list-style-type: none"> – Politikmaßnahmen zur Schaffung von Infrastrukturen als Bedingung für zirkuläre und Net-zero Produktion von Zement – Für Teile der Branche Steine, Erden und Glas ist CCS und CCU eine wichtige Strategie, folglich ist der Aufbau entsprechender Infrastruktur durch die öffentliche Hand zu unterstützen
Kooperation und Vernetzung	<ul style="list-style-type: none"> – Die Zementindustrie muss eine aktive Rolle bei der Förderung und Entwicklung CO₂-ärmerer Produkte und Prozesse spielen, um sicherzustellen, dass Zement bzw. Beton-Produkte nur dann eingesetzt werden, wenn sie benötigt werden
Gesetzliche Rahmenbedingungen, Standards und Normen	<ul style="list-style-type: none"> – Klärung der gesetzlichen Einordnung von CO₂, als Abfall, Rohstoff etc.; Regulierung bzgl. CO₂ Emissionen als Grundlagen für Business Cases (z. B. Transport oder Speicherung), oder Vorwärtsintegration („Chemieunternehmen“)
Öffentliche Beschaffung und Nachfrage	<ul style="list-style-type: none"> – Politikmaßnahmen zur Nachfragestimulation für Low-Carbon Beton
Aus- und Weiterbildung sowie gesellschaftlicher Wandel	<ul style="list-style-type: none"> – Öffentlicher und wissenschaftlich begleiteter Diskurs zur gesellschaftlichen Akzeptanz von CCS/CCU als Voraussetzung – Monitoring der CO₂ Emissionen von Beton und klare Kommunikation der Fortschritte und Leistung aller Stakeholder²

Tabelle 6
Handlungsempfehlungen

² Siehe auch: GCCA, GCCA Concrete Future Action & Progress 2050 Net Zero Roadmap. Global Cement and Concrete Association (2022)
gccassociation.org/wp-content/uploads/2022/10/7286_GCCA_RoadmapOneYearOn_Artwork_Screen_v3_1r.pdf

Literaturverzeichnis

- [1] Statistik Austria, Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, Stat. Austria, Produktionsindex 2020. (2020). www.statistik.at/statistiken/volkswirtschaft-und-oeffentliche-finanzen/volkswirtschaftliche-gesamtrechnungen.
- [2] Statistik Austria, Energiegesamtrechnung, Stat. Austria, Nutzenergieanalyse 2020. (2019). www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energiegesamtrechnung.
- [3] V. a.A.I. of T. Alton, P.M.L. Binderbauer, R.M.L. Cvetkovska, G.A.A.I. of T. Drexler-Schmid, B.A.A.I. of T. Gahleitner, R.A.A.I. of T. Geyer, A.A.A.I. of T. Hainoun, P.M.L. Nagovnak, T.M.L. Kienberger, M.M.L. Rahnama-Mobarakeh, C.A.A.I. of T. Schützenhofer, S.A.A.I. of T. Stortecy, NEFI PATHWAY TO INDUSTRIAL DECARBONISATION SCENARIOS FOR THE DEVELOPMENT OF THE INDUSTRIAL SECTOR IN AUSTRIA, 2022.
- [4] R. Chan, Yeen; Kantamaneni, Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry and on, (2015).
- [5] Eurostat, NACE Rev. 2 – Statistical classification of economic activities in the European Community, 2008.
- [6] Statistics Austria, Energiebilanzen für Österreich: Gesamtenergiebilanz Österreich 1970 bis 2019, (2021). www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html (accessed January 20, 2021).
- [7] EEA, Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 2019 and Inventory Report, 2019.
- [8] Eurostat, Energy Balances 2020, 2021.
- [9] Statistics Austria, Nutzenergieanalyse, Nutzenergiekategorien Österreich 1993 bis 2020 (Detailinformation), (2021). www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html.
- [10] E.C.R.A. and C.S. Initiative, Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead, Revision 2017: CSI/ECRA Technology papers 2017, Geneva, 2017. www.wbcdcement.org/technology.
- [11] A. Moya, José Antonio; Pardo, Nicolas; Mercier, Energy Efficiency and CO₂ Emissions: Prospective scenarios for the cement industry, 2010.
- [12] G. Mauschitz, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie III, (2021). www.zement.at/downloads/downloads_2021/Emissionen_2020.pdf.
- [13] IEA, ETP Clean Energy Technology Guide, Paris, 2022. www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide.
- [14] IEA, Deployment of bio-CCS in the cement sector: an overview of technology options and policy tools, 2021.
- [15] GCCA, GCCA Concrete Future Action & Progress 2050 Net Zero Roadmap. Global Cement and Concrete Association (2022) gccassociation.org/wp-content/uploads/2022/10/7286_GCCA_RoadmapOneYearOn_Artwork_Screen_v3_lr.pdf

Kontaktdaten

Projektleiter

Christian Schützenhofer

Center for Energy

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 6, 1210 Vienna

christian.schuetzenhofer@ait.ac.at

Herausgeber

Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung

Leopold-Ungar-Platz 2/Stiege 1/Top 142, 1190 Wien

Tel: (+43 1) 585 03 90

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

AutorInnen

Christian Schützenhofer, Verena Alton, Bernhard Gahleitner,

Sophie Knöttner, Klaus Kubezcko, Karl-Heinz Leitner

AIT Austrian Institute Of Technology

Martin Baumann, Christoph Dolna-Gruber, Bernhard Felber, Andreas Indinger

Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency (AEA)

Thomas Kienberger, Maedeh Rahnama Mobarakeh, Peter Nagovnak

Lehrstuhl für Energieverbundtechnik/Montanuniversität Leoben (EVT)

Hans Böhm, Sebastian Goers, Simon Moser, Mario Reisinger

Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz (EI-JKU)

Mitwirkende

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien

Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien

Für den Inhalt verantwortlich

Die AutorInnen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Studie.

Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch das Bundesministerium für Klimaschutz,

Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) sind für die

Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung

www.angieneering.net

Titelfoto

Matt Reames


Herstellungsort: Wien

Wir haben diese Broschüre mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt und die Daten überprüft.

Rundungs-, Satz- oder Druckfehler können wir dennoch nicht ausschließen.

www.klimafonds.gv.at



 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie