




Bundesministerium  
für Arbeit und Soziales



Faten Saleh, Kerstin Goluchowicz, Marc Bovenschulte

---

# Die Auswirkungen von Digitalisierung und Dekarbonisierung auf Arbeitsinhalte und Arbeitsqualität



Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales im Rahmen des Vorhabens „Strategische Vorausschau – Digitale Arbeitsgesellschaft“. Mit thematisch fokussierten Tiefenuntersuchungen werden regelmäßig Trends und damit einhergehende Aspekte von Arbeit und Gesellschaft im Kontext der Digitalisierung in ausgewählten Technologie-, Anwendungs- und Politikfeldern analysiert, um das BMAS in einer langfristigen nachhaltigen Strategieentwicklung zu den arbeits-, gesellschafts-, ordnungs- und sozialpolitischen Herausforderungen zu unterstützen. Die Konzeptionsphase für die jeweiligen Tiefenuntersuchungen wird durch das BMAS daher eng begleitet. Die Durchführung der Untersuchungen sowie die Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen sind von den Auftragnehmern in eigener wissenschaftlicher Verantwortung vorgenommen worden. Das Bundesministerium für Arbeit und Soziales übernimmt insbesondere keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Untersuchungen.



INSTITUT FÜR  
INNOVATION UND  
TECHNIK



# Kurzbeschreibung

Der Klimawandel erfordert eine umfassende Umstellung der heutigen Wirtschaftsweise auf eine defossilierte Wertschöpfung. Der Digitalisierung kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Eine Umsetzung der Dekarbonisierung durch intelligente Nutzungskonzepte anstatt einschneidender Verzichts- und Verbotsmechanismen ist nur mit Digitalisierung und Künstlicher Intelligenz umsetzbar. Beide Transformationsprozesse - Dekarbonisierung und Digitalisierung - werden daher in ihrem Wechselspiel untersucht. Welche Auswirkungen haben die Dekarbonisierung von Industrie, Mobilität und Energieversorgung und der fortschreitende digitale Wandel auf verschiedene Aspekte der Qualität der Arbeit? Um diese Frage zu beantworten, untersucht die Studie die Sektoren Bioökonomie, Kreislaufwirtschaft/Recycling und Erneuerbare Energie als die drei wesentlichen Elemente der Dekarbonisierung und die Automobilwirtschaft, die Bauindustrie und die Chemie- und Kunststoffindustrie als ausgewählte Fallbeispiele, um mögliche Auswirkungen auf Wertschöpfung, Beschäftigung, Anforderungsprofile, Arbeitszeiten oder auch Frauen in Führungspositionen zu beleuchten.

Die Studie untersucht mit einem explorativen und qualitativen Ansatz die Veränderungen, die sich durch Digitalisierung und Dekarbonisierung auf betrieblicher und überbetrieblicher Ebene ergeben. Grundlage sind Expert\*innengesprächen, Auswertungen von Fachpublikationen und Algorithmus-basierte Analysen von Datenbanken z.B. zu bestehenden Weiterbildungsangeboten.

Im Ergebnis wird deutlich, dass Qualifizierung für das Gelingen des bevorstehenden Transformationsprozesses im Zusammenspiel von Dekarbonisierung und Digitalisierung von zentraler Bedeutung ist. Umgekehrt kann Fachkräftemangel die Dekarbonisierung der Wirtschaft ausbremsen und so das 2-Grad-Ziel gefährden. So sehen die Autor\*innen eine Erweiterung des bestehenden Skill-Sets der Beschäftigten um dezidierte Nachhaltigkeitsfähigkeiten („Dekarbonisierungs-Literacy“) als unverzichtbar an. Chancen könnten sich dabei zum einen im Hinblick auf eine mögliche Aufwertung der Basisarbeit durch neue Tätigkeitsfelder im mittleren Qualifikationssegment ergeben. Gleichzeitig könnten neue Chancen auf verantwortungsvolle Positionen und Führungsrollen insbesondere für Frauen entstehen.

Da dieser Deep Dive Anfang Februar 2022 fertiggestellt wurde, berücksichtigt er nicht die jüngsten Entwicklungen des Ukraine-Krieges und seine Auswirkungen beispielsweise auf die Energieversorgung in Deutschland. Tatsächlich darf aber davon ausgegangen werden, dass die hier beschriebenen Entwicklungen in ihrer grundlegenden Tendenz durch die „Zeitenwende“ nicht gebrochen werden. Ganz im Gegenteil: Alternative Zukünfte wie „diskontinuierliche Produktionsprozesse“ dürften angesichts abermals wachsender Unsicherheiten an Wahrscheinlichkeit und Bedeutung gewinnen.

## Abstract

Climate change calls for a comprehensive conversion of the current economic system to fossil-free value creation – a process in which digitalisation has a key role to play. Only through the use of digitalisation including Artificial Intelligence will it be possible to implement decarbonisation through intelligent utilisation concepts, rather than drastic mechanisms for abstention or prohibition. Therefore, this study examines the interrelationship between these two transformation processes – decarbonisation and digitalisation. What effects are the decarbonisation of industry, mobility, and energy provision, and the ongoing digital transformation, having on various aspects of the quality of work? To answer this question, the study examines three essential elements of decarbonisation, namely the bioeconomy, circular economy/recycling, and renewable energy sectors, plus selected case studies – the automotive, construction and chemicals and plastics industries – so as to highlight the potential effects on value creation, employment, job profiles, working hours or women occupying leadership positions.

Taking an exploratory and qualitative approach, the study looks at the changes that are emerging at a company and inter-company level as a result of digitalisation and decarbonisation. It is based on expert discussions, evaluations of specialist publications and algorithm-based analyses of data relating to such matters as currently available opportunities for advanced training.

The outcome clearly shows that qualification is vitally important if the imminent transformation process is to succeed in terms of the interaction between decarbonisation and digitalisation. If on the other hand trained specialists are in short supply, this can impede the decarbonisation of the economy, thereby placing the 2-degree target at risk. The authors therefore consider it essential that the existing skill sets of employees be broadened to include competencies oriented firmly towards sustainability ("decarbonisation literacy"). Opportunities might emerge here in the medium qualification segment – partly because of the potential upgrading of the basic work through the addition of new areas of activity. At the same time, fresh opportunities might arise for positions of responsibility and leadership roles, especially for women.

Because this deep dive was completed in early February 2022 it does not take into account more recent developments: the war in Ukraine and its impact on – for example – energy provision in Germany. In point of fact, however, it may be assumed that the underlying tendency of the developments described here will not be changed by this historical watershed. Quite the reverse: with uncertainties on the rise once again, forward-looking alternative approaches such as "discontinuous production processes" may well become more probable and more important.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzbeschreibung</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>10</b>
<b>1. Hintergrund</b>	<b>12</b>
<b>2. Methodisches Vorgehen</b>	<b>17</b>
<b>3. Cleantech-Sektoren und ihre Einordnung in nationale und europäische Strategien im Kontext der Dekarbonisierung</b>	<b>20</b>
3.1 Bioökonomie	20
3.2 Kreislaufwirtschaft und Recycling	22
3.3 Erneuerbare Energien	26
<b>4. Exploration</b>	<b>26</b>
4.1 Grüner Wasserstoff im Kontext erneuerbarer Energien	26
4.2 Nachhaltige, erdölreduzierte Chemie- und Kunststoffindustrie	33
4.3 Nachhaltige Automobilindustrie	40
4.3.1 Nachhaltige Antriebstechnologien in der Automobilindustrie	44
4.3.2 Nachhaltige Produktion und Wertschöpfung in der Automobilindustrie	47
4.4 Nachhaltige Bauindustrie	51
<b>5. Datenanalyse von Aus- und Weiterbildungsangeboten</b>	<b>57</b>
<b>6. Zukünftige Fähigkeiten und Möglichkeiten</b>	<b>75</b>
6.1 Dekarbonisierungsfähigkeiten	75
6.2 Beschäftigungsperspektiven für Frauen	77
<b>7. Zusammenfassende Reflexion und Ausblick</b>	<b>80</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>84</b>

# Tabellenverzeichnis

**Tabelle 1:**

Übersicht der identifizierten Ausbildungsberufe. ————— **64**

**Tabelle 2:**

Übersicht der identifizierten Weiterbildungsberufe. ————— **65**

**Tabelle 3:**

Exemplarische Übersicht der identifizierten Studiengänge für Berlin und Nürtingen). ————— **67**

**Tabelle 4:**

Vergleich der von deutschen und niederländischen Institutionen  
angebotenen MOOCs mit Nachhaltigkeitsschwerpunkt. ————— **72**

**Tabelle 5:**

Klassifizierung von Dekarbonisierungsfähigkeiten in Anlehnung  
an die OECD-Systematisierung digitaler Fähigkeiten. ————— **76**

# Abbildungsverzeichnis

## **Abbildung 1:**

Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Zielfestlegungen für die Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetzes. ————— **13**

## **Abbildung 2:**

Wertschöpfungskette der Kohleverstromung inklusive Koppelprodukten. ————— **14**

## **Abbildung 3:**

Zukünftige Anknüpfungspunkte für die Akteure der Braunkohlewirtschaft im Mitteldeutschen Revier. — **15**

## **Abbildung 4:**

Darstellung der in dieser Studie betrachteten Wertschöpfungszusammenhänge und Stoffströme. ————— **18**

## **Abbildung 5:**

Systemdiagramm der Kreislaufwirtschaft für regenerative und endliche Stoffe. ————— **23**

## **Abbildung 6:**

Job-Cluster im Bereich Erneuerbare Energien auf Basis einer exemplarischen Analyse von Stellenausschreibungen/Tätigkeitsprofilen. ————— **27**

## **Abbildung 7:**

Zwei exemplarische Stellenausschreibungen eines Unternehmens, das im Bereich Antriebs- und Energietechnik tätig ist. ————— **30**

## **Abbildung 8:**

Schema für ein „Internet des Wasserstoffs“ zur Systemintegration einer vernetzten Wasserstoffökonomie. — **34**

## **Abbildung 9:**

Schematische Darstellung der Stoffströme für die chemische Industrie als Ersatz für Erdöl und andere fossile Quellen. ————— **36**

**Abbildung 10:**

Anzahl der Beschäftigten in der Automobilindustrie in Deutschland von 2010 bis 2020. ————— **41**

**Abbildung 11:**

Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis 2021. ————— **42**

**Abbildung 12:**

Erwartete Marktdurchdringung aktueller Trends in der Automobilbranche im Jahr 2030. ————— **44**

**Abbildung 13:**

Vergleich der Arbeitszeit pro Auto für Verbrennungsmotor bzw. Elektroantrieb. ————— **46**

**Abbildung 14:**

Geschlossener Kreislauf für das Batterierecycling. ————— **49**

**Abbildung 15:**

Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen Kreislaufwirtschaft und grüner Produktion. — **50**

**Abbildung 16:**

Beschäftigtenstruktur im Bauhauptgewerbe. ————— **52**

**Abbildung 17:**

Fachkräftemangel als größtes Risiko der Bauunternehmen. ————— **53**

**Abbildung 18:**

Wertschöpfung über den Lebenszyklus von Bauwerken. ————— **54**

**Abbildung 19:**

Prozessdarstellung der Analyse der Weiterbildungsangebote. ————— **59**

**Abbildung 20:**

Ko-Häufigkeiten wissenschaftlicher Publikationen zu den Schwerpunkten Kreislaufwirtschaft bzw. Bioökonomie im Kontext Qualität der Arbeit, Arbeitsbedingungen und/oder Skills-Entwicklung. ————— **60**



**Abbildung 21:**

Ko-Häufigkeiten wissenschaftlicher Publikationen im Kontext Green Jobs. ————— **61**

**Abbildung 22:**

Regionale Verteilung wissenschaftlicher Publikationen zu den Schwerpunkten  
Kreislaufwirtschaft bzw. Bioökonomie im Kontext Qualität der Arbeit und Green Jobs. ————— **62**

**Abbildung 23:**

Digitalisierungsinhalte der Aus- und Weiterbildungsangebote nach Stichworten. ————— **63**

**Abbildung 24:**

Text-Mining-Analyse der Studieninhalte. ————— **69**

**Abbildung 25:**

Räumliche Verteilung der Studienangebote. ————— **70**

**Abbildung 26:**

Räumliche Verteilung der identifizierten MOOCs mit Nachhaltigkeitsschwerpunkt. ————— **71**

**Abbildung 27:**

Zuordnung der angebotenen MOOCs zu vorgegebenen fachlichen Schwerpunkten (Subjects). ————— **74**

**Abbildung 28:**

Modulplan des Bachelor-Studiengangs „Nachhaltige Ingenieurwissenschaft“  
der Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau. ————— **79**

# Abkürzungsverzeichnis

<b>BImSchV</b>	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
<b>BIM</b>	Building Information Modeling (Bau- und Gebäudedatenmodellierung)
<b>BIP</b>	Bruttoinlandsprodukt
<b>BMAS</b>	Bundesministerium für Arbeit und Soziales
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<b>BMWi</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (bis Dezember 2021)
<b>BMWK</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (seit Januar 2022)
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>EF</b>	Environmental Footprint (ökologischer Fußabdruck)
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>FuE</b>	Forschung und Entwicklung
<b>GFK</b>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<b>GW(h)</b>	Gigawatt(stunden)
<b>H<sub>2</sub></b>	Wasserstoff
<b>ha</b>	Hektar
<b>IPCEI</b>	Important Projects of Common European Interest (wichtige Projekte von gemeinsamem europäischem Interesse)
<b>IRENA</b>	International Renewable Energy Agency (Internationale Erneuerbare-Energien-Agentur)
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>KOM</b>	Europäische Kommission
<b>KMU</b>	Kleine und mittelständische Unternehmen
<b>KPI</b>	Key Performance Indicators (Schlüsselindikatoren für Leistungen)
<b>KrWG</b>	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz)
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung)
<b>LCC</b>	Life Cycle Costing (Lebenszykluskostenrechnung)
<b>Mio.</b>	Million
<b>Mrd.</b>	Milliarde
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer (Originalgerätehersteller; in der Automobilindustrie synonym für Fahrzeughersteller)

<b>p. a.</b>	per annum (pro Jahr)
<b>PBS</b>	Polybutylensuccinat
<b>PEM</b>	Polymerelektrolyt-Membran
<b>PHA</b>	Polyhydroxyalkanoate
<b>PLA</b>	Polymilchsäure
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>REA</b>	Rauchgasentschweflung
<b>t</b>	(metrische) Tonne
<b>Tsd.</b>	Tausend
<b>TW(h)</b>	Terawatt(stunden)
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt

# 1. Hintergrund

Angesichts des fortschreitenden digitalen Wandels und der für die nächsten Jahren absehbaren beschleunigten Dekarbonisierung von Industrie, Mobilität und Energieversorgung stellt sich die Frage nach den kurz-, mittel- und langfristig zu erwartenden Auswirkungen auf die Quantität und Qualität von „grünen Jobs“<sup>1</sup> und „grüneren Jobs“: Welche Anforderungsprofile resultieren aus den Transformationsprozessen der Dekarbonisierung, den sich ändernden Technologien, Prozessen (inklusive Stoffströmen) und Produkten sowie den korrespondierenden Wertschöpfungs- und Geschäftsmodellen? Wie verändert sich dabei die Arbeitsorganisation, welche Inhalte und Fähigkeiten nehmen an Bedeutung zu, welche ggf. ab? Bietet die Dekarbonisierung besondere Arbeitsmarktchancen für Frauen? Eine Umsetzung der Dekarbonisierung, die vorrangig auf intelligenten Nutzungskonzepten und nicht auf einschneidenden Verzichts- und Verbotsmechanismen beruhen soll, scheint ohne Digitalisierung und Künstliche Intelligenz nicht umsetzbar. Somit dürfte der Digitalisierung eine Schlüsselrolle für eine gelingende Dekarbonisierung zukommen – (unter anderem durch nachhaltige Technologieentwicklungen und die optimierte Steuerung komplexer Systeme –, sodass beide Transformationsprozesse in ihrem Wechselspiel in dieser Studie berücksichtigt werden.

Das Konzept des ökologisch induzierten Strukturwandels wird spätestens nach Maßgabe der Pariser Klimaziele universell. Waren seit Beginn der industriellen Revolution vor allem einzelne Industrien wie Kohle und Stahl und Regionen wie das Ruhrgebiet von solchen Umwälzungsprozessen betroffen, die meist zu tiefen Einschnitten oder sogar zum Niedergang geführt haben, erfasst die Notwendigkeit zur CO<sub>2</sub>-Minderung heute alle Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft. Ausdruck findet diese Entwicklung im Umstand, dass mit den jährlichen Minderungszielen klare Zielpfade zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in 6 Sektoren festgeschrieben wurden (Sektorenziele – siehe Abbildung 1). Die aktuelle Festlegung erfolgte nach einem Urteil des Bundesverfassungsgerichtes gemäß erster Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 18.08.2021, und es ist nicht ausgeschlossen, dass

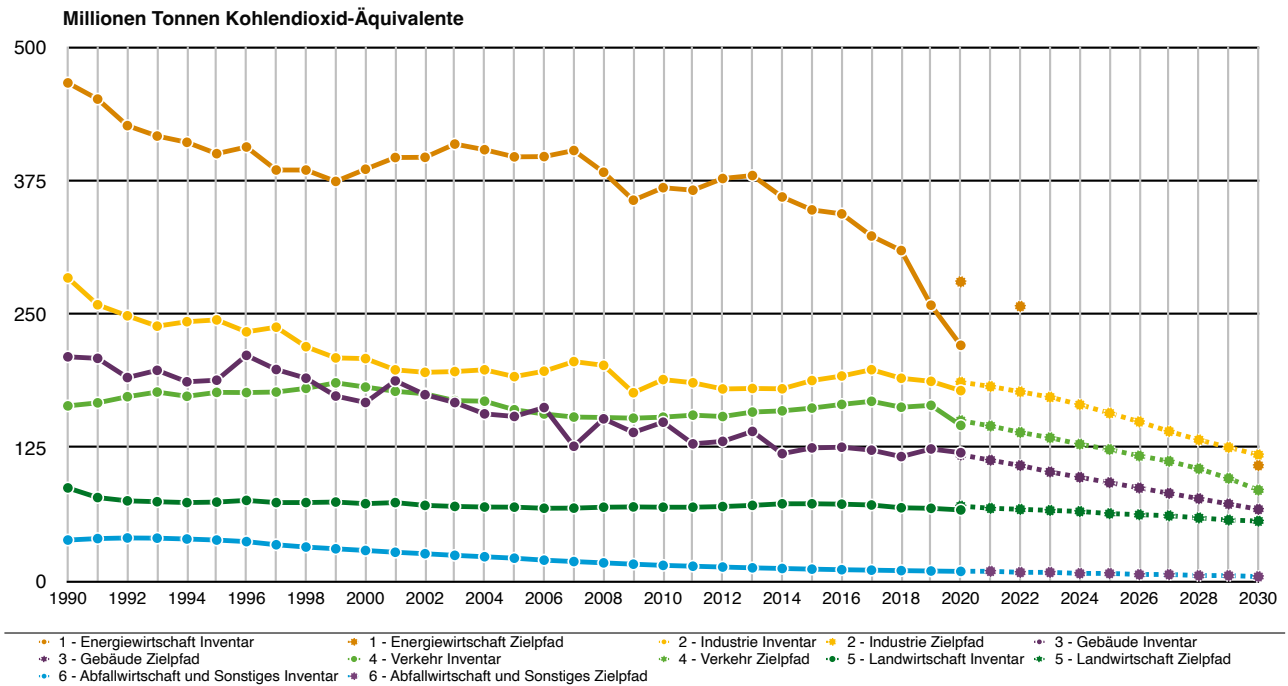
die Ziele infolge der zunehmenden Erderwärmung in Zukunft noch ambitionierter werden (müssen).

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, ist die Energiewirtschaft aufgrund des Einsatzes fossiler Brennstoffe wie Kohle, Öl und Gas der größte CO<sub>2</sub>-Emittent in Deutschland, und auch weltweit trägt die Erzeugung von Strom und Wärme aktuell mit rund 42 % zu den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. In der Abschlusserklärung der COP26 im November 2021 in Glasgow heißt es entsprechend: „[...] fordert die Vertragsparteien auf, die Entwicklung, den Einsatz und die Verbreitung von Technologien sowie die Verabschiedung politischer Maßnahmen zu beschleunigen, um den Übergang zu emissionsarmen Energiesystemen zu vollziehen, unter anderem durch die rasche Ausweitung des Einsatzes sauberer Stromerzeugungs- und Energieeffizienzmaßnahmen, einschließlich der Beschleunigung der Bemühungen um einen schrittweisen Ausstieg aus der unverminderten Kohleverstromung und aus ineffizienten Subventionen für fossile Brennstoffe, wobei die Notwendigkeit der Unterstützung eines gerechten Übergangs anerkannt wird.“<sup>2</sup>

1 Siehe dazu die Definition auf der Website der International Labour Organization (ILO) unter [https://www.ilo.org/global/topics/green-jobs/news/WCMS\\_220248/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/global/topics/green-jobs/news/WCMS_220248/lang--en/index.htm) (zuletzt geprüft: 15.11.2021).

2 Übersetzung durch die Autor\*innen. Im Original des „Glasgow Climate Pact“ (Advance Version vom 13. November 2021) heißt es dazu auf Seite 4 zu Punkt 36: „Calls upon Parties to accelerate the development, deployment and dissemination of technologies, and the adoption of policies, to transition towards low-emission energy systems, including by rapidly scaling up the deployment of clean power generation and energy efficiency measures, including accelerating efforts towards the phase-out of unabated coal power and inefficient fossil fuel subsidies, recognizing the need for support towards a just transition.“ – online unter [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021\\_L16\\_adv.pdf?download](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_L16_adv.pdf?download)

**Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Zielfestlegungen für die Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Die Daten für das Jahr 2020 basieren auf der Vorjahresschätzung. Die hohen Emissionsrückgänge gegenüber dem Jahr 2019 sind zu einem Drittel auf die Folgen der Bekämpfung der Coronapandemie zurückzuführen (Quelle: Umweltbundesamt 2021).**



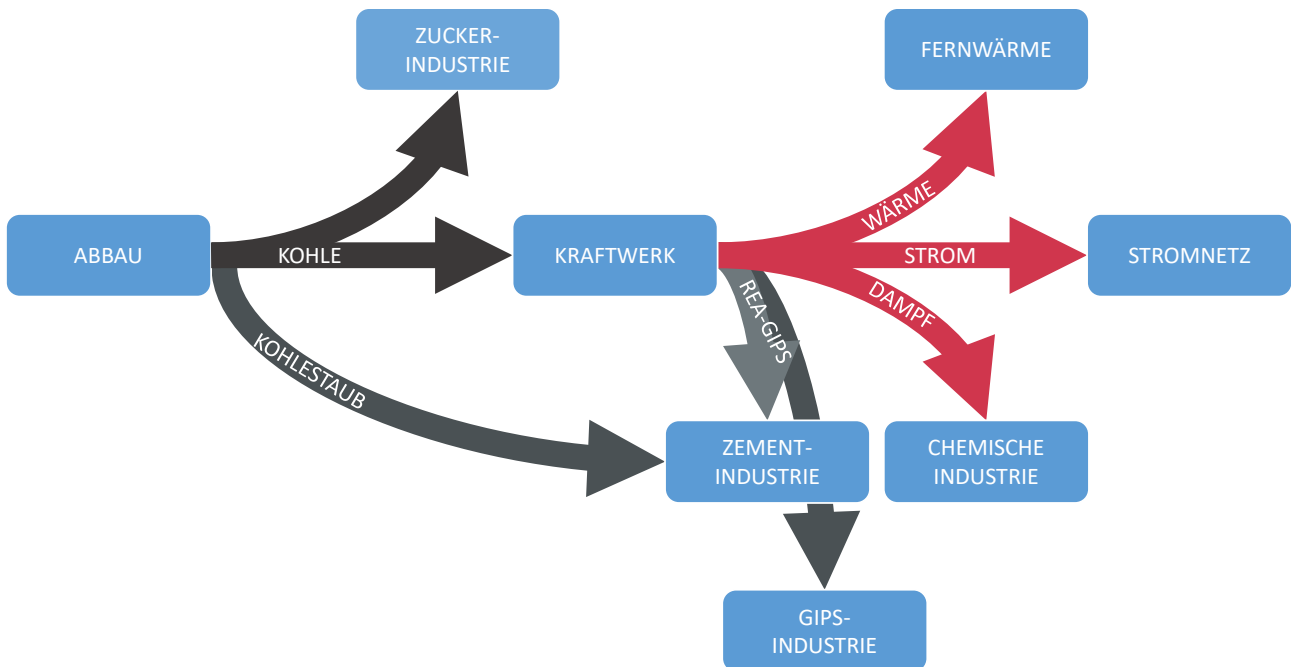
\* Die Aufteilung der Emissionen weicht von der UN-Berichterstattung ab, die Gesamtemissionen sind identisch.

Quelle EM-Daten 1990–2019: Umweltbundesamt, Deutsches Treibhausgasinventar 1990–2019, Endstand vom 15.04.2021  
 Quelle Vorjahresschätzung (VJS) für das Jahr 2020: Umweltbundesamt, Presse-Information 07/2021, vom 15.03.2021  
 Quelle Ziele 2020 & 2030: Novelle des Bundes-KSG vom 12.05.2021

In der Praxis sind mit fossilen Brennstoffen betriebene Kraftwerke oftmals multifunktionale Dienstleister, die neben Elektrizität und (Fern- und Prozess-)Wärme auch Koppelprodukte wie Prozessdampf oder im Falle von Kohlekraftwerken ebenso Gips aus der Rauchgasentschwefelung (REA-Gips) bereitstellen (Abbildung 2). Dabei werden nicht unerhebliche Mengen erzeugt: Etwa die Hälfte der rund 10 Millionen Tonnen Gips, die in Deutschland jährlich verarbeitet werden, sind REA-Gips, die andere Hälfte stammt im Wesentlichen aus Naturgipsvorkommen; Recyclinggips spielt gegenwärtig (Stichwort „Kreislaufwirtschaft“) eine nachgeordnete Rolle in Deutschland. Ebenso wird aus einigen Kraftwerken Prozessdampf entnommen. So koppelt beispielsweise das Braunkohlekraftwerk Schkopau im Mitteldeutschen Revier pro Stunde rund 200 Tonnen hochenergetischen Dampf (18 Bar, 253 °C) für den „Steamcracker“ der petrochemischen Industrie aus (Brandt et al., 2021). Derartige Dampfmen gen sind sowohl technisch als auch wirtschaftlich kaum anders als mit fossilen Brennstoffen zu erzeugen, wenngleich beispielsweise der weltgrößte Chemiekonzern BASF an

der Entwicklung elektrischer Dampferzeuger arbeitet (Stark, 2021). Ebenso werden etwa durch das DLR-Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse in Zittau Hoch- und Höchsttemperatur-Wärmepumpen pilotiert, die Temperaturen über 250 °C erreichen sollen (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. [DLR], 2021). Wie im weiteren Verlauf der Studie gezeigt wird, existieren darüber hinaus mit biobasierten Kunststoffen und Materialien natürlichen Ursprungs Pfade in der chemischen und Kunststoffindustrie, die den Einsatz von Erdöl als stoffliche Basis reduzieren bzw. substituieren – und somit auch den Bedarf an Dampf (siehe oben).

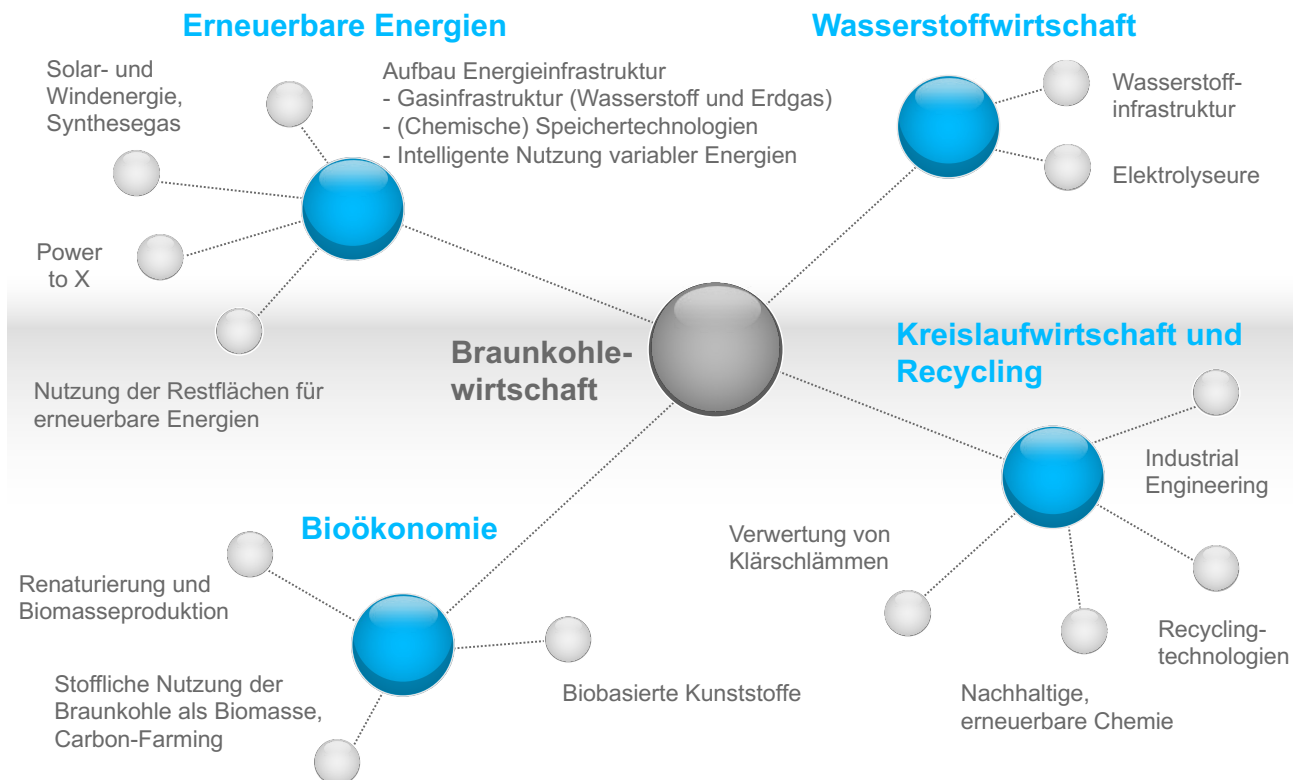
**Abbildung 2: Wertschöpfungskette der Kohleverstromung inklusive Koppelprodukten (Quelle: Brandt et al. 2021, modifiziert). Verschiedene Industrien, wie die Zuckerherstellung oder auch die Zementindustrie, verfügen über eigene Kraftwerke bzw. Feuerungen, die ebenfalls vom Ausstieg aus der Kohleverstromung betroffen sind und alternative Quellen erschließen müssen.**



Mit dem Beschluss, bis spätestens zum Jahr 2038 aus der Braunkohleverstromung in Deutschland auszuweisen, ist nicht nur die Stilllegung der Kraftwerke verbunden, sondern auch eine Umstrukturierung der sich darum gruppierenden Wertschöpfung und Beschäftigung nötig. Dabei ist zu erwarten, dass die Akteure der Braunkohlewirtschaft im Sinne einer „related variety“ (Frenken et al., 2007) Perspektiven in verwandten Geschäftsfeldern suchen – erneuerbare Energien anstelle von fossilen Energien – oder bei einem Niedergang der Braunkohleunternehmen deren Beschäftigte in benachbarten Industrien wie der Chemie Arbeit finden. Auch wenn die „related variety“ somit für eine Pfadenerneuerung und nicht für eine (disruptive) Pfadkreation steht, erfordert der Übergang nicht nur eine Wandlung und Anpassung des Geschäftsmodells, sondern auch der Fähigkeiten und Fertigkeiten der Beschäftigten (Brandt et al., 2021). Für die Akteure der Braunkohlewirtschaft im Mitteldeutschen Revier wurden in diesem Sinne vier zentrale Anknüpfungspunkte für eine Dekarbonisierungstransformation und damit Schwerpunkte zukünftiger Qualifizierungsmaßnahmen (Re- und Upskilling) identifiziert (Abbildung 3). Dabei wird darauf Wert gelegt, dass es sich um realistische Pfade für die Übergänge in andere Sektoren handelt, die den Fähigkeiten, Erfahrungen und auch Ansprüchen der

in der Braunkohle Beschäftigten Rechnung tragen, da es sich zum weit überwiegenden Teil um gut bezahlte Industriearbeitsplätze handelt. Daher bietet sich nicht nur mit Blick auf die Bezahlung der Einsatz in anderen Industrien wie der chemischen Industrie, den erneuerbaren Energien oder der Elektromobilität an; die Perspektive, dass aus Bergleuten Pflegekräfte werden, wird sich voraussichtlich nur in Einzelfällen als tragfähig erweisen (Dittrich, 2020).

**Abbildung 3: Zukünftige Anknüpfungspunkte für die Akteure der Braunkohlewirtschaft im Mitteldeutschen Revier (Quelle: Brandt et al 2021, S. 38).**



Für das gleichermaßen vom Strukturwandel betroffene Rheinische Revier wird in einem Trendszenario davon ausgegangen, dass durch den Kohleausstieg zwar rund 14.400 Arbeitsplätze in der Braunkohlewirtschaft bis zum Jahr 2038 gegenüber dem Jahr 2021 verloren gehen, durch die bestmögliche Nutzung der Fördermittel aus dem Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen jedoch bis zu 27.000 neue Arbeitsplätze im gleichen Zeitraum entstehen können. Der dynamische Zuwachs an „neuen“ Arbeitsplätzen erfolgt weitgehend bis zum Jahr 2030 (Kempermann et al., 2021, S. 6–7). Auch hier ist zu erwarten, dass im Sinne eines gerechten Übergangs ein Wandel des bestehenden industriellen Kerns erfolgt (related variety) und nicht ausschließlich ein radikaler Neustart mit Firmen-neugründungen/-ansiedlungen; die mit der „related variety“ einhergehende Pfadernerneuerung bietet den Beschäftigten in den bestehenden Industrien die Möglichkeit, durch den Erwerb von Zusatzqualifikationen weiterhin eine realistische Beschäftigungsperspektive zu erhalten.

Aktuelle Projektionen gehen davon aus, dass diese „Green – und nach Möglichkeit auch Just – Transition“ erheblicher Investitionen in die Ökologisierung der Wirtschaft bedarf und hierdurch zu einem Beschäfti-

gungswachstum führen wird. Dabei werden vor allem vier Treiber bzw. Bereiche für diese Transition beschrieben, in denen grüne Arbeitsplätze bereits wachsen und neue entstehen werden (Asikainen et al., 2021, vi):

- grüne Elektrifizierung und die Substitution kohlenstoffintensiver Prozesse
- Ressourceneffizienz und die damit verbundene Senkung des Energie- und Materialverbrauchs sowie eine durchgängige Kreislaufwirtschaft
- Verantwortungsbewusstsein bei Verbraucher\*innen (Nachfrage nach klimaneutral erzeugten Produkten und Services, Boykotte von klimaschädlich agierenden Unternehmen), Unternehmen, Regierungen und öffentlichen Einrichtungen (Beschaffung)
- Schutz und Wiederherstellung der natürlichen Ökosysteme

Ergänzend werden vier weitere Treiber identifiziert, die starke Veränderungen des Arbeitsmarktes bedingen werden (Asikainen et al., 2021, vi):

- digitale Transformation hin zu digital unterstützten Arbeitsplätzen
- Neue Informations- und Kommunikationstechnologien führen zu einer Reorganisation der Arbeit (Flexibilisierung und Dezentralisierung).
- neue Formen der Wertschöpfung und eine Neugestaltung der Produktionsketten
- zielgerichtete Arbeit (klimabewusstes, effektives und effizientes Handeln)

Der Übergang in eine dekarbonisierte, gleichsam grüne Wertschöpfung bedeutet, dass auch die sich ebenfalls wandelnden Qualifikationen prinzipiell zu grüneren Jobs führen. Das Europäische Zentrum für die Förderung der Berufsbildung (Cedefop) beschreibt dies folgendermaßen: „[Übersetzung durch die Autor\*innen] Der Übergang hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft bringt strukturelle Veränderungen in allen Sektoren und Berufen mit sich, da neue ‚grüne‘ Berufe entstehen oder die Nachfrage nach selbigen steigt. In den meisten Fällen ist jedoch eine ‚Ökologisierung‘ der bestehenden Berufe erforderlich. Dies führt zu neuen Qualifikationen, die eine Aktualisierung der Lehrpläne oder sogar neue Qualifikationen auf allen Ebenen der allgemeinen und beruflichen Bildung erfordern. Diese neuen ‚grünen Fertigkeiten‘ können von sehr technischen und berufsspezifischen Fertigkeiten bis hin zu ‚weicheren‘ Fertigkeiten wie dem verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen reichen, die für alle Berufe, Hierarchieebenen und Sektoren relevant sein können. Während die ‚Ökologisierung‘ der Wirtschaft vor allem in bestimmten Sektoren wie Energie- und Ressourceneffizienz, Bauwesen oder Fertigung einen Qualifikationsbedarf schafft, führt der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft zu einem allgemeinen Bedarf an ‚grünen‘ Qualifikationen“ (Cedefop, 2019, S. 4).

Insgesamt ist somit zu erwarten, dass eine umfassende Dekarbonisierung der zentralen Sektoren wie Energie, Produktion, Mobilität, Gebäude etc. zu einem steigenden Anteil an dafür erforderlichen, grünen Tätigkeitsanforderungen (Greening of Skills) innerhalb von Berufen (Greening of Occupations) und infolgedessen zu einem steigenden Bedarf an entsprechend qualifizierten Beschäftigten führt (Greening of Employment) (Janser, 2018). Da gegenwärtig noch keine spezifischen Indikatoren existieren, mit denen sich die genannte Wirklogik in Form von Arbeitsmarkteffekten nachweisen lässt, wurde pilothaft ein auf Textmining der Onlinedatenbank berufenet.de basierender „Greenness-of-Jobs-Index“ entwickelt, der den Trend hin zu grüneren Jobs stützt und nahelegt, dass der Anteil entsprechender Tätigkeitsinhalte von Berufen po-

sitiv mit deren Beschäftigungswachstum korreliert ist (Janser, 2018). Für einige der mit der nachhaltigen bzw. Dekarbonisierungstransformation verbundenen Wertschöpfungsprozesse und Tätigkeitsbereiche bedeutet der staatlich getriebene Wandel mitunter eine Jobmaschine. So stehen etwa mit der finanziellen Förderung „Energieeffizientes Bauen und Sanieren“ bundesweit 900.000 Arbeitsplätze in Verbindung (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2021a). Bei der globalen Betrachtung von Arbeitsmarkteffekten der Dekarbonisierungstransformation würde sich durch eine Umschichtung der Investitionen im Energiesektor gemäß Projektion der International Renewable Energy Agency die Zahl der Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2050 auf 42 Millionen im Vergleich zu heute vervierfachen. Insgesamt 100 Millionen Arbeitsplätze würden bis 2050 im gesamten Energiesektor geschaffen werden, etwa 40 Millionen mehr als heute (IRENA, 2020).

In Europa hängt dieses Szenario auch von der (vorläufigen) Taxonomie der Europäischen Kommission ab, die fossiles Erdgas und Atomkraft zumindest für eine Übergangszeit als grüne, weil emissionsarme und somit klimafreundliche Energien einstuft – und damit Anreize für Investoren über die Zugänglichkeit von Krediten setzt. Für (die neu zu bauenden) Gaskraftwerke wären zum einen hochwirksame Filteranlagen nötig und zum anderen eine prinzipielle „H<sub>2</sub> readiness“, um später auf grünen Wasserstoff anstelle von Erdgas umsteigen und die Klimaneutralität erreichen zu können. Mit Blick auf die Atomkraft muss angesichts der Tatsache, dass mehrere EU-Staaten planen, neue Atomkraftwerke zu bauen, die Frage nach der Dauer von Übergangszeiten beantwortet werden, da die technische Laufzeit derartiger Anlagen 40 bis 50 Jahre beträgt. Ebenso stellt sich die Frage, wie wettbewerbsfähig diese gegenüber erneuerbaren Energien sind (Wille, 2022a).



## 2. Methodisches Vorgehen

Sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene werden die Themen der Dekarbonisierung und Digitalisierung in verschiedenen Strategien thematisiert und mit Zielen und Meilensteinen versehen; Beispiele sind der „Green Deal“ der Europäischen Kommission (Europäische Kommission, 2021) sowie die KI- (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF] et al., 2020), Wasserstoff- (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2020a) und die Bioökonomiestrategie der Bundesregierung (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF] & Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [BMEL], 2020). Dabei steht insbesondere die Verbindung von grünem und digitalem Wandel als gemeinsame Herausforderung im Fokus der Betrachtung, wie die jüngsten Schlussfolgerungen des Rats der Europäischen Union zum künftigen Europäischen Forschungsraum deutlich machen (Rat der Europäischen Union, 2021, S. 18). Um Aussagen über a.) zukünftige Arbeitsinhalte und b.) die Qualität von Beschäftigung (Bezahlung, Flexibilisierung, Verantwortung, Aufstiegsmöglichkeiten) von „grünere Jobs“ machen zu können, wurden daher in einem ersten Schritt ausgewählte Strategien hinsichtlich ihrer Adressierung der Dekarbonisierung analysiert.

Aus den so ermittelten technischen und marktbezogenen Zielsetzungen wurden unter Einbindung externer Expert\*innen korrespondierende Erzeugungs-, Produktions- und Verarbeitungs- sowie Nutzungsprozesse abgeleitet und mit Wertschöpfungsstufen in ausgewählten Sektoren kontrastiert. Diese Zusammenführungen wurden sowohl für Cleantech-Ansätze<sup>3</sup> in den genannten vier Dekarbonisierungssäulen erneuerbare Energien, grüner Wasserstoff, Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie (als Anbieter von Verfahren, Technologien, Services, aber auch Ausgangsstoffen) vorgenommen als auch in Anwendungskontexten (Abbildung 4). Auf diese Weise wurden Aussagen über die Veränderung von Wertschöpfungsprozessen, zukünftiger Arbeitsinhalte und fachlicher Fähigkeiten – beispielsweise Umgang mit neuen Materialien und Prozessen – sowie zukünftiger Qualitätsentwicklungen der Beschäftigung bzw. Arbeit getroffen (Flexibilisierung, Bezahlung, Gefährdungen etc.).

Hierbei beschränken sich die ausgewählten Untersuchungen nicht auf Einzelunternehmen, sondern betrachten auch die Konstellationen und Akteursübergänge in Wertschöpfungsketten oder regionalen

Wertschöpfungsökosystemen (Stichwort „Kreislaufwirtschaft“), um darin das Zusammenspiel aus (technologischen) Entwicklungen der Dekarbonisierung und Digitalisierung, die sich daraus ergebenden beruflichen Anforderungsprofile sowie deren Auswirkungen auf die Qualität der Arbeit zu ermitteln. Im Folgenden wurden fallstudienbasierte Branchenanalysen durchgeführt:

- grüner Wasserstoff im Kontext erneuerbarer Energien
- nachhaltige, erdölreduzierte Chemie-/Kunststoffindustrie
- nachhaltige Automobilindustrie:
  - nachhaltige Antriebstechnologien
  - nachhaltige Produktion und Wertschöpfung
- nachhaltige Bauindustrie

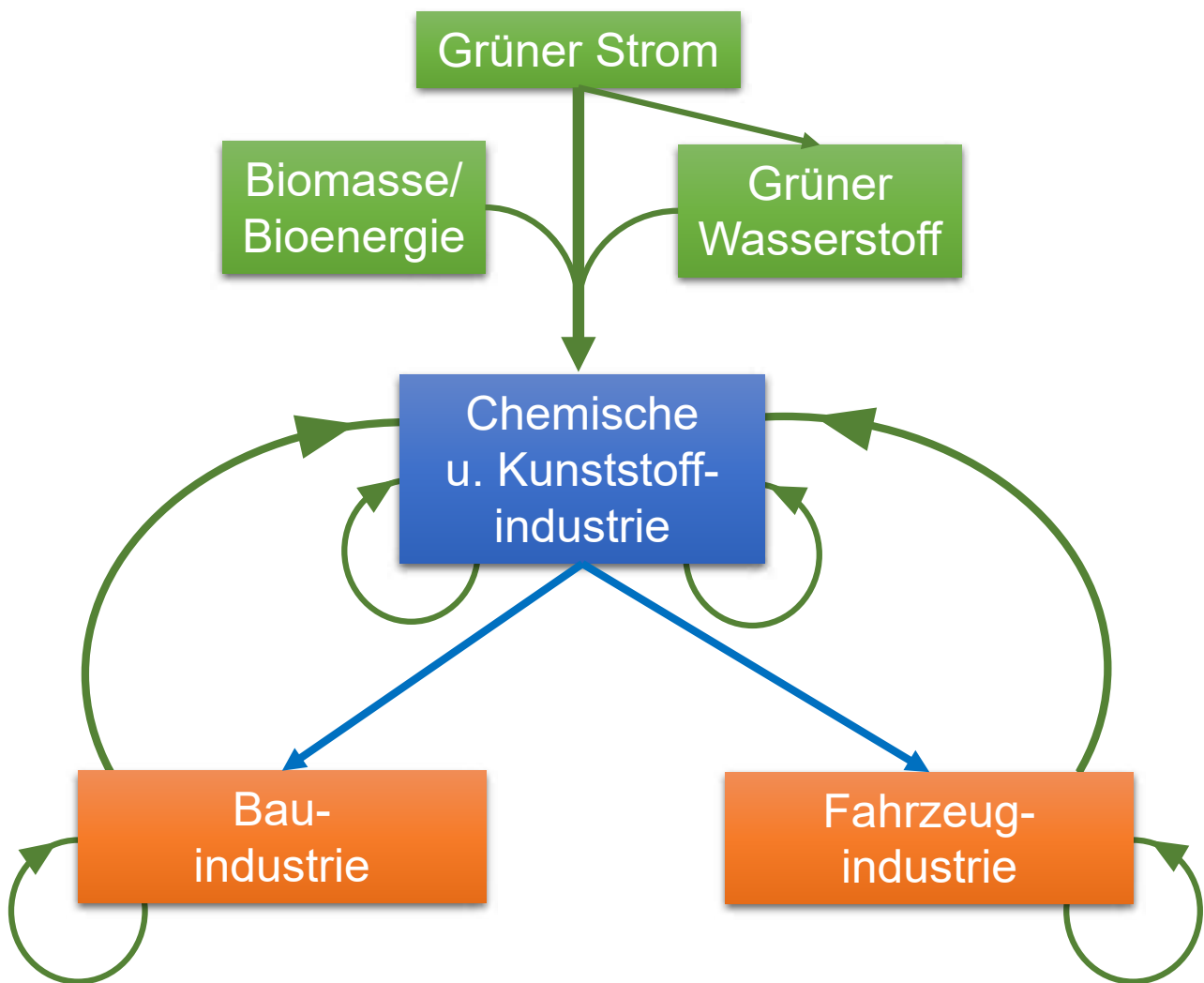
Die Untersuchungen basieren auf leitfragengestützten Interviews mit Akteur\*innen und Expert\*innen in den jeweiligen Sektoren, die zusammengeführt und um zusätzliche Informationen aus Branchenberichten etc. ergänzt wurden. Auf diese Weise konnten konkrete Einblicke in die digitale und die Dekarbonisierungstransformation auf Unternehmensebene bzw. im Unternehmensverbund und ihre Auswirkungen auf die Art der Beschäftigung (Arbeitsinhalte und -anforderungen) sowie auf die Qualität der Arbeit erzielt werden. Die Analysen in den Anwenderindustrien (Chemie, Automobil, Bau) wurden kombiniert mit den Cleantech-Schwerpunkten Bioökonomie, erneuerbare Energien und Kreislaufwirtschaft, da sich aus diesen oftmals übergreifende Konstellationen ergeben. So bietet die Bioökonomie die Möglichkeit, biogene statt fossile Rohstoffe zu nutzen. Ebenso stellt grüner Wasserstoff mitsamt seinen Folgeprodukten eine nicht-fossile stoffliche Basis dar, während die Kreislaufwirtschaft Altstoffe nutzbar macht und somit gleichsam ein anderes Wirtschaften ermöglicht: „Mit der Kreislaufwirtschaft können wir Wachstum und Ressourcenverbrauch voneinander entkoppeln“, sagt BASF-Chef Martin Bruder Müller.“ (Fröndhoff & Witsch, 2021) Die elektrische Energie für die Erzeugung von grünem Wasserstoff (und für andere Prozesse) muss dabei zwangsläufig aus erneuerbaren Energien stammen, um CO<sub>2</sub>-neutral zu sein; das Gleiche gilt für die Bereitstellung von grünem Wasserstoff.

<sup>3</sup> Unter Cleantech werden Verfahren, Produkte und Services zusammengefasst, die Effizienz-, Leistungs- oder Produktivitätssteigerungen erzielen und dabei zugleich Emissionen reduzieren/vermeiden und den Einsatz von Ressourcen mindern.

Im weiteren Vorgehen wurden die Ergebnisse aus der Untersuchung einzelner Unternehmen zu explorativen Analysen zentraler Linien in den vier Industrien zusammengeführt, um insbesondere Aussagen zu übergreifenden Trends und Entwicklungen zu treffen. Darüber hinaus wurden die Branchen/Industrien entlang der Wertschöpfungskette zueinander in Beziehung gesetzt (Abbildung 4): Die chemische Indus-

trie, die Bauindustrie und die Fahrzeugindustrie sind Kernbranchen für die deutsche Wirtschaft; die beiden Letztgenannten sind nach der Verpackungsindustrie zudem die beiden größten Verarbeiter-/Anwenderindustrien von Kunststoffen (Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V., 2020b), sodass ein volkswirtschaftlich maßgeblicher Wertschöpfungs- und Stoffstrompfad betrachtet wird.

**Abbildung 4: Darstellung der in dieser Studie betrachteten Wertschöpfungsbeziehungen und Stoffströme. Die grünen Pfeile repräsentieren sowohl den regenerativen energetischen und stofflichen Input als auch die Potenziale der Kreislaufwirtschaft (eigene Darstellung).**



Auf Grundlage der skizzierten Wertschöpfungszusammenhänge und sektoralen Verflechtungen wurde ermittelt, was die jeweiligen (übergreifenden) Entwicklungen für Beschäftigte und deren Arbeit bedeuten: Welche Tätigkeiten ändern sich und werden aufgewertet (job enrichment), welche entstehen womöglich neu? Zu diesem Zweck wurden zudem eine Analyse der wissenschaftlichen Literatur mittels Textmining der wissenschaftlichen Datenbank Scopus® durchgeführt sowie ein Textmining verschiedener Aus- und Weiterbildungsangebote.

Bei der Untersuchung wurde ein besonderes Augenmerk auf die Frage gelegt, welche Beschäftigungschancen das Zusammenspiel von Dekarbonisierung und digitaler Transformation für Frauen bietet und welches die dafür verantwortlichen Mechanismen sein können. Damit sollte ermittelt werden, auf welche Qualifikations- und Tätigkeitsniveaus (leitende vs. zuarbeitend-assistierende Tätigkeiten) sich möglicherweise ergebende Beschäftigungschancen beziehen und inwieweit bestehende Gender-Pay-Gaps überwunden werden können.

#### **Expert\*innengespräche wurden im Rahmen der Studie geführt mit:**

- **Ahlswede-Brech, Thomas;** Programmleitung Mobilität Allianz für die Region Braunschweig
- **Backsmann, Kolja;** Project Manager Hydrogen Campus and CO<sub>2</sub>-Neutrality Robert Bosch Elektronik GmbH, Salzgitter; Wasserstoff Campus Salzgitter
- **Bald, Uwe;** Personalleiter, Zentrales Produktionsressort, Netzwerk Produktion BMW Group, Werk München
- **Bohling, Jan Erik;** Stadtrat, Dezernent für Wirtschaft, Kultur, Digitales Stadt Salzgitter; Geschäftsführer Wirtschafts- u. Innovationsförderung Salzgitter GmbH
- **Ebner, Armin;** Hauptabteilungsleiter Produktionssystem, Digitalisierung, Planung, BMW Group, Werk München
- **Eulenstein, Thomas;** Geschäftsführer Kunststoffinstitut, Lüdenscheid
- **Dr. Fuchs, Oliver;** Projektbüro Südostniedersachsen, Amt für regionale Landesentwicklung, Braunschweig
- **Imdahl, Christoph;** Gruppenleiter Nachhaltige Fabriksysteme und Life Cycle Management, Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik Braunschweig; Wasserstoff Campus Salzgitter
- **Dr. Jäkel, Christoph;** Vice President Corporate Sustainability BASF SE, Ludwigshafen
- **Jandel, Doris;** Bildungsmanagerin Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik Braunschweig; Wasserstoff Campus Salzgitter
- **Lehmann, Juliane;** Referatsleiterin Wirtschafts-, Verbands- und Europaangelegenheiten, Stadt Salzgitter
- **Mayr, Alfred;** Geschäftsführer Umweltcluster Bayern, Augsburg
- **Patscha, Cornelius;** Foresight Manager Evonik Creavis GmbH, Marl
- **Plankert, Saskia;** Bildungsmanagerin Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik Braunschweig; Wasserstoff Campus Salzgitter
- **Römer, Joß;** Experte Holzbau WOLFF & MÜLLER Holding GmbH & Co. KG, Stuttgart
- **Sieling, Paul Justus;** Referent der Geschäftsführung für Nachhaltigkeit WOLFF & MÜLLER Holding GmbH & Co. KG, Stuttgart
- **Stein-Barthelmes, Inga;** Geschäftsführerin Planen Bauen 4.0, Berlin; Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Planen und Bauen
- **Theis, Björn;** Head of Foresight Evonik Creavis GmbH, Marl

### 3. Cleantech-Sektoren und ihre Einordnung in nationale und europäische Strategien im Kontext der Dekarbonisierung

Angesichts des fortschreitenden Klimawandels werden die ordnungspolitischen Instrumente sowohl auf nationaler als auch europäischer Ebene verbindlicher auf die Themen Nachhaltigkeit und Klimaschutz ausgerichtet. Für die europäische Ebene sind unter dem Titel „Green Deal“ zahlreiche Maßnahmen definiert, in die insgesamt 1,8 Billionen Euro aus dem Aufbaupaket NextGenerationEU und dem Siebenjahreshaushalt der EU fließen (Europäische Kommission, 2021). Die Strategien und Maßnahmen werden regelmäßig überprüft, weiterentwickelt und im Regelfall mit strengeren Auflagen versehen. Auf nationaler Ebene beschreiben ebenfalls Strategien Ziele und Maßnahmen für eine nachhaltige und klimafreundliche/-neutrale Wertschöpfung, Mobilität und Energieversorgung. Über diesen verschiedenen Initiativen und Maßnahmen steht die weiterentwickelte Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, welche die 17 Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, kurz SDGs) der UN übernimmt und die Wechselwirkungen zwischen den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit a) Ökologie, b) Ökonomie und c) Soziales in den Mittelpunkt stellt (Bundesregierung [BReg.], 2018). Der aktuelle Koalitionsvertrag „Mehr Fortschritt wagen“ (SPD, B90/Die Grünen, FDP, 2021) setzt einen deutlichen Fokus auf die beiden aktuell wichtigsten Transformationsherausforderungen Klimaschutz und Digitalisierung und skizziert umfassende Fortschritte.

Der Digitalisierung wird grundsätzlich ein hohes Potenzial als „Enabler“ für die Erreichung der Klimaschutzziele zugesprochen. Eine aktuelle Studie schätzt das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial durch eine beschleunigte Digitalisierung trotz Rebound-Effekten und des Energie- und Rohstoffbedarfs digitaler Technologien – vgl. den weltweiten Strombedarf von Rechenzentren und Cloud-Services, der durch Modellierung mit 321 TWh im Jahr 2030 prognostiziert wird (Koot & Wijnhoven, 2021) – auf netto 58 % (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. [BITKOM], 2020).

Im Folgenden werden mit der Bioökonomie, der Kreislaufwirtschaft und den erneuerbaren Energien drei zentrale Segmente von Cleantech-Industrien beschrieben, die für eine Dekarbonisierungstransformation essenziell sind und auf die in der weiteren Analyse immer wieder Bezug genommen wird.

#### 3.1 Bioökonomie

*Gegenwärtig (Stand: 2017) sind in der Bioökonomie in Deutschland je nach Abgrenzung 3,1 bis 3,7 Millionen Menschen tätig (inkl. Land- und Forstwirtschaft), was rund 9 % aller Beschäftigten entspricht. Diese erwirtschaften – ebenfalls je nach Abgrenzung – zwischen 165 und 265 Milliarden Euro Bruttowertschöpfung, von der 50 % auf das verarbeitende Gewerbe (Pharma, Chemie, Maschinen- und Anlagenbau, Textil) entfallen. Die Beschäftigungsentwicklung war, verglichen mit der allgemeinen Beschäftigungsentwicklung, leicht rückläufig. Dieser Trend wird auch für die Zukunft in ähnlicher Weise erwartet; als Grund gelten anhaltende Beschäftigungsrückgänge in der Land- und Forstwirtschaft (Bringezu & Banse, 2020, 42 ff.).*

Die Bioökonomie zielt darauf ab, fossile und sonstige endliche Roh- und Ausgangsstoffe der industriellen Wertschöpfung durch regenerative und damit potenziell unendliche Stoffe zu ersetzen. Dabei liegt der Schwerpunkt der stofflichen Nutzung auf chemischen Erzeugnissen und Kunststoffen (Biokunststoffe), da sich mineralische Rohstoffe – Stichworte sind elektrische Leitfähigkeit, mechanische Festigkeit, thermische Widerstandsfähigkeit – nicht oder nur in geringem Maße durch biobasierte Stoffe ersetzen lassen.

Bioökonomische Innovationen verbinden biologisches Wissen und technologische Lösungen mit dem Ziel, ein biobasiertes, an natürlichen Stoffkreisläufen orientiertes, nachhaltiges Wirtschaften zu ermöglichen. Dabei geht u. a. die nationale Bioökonomiestrategie davon aus, dass die angestrebten Ziele, wie etwa die deutliche Verringerung der Treibhausgasemissionen, vor allem durch eine Kombination aus Biotechnologie und Digitalisierung zu verwirklichen sind. Zudem können digitale Technologien entscheidend zur Entwicklung neuer biotechnologischer Prozesse und Produkte und damit zur Verringerung der Inanspruchnahme fossiler Rohstoffe beitragen (Wiechert et al., 2018). Die Potenziale der Digitalisierung zur Erreichung der Klimaschutzziele werden auch in der Nationalen Bioökonomiestrategie hervorgehoben (Bun-

desministerium für Bildung und Forschung [BMBF] und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [BMEL], 2020, S. 30). So können beispielsweise mithilfe neuer digitaler Tools schnell entstehende große Datenmengen intelligent ausgewertet und nutzbar gemacht werden. Auch im Bereich der Simulation und Modellierung hat die Digitalisierung ein hohes Innovationspotenzial für die Bioökonomie: Modelle können nicht nur bei der Beschreibung biologischer Prozesse und Systeme helfen, sondern sollen zunehmend auch zur Voraussage, Folgenabschätzung und zum gezielten Design von effizienten und passgenauen biobasierten Verfahren genutzt werden. Die technologische Weiterentwicklung in den Bereichen Künstliche Intelligenz, Smart Sensorik, Automatisierung, Miniaturisierung und Parallelisierung von Verfahrensprozessen unterstützt zudem die schnellere und bessere Entwicklung, Überwachung und Steuerung von biotechnologischen Produktionsverfahren. Im Hinblick auf neue Beschäftigungspotenziale legt die nationale Bioökonomiestrategie einen Fokus auf die lokale Weiterverarbeitung biogener Rohstoffe zu höherwertigen Verarbeitungsstufen, wodurch Transportwege reduziert und Beschäftigung und Wertschöpfung in ländlichen Räumen geschaffen werden (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF] und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [BMEL], 2020, S. 45).

Ein wichtiges Anwendungsfeld der Bioökonomie ist die bereits eingangs genannte Bereitstellung von Rohstoffen für Biokunststoffe als Ersatz für erdölbasierte Produkte. Biokunststoffe machen derzeit etwa 1 % der jährlich produzierten mehr als 368 Millionen Tonnen Kunststoff aus. Da die Nachfrage jedoch steigt, wächst der Markt für Biokunststoffe kontinuierlich an und diversifiziert sich. Erwartet wird, dass die weltweiten Produktionskapazitäten für Biokunststoffe von rund 2,1 Millionen Tonnen im Jahr 2020 auf etwa 2,9 Millionen Tonnen im Jahr 2025 steigen (Statista GmbH, 2021b). Neue Biopolymere, wie Polymilchsäure (PLA), biobasiertes Polypropylen (PP) und Polyhydroxyalkanoate (PHA), weisen hohe Wachstumsraten auf. Im Jahr 2019 kam biobasiertes PP in kommerziellem Maßstab auf den Markt. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Absatz bis 2025 mehr als vervierfachen wird, da PP in zahlreichen Sektoren eingesetzt wird. PHA sind eine wichtige Polymerfamilie, deren Produktionskapazitäten sich in den nächsten fünf Jahren schätzungsweise fast verzehnfachen werden. Ebenso gehen Prognosen davon aus, dass die Produktion von biologisch abbaubaren Kunststoffen – PLA, PHA, Stärkemischungen und andere – von gegenwärtig rund 1,2 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2025 auf 1,8 Millionen Tonnen ansteigen wird, insbesondere aufgrund der erheblichen Wachstumsraten von PHA und neuer Investitionen in die PLA-Produktion in den USA und Europa (European Bioplastics

e.V., 2020). Die zentralen wissenschaftlich-technischen Säulen der biobasierten Ökonomie/Produktion sind:

- mikrobielle Produktion durch den Einsatz von Bakterien und Hefen zur Stoffumwandlung (auch synthetische Biologie)
- Enzymtechnologien für die maßgeschneiderte Biokatalyse
- grüne Chemie (siehe hierzu im Detail Abschnitt 5.1)
- fortgeschrittene chemische und physikalische Verfahren (neue Prozesse und Anlagen)

Im Oktober 2020 hat die Europäische Kommission ihre „Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit – Für eine schadstofffreie Umwelt“ veröffentlicht (European Commission, 2020b). Diese ist ein wichtiges Element zur Erreichung des „Null-Schadstoff-Ziels“ der Kommission und fasst die langfristige Vision einer Chemikalienpolitik in Europa zusammen, um den Schutz von Mensch und Umwelt vor gefährlichen Chemikalien weiter zu verbessern. Zugleich soll auf diese Weise die europäische chemische Industrie dabei unterstützt werden, weltweit führend bei der Herstellung und Verwendung von sicheren und nachhaltigen Chemikalien zu werden. Im Grundsatz werden mit dieser Strategie die bisherigen Bestrebungen zur Realisierung einer „Green Chemistry“ weiter vorangetrieben. Sie stehen darüber hinaus im Einklang mit der Stärkung einer Bioökonomie. Eine solche kann einen signifikanten Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und somit der Erderwärmung leisten (Carus, 2017). Hierbei ist auch die Verwertung pflanzlicher Reststoffe oder Abfälle zu berücksichtigen – anstelle von eigens produzierten Energiepflanzen.

Mit Blick auf die zukünftige Entwicklung einer umfassenden Bioproduktion spielt der Einsatz neuer molekularbiologischer (z. B. Genome Editing) und biotechnologischer Verfahren und Methoden eine bedeutsame Rolle. Diese werden benötigt, um aus den natürlichen und nachwachsenden Ressourcen die Vielfalt von Stoffen und Materialien zu erzeugen. Ein besonderer Treiber ist die synthetische Biologie, die darauf abzielt, in der Schnittmenge aus Molekularbiologie, organischer Chemie, Nanobiotechnologie und Technikwissenschaften (Materialwissenschaften, Informationstechnik etc.) vollständige künstliche biologische Systeme zu schaffen, die isoliert oder kombiniert Stoffe/Materialien mit den gewünschten Eigenschaften erzeugen. Ähnlich wie zuvor schon bei der Biotechnologie ist zu erwarten, dass mit zunehmender Verbreitung der synthetischen Biologie auch die Anzahl der Beschäftigten, die mit der Technologie fachgerecht umgehen können muss, zunehmen wird.

### 3.2 Kreislaufwirtschaft und Recycling

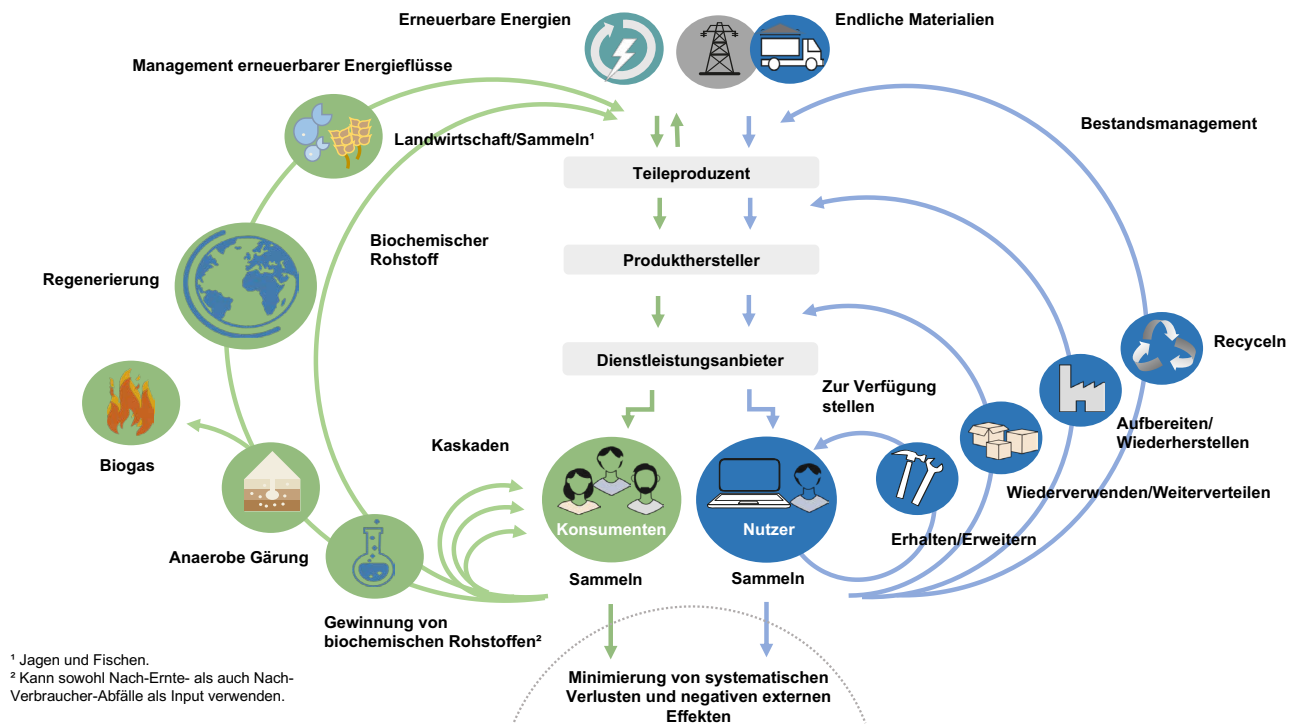
*In der Kreislaufwirtschaft arbeiten in Deutschland (Stand: 2020) rund 310.000 Beschäftigte. Die Branche erwirtschaftete im Jahr 2020 einen Umsatz von rund 84 Milliarden Euro und verzeichnete damit im Vergleich zum Jahr 2010 einen Anstieg um 18 % (Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. [BDE], 2020).*

reichen. Für Europa sind es sogar bis zu 800 Milliarden Euro“ (Fröndhoff & Witsch, 2021). Allerdings wird im aktuellen Koalitionsvertrag die Entwicklung einer nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie angekündigt (SPD, B90/Die Grünen, FDP, 2021, S. 42). Zudem hat Deutschland im Jahr 2021 mit rund 697.000 Tonnen etwa ein Drittel weniger Plastikmüll exportiert als im Jahr 2020. Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die Inlandsnachfrage nach diesem Rohstoff gestiegen sein könnte (dpa, 2022).

Die Kreislaufwirtschaft hat nach Berechnungen der Ellen MacArthur Foundation das Potenzial, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß des produzierenden Gewerbes insgesamt um 45 % zu senken (Ellen MacArthur Foundation, 2021); etwa, indem die Chemieindustrie nicht mehr Öl und Gas nutzt, sondern Altkunststoffe, Biomasse oder auch direkt CO<sub>2</sub> aus Abgasen oder der Atmosphäre (siehe Abbildung 5 und Abbildung 10 auf Seite 42). Eine Metaanalyse von gut 300 prospektiven Studien zur Kreislaufwirtschaft hat ergeben, dass die CO<sub>2</sub>-Reduktion mittel- und langfristig zwischen 36,3 bis 20,2 % in der EU und zwischen 34,0 und 6,5 % weltweit liegen wird. Entscheidend dabei ist jedoch, dass es zu einer Win-win-Situation zwischen makroökonomischen, sozialen und Klimaeffekten kommt: Bei einer umfassend etablierten Kreislaufwirtschaft kommt es gemäß der Metaanalyse einhellig zu wirtschaftlichem Wachstum, einer (moderaten) Zunahme von Beschäftigung – zwischen 2 und 4 % pro Jahr – sowie einer Abnahme der CO<sub>2</sub>-Emission (Aguilar-Hernandez et al., 2020, S. 8).

Wenngleich die positiven Effekte der Kreislaufwirtschaft somit offensichtlich scheinen und sie aus diesem Grund als zentraler Baustein für die Realisierung der Klimaneutralität gilt, ist Deutschland von einem umfassenden zirkulären System noch weit entfernt. In den letzten sechs Jahren ist die deutsche Wiederverwertungsquote nur um 0,1 Prozentpunkte pro Jahr angestiegen. Selbst wenn Deutschland das derzeitige Tempo verdoppeln würde, würde es mindestens bis zum Jahr 2215 dauern, bis das Land eine Kreislaufwirtschaft von 50 % erreicht; 50 % bis 60 % gelten als notwendig, um innerhalb der planetaren Tragfähigkeitsgrenzen zu bleiben (Rubel et al., 2020). Auch ökonomisch ist der geringe Anteil der Kreislaufwirtschaft aufgrund der genannten Win-win-Logik von Nachteil: „Während Nachbarländer wie die Niederlande ganze Kreislaufstrategien entwickeln, Quoten festlegen und Ziele vorgeben, läuft Deutschland Gefahr, den Anschluss an einen Milliardenmarkt zu verpassen. Zirkuläre Wirtschaft könnte bis 2030 allein in Deutschland ein Marktvolumen von bis zu 200 Milliarden Euro er-

**Abbildung 5: Systemdiagramm der Kreislaufwirtschaft für regenerative und endliche Stoffe, wie es auch in dieser Studie zugrunde gelegt wird (vgl. Abbildung 4). Das Diagramm beruht auf dem Cradle-to-Cradle-Konzept von Baumgart & McDonough (eigene Darstellung nach Ellen MacArthur Foundation 2019<sup>4</sup>).**



Bei der Kreislaufwirtschaft gilt die branchenübergreifende Zusammenarbeit als maßgeblich, zumal die Stoffströme meist nicht innerhalb eines Unternehmens realisiert werden, sondern im Verbund mit anderen Firmen; tragfähige Lösungen können branchenübergreifend und entlang der Lieferketten übernommen werden. Dabei können Unternehmen voneinander lernen und ihre Anstrengungen in Forschung und Entwicklung bündeln. Die Zusammenarbeit kann auch dazu beitragen, dass Strategien der Kreislaufwirtschaft wie Aufarbeitung, Wiederverwendung oder Recycling eine breitere Akzeptanz finden. Querschnittsbranchen wie das Finanzwesen, die Abfallwirtschaft und die Informations- und Kommunikationstechnologien können den Wandel beschleunigen und es den Akteuren in verschiedenen Branchen ermöglichen, ihre Ziele und Aktivitäten in der Kreislaufwirtschaft besser zu verfolgen (Hackelsberger et al., 2021). Bei der Kreislaufwirtschaft kommt hinzu, dass regionale Stoffströme zu bevorzugen sind, um lange und mit CO<sub>2</sub>-Emissionen belastete Transportwege zu vermeiden. Hier ist allerdings stets die Frage der kritischen Men-

gengröße im Hinblick auf Effizienz und Effektivität zu berücksichtigen.

Die befragten Expert\*innen sahen es als wahrscheinlich an, dass in der Kreislaufwirtschaft Berufsbilder wie „Stoffstrom-Manager (m/w/d)“ entstehen, die mittels digitaler Plattformen für einen flexiblen Fluss der Rohstoffe in firmenübergreifenden Kontexten sorgen und die über Echtzeitsensordaten nicht nur die Quantität dieser Ströme bewerten, steuern und kontrollieren können, sondern auch die jeweilige Qualität. Dies ist besonders wichtig, da hiermit die Zusammensetzung der wiedergenutzten Stoffe/Stoffgemische ermittelt und gesteuert werden kann, um eine weitgehend einheitliche Qualität sicherzustellen. Nichtsdestotrotz wird es dabei Toleranzgrenzen für die aus wiederverwerteten Materialien gefertigten Erzeugnisse geben müssen (siehe unten). Parallel zu den wachsenden Flexibilisierungsprozessen kann dies dazu führen, dass Produzenten ihre Fertigung an die (schwankenden) Verfügbarkeiten der Stoffe anpassen (diskontinuierlicher Materialfluss), wobei mangels Erfahrung noch

<sup>4</sup> Siehe Website unter <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>

nicht absehbar ist, ob diese Schwankungen sich tagesaktuell oder über Wochen und Monate manifestieren. Unter Umständen wird dies auch im Wechselspiel mit Spitzen bzw. Senken bei der Verfügbarkeit von (volatiler) Energie erfolgen (siehe dazu auch Abschnitt 4.1). Die Folge wäre eine an diese schwankenden Umstände adaptive Fertigung mit einem Paradigmenwechsel von kontinuierlicher zu diskontinuierlicher Produktion. Eine solche würde das gesamte Prozess-Engineering vor eine große Aufgabe stellen, da Prozesse nicht mehr automatisch an ihrem Optimum gefahren werden können. Um dies auszugleichen, könnte zukünftig anstelle eines Upscalings von Prozessen ein Outscaling erfolgen, indem mehrere parallele, aber kleine Produktionseinheiten je nach Bedarf und Verfügbarkeit stückweise zu- oder abgeschaltet werden. Eine derartige Diskontinuität hätte unmittelbare Auswirkungen auf die Arbeitsorganisation hin zu agilen Strukturen, aber auch auf die Arbeitszeitlage sowie auf die Möglichkeit, die (steuernd-überwachenden) Tätigkeiten ortsungebunden (Homeoffice) durchzuführen. Insgesamt dürfte damit das Potenzial einer zeitlichen und örtlichen Entgrenzung von Arbeit zunehmen – mit dem Nachteil, dass Arbeit auch für die Beschäftigten schlechter planbar wird. Hier sind flexible und auch kurzfristig wirksame Modelle zum (einkommensstabilisierenden) Ausgleich von produktionsbedingten Über- und Unterstunden nötig.

Die Kreislaufwirtschaft kann die Gesamtheit des anthropogenen Lagers (Umweltbundesamt [UBA], 2016) einbeziehen und insbesondere in den verdichteten Ballungsräumen für die Wiederverwertung im Zuge eines „Urban Minings“ nutzbar machen. Da zudem die Flächen für Deponien immer knapper werden und die Möglichkeit abnimmt, Abfälle in andere Länder zu exportieren, bedeutet dies eine zusätzliche Motivation für die stoffliche Wiederverwertung. Dabei dürfte es in einer Kombination aus wirtschaftlicher und technischer Machbarkeit unter Umständen mittels „Landfill Mining“ auch zu einer stofflichen Nutzung von existierenden Abfaldeponien kommen (Umweltbundesamt [UBA], 2017). In diesem Bereich können hochspezialisierte Tätigkeitsprofile wie „Landfill Miner (m/w/d)“ entstehen, die geologisches, hydrologisches, toxikologisches und materialwissenschaftliches Know-how in sich vereinen.

Aufgrund der zwangsläufigen Verflechtung der Kreislaufwirtschaft über mehrere Wertschöpfungsstufen hinweg dürfte der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft zu einem allgemeinen Bedarf an grünen Qualifikationen führen (Cedefop, 2019, S. 4), sodass unab-

hängig von der Quantität der Beschäftigung deutliche qualitative Effekte zu erwarten sind, zum Beispiel diskontinuierliche Produktionsprozesse. Für das Thema „Recycling grüner Technologien“ (siehe unten) ist dies in Ansätzen und mit Schwerpunkt auf der Arbeitssicherheit beschrieben (Bovenschulte, Abel et al., 2021).

In den Bereichen Kreislaufwirtschaft und Recycling konzentriert sich die Europäische Kommission (KOM) vor allem auf die Branchen Kunststoff, Bau und Automobil (diese bilden auch in der vorliegenden Studie die zentralen Bezugsindustrien/-branchen), da sie zu den ressourcenintensivsten zählen und gleichzeitig ein hohes Kreislaufpotenzial aufzeigen. Branchenübergreifend gilt es, neue Sortier- und Recyclingtechnologien zu prüfen und die bestehende Verwertungsinfrastruktur weiterzuentwickeln. Innerhalb der Baubranche ist die Renovierung und Sanierung von Bestandsgebäuden ein Flaggschiffthema der EU für die Erreichung der Klimaneutralität (Simon, 2019). Auch die Bundesregierung fördert gemäß EEG die Gebäudesanierung von Eigentümer\*innen z. B. durch Wärmedämmung oder moderne Heizungsanlagen, um die Sanierungsrate zu erhöhen. Zudem wird der Einsatz mineralischer Abfälle wie Bauschutt, Schlacken oder Gleisschotter (Ersatzbaustoffe) als Alternative zu Primärbaustoffen betont. Allerdings weisen Expert\*innen darauf hin, dass es bei der öffentlichen Beschaffung für Bauvorhaben derzeit keinen verbindlichen Anteil von Rezyklaten<sup>5</sup> gibt und die Bestimmungen im Regelfall als Kann- und nicht als Muss-Bestimmungen ausgelegt werden. Die Schweiz hingegen hat einen einheitlichen Anteil von mindestens 20 % Rezyklat bei Baustoffen festgelegt.

Vergleichbare Regulierungshemmnisse betreffen die stärkere Nutzung von Kunststoffrezyklaten gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Gegenwärtig sind diese von Anwendungen in der Medizin oder der Lebensmittelindustrie ausgeschlossen, da im Regelfall keine 100%ige Sortenreinheit und Verunreinigungsfreiheit garantiert werden kann (Produkthaftung). Hier ist nach Expert\*innenmeinung die Festlegung von Grenzwerten für Verunreinigungen (im Sinne von Mischkunststoffen) und Materialtoleranzen (etwa Einschlüsse) nötig, ohne dass Klima- und Verbraucher\*innen-/Gesundheitsschutz gegeneinander ausgespielt werden. Ein wichtiger Schritt für die möglichst hohe Qualität der Rezyklate wird in der durchgehenden Digitalisierung der Stoffströme gesehen. Durch hochentwickelte Analysen und deren Auswertung kann zukünftig sichergestellt werden, dass Grenzwerte eingehalten oder möglichst unterschritten werden.

<sup>5</sup> KrWG, § 3, Absatz 7(b): „Rezyklate im Sinne dieses Gesetzes sind sekundäre Rohstoffe, die durch die Verwertung von Abfällen gewonnen worden sind oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind.“



Die Digitalisierung und schrittweise Wissensbasierung der Kreislaufwirtschaft sowohl innerhalb einzelner Unternehmen als auch firmenübergreifend sowie insbesondere in der existierenden Abfall- und Recyclingwirtschaft dürfte zu einer Aufwertung der Tätigkeiten bei einer gleichzeitigen Flexibilisierung der Arbeit führen. Insbesondere in der Recyclingbranche kann dies zu einer Verschiebung von geringqualifizierten manuellen Tätigkeiten zu höherqualifizierten planerischen und prüfend-steuernden Tätigkeiten führen. Damit verbunden wäre zwangsläufig eine Reduzierung des Gefährdungspotenzials (Kontaktminderung durch fortschreitende Prozesstechnisierung), das in der bestehenden Recyclingwirtschaft überdurchschnittlich hoch ausgeprägt ist (Bovenschulte, Abel et al., 2021, 33 ff.).

Aus dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft hat die KOM weiterhin eine erste Initiative umgesetzt und einen neuen Rechtsrahmen für Batterien aller Typen geschaffen: Batterien, die in der EU in den Verkehr gebracht werden, sollen demnach über ihren gesamten Lebenszyklus nachhaltig, sicher und leistungsfähig sein und so die Umweltauswirkungen so gering wie möglich halten (European Commission, 2020a). Gerade mit Blick auf die Automobilbranche werden nachhaltige Batterien einen wichtigen Beitrag zur Verbreitung von Elektrofahrzeugen leisten. Denn Batterien für Elektroautos sind sehr energie- und damit emissionsintensiv: Ca. 50 % der Emissionen entstehen in der Produktion. Im Zusammenhang mit der Sammlung und dem Recycling von Gerätebatterien werden damit auch neue Auslieferungs- und Rücknahmesysteme wie z. B. Tauschstationen für Autobatterien immer wichtiger. Mit Blick auf den aktuellen Markthochlauf der Elektromobilität ist absehbar, dass Wiederverwertungskonzepte für die Batteriezellen benötigt werden (siehe dazu Abschnitt 5.3.2). Diese machen bis zu 40 % der Wertschöpfung eines Fahrzeugs aus und haben eine Lebensdauer von rund 8 bis 10 Jahren. Es ist absehbar, dass die schon gegenwärtig knappen Kapazitäten zur Verwertung ausgedienter Batteriezellen in keiner Weise den bis zum Jahr 2030 stark wachsenden Mengen gerecht werden (tagesschau.de, 2021).

Auch die erneuerbaren Energien machen eine umfassende stoffliche Wiederverwertung nötig. Im Durchschnitt wird die Lebensdauer von Photovoltaikmodulen auf ca. 20 bis 25 Jahre taxiert. Entsprechend fallen in Deutschland nun, wo die erste Fördergeneration des im Jahr 2000 in Kraft getretenen EEG an ihr Nutzungsende kommt, größere und stark wachsende Mengen an zu recycelnden PV-Modulen an. Es wird für das Jahr 2030 bereits ein potenzielles kumuliertes Recyclingaufkommen von ca. 400.000 bis 1.000.000 Tonnen in Deutschland erwartet, weltweit sogar bis zu 78 Millionen Tonnen, kumuliert bis zum Jahr 2050

(Weckend et al., 2016). Das größte deutsche Recyclingunternehmen für PV-Module, die Reiling GmbH aus dem nordrhein-westfälischen Marienfeld, hat gemeinsam mit zwei Fraunhofer-Instituten ein Verfahren entwickelt, mit dem neben den metallischen Bestandteilen der Solarzellen auch das kristalline Silizium hochwertig wiederverwendet werden kann. Ziel ist nun, das Verfahren im industriellen Maßstab zur Anwendung zu bringen (Wille, 2022b).

Analog zur Photovoltaik wird das Thema Windenergieanlagen-Rückbau und -Recycling in den kommenden Jahren zunehmend in den Mittelpunkt rücken. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die anfallenden Millionen Tonnen Beton (vgl. Abschnitt 5.3.2), Stahl oder Aluminium über bestehende Recyclingstrukturen verwertet werden können. Als deutlich anspruchsvoller werden dagegen die Rotorblätter beurteilt, die insbesondere aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) sowie – in deutlich geringerem Maße – aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) bestehen (Bundesverband WindEnergie e.V., 2019). Für diese Verbundmaterialien bestehen gegenwärtig kaum geeignete Verfahren zur Trennung und Wiederverwertung, weshalb hier verstärkt auf die Pyrolyse gesetzt wird (siehe dazu auch Abschnitt 5.2 und Abbildung 10). Insgesamt erfordern gerade die grünen Technologien angesichts ihres absehbaren Ausbaus effektive zirkuläre Konzepte, da beispielsweise die erneuerbaren Energien nicht nur einen Teil des von ihnen erzeugten Stroms für ihre eigene Produktion (PV- und Windkraftanlagen etc.) benötigen, sondern sie auch mit Millionen Tonnen zum stofflichen Ressourcenverbrauch beitragen.

*Im Bereich der erneuerbaren Energien waren im Jahr 2019 knapp 300.000 Beschäftigte und damit rund dreimal so viele wie im Jahr 2000 tätig. Unter dem Eindruck des EEG gab es zunächst einen starken Beschäftigungsanstieg, der ab dem Jahr 2011 (mit einem vorläufigen Allzeithoch von gut 415.000 Beschäftigten) jedoch deutlich zurückging. Der Grund dafür war zunächst der weitgehende Zusammenbruch der heimischen Photovoltaikindustrie. Seit dem Jahr 2017 geht auch die Produktion in der Windenergie zurück (Umweltbundesamt [UBA], 2021). Dieser Trend dürfte sich angesichts der Ausbaupläne jedoch kurzfristig und tiefgreifend umkehren.*

### 3.3 Erneuerbare Energien

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gilt als zentrales Steuerungsinstrument für den Ausbau der erneuerbaren Energien und fördert die Technologieentwicklung in diesem Bereich. Neben dem Ausbau überregionaler Übertragungs- und Verteilnetze für den Transport des grünen Stroms zu den Verbraucher\*innen – insbesondere in die industriellen Zentren – ist eine große Herausforderung weiterhin die, den Anteil am Gesamtenergiebedarf zügig auszubauen sowie Energie in Spitzenzeiten zu speichern und zu verteilen, um sie in Flauten verfügbar zu machen. In diesem Kontext werden die Potenziale digitaler Technologien deutlich: So ermöglicht KI bei der Analyse großer Datenmengen in Echtzeit jederzeit eine flexible Anpassung und Optimierung des Netzbetriebs. Zudem können im Sinne eines digitalen Energiemanagements digitale Lösungen bei der Erfassung und Bewertung des Energiezustands von Gebäuden eingesetzt werden. Um die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor zu reduzieren, müssen weiterhin die erneuerbaren Energien ausgebaut und die Sektorenkopplung für Beheizung, Warmwasser, Kühlung und Beleuchtung realisiert werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2019, S. 15).

Auch Wasserstofftechnologien bilden, wie in der Nationalen Wasserstoffstrategie beschrieben, einen wichtigen Faktor der Energiewende. Dabei kann ihre Vielseitigkeit sie zu einer der zentralen Querschnittstechnologien der Dekarbonisierung machen. „Damit Wasserstoff ein zentraler Bestandteil unserer Dekarbonisierungsstrategie werden kann, muss die gesamte Wertschöpfungskette – Technologien, Erzeugung, Speicherung, Infrastruktur und Verwendung

einschließlich Logistik und wichtiger Aspekte der Qualitätsinfrastruktur – in den Blick genommen werden“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2020a, S. 2). Voraussetzung für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologien sowie deren Export ist zunächst die Schaffung eines „Heimatmarkts“, d. h. einer nachhaltigen inländischen Wasserstoffproduktion und -verwendung. Darunter fällt insbesondere auch, Wasserstoff als Grundstoff für die Industrie nachhaltig zu machen. Mit dem Ziel des Umstiegs auf klimafreundliche Industrieverfahren soll im neuen Pilotprogramm der Bundesregierung „Carbon Contracts for Difference (CCfD)“ der Betrieb von Elektrolyseanlagen im Rahmen der Chemie- und Stahlindustrie gefördert werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2020c).

Der Aktionsplan der Wasserstoffstrategie benennt als weitere Maßnahme, Wasserstoff als alternativen Energieträger im Verkehr durchzusetzen. Damit verbunden ist der Aufbau der notwendigen Tankinfrastruktur. Der Einsatzbereich von H<sub>2</sub>-betriebenen Brennstoffzellen wird derzeit neben dem Schiffs- und Flugverkehr im öffentlichen Personennahverkehr (z. B. Busse, Züge), teilweise im Straßenschwerlastverkehr (Lkw) oder bei Nutzfahrzeugen (z. B. auf Baustellen, in der Logistik) als sinnvoll erachtet. Wasserstoff und Brennstoffzellen sind damit als „unverzichtbare Ergänzung zu den leistungs- und reichweitenbeschränkten Batteriefahrzeugen zu verstehen“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [BMVI], 2020).

Eine weitere Ausführung des Themas erfolgt in der Exploration „Grüner Wasserstoff im Kontext erneuerbarer Energien“ in Abschnitt 4.1.

## 4. Exploration

In den folgenden Schwerpunkten werden zentrale Branchen/Industrien der Dekarbonisierung analysiert. Dazu wurden jeweils Fallstudien in Form von Expert\*inneninterviews durchgeführt, die durch die Auswertung bestehender Studien und anderer Quellen ergänzt und zu aggregierten Porträts zusammengeführt wurden. Dabei kommt es nicht nur unweigerlich, sondern beabsichtigt zu Überschneidungen der betrachteten Branchen/Industrien, da diese auch volkswirtschaftlich unmittelbar miteinander zusammenhängen (vgl. Abbildung 4).

### 4.1. Grüner Wasserstoff im Kontext erneuerbarer Energien

Angesichts des im Koalitionsvertrag für die Legislaturperiode 2021 bis 2025 genannten Ziels, rund 80 % des im Vergleich zu heute erhöhten Strombedarfs<sup>6</sup> von 680 bis 750 TWh im Jahr 2030 durch erneuerbare Energien zu decken (SPD, B90/Die Grünen, FDP, 2021, S. 56) wird deutlich, wie rasch auch in Deutschland der Bedarf an Fachkräften in diesem Sektor ansteigen wird; zumal Studien zu dem Ergebnis kommen, dass bis zum Jahr

<sup>6</sup> Zusätzlicher Bedarf entsteht u. a. durch die zunehmende Elektromobilität und die Erzeugung von grünem Wasserstoff.

2030 sogar rund doppelt so viel Windkraft- und Photovoltaikleistungen hinzugebaut werden müssten wie im Koalitionsvertrag festgelegt, um das Pariser Klimaziel zu erreichen (Quasching et al., 2021, S. 3).

Es ist somit absehbar, dass die Dekarbonisierung an ihrem zentralen Ausgangspunkt – dem grünen Strom – trotz potenziell steigender grüner Energieimporte in eine Situation der Fachkräfteknappheiten laufen dürfte. Es zeichnet sich ab, dass ein beschleunigtes Erreichen der Klimaneutralität durch Knappheiten auf dem Arbeitsmarkt ausgebremst werden könnte (Zentralverband des Deutschen Handwerks [ZDH], 2021).

Dies gilt gegenwärtig besonders für die energetische Gebäudesanierung, für die rund 100.000 zusätzliche Fachkräfte benötigt werden (Kenkmann & Braungardt, 2021), und den Ausbau der erneuerbaren Energien: „Allein durch einen stärkeren Ausbau der erneuerbaren Energien im Strombereich, der mit einer 65

%igen Emissionsreduktion vereinbar ist, ergeben sich knapp 60.000 zusätzliche Erwerbstätige im Jahr 2030 gegenüber dem bisherigen Zielpfad einer 55%igen Emissionsreduktion“ (Becker & Lutz, 2021, VII) bei aktuell rund 300.000 Beschäftigten in Deutschland in diesem Bereich (siehe weiterhin die projizierten globalen Beschäftigungszahlen der IRENA auf Seite 12).

Da sich der Cleantech-Sektor der erneuerbaren Energien (insbesondere Wind und Solar) seit dem Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im Jahr 2000 bereits dynamisch entwickelt hat – allerdings mit Höhen und Tiefen –, dürfte dies auch der Sektor sein, der heute bereits über die differenziertesten Tätigkeitsprofile verfügt. Einen Eindruck der technischen, planerischen sowie auf Markterschließung und Geschäftsmodelle abzielenden Tätigkeiten gibt Abbildung 6, in der exemplarisch Stellenausschreibungen der Plattform [www.greenjobs.de](http://www.greenjobs.de) aufgeführt und in Job-Clustern zusammengefasst sind.

**Abbildung 6: Job-Cluster im Bereich Erneuerbare Energien auf Basis einer exemplarischen Analyse von Stellenausschreibungen/Tätigkeitsprofilen auf der Plattform [www.greenjobs.de](http://www.greenjobs.de) (Stand: 15.11.2021).**



## Transformation der Wertschöpfung

Durch die Abkehr von fossilen Energien kann sich die globale Wertschöpfungs- und damit auch Industriestruktur ändern. Dies gilt nicht nur für die Neudefinition bestehender Prozesse oder die Etablierung neuer Strukturen, sondern ggf. auch für die globale Allokation von Industriestandorten. Da sich fossile Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle durch eine sehr hohe Energiedichte auszeichnen, spielen die Entfernungen zwischen ihrer Gewinnung und ihrer (industriellen) Nutzung kaum eine Rolle; die Transportkosten sind gleichsam zu vernachlässigen. So betreibt der koreanische Stahlkonzern POSCO das größte Stahlwerk der Welt in Gwangyang, obwohl Südkorea weder über Eisenerz noch über Kohlevorräte in nennenswertem Umfang verfügt. Noch vor einer Dekade wurde der Erfolg der koreanischen Stahlindustrie aufgrund der strategischen Ausrichtung auf die Boomregion Asien als „Gunst der Geografie“ gewertet (Kölling, 2021). Derartige Standorte könnten zukünftig zu den Verlierern der Dekarbonisierung gehören, da unter dem Eindruck erneuerbarer Energien nun die räumliche Nähe zwischen Energiebereitstellung und -nutzung in den Fokus rückt. Dabei wird deutlich, dass sich insbesondere im „globalen Süden“ aufgrund der erhöhten Sonneneinstrahlung, der Windverhältnisse und der Flächenverfügbarkeit Wind- und Sonnenstrom und mit ihnen grüner Wasserstoff deutlich kostengünstiger produzieren lassen als etwa auf der Nordhalbkugel mit ihren Zentren industrieller Produktion. Dies gilt auch für Deutschland, das inzwischen über eine ausgeprägte Akteurslandschaft beim Thema grüner Wasserstoff verfügt (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie [NOW GmbH], 2021b). Gemäß der im Sommer 2021 vorgestellten Teilanalyse des „H<sub>2</sub> Atlas-Afrika“ (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF], 2021b) können jährlich theoretisch bis zu 165.000 TWh grüner Wasserstoff allein in Westafrika hergestellt werden; das entspricht der mehr als hundertfachen Menge an grünem Wasserstoff, die Deutschland im Jahr 2050 voraussichtlich importieren müsste. Von diesen 165.000 TWh H<sub>2</sub> lassen sich gemäß den getroffenen Annahmen jährlich rund 120.000 TWh zu Kosten für unter 2,50 Euro pro kg herstellen. Zum Vergleich: Studien gehen davon aus, dass die Kosten für 1 kg H<sub>2</sub> in Deutschland auch im Jahr 2050 noch rund 3,80 Euro betragen werden (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF], 2021c). Mit Blick auf das Jahr 2030 wird jedoch festgestellt, dass die gegenwärtige Geschwindigkeit des Auf- und Ausbaus von grünen H<sub>2</sub>-Kapazitäten in

den Exportländern vermutlich nicht ausreichen wird, um den Bedarf in Deutschland zu decken (Egenolf-Jonkmanns et al., 2021). Wenngleich Energieautarkie auch in der Vergangenheit keine Option für Deutschland war und gegenwärtig eine Vielzahl von internationalen Wasserstoffpartnerschaften geschlossen werden, um den Bedarf zu decken, weisen Kritiker\*innen darauf hin, dass die Dekarbonisierung auch die nationalen Entwicklungspfade für die Industrie verändern und die politischen Entscheidungsträger\*innen zwingen könnte, ihre wirtschaftlichen Strategien zu überdenken, da das Ende der „Energieflutrate“ zu deutlichen Industrieverlagerungen führen könne (Hausmann, 2021). Das Phänomen der „Greenflation“ ist bereits deutlich erkennbar (Koch, 2022) und kann insbesondere für die energieintensiven Industrien<sup>7</sup> zu einer Herausforderung werden.

In Deutschland gilt die Stahlindustrie als ein prominentes Anwendungsfeld für die Nutzung grünen Wasserstoffs in Direktreduktionsanlagen anstelle von mit Koks betriebenen Hochöfen. Dabei ist der Wasserstoffbedarf jedoch gewaltig: Das Stahlwerk von ThyssenKrupp in Duisburg würde zweimal so viel Wasserstoff benötigen, wie das Gasometer im benachbarten Oberhausen fassen kann – und zwar pro Stunde (Böckmann, 2022, S. 13). ThyssenKrupp Steel, das Essener Energieunternehmen STEAG und der Dortmunder Elektrolyseanbieter Nucerca (ehemals ThyssenKrupp Uhde Chlorine Engineers) prüfen im Rahmen einer Machbarkeitsstudie den Aufbau einer gemeinsamen Wasserelektrolyse auf einem 15 ha großen Gelände in Duisburg-Walsum. Bei Umrüstung eines Hochofens wird mit einem Bedarf von 20.000 Tonnen grünem Wasserstoff pro Jahr gerechnet. Die schrittweise Umstellung der Anlagen bis zum Jahr 2050 lässt den Bedarf auf etwa 720.000 Tonnen pro Jahr ansteigen. Mit einer geplanten Leistung von 500 MW könnte die Elektrolyse vor Ort bis zu 75.000 Tonnen grünem Wasserstoff pro Jahr und damit immerhin rund 10 % des Bedarfs bereitstellen (Lohse, 2020).

Die Salzgitter AG erprobt bereits in dem Projekt SALCOS (Salzgitter Low CO<sub>2</sub> Steelmaking)<sup>8</sup> gemeinsam mit den Partnern Avacon und Linde in Salzgitter in der Praxis die lokale/regionale Erzeugung von grünem Wasserstoff aus Windkraft (30 MW installierte Leistung), der dann in Deutschlands zweitgrößtem Hüttenwerk zur Direktreduktion genutzt wird.

Aus den genannten Gründen scheint es wichtig, dass Deutschland auch die eigenen Kapazitäten zur Wasserstofferzeugung auf- und ausbaut (Nationale Orga-

<sup>7</sup> Für eine Übersicht siehe die Website <https://www.energieintensive.de/>

<sup>8</sup> Siehe die Website <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/>

nisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie [NOW GmbH, 2021b), um zukünftige Standortnachteile zumindest in den unweigerlich eintretenden Übergangsphasen zu vermeiden. Demgegenüber bietet die Aussicht auf ein „Powerhouse Africa“ unter dem Gesichtspunkt der SDGs die Möglichkeit, einen substanziellen Entwicklungsbeitrag für afrikanische Länder zu leisten; angesichts der stark wachsenden Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter bieten die erneuerbaren Energien und ihre Green Jobs eine dringend benötigte Beschäftigungsperspektive (Krichewsky-Wegener et al., 2020). Folgerichtig unterstützt Deutschland den Aufbau von Kompetenzen im Bereich Wasserstoffökonomie in den 15 ECOWAS-Staaten mit dem „International Master Program in Energy and Green Hydrogen“; die RWTH Aachen und das Forschungszentrum Jülich sind Partnerinstitutionen in Deutschland (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF], 2021a).

### **Auswirkungen auf Beschäftigte und Beschäftigung**

Auch in Deutschland ist festzustellen: Das Thema grüner Wasserstoff wird gegenwärtig noch deutlich von einer akademischen Ausbildungs- und Beschäftigungsperspektive gesehen. Es gibt inzwischen einige (berufsbegleitende) Studiengänge zum Thema, die insbesondere technische und wirtschaftliche Aspekte kombinieren, aber auch darüber hinausgehen. So umfasst der zum April 2022 beginnende berufsbegleitende Masterstudiengang „Wasserstofftechnologie und -wirtschaft“ an der DIU auch Fragen der Akzeptanz, der Sicherheit und des Rechtsrahmens. Die Lehrmodule entsprechen insgesamt 60 ECTS<sup>9</sup>-Punkten (Dresden International University, 2022).

Eine Analyse von Stellenausschreibungen ergab, dass die am häufigsten nachgefragten Profile aus den Bereichen „Technische Forschung und Entwicklung“, „Maschinenbau und Betriebstechnik“, „Elektrotechnik“, „Chemie“ und „Energietechnik“ stammen. Ähnlich wie im Bereich der Wind- und Solarenergie (Abbildung 4) kommen flankierend noch Berufe der „Unternehmensorganisation und -strategie“, „Ver- und Entsorgung“ sowie „Einkauf und Vertrieb“ hinzu. Insgesamt entsprechen rund 90 % der Stellen mit einer Nachfrage nach Wasserstoffkompetenzen in ihren Anforderungsniveaus „fachlich ausgerichteten Tätigkeiten“ und „hochkomplexen Tätigkeiten“ (Grimm et al., 2021, S. 4).

Ebenso wenden sich Weiterbildungsangebote überwiegend an „technische Fachkräfte, insbesondere Ingenieure, staatlich geprüfte Techniker und Meister, welche aufbauend auf ihrer beruflichen Ausbildung

und bereits erworbener Berufserfahrung Expertenwissen im Bereich der Zukunftstechnologie Wasserstoffsysteme erlangen möchten“ (Heinze Akademie, 2021, S. 2). Auffallend ist auch hier, dass die Weiterbildung zum Thema (grüner) Wasserstoff explizit Module zur Digitalisierung einschließt; eine exemplarische Grundstruktur ist dabei wie folgt:

#### **Data-Science, Digitalisierung und Innovation**

- Data-Science für Entwicklungs- und Arbeitsprozesse nutzen
- Digitalisierungsszenarien erstellen und nutzen
- Innovationen managen

#### **Nutzung, Modellierung und Simulation von Wasserstoffsystemen**

- Prozesse und Verfahren der Wasserstofftechnologie nutzen
- Behälter und Apparate für die Wasserstofftechnologie auslegen
- Wasserstoff nutzen
- Modellierung und Simulation von Wasserstoffsystemen

#### **Konfiguration, Analyse und Optimierung von Wasserstoffanlagen**

- Wasserstoffanlagen konfigurieren
- Wasserstoffsysteme ökonomisch und ökologisch bewerten
- Wasserstoffanlagen rechtlich und wirtschaftlich absichern (Heinze Akademie, 2021, S. 3)

Ein Beispiel für die (technischen/digitalen) Anforderungsprofile von Cleantech-Unternehmen im Bereich Energie-/Wasserstofftechnologien zeigt Abbildung 7. Ein zentrales Element der Qualifikationsanforderung ist das Interesse an nachhaltigen Lösungen in Kombination mit ausgeprägten technischen Fachkenntnissen sowie Fähigkeiten zum systemischen und vernetzten Denken, zur Selbstorganisation und zur aktiven Kommunikation. Die bestehenden wissenschaftlich-technischen Inhalte erfahren durch die Anwendungsorientierung eine zusätzliche Aufwertung – sowohl die Qualität der Arbeit als auch die Vergütung können als hoch eingeschätzt werden.

<sup>9</sup> European Credit Transfer System, das dem Bologna-Prozess zugrunde liegende Anrechnungssystem zur länderübergreifenden Qualitätssicherung und Vergleichbarkeit von Studieninhalten.

**Abbildung 7: Zwei exemplarische Stellenausschreibungen (Stand: 26.11.2021) eines Unternehmens, das im Bereich Antriebs- und Energietechnik tätig ist und sich immer stärker zu einem Cleantech-Unternehmen („Vom Dieselgenerator zur Brennstoffzelle“) wandelt. Als weiteres Profil wurde in diesem Zusammenhang ein „Cyber-Security-Experte (m/w/d) für nachhaltige Antriebs- und Energielösungen“ ausgeschrieben (Profil nicht gezeigt).**

Wir entwickeln umweltfreundliche, CO<sub>2</sub>-freie Technologien und klimaschonende Gesamtlösungen und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Klimawende und zur Sicherung einer nachhaltigen Zukunft. Das sich entwickelnde Wasserstoffökosystem mit Brennstoffzellen, Wasserstoffmotoren, Batteriespeichern und der synthetischen Herstellung von Kraftstoffen mit Energie aus erneuerbaren Quellen bietet uns fantastische Möglichkeiten, die Zukunft aktiv zu gestalten: hybride oder rein elektrische Antriebslösungen für Schiffe und große Landfahrzeuge sowie CO<sub>2</sub>-freie brennstoffzellenbasierte Energiesysteme oder Microgrids, die Sonnenkollektoren, Windturbinen, Batterien und Gasmotoren umfassen. Dafür entwickeln wir auch Steuerung und Automatisierung als Schlüsselfunktionen im eigenen Haus.

#### **Software-Entwickler (m/w/d) für nachhaltige Energie- und Antriebslösungen**

##### **Was wir Ihnen bieten:**

- Wir bieten verschiedene anspruchsvolle Positionen für eine gemeinsame Zukunft: Als Teil unseres Entwicklungsteams im Software-Engineering leisten Sie mit uns Pionierarbeit. Sie arbeiten in der global tätigen Technologiegruppe in einem dynamischen Umfeld in funktionsübergreifenden Teams, die sich aus hochmotivierten internen Mitarbeitern und externen Entwicklungspartnern zusammensetzen.
- Mit uns arbeiten Sie an der Funktionsentwicklung, Software-Engineering, Software-Architektur sowie Machine-Learning und Optimierungs-Algorithmen.
- Je nach Auftragsanforderungen und Kundenspezifikationen entwickeln Sie Software-Anwendungen oder Sie unterstützen die Entwicklung neuer, innovativer Software-Funktionen und Software-Optimierung.
- Sie kümmern sich um die Implementierung der Software und die Prüfung der Übereinstimmung mit den Projektanforderungen.
- Sie sind verantwortlich für die Kompatibilität innerhalb verschiedener Systeme und die Lösungsfindung bei der App- und Programmentwicklung.

##### **Was wir uns wünschen:**

- Sie verfügen über ein erfolgreich abgeschlossenes Studium im Bereich Informatik, Mechatronik, Elektroingenieur oder eine vergleichbare Qualifikation.
- Sie bringen im besten Fall einschlägige Berufserfahrung im Bereich Software-Entwicklung und/oder Software-Architektur mit.
- Sie verfügen über Kenntnisse der wesentlichen Prinzipien beim Entwurf von Software-Architekturen, Plattformen, Libraries in den Steuergeräten und Sie kennen die Programmiersprachen C++, C#, Java, Python und Matlab / Simulink, besser als wir.
- Sie kommunizieren problemlos auf Deutsch und Englisch, sowohl in persönlichen Gesprächen als auch im Schriftverkehr. Je ausgeprägter Ihre Deutsch- und Englischkenntnisse sind, desto besser.
- Sie begeistern sich für die Entwicklung von nachhaltigen Zukunftstechnologien im Antriebs- und Energieerzeugungsbereich und haben den eigenen Antrieb, diese in den Markt zu bringen.

#### **Elektroingenieur (m/w/d) nachhaltige Energie- und Antriebslösungen**

##### **Was wir Ihnen bieten:**

- Wir bieten verschiedene anspruchsvolle Positionen für eine gemeinsame Zukunft: Als Teil unseres Entwicklungsteams im Bereich Elektrik und Elektronik leisten Sie mit uns Pionierarbeit. Sie arbeiten in der global tätigen Technologiegruppe in einem dynamischen Umfeld in funktionsübergreifenden Teams, die sich aus hochmotivierten internen Mitarbeitern und externen Entwicklungspartnern zusammensetzen.
- Sie partizipieren an der Mitgestaltung von Lösungen im Team durch Erarbeitung und Interpretation systemseitiger Anforderungen inklusive Auslegung von Elektrik/Elektronik-, Automations- und Leistungselektroniksystemen.
- Je nach Stelle sind Sie auch für das Aufsetzen und die Durchführung von Tests und Validierungsstrategien (inkl. MIL & HIL) zuständig.

##### **Was wir uns wünschen:**

- Sie verfügen über ein erfolgreich abgeschlossenes Studium der Energietechnik, Elektrotechnik oder einen vergleichbaren Abschluss.
- Idealerweise konnten Sie bereits Berufserfahrung in einem oder mehreren der folgenden Bereiche/Disziplinen sammeln:
  - Elektrik/Elektronik und Automations-Systeme & Software, Systemarchitektur und Systemintegration
  - Entwicklung von leistungselektrischen Komponenten und Energiespeichersystemen (z. B. Elektromotoren, Leistungselektroniken, Energiespeichersysteme)
  - Testdurchführung und Teststrategie
- Sie begeistern sich für die Entwicklung von nachhaltigen Zukunftstechnologien im Antriebs- und Energieerzeugungsbereich und haben den eigenen Antrieb, diese in den Markt zu bringen. Systematisches und vernetztes Denken und eine eigenverantwortliche Arbeitsweise zeichnen Sie aus.
- Sie kommunizieren problemlos auf Deutsch und Englisch, sowohl in persönlichen Gesprächen als auch im Schriftverkehr. Je ausgeprägter Ihre Deutsch- und Englischkenntnisse sind, desto besser.

Insgesamt werden Fähigkeiten für die Herstellung von technischen Systemen und Anlagen zur Produktion, Speicherung, Verteilung und Nutzung von grünem Wasserstoff und die damit verbundene Systemintegration benötigt. Gleiches gilt für Fachpersonal zum Betrieb und zur Wartung derartiger Systeme und Anlagen. Dabei ist zu erwarten, dass es zu einer Aufwertung bestehender Tätigkeiten kommt, die mit besseren Arbeitsbedingungen und/oder einer höheren Entlohnung einhergeht. So unterstreicht der Betriebsrat von Alstom in Salzgitter, wo die ersten Wasserstoffzüge Europas entwickelt wurden und nun gebaut werden, dass diese technisch aufwendiger sind als Dieselzüge. Aufgrund der notwendigen höheren Qualifikationen „werden wir auch über neue Eingruppierungen reden müssen“ (Böckmann, 2022); dies gilt sowohl für Beschäftigte, die entsprechend weiterqualifiziert wurden/werden, als auch für Mitarbeiter\*innen, die neu gewonnen werden. Bei Siemens am Standort Krefeld wurde eine neue Generation von Wasserstoffzügen entwickelt. „Wir haben eine dreifach längere Lebensdauer, eine um 50 % höhere Leistungsdichte und bis zu 5 % mehr Wirkungsgrad erreicht“, erläutert De-Niang Maria Peymandar. Die 36-jährige Chemikerin, vom Konzern als eine von 15 Forscher\*innen für bahnbrechende Innovationen ausgezeichnet, ergänzt: „Bei grünem Wasserstoff haben wir ein CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial von etwa 520 Tonnen pro Zug und Jahr“ (Magenheim-Hörmann, 2022).

Mit Blick auf den Markthochlauf bis zum Jahr 2030 wird festgestellt, dass „[Übersetzung durch die Autor\*innen] das Wachstum in der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie zu weitreichenden neuen Beschäftigungsmöglichkeiten führen [wird], die in einer Vielzahl von Branchen, Fertigkeiten, Aufgaben und Einkünften entstehen werden. Viele dieser Arbeitsplätze existieren derzeit noch nicht und besitzen keine in offiziellen Klassifikationen definierten Berufsbezeichnungen. Darüber hinaus erfordern viele dieser Arbeitsplätze andere Fähigkeiten und andere Ausbildungsinhalte als derzeit bestehende, sodass die entsprechenden Anforderungen neu bewertet werden müssen, um sicherzustellen, dass dieser schnell wachsende Teil der Wirtschaft über ein ausreichendes Angebot an ausgebildeten und qualifizierten Arbeitskräften verfügt“ (Bezdek, 2019, S. 1).

Auch bei anderen Anwendungen, etwa der Umstellung von Fabriken auf eine klimaneutrale Energieversorgung auf Basis von grünem Wasserstoff, wird weitgehend Neuland betreten, wie die Ergebnisse durch Praxisinterviews mit Expert\*innen des Wasserstoff Campus Salzgitter ergeben haben. Insbesondere bei der Herstellung, der Installation, der Abnahme

und der Wartung muss das oftmals über verschiedene Institutionen und auch Standorte verteilte Wissen zusammengeführt werden. So müssen beispielsweise die Kesselhäuser zur Wasserstoffspeicherung entsprechend „Wasserstoff-Readiness“ ausgestattet und geprüft werden, nach Möglichkeit geschweißte und nicht geschraubte Rohrverbindungen genutzt, das Verhalten mit möglichen anderen Gasen ermittelt, die Systeme mit Gassensoren etc. ausgestattet und funkenfreie elektrische Systeme installiert werden. Mit Blick auf die Regelsetzung ist der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) ein zentraler Akteur, speziell wenn es um die Etablierung einer verzweigten Infrastruktur geht oder etwa die Beimischung von Wasserstoff in das vorhandene Erdgasnetz.<sup>10</sup>

Auf der Verwaltungsseite sind mit Blick auf eine Wasserstoffökonomie somit regulatorische, rechtliche und administrative Kenntnisse zur Anwendung in Zulassungsverfahren, Abnahmeprozessen etc. nötig. Einige Hochschulen bieten Bachelor- und Masterstudiengänge mit stark technischer Ausrichtung an. Planerische, regulatorische, rechtliche oder auch ökonomische Aspekte werden darin meist nur angeschnitten. Dabei zeigen die Analysen und Expert\*inneninterviews, die im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurden, dass viele Anwendungen weiterhin Projekte sind, für die es kaum standardisierte Grundlagen gibt. Ein Beispiel für die Bereitstellung des notwendigen und praktisch nutzbaren „Allgemeinwissens Wasserstoff“ ist der Genehmigungsleitfaden für Wasserstofftankstellen (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie [NOW GmbH], 2021a), in dem die wesentlichen Erfordernisse und Schritte der einschlägigen Verfahren zusammengefasst sind.

Bei der Installation von Elektrolyseuren ergeben sich tradierte Zulassungshürden. Für Wasserstofflager sind aufwendige Genehmigungsverfahren inklusive Öffentlichkeitsbeteiligung erst bei Lagermengen ab 30 Tonnen erforderlich. Dennoch halten die Genehmigungsbehörden bisher überwiegend auch für kleine Elektrolyseure mit deutlich geringeren H<sub>2</sub>-Mengen derartige Verfahren für erforderlich. Grund dafür sind unscharfe Formulierungen in der EU-Industrieanlagenrichtlinie 2010/75/EU und deren Umsetzung in nationales Recht (BlmSchV). Die entsprechenden Genehmigungsanforderungen wurden ursprünglich für Dampfreformierungsanlagen formuliert, mit denen (grauer) Wasserstoff bislang überwiegend hergestellt wird und die mit einem Elektrolyseur nicht vergleichbar sind, da es sich um große Industrieanlagen handelt, in denen Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird. Weil es jedoch keine spezifischen Regelungen für Elektrolyseure gibt, wer-

<sup>10</sup> Siehe die Website <https://www.dvgw.de/leistungen/regeln-und-normen>

den ersatzweise die bestehenden, aber unpassenden Genehmigungsverfahren angewendet (Gaßner, 2021). Die Kompetenzentwicklung muss deshalb mit einer Anpassung des Regulierungsrahmens einhergehen.

### Wasserstoff als Beruf

Parallel zur emergenten Technologieentwicklung/-anwendung erfolgt eine Differenzierung der Qualifikationen. Dabei ist festzustellen, dass die grünen Qualifikationen im Bereich der Cleantech-Industrie und damit insbesondere im Engineering von Apparaturen, Anlagen und Prozessen und Verfahren gefordert sind (siehe oben), indem beispielsweise die wasserstofferzeugenden Elektrolyseure entwickelt und hergestellt werden.<sup>11</sup> Dabei werden Elektrolyseure so konstruiert, dass sie im operativen Betrieb mit einer geringen Parametrisierung auskommen. Denn obwohl sich insbesondere PEM-Systeme durch ein dynamisches Betriebsverhalten auszeichnen (Wechsel von Minimallast zu Nominallast – entspricht einer H<sub>2</sub>-Produktion von 20 bzw. 100 % – innerhalb von 30 Sekunden und weniger), wird im Regelbetrieb eine möglichst konstante Last auf dem Niveau der Nominalleistung angestrebt, typischerweise mit Wirkungsgraden um die 75 %. Schwankungen in der Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem Strom werden dabei bevorzugt durch Batteriespeicher o. Ä. abgepuffert. Somit ist nach Einschätzung der Expert\*innen gegenwärtig kein Tätigkeitsprofil oder gar Berufsbild „Elektrolyseur Operator (m/w/d)“ absehbar.

Für die Systemintegration von grünem Wasserstoff in das regionale, nationale und internationale System der Energieversorgung im Sinne des in Abbildung 8 dargestellten „Internets des Wasserstoffs“ (Kamberi & Kergel, 2021) sind zukünftig hingegen vielfältige Qualifikationen der Projektierung und Planung, Entwicklung und Herstellung, Zulassung und Genehmigung, Anpassung und Installation, Abnahme, Wartung, Sicherheitsüberprüfung, Notfallbekämpfung etc. notwendig. Aufgrund der volatilen Stromverfügbarkeiten wird es insbesondere bei kleinräumigen Energiesystemen darauf ankommen, Ausgleichs- und Stabilisierungsmechanismen zu implementieren, die für eine optimale Verfügbarkeit sorgen und dabei sowohl optimierte Einzelprozesse umfassen als auch Ausgleichsmechanismen in Form von Lastverteilungen (Herunterfahren bestimmter Verbraucher bei Überlast, Verschieben

von planbaren Lastspitzen im Tagesverlauf etc.). Somit kommt Mess- und Steuerungssystemen eine zentrale Bedeutung zu, was dazu führt, dass der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur (Erzeugung, Transport, Speicherung, Nutzung) mit einer umfassenden Digitalisierung von der Erzeugung grünen Stroms bis zur energetischen oder stofflichen Nutzung von grünem Wasserstoff einhergeht.

Im Auf- und Ausbau dieser doppelten Struktur ist einerseits ein hohes technisches H<sub>2</sub>-Know-how erforderlich und andererseits eine hohe digitale Entwickler- und Anwendungskompetenz (siehe dazu auch Abschnitt 6.1). Das nötige Wissen wird sich nicht auf (akademisch ausgebildete) Ingenieurstätigkeiten beschränken, sondern bis auf die Ebene des Handwerks reichen. Für die grundständige Berufsausbildung bietet sich an, im Zuge eines zukünftigen Roll-outs von Wasserstoffanwendungen etablierte Berufsbilder wie etwa Gas- und Wasserinstallateur (m/w/d), Anlagenmechaniker (m/w/d), Rohrvorrichter (m/w/d), Rohrnetzbauer (m/w/d) oder Gas- und Wärmenetzmonteur (m/w/d) mit entsprechenden Zusatzqualifikationen im Rahmen der bestehenden Ausbildungsordnungen zu versehen.<sup>12</sup> Vorbild hierfür kann der Bereich der erneuerbaren Energien sein, in dem sich Aus- und Weiterbildungsgänge zu Berufsbildern wie Technischer Assistent (m/w/d) regenerative Energietechnik/Energiemanagement, Servicemonteur (m/w/d) Windenergieanlagentechnik, Energiewirt (m/w/d) Solar oder Techniker (m/w/d) Windenergie-technik herausgebildet haben (siehe dazu auch Tabelle 1 auf Seite 51). Auch in der jüngsten (Stand: 21.12.2021) der in Deutschland beschlossenen regionalen Wasserstoffstrategien des Landes Bremen heißt es dazu übereinstimmend: „Wesentlicher Baustein einer vorausschauenden Fachkräftesicherung ist die Anpassung bestehender Berufsbilder, in denen klimaschutzrelevante Inhalte in Lehrplänen und Ausbildungscurricula deutlich stärker Berücksichtigung finden. Um künftige Fachkräftebedarfe im Bereich Wasserstoff decken zu können, gilt es, Wasserstofftechnologien als Zusatzqualifikationen in bestehende Berufsbilder zu integrieren.“ (Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau et al., 2021, S. 23) Erste Schritte einer H<sub>2</sub>-spezifischen Erweiterung klassischer Ausbildungsgänge erfolgen beispielsweise im Zuge des BMBF-geförderten Projekts „H<sub>2</sub>-Well“<sup>13</sup> im thüringischen Sonnenberg, da in den Lehrplänen bisher

<sup>11</sup> Ein typischer Elektrolyseur mit 1 MW Leistung hat die Ausmaße eines 40 Fuß großen Schiffscontainers und inkl. Auf- und Anbauten von etwa 12 m x 5 m x 5 m. Für höhere Leistungen werden im Regelfall mehrere Elektrolyseure zusammengeschaltet, wodurch sich der Aufwand für die nötige Versorgungsinfrastruktur reduziert. Die benötigte Wasserqualität entspricht grundsätzlich der von Trinkwasser.

<sup>12</sup> Siehe hierzu das Angebot von BERUFENET unter <https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/faces/index?path=null/berufsfelder>

<sup>13</sup> Siehe die Website <https://www.h2well.de>



keine Grundlagenausbildung zu Wasserstofftechnologien in dualen MINT-Ausbildungsberufen existiert, wie z. B. Elektroniker (m/w/d), Kfz-Mechatroniker (m/w/d) oder Mechatroniker (m/w/d) (Landratsamt Sonneberg & Staatliche Berufsbildende Schule Sonneberg, 2019, S. 4).

Wichtig scheint dabei zu sein, dass parallel zu den regionalen Innovations- und Wertschöpfungsökosystemen auch Bildungsökosysteme entstehen zur „Vernetzung unterschiedlicher Akteure in lokalen Bildungslandschaften (bspw. zwischen beruflichen Schulen, Betrieben und nonformalen Bildungsträgern) und einer dahingehenden Ausrichtung der Lernortkooperationen zwischen Berufsschulen und Betrieben. Mit dem Ziel der Stärkung regionaler Wertschöpfungsketten, der Identifikation mit der Region und der Entwicklung lokaler Bildungslandschaften, sprechen sich die Befragten für eine Intensivierung der lokalen Kooperation und Vernetzung aus“ (Singer-Brodowski & Grapentin-Rimek, 2018, S. 5).

Da es für eine grundständige Berufsausbildung „Wasserstoff als Beruf“ noch keine breite Nachfrage gibt, liegt der Fokus somit zunächst auf gezielten Weiterbildungsmaßnahmen. Um auf den unweigerlich, doch vorerst nur schrittweise entstehenden Bedarf auch an nichtakademischen Fachkräften angemessen reagieren zu können, wird es nötig, ein ausreichend großes und flexibles Angebot an Maßnahmen zur Weiterentwicklung bestehender Fähigkeiten und Kompetenzen zu etablieren (Re- und Upskilling), wie dies beispielsweise am Wasserstoff Campus Salzgitter realisiert wird. Gemeinsam mit der Fraunhofer Academy entsteht hier ein vernetztes Bildungsangebot der Region (siehe oben). Die Module nutzen eine digitale Lernplattform und kombinieren diese mit „instructor-led“- und „hands-on“-Elementen, um neben den Fähigkeiten auch die entsprechenden Fertigkeiten und manuellen Kompetenzen zu entwickeln. Das Lernziel für das Modul „Basiswissen“ wird wie folgt zusammengefasst: „Am Ende der Weiterbildung werden Sie die systemischen Wirkzusammenhänge in der Wasserstoffwirtschaft verstehen und analysieren können und potenzielle Anwendungen für Ihren Betrieb beurteilen können.“ (Fraunhofer Academy, 2022a) Weitere Module behandeln die Technologien entlang der Wertschöpfungskette, gesellschaftliche Themen, den rechtlichen Rahmen, Genehmigungsverfahren und Sicherheitsanforderungen (Fraunhofer Academy, 2022b). Damit richten sich diese Weiterbildungsangebote in erster Linie an Anwenderunternehmen und öffentliche Verwaltungen, nicht aber an Cleantech-Unternehmen als Anbieter von H<sub>2</sub>-Lösungen.

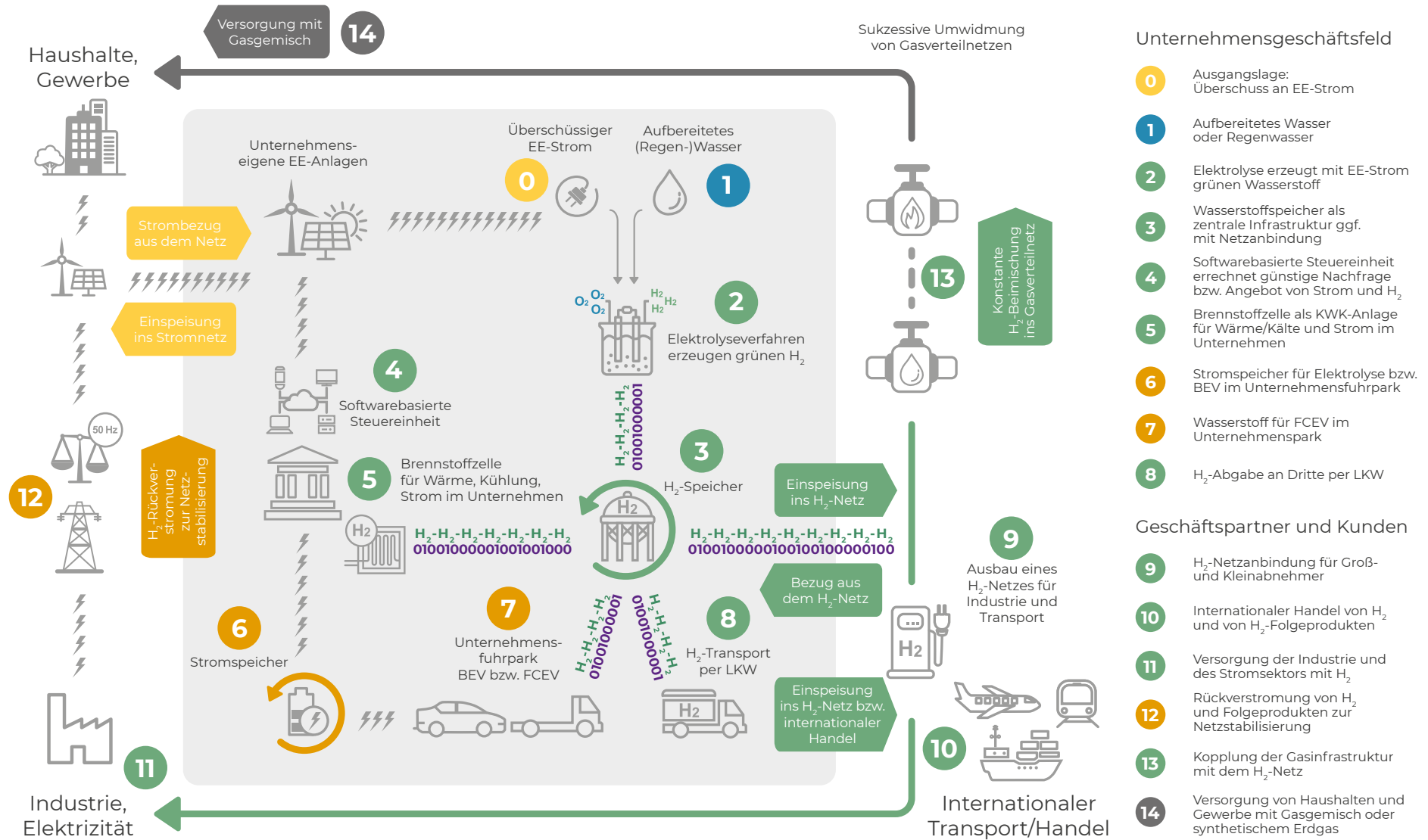
## Die Diffusion von grünen Fähigkeiten

Aufgrund des „werdenden“ Charakters der grünen Wasserstoffökonomie kommt es darauf an, die Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen für Unternehmen so zu gestalten, dass sie auf sich kurzfristig ergebende Erfordernisse eingehen können. Die Entwicklung eines Sets von Fähigkeiten dürfte insbesondere für den noch mehrjährigen Hochlauf einer wettbewerbsfähigen grünen Wasserstoffökonomie sehr relevant sein, um flexibel auf technische und regulatorische Änderungen reagieren zu können. Zentral werden dabei Fähigkeiten zur Problemlösung und zum eigenständigen Erschließen von Wissensquellen sein, um die individuellen Fähigkeiten der fortschreitenden Entwicklung anpassen zu können (Bovenshulte, 2021) und so einen Beitrag zur entsprechenden „Literacy“ (siehe Abschnitt 6 auf Seite 72) zu leisten. Dass darüber hinaus ein Arbeitsmarkt mitsamt der Notwendigkeit einer eigenständigen Ausbildung „Wasserstoff als Beruf“ entsteht, ist insbesondere bei einer Markterschließung jenseits von industriellen Anwendungen absehbar: Prognosen erwarten unter den günstigsten Bedingungen bis zu 800.000 Arbeitsplätze, die im Jahr 2050 in Deutschland direkt und indirekt in der grünen Wasserstoffwirtschaft entstehen werden (Merten et al., 2020). Dies bedingt jedoch, dass eine umfassende Wasserstoffinfrastruktur geschaffen wird und grüner H<sub>2</sub> auch in großskaligen Endverbraucherkontexten zum Einsatz kommt – etwa in Form von Brennstoffzellen in Wohngebäuden oder in Nutzfahrzeugen (siehe dazu auch Abschnitt 5.2.1). Mit der qualitativen und vor allem quantitativen Ausweitung des Anwendungsspektrums und seiner zunehmenden „Universalität“ aufgrund der Sektorkopplung wird sich ein dynamischer Aus- und Weiterbildungs- sowie Arbeitsmarkt für Wasserstoff entwickeln, der neben der akademischen insbesondere auch die berufliche Qualifizierung und Kompetenzentwicklung inklusive des Handwerks betrifft.

## 4.2 Nachhaltige, erdölreduzierte Chemie- und Kunststoffindustrie

Die chemische Industrie ist gemeinsam mit Automobil und Maschinenbau Teil des industriellen Kerns Deutschlands – dies gilt sowohl für den Umsatz als auch für die Beschäftigung (Priesack et al., 2019). Ergänzend dazu ist die KMU-geprägte Kunststoffindustrie mit über 322.000 Beschäftigten (Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V., 2020a) ebenfalls ein wichtiger Wirtschafts- und Arbeitsmarktfaktor. In den mehr als 3.000 Unternehmen (ab 20 Beschäftigte) wurde im Jahr 2018 ein Umsatz von fast 66 Milliarden Euro erwirtschaftet (Dispan & Mendler, 2020, S. 102). Im Jahr 2019 wurden allein in Deutschland 14,6 Millionen Tonnen Kunststoff produziert. Die drei größten Abnehmerbranchen für Kunststoffe sind (Stand: 2019) die Verpackungs-

Abbildung 8: Schema für ein „Internet des Wasserstoffs“ zur Systemintegration einer vernetzten Wasserstoffökonomie.



industrie mit 30,7 %, das Baugewerbe mit 25,5 % (siehe hierzu auch Abschnitt 4.3) und die Fahrzeugindustrie mit 10,6 % (siehe Abschnitt 4.2) (Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V., 2020b).

Die chemische und die Kunststoffindustrie sind traditionell von einer energetischen und stofflichen Nutzung fossiler Rohstoffe geprägt – maßgeblich Erdöl und Erdgas –, sodass die Klimaneutralität<sup>14</sup> die gesamte Basis und das Geschäftsmodell der Industrie betrifft. Dabei haben jüngste Untersuchungen ergeben, dass der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der globalen Kunststoffherstellung deutlich höher sein dürfte als bisher angenommen; der Grund liegt insbesondere in der Nutzung von Kohle für die Strom- und Wärmeerzeugung: Die kohlebasierten Emissionen haben sich seit 1995 vervierfacht und verursachten 2015 fast die Hälfte des kunststoffbezogenen Kohlenstofffußabdrucks und der gesundheitsrelevanten Feinstaubemissionen. Die kunststoffbedingten Kohlenstofffußabdrücke des chinesischen Verkehrssektors, der indonesischen Elektronikindustrie und des indischen Bausektors haben sich seit dem Jahr 1995 mehr als verfünffacht. Momentan werden 99 % der globalen Kunststofferzeugnisse aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Nur rund 1 % des Marktes nehmen Biokunststoffe ein, wobei diese nicht zwangsweise aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, sondern vielfach auch auf fossilen Rohstoffen basieren können. Im Jahr 2015 verursachten Kunststoffe 4,5 % der weltweiten Treibhausgasemissionen. Zudem werden 6 % des weltweiten Kohlestroms für die Kunststoffproduktion verwendet. Die Europäische Union und die Vereinigten Staaten verbrauchen als Folge der globalen Arbeitsteilung zunehmend Kunststoffe, die in kohlebasierten Volkswirtschaften hergestellt werden. Im Jahr 2015 waren 85 % der Arbeitskräfte, die für die Herstellung der von der Europäischen Union und den Vereinigten Staaten verbrauchten Kunststoffe benötigt wurden, im Ausland beschäftigt, aber 80 % der damit verbundenen Wertschöpfung wurde im Inland erzielt. Da einkommensstarke Regionen die energieintensiven Schritte der Kunststoffproduktion in kohlebasierte Volkswirtschaften verlagert haben, sind Investitionen in erneuerbare Energien in der gesamten Kunststoffwertschöpfungskette entscheidend für die nachhaltige Produktion und den nachhaltigen Verbrauch von Kunststoffen (Cabernard et al., 2021). Diese Umstände müssen auch beim Engagement deutscher und europäischer Unternehmen in Ländern betrachtet werden, die auf fossile Energien und hier insbeson-

dere auf Kohle setzen, auch wenn das Engagement auf Gründen des Marktzugangs beruht. So strebt der Chemiekonzern BASF, der seit dem Jahr 2019 einen Verbundstandort in Zhanjiang in der südchinesischen Provinz Guangdong aufbaut – der weltweit drittgrößte Unternehmensstandort nach Ludwigshafen und Antwerpen –, explizit die Nutzung erneuerbarer Energien an. Allerdings könnte die Bereitstellung der benötigten Menge grünen Stroms in der kohledominierten Energieerzeugung Chinas eine besondere Herausforderung darstellen (Bork & Ernhofer, 2021).

### Transformation der Wertschöpfung

Um die fossilen Rohstoffe zu reduzieren oder perspektivisch sogar zu ersetzen, bieten sich prinzipiell verschiedene Wege an, von denen voraussichtlich keiner allein ausreichen wird, um einen umfassenden Wandel zu vollziehen. In Abbildung 9 sind diese Wege als Stoffströme schematisch zusammengefasst. Dabei wird deutlich, dass sich die Betrachtung nicht auf die in sich schon sehr ausdifferenzierte und vielfältige chemische/Kunststoffindustrie beschränken kann, sondern die Bereitstellung von Roh- und Ausgangsstoffen (inkl. Energie) ebenso berücksichtigen muss, wie die weitere Verarbeitung, Nutzung und Rückgewinnung ihrer Produkte in Anwenderindustrien wie der Automobilindustrie. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der erneuerbaren Energien: Zum einen benötigt die chemische und Kunststoffindustrie angesichts der angestrebten Klimaneutralität zukünftig große Mengen erneuerbarer Energien (Freytag, 2021), zum anderen liefert die chemische und Kunststoffindustrie wichtige Materialien für den Bau etwa von Windenergieanlagen. Deren Rotoren bestehen aus Verbundwerkstoffen (GFK etc.), für die es aktuell keinen Prozess zur annähernd sortenreinen Wiedergewinnung der Materialien gibt und die einstweilen nur durch Pyrolyse (Hochtemperaturbehandlung unter Luftausschluss) in Form von Pyrolyseöl und Wiedereinbringung als Rohstoff in die chemische Wertschöpfungskette oder durch mechanische Zerkleinerung („Schreddern“) in Form von minderwertigem Füllmaterial oder von Ersatzbrennstoff verwertet werden können. Weitere Verfahren etwa unter Nutzung von Tensiden (waschaktive Substanzen, Lösungsvermittler), wie sie beispielsweise von dem Cleantech-Unternehmen Seperatec GmbH<sup>15</sup> entwickelt wurden, oder die Herstellung eines Komposits mittels patentierten Verfahrens der finnischen WIMAO Ltd.,<sup>16</sup> stehen an der Schwelle zur großskaligen Anwendung (Knappe et al., 2021).

<sup>14</sup> Angesichts des unverzichtbaren chemischen Elements Kohlenstoff in chemischen Produkten kann hier kaum von einer Dekarbonisierung gesprochen werden.

<sup>15</sup> Siehe die Website <https://www.seperatec.de/de/technologie.html>

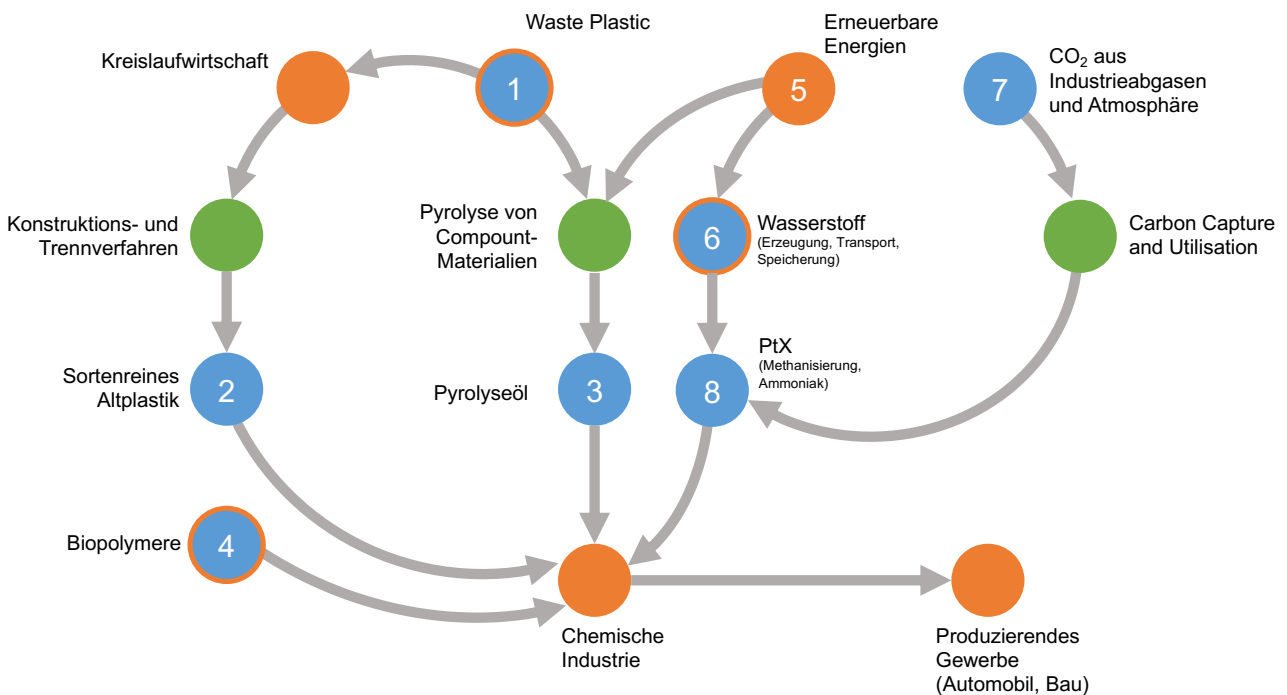
<sup>16</sup> Siehe die Website <https://www.wimaoremat.fi/>

Bei der Pyrolyse von Kunststoffen/Kunststoffgemischen werden diese in flüssige, gasförmige und feste Pyrolyseprodukte umgewandelt. Dabei handelt es sich in erster Linie um Pyrolyseöle, die fossiles Erdöl als Ausgangsstoff (Feedstock) für die Polymerchemie ersetzen (Chemietechnik, 2020). Darüber hinaus können Pyrolysegase, Koks und Kondensate als eigenständige Produkte für die Petrochemie oder Energiegewinnung gewonnen werden. Derartige Anlagen stehen an der Schwelle zur industriellen Anwendung und werden von Cleantech-Firmen wie der ARCUS Greencycling Technologies GmbH<sup>17</sup> oder der Pyrum Innovations AG<sup>18</sup> entwickelt. Der Kunststoffpyrolyse wird ein erkennbares Potenzial bei der Verwirklichung geschlossener Stoffkreisläufe und damit der Reduzierung von Treibhausgasen in der chemischen und Kunststoffindustrie zugesprochen (Chemietechnik, 2020). Doch wenngleich es das auch im Koalitionsvertrag „Mehr Fortschritt wagen“ aufgeführte chemische Recycling (SPD, B90/Die Grünen, FDP, 2021, S. 43) mittels Pyrolyse möglich macht, auch Stoffgemische wieder dem chemischen Wertschöpfungsprozess zuzuführen, ist ein Nachteil des Verfahrens der hohe Energiebedarf (Gersmann, 2021), der mit Blick auf die Defossilierung zwingend aus regenerativen Quellen ge-

deckt werden muss und nicht etwa durch Erdgas oder die gewonnenen Pyrolyseöle selbst.

Ein weiterer wichtiger Baustein der Dekarbonisierung der chemischen Produktion ist die Nutzung von grünem Wasserstoff (vgl. Abschnitt 4.1). So hat der in Dormagen ansässige Spezialchemiekonzern Covestro Anfang des Jahres 2022 einen Vertrag über die Lieferung von 100.000 Tonnen grünem Wasserstoff pro Jahr – eine bislang einmalige Größenordnung – mit dem australischen Erzeuger Fortescue Future Industries geschlossen. Durch die Verwendung des Wasserstoffs können in der Produktion rund 900.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden (Fründhoff & Stratmann, 2022). Die Nutzung von H<sub>2</sub> in der Energie- und Rohstoffversorgung bildet gemeinsam mit der Nutzung biobasierter Rohstoffe und dem chemischen Recycling (siehe unten) wichtige Bausteine für eine nachhaltige und klimaneutrale Produktion. Der Chief Technology Officer von Covestro, Klaus Schäfer, erklärte dazu: „Wir richten unser Unternehmen konsequent am Gedanken der Kreislaufwirtschaft aus“ (Chemietechnik, 2021).

**Abbildung 9: Schematische Darstellung der Stoffströme für die chemische Industrie als Ersatz für Erdöl und andere fossile Quellen (eigene Darstellung).**



<sup>17</sup> Siehe die Website <https://www.arcus-greencycling.com/>

<sup>18</sup> Siehe die Website <https://www.pyrum.net/for-a-cleaner-world-start/>

Ein Bindeglied zwischen chemischer/Kunststoffindustrie und Kreislaufwirtschaft bildet die sogenannte „grüne Chemie“. Unter grüner (oder auch sanfter) Chemie wird die Entwicklung von chemischen Produkten und Prozessen verstanden, die die Verwendung oder Erzeugung gefährlicher Stoffe reduzieren oder ganz vermeiden. Ebenso liegt ein Schwerpunkt auf der Vermeidung fossiler bzw. generell endlicher Ressourcen und der Wiederverwertbarkeit.<sup>19</sup> Somit ist sie eine interessante Orientierung für die Reduzierung des fossilen Rohstoffverbrauchs (siehe auch Abschnitt 6.1), weshalb einige Grundprinzipien hier dargestellt werden sollen. Die grüne Chemie umfasst den gesamten Lebenszyklus eines chemischen Produkts von der Entwicklung über die Herstellung und Verwendung bis zur Wiederverwertung. Das Konzept der grünen Chemie ist in 12 Grundsätzen beschrieben, die sich allesamt darum drehen, so wenig (schädlichen) Einfluss auf Umwelt und Mensch zu haben wie möglich – beispielhaft seien genannt:

- **Abfall vermeiden:** Gestaltung chemischer Synthesen dergestalt, dass Abfälle vermieden werden
- **Entwicklung weniger gefährlicher chemischer Synthesen:** Entwicklung von Synthesen zur Verwendung und Erzeugung von Stoffen mit geringer oder keiner Toxizität für Mensch und Umwelt
- **Erhöhen der Energieeffizienz:** Durchführen chemischer Reaktionen bei Raumtemperatur und -druck, wann immer dies möglich ist
- **Verwendung erneuerbarer Ausgangsstoffe:** Nutzung von Roh-/Ausgangsstoffen, die erneuerbar und nicht erschöpfbar sind
- **Entwicklung abbaubarer Chemikalien und Produkte:** Entwicklung chemischer Produkte, die nach der Verwendung zu unschädlichen Substanzen abgebaut werden und sich nicht in der Umwelt anreichern
- **Echtzeitanalysen zur Vermeidung von Umweltverschmutzung:** Überwachen und Kontrollieren der Synthese in Echtzeit, um die Bildung von Nebenprodukten zu minimieren oder zu vermeiden
- **Minimierung des Unfallrisikos:** Entwicklung fester, flüssiger oder gasförmiger Substanzen mit minimalem (Umwelt-)Gefährdungspotenzial durch Explosion, Brand oder Freisetzung/Aufnahme (United States Environmental Protection Agency, 2021)

Wenngleich das Konzept der grünen Chemie weiter gefasst ist als die Dekarbonisierung, adressiert sie deren zentrale Pfeiler „erneuerbare/unerschöpfliche Rohstoffe“ und „natürliche Abbaubarkeit der (Zwischen-)Produkte“. Zudem manifestiert sich hierin eine grundlegende Ausrichtung auf eine gleichsam „sanfte“ chemische Produktion, die als Handlungsrahmen eine „Sustainability Literacy“ beschreibt (siehe Abschnitt 6.1).

Aus energetischer Sicht ist darüber hinaus das Primat „Synthesen bei Raumtemperatur/-druck“ von großer Bedeutung für die Substitution hochenergetischer Prozesse, da die chemische Industrie einen sehr hohen Energiebedarf hat – vgl. den Betrieb von Steamcrackern mit hochenergetischem Dampf – und im Zuge der ökologischen Transformation auf erneuerbare Energien angewiesen ist. In einer im Jahr 2019 veröffentlichten Roadmap zur CO<sub>2</sub>-Minimierung wird für das Szenario „Treibhausgasneutralität“ (nahezu 100 % Reduktion der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050) ein elfmal höherer Strombedarf aus dekarbonisierter Erzeugung als heute angenommen. Neue Methoden der Kreislaufführung, eine CO<sub>2</sub>-freie Wasserstoffherstellung und die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff sind kapitalintensive Schlüsselfaktoren in diesem Szenario (Geres et al., 2019, S. 9).

### Dekarbonisierung und Digitalisierung

Insgesamt bedeutet die Implementierung einer grünen Chemie nicht zwangsläufig die Nutzung biologischer/biotechnologischer Prinzipien und Methoden, sondern die konsequente Ausrichtung von Produktionsverfahren auf Nachhaltigkeits- und Schutzziele. Dazu gehört die Optimierung „klassischer“ Verfahren ebenso wie die Entwicklung/Nutzung neuer Prozesse und Substanzen mit möglichst geringen Auswirkungen auf Klima, Umwelt und Gesundheit. In all diesen Entwicklungs- und Produktionsprozessen erfährt der Einsatz digitaler Systeme – sei es die KI-basierte Analyse von Big Data bei der Materialentwicklung, die Echtzeitüberwachung und Steuerung von komplexen chemischen Produktionsprozessen oder die Modellierung und Simulation neuartiger Verfahren und ihrer Skalierung – eine wachsende Bedeutung und erfordert entsprechende Fähigkeiten. Gleiches gilt für die Optimierung von Stoffkreisläufen mittels Big Data. So werden beispielsweise in dem Projekt „DiLink – Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe“ innovative digitale Systeme sowie ergänzende Kooperationskonzepte zur Unterstützung

<sup>19</sup> Kritiker\*innen wenden ein, dass die grüne Chemie aufgrund der mit ihr im Regelfall einhergehenden niedrigen Reaktionskinetik bzw. des Oberflächenbedarfs kaum geeignet sei, den quantitativen Bedarf an chemischen Grundstoffen („Bulk Chemicals“) zu decken. Da jedoch gerade in der großskaligen Grundstoffchemie der größte CO<sub>2</sub>-Abdruck entsteht, bietet die grüne Chemie in ihrer Gesamtheit nur einen beschränkten Ansatz zur Defossilierung der chemischen und Kunststoffindustrie.

der Kreislaufschließung in der Kunststoffwirtschaft entwickelt (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2020); siehe dazu auch Abschnitt 3.2 auf Seite 21 ff.

Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft „stellen jeweils für sich eine große Herausforderung für die Unternehmen dar. Beide Megatrends können sich aber auch gegenseitig ergänzen und bieten in ihrer wechselseitigen Verschränkung große Möglichkeiten für die nachhaltige Entwicklung des Wertschöpfungsnetzwerks Kunststoff. Digitale Technologien und Plattformen sind ein Treiber für die Kreislaufwirtschaft. Auf der anderen Seite befördert die Notwendigkeit der Kreislaufwirtschaft die Implementierung digitaler Lösungen. Die Verknüpfung von Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung [...] ist eine große Chance für die gesamte Kunststoffbranche“ (Dispan & Mendler, 2020, S. 103–104).

Es ist absehbar, dass die weitreichende Umstellung von Energienutzung und in Teilen der stofflichen Basis tiefgreifende Auswirkungen auf die Herstellungsverfahren und auch die Produkte der chemischen und Kunststoffindustrie sowie auf die Anwenderindustrien haben wird. Dies betrifft die Gewinnung/Aufreinigung/Modifikation von Rohstoffen etwa durch biochemische Verfahren (Fermentation, Nutzung der synthetischen Biotechnologie für maßgeschneiderte Prozesse etc.) sowie die Weiterverarbeitung dieser Substanzen mit ggf. großtechnisch schwierig zu prozessierenden Eigenschaften. Gerade mit Blick auf die Kunststoffindustrie stellen sich zudem Fragen alternativer Rohstoffe: etwa die Nutzung natürlicher Polymere wie Lignin aus Holz oder auch Verfahren wie Papierspritzguss. Zu diesen Themen, die von der Nutzung von Agrarreststoffen und der Erzeugung von Basischemikalien für Polymere aus der Wurzelrübe von Chicorée über marine Polysaccharide etwa aus Korbtierpanzern bis hin zu Pilzkulturen reichen, wird in vielen Unternehmen, Start-ups, Hochschulen und Forschungseinrichtungen und sich daraus formierenden Innovationsnetzwerken gearbeitet.

Attraktiv sind dabei Rohstoffe, die auch regional verfügbar sind (geringe Klimabelastung durch Transport) und für die es bisher keine Verwendung gibt und somit keine Nutzungskonflikte („Tank oder Teller“) bestehen. Ein solches Biopolymer ist beispielsweise Polybutylensuccinat (PBS), das eine hohe Variantenvielfalt und gute Verarbeitungseigenschaften bietet und sich somit für vielfältige Anwendungen eignet – so strebt beispielsweise das RUBIO-Konsor-

tium dessen großindustrielle Anwendung im mitteldeutschen Chemiedreieck an. Als Ausgangsmaterial dienen cellulose- und lignocellulosehaltige Stoffe, die als Nebenprodukte anfallen bzw. keine sonstige Verwertung finden, wie etwa Holzabfälle, Gräser, Reststoffe aus der Papierindustrie oder auch Gärreste aus Biogasanlagen. Aus diesen werden biotechnologisch zunächst Kohlenhydrate gewonnen, die anschließend mittels Fermentation in Bernsteinsäure und biobasiertes 1,4-Butandiol als Ausgangsstoffe für PBS umgewandelt werden.<sup>20</sup>

### Auswirkungen auf Beschäftigte und Beschäftigung

Grundsätzlich sind in all diesen Prozessen insbesondere auf der Engineering-Seite Qualifikationsanpassungen zu erwarten. Diese fallen oftmals aber nicht ausschließlich in das Cleantech-Segment und beinhalten in erster Linie die Entwicklung neuer Verfahren und Prozesse zur a.) Nutzung alternativer und nichtfossiler Rohstoffe für neue Substanzen/Materialien und b.) die Optimierung von bestehenden chemischen Prozessen auf möglichst geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen anhand von Klima-KPI (Key Performance Indicators), die sich nicht zuletzt aufgrund der steigenden CO<sub>2</sub>-Bepreisung zusehends gleichberechtigt zu den Produktivitäts-KPI etablieren. Die befragten Expert\*innen sprachen in diesem Zusammenhang von einer „Prozessrevolution für die nächsten 20 bis 30 Jahre“ inkl. großer Chancen für den Maschinen- und Anlagenbau (Neuhold, 2021).

Dies kann auch einschließen, angesichts volatiler Verfügbarkeiten von (erneuerbarer) Energie und der auf einer Kreislaufwirtschaft basierenden Stoffströme stärker diskontinuierliche Produktionsprozesse zu entwickeln, die sich durch eine gewisse Flexibilität auszeichnen und nicht durch ein „Volllastoptimum“. Statt einer binären Funktionsweise („an“/„aus“) ist eine „Input-Folgefähigkeit“ in Form mehrerer parallelierter Einheiten denkbar, die einzeln zu- und abgeschaltet werden können. Als Tätigkeitsprofil scheint hier der „Prozess-Kybernetiker (m/w/d)“ als Orchestrator und Koordinator flexibler Systeme wahrscheinlich. Eine solche Produktion hat zwangsläufig Auswirkungen auf Arbeitsinhalte und -organisation (vgl. Abschnitt 3.2).

Auch die Einführung neuer Stoffe/Materialien und daran angepasster Prozesse und Apparate/Maschinen, mit denen die neuen Substanzen hergestellt und weiterverarbeitet werden, erfordert im Zuge der Defossilierung zusätzliches, im Regelfall chemisches und technisches Know-how: Material- und Werkstoffwissenschaft, Chemietechnik, Maschinen- und Anlagenbau, Steuerungstechnik/-elektronik etc. Dies betrifft

<sup>20</sup> Siehe die Website <https://rubio-biopolymer.de/about/>

insbesondere den (fließenden) Branchenübergang von der chemischen zur Kunststoffindustrie. Dabei kommt auch dem Stoffstrommanagement vor dem Hintergrund einer (regionalen) Kreislaufwirtschaft eine hohe Bedeutung zu; derartige Ansätze sind bereits in verschiedenen Chemieparks realisiert, sodass Nebenprodukte aus einem Prozess Ausgangsstoffe in einem anderen Prozess sind. Unmittelbar damit in Verbindung steht die Ökobilanzierung, auch LCA – Life Cycle Assessment – genannt, mit der eine systematische Analyse der Umweltwirkungen und der Energie-/CO<sub>2</sub>-Bilanz von Produkten während des gesamten Lebenszyklus erfolgt. Dieses Wissen ist gerade in KMU der Kunststoffindustrie nicht oder nicht ausreichend vorhanden, sodass es hier nach Einschätzung von Expert\*innen, die im Zuge der vorliegenden Studie befragt wurden, zu einem Flaschenhals kommen könnte (Großunternehmen haben diese Probleme im Regelfall nicht); die Unternehmen stehen dabei vor einer „make or buy“-Option für den Kompetenzaufbau (siehe unten).

Unabhängig von der Unternehmensgröße kommt dem LCA und der Festlegung von Nachhaltigkeits-KPI sowie Mittel- und Langfristzielen („minus 25 % CO<sub>2</sub> bis 2030“) eine große Bedeutung zu. Unternehmen setzen zum Erreichen dieser Ziele auf einen Kulturwandel, der durch Town-Hall-Meetings, Learning-Sessions, das Schaffen von konkreten Anknüpfungspunkten im Alltag und auch Projekte, die sich nicht kurzfristig amortisieren, realisiert wird. Ziele sind die Etablierung eines Nachhaltigkeitsmindsets (auch und gerade im Management) und eines breiten Skill-Sets, zu dem u. a. ein grundlegendes LCA-Verständnis gehört, und darüber hinaus Kommunikations-, Transfer- und Deutungsfähigkeiten („Was ist Green Washing und was nicht?“). Insbesondere bei KMU ist damit nach Expert\*innenmeinung die Fragestellung verbunden, ob das für die Defossilierung benötigte Wissen intern aufgebaut werden kann oder durch Personalakquisition von außen integriert werden muss. Speziell für die Implementierung neuer Pfade der Wertschöpfung wird die Akquisition von externem neuem Wissen in Form von Spezialist\*innen als unerlässlich angesehen, um eine Impulssetzung auch gegen Beharrungskräfte und etablierte Strukturen und Prozesse vornehmen zu können.

Die Kernkompetenzen der Beschäftigten werden neben technisch-naturwissenschaftlichen Fachkenntnissen und Problemlösungsfähigkeit künftig zunehmend Innovationsfähigkeit, IT-bezogene Anwender- und Entwicklerkenntnisse sowie Kenntnisse in der Anwendung von Maschinen und vernetzten Systemen sein. Ebenso spielen Analyse-, Kommunikations- und Interaktionsfähigkeiten eine zunehmend wichtige Rolle. Potenzielle Berufsbilder der

Zukunft zeichnen sich durch technisch-naturwissenschaftliche Schnittstellenkompetenzen, ein ganzheitliches Systemverständnis der Produktions- und Entwicklungsprozesse und damit einhergehend Kooperations- und Selbstorganisationskompetenzen aus. Die voranschreitende Digitalisierung wird sich künftig stärker in der beruflichen und hochschulischen Ausbildung in naturwissenschaftlich-technischen Fachgebieten der Chemie- und Kunststoffindustrie niederschlagen. So erfolgte eine Integration von neuen digitalen Inhalten zuletzt im Jahr 2018 in Form von neuen Wahlqualifikationen in den Ausbildungsordnungen ausgewählter Berufsausbildungen (z. B. Chemikant (m/w/d), Elektroniker (m/w/d) für Automatisierungstechnik). Auch in der hochschulischen Ausbildung ist eine stärkere Integration von IT- und nachhaltigkeitsorientierten Inhalten in naturwissenschaftlichen Studiengängen feststellbar (Priesack et al., 2019) – siehe dazu auch Abschnitt 5. Parallel zu dieser Entwicklung sind zudem Anpassungen in der Arbeitsorganisation zu erwarten, da nicht nur die Umstellung eines linearen auf ein zirkuläres Geschäftsmodell neue Herausforderungen darstellt, sondern sich aufgrund der mit einer Kreislaufwirtschaft verbundenen Variationsvielfalt auch eine stärkere „Projektwirtschaft“ herausbildet (insbesondere Downstream der Grundstoffchemie). Daher „könnte zukünftig auch in der kunststoffverarbeitenden Industrie agiles Arbeiten immer wichtiger werden. Die Methoden des agilen Arbeitens stammen aus der IT-Branche bzw. aus der Softwareentwicklung und haben sich von dort aus zunächst in die Unternehmensabteilungen für Forschung und Entwicklung in vielen Wirtschaftszweigen ausgebreitet. Heute sind agile Methoden nicht nur in den Entwicklungsabteilungen von Industrieunternehmen zu finden, sondern sie diffundieren zunehmend in andere betriebliche Funktionen und Bereiche hinein“ (Dispan & Mendler, 2020, S. 97).

### **Flexibilisierung der Arbeit**

Einhergehend mit der Zunahme agiler Arbeitsweisen sind in der chemischen und der Kunststoffindustrie Flexibilisierungstendenzen zu beobachten, wobei das produktionsgetriebene Kerngeschäft in Kombination mit rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorschriften die chemischen Unternehmen vor besondere Herausforderungen stellt. Demnach sind die Flexibilisierungsmöglichkeiten in der chemischen Produktion sowie damit verbundenen Tätigkeitsfeldern aufgrund vollkontinuierlicher Prozessabfolgen bei den meisten Anlagen aktuell begrenzt. Dagegen lassen sich mithilfe neuer digitaler Technologien und neuer Kommunikationsmedien vor allem im Bereich der Angestelltentätigkeiten in der Chemiebranche zunehmend flexiblere Arbeitszusammenhänge rea-

lisieren (Malanowski et al., 2017; Malanowski & Aweinius, 2017). Eine Mitgliederbefragung des Arbeitgeberverbandes HessenChemie aus dem Jahr 2017 – und damit noch deutlich vor der Covid-19-Pandemie – unter rund 50 Unternehmen kam zu dem Ergebnis, dass künftig das Arbeitsumfeld in der Branche räumlich, zeitlich und inhaltlich flexibler wird. So erwarten 3 von 4 befragten Unternehmen, dass Mitarbeiter\*innen künftig überwiegend räumlich flexibel arbeiten werden, 9 von 10 Unternehmen gehen von der Möglichkeit einer überwiegend zeitlich flexiblen Arbeit aus (Arbeitgeberverband Chemie und verwandte Industrien für das Land Hessen e.V. [HessenChemie], 2017). Zentraler Treiber ist in allen Fällen die fortschreitende Digitalisierung. Durch die Pandemieerfahrungen setzt sich dieser Trend insbesondere in der chemischen Industrie noch deutlich fort (Krzywdzinski et al., 2021).

### Beschäftigungsperspektiven für Frauen

Der Bedeutungszuwachs von Themen der Nachhaltigkeit und Dekarbonisierung/Defossilierung bewirkt nach Einschätzung der befragten Expert\*innen ein „Greening“ zahlreicher bestehender Tätigkeitsprofile und damit einhergehend eine Kompetenzerweiterung in Form einer allgemeinen „Literacy“ (siehe dazu Abschnitt 6.1 auf Seite 75). Ebenso werden insbesondere für Frauen zusätzliche Beschäftigungsmöglichkeiten auch und gerade in hochqualifizierten Tätigkeiten gesehen. Von den Expert\*innen wurden hierfür drei mögliche Trajektorien genannt:

- Insbesondere KMU richten vor dem Hintergrund der Klimadebatte und der Sektorziele (Abbildung 1) Führungspositionen zum Thema Nachhaltigkeit und Klimaschutz (CSO – Chief Sustainability Officer) ein. Da die bereits bestehenden Führungssegmente meist traditionell männlich dominiert sind, werden die „Nachhaltigkeitsverantwortlichkeiten“ auch vor dem Hintergrund des Diskurses über mehr Frauen in Führungspositionen verstärkt weiblich besetzt.
- Insgesamt hat sich das Einstellungsverhalten gegenüber Frauen insbesondere in den „New Business“-Einheiten von Unternehmen verändert. Waren früher von 10 geeigneten Bewerbungen 10 von Frauen, wurden 1 oder 2 weibliche Kandidatinnen zum Gespräch eingeladen – heute werden bei entsprechender Eignung überproportional Bewerberinnen eingeladen, sodass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Frau die entsprechende Stelle besetzt, rein statistisch größer geworden ist.
- Für die Umsetzung der Nachhaltigkeit in Unternehmen werden vor allem Eigenschaften wie Kommunikationsfähigkeit, Umsichtigkeit, insbe-

sondere übergreifendes Verantwortungsbewusstsein, Perspektivvielfalt etc. benötigt, die vorzugsweise weiblich konnotiert sind. Zudem scheint bei Frauen die Purpose-Orientierung besonders deutlich und somit das Interesse an Nachhaltigkeitsthemen besonders stark ausgeprägt zu sein (siehe hierzu auch Abschnitt 6.1 auf Seite 75).

Diese für die chemische und Kunststoffindustrie formulierten Trajektorien können im vorliegenden Fall als „schwache Signale“ dafür gewertet werden, dass die Dekarbonisierung – und weiter gefasst die gesamte Nachhaltigkeitsthematik – eine besondere Beschäftigungsperspektive für Frauen bieten können; erste empirische Befunde deuten ebenfalls darauf hin (vgl. Abschnitt 6.1). Wenngleich es gute Argumente dafür gibt, dass Frauen mit Blick auf Nachhaltigkeit verantwortungsvoller handeln (Winterfeld, 2012, S. 20), muss hinterfragt werden, ob es sich dabei nicht zumindest in Teilen um positive Klischees handelt. Die Gefahr hingegen, dass Nachhaltigkeit und Dekarbonisierung als „Frauenthema“ abgetan werden, dürfte angesichts der faktischen Dringlichkeit und der politischen Weichenstellungen sowie der Bedeutungszunahme in der betrieblichen Praxis sicher nicht bestehen.

### 4.3 Nachhaltige Automobilindustrie

Die Automobilindustrie trägt maßgeblich zur industriellen Wertschöpfung, Beschäftigung und Innovationskraft am Standort Deutschland bei. Sie umfasst die Kraftfahrzeughersteller, die Zulieferer von Kfz-Teilen und Zubehör sowie die Hersteller von Anhängern und Aufbauten. Als größte Branche des verarbeitenden Gewerbes und gemessen an ihrem Umsatz hat die Automobilbranche als eigenständige Branche, als Kunde anderer Branchen und als Forschungsförderer eine immense Bedeutung für den Wohlstand am Standort Deutschland. Mit knapp 45 Mrd. Euro Investitionen für Forschung und Entwicklung im Jahr 2018 liegt die deutsche Automobilbranche im internationalen Vergleich auf Platz eins noch vor Japan (32,5 Mrd. Euro) und den USA (18,4 Mrd. Euro). Dies macht sich auch in den Beschäftigtenzahlen bemerkbar. Werden Hersteller und Zulieferer zusammengefasst, sind insgesamt 132.000 Mitarbeitende allein in FuE-Bereichen beschäftigt (Verband der Automobilindustrie e. V. [VDA], 2020).

Der Trend von wachsenden Umsatz- und Beschäftigungszahlen hat in den Jahren nach der Finanzkrise 2008/2009 fortlaufend zugenommen. Zwischen 2009 und 2018 erlebte die Automobilindustrie ein goldenes Jahrzehnt (Puls & Fritsch, 2020).



## Transformation der Wertschöpfung

2019 kam es zum Konjunkturabschwung, und mit dem Beginn der Coronapandemie schwächte sich das Wachstum weiter ab: Der Umsatz ist im Jahr 2020 im Inland auf 135,4 Mrd. Euro (2019: 153,4 Mrd.) und im Ausland auf 242,8 Milliarden Euro gesunken (2019: 282,7 Mrd.). Viele Unternehmen reagierten mit Kurzarbeit und Stellenabbau. So waren im Jahr 2020 in der Branche mit 809.000 Menschen (Abbildung 10) fast 24.000 Arbeitnehmende weniger beschäftigt als im Vorjahr (Kords, 2022b).

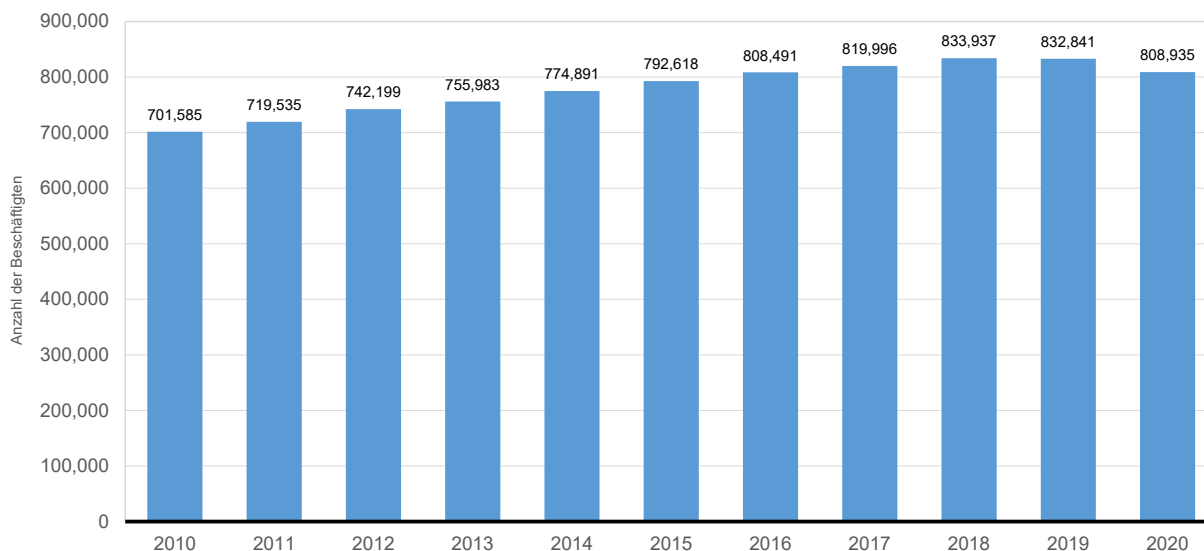
Die Auswirkungen der Pandemie auf die Automobilbranche fielen daher vergleichsweise hart aus. Als Erklärung kann der tiefgreifende Transformationsprozess angeführt werden, in dem sich die Branche bereits vor Einbruch der Pandemie befand (Puls & Fritsch, 2020). Dieser zeichnet sich durch eine Reihe an Faktoren aus, welche die Automobilbranche zu strategischen Veränderungen zwingen. Treiber dieser Transformation sind vier zentrale Trends: alternative Antriebstechnologien, vernetztes Fahren, autonomes Fahren sowie neue Nutzungs- und Mobilitätskonzepte (Shared Mobility). Aufgrund eines neuen gesellschaftlichen Verantwortungsbewusstseins für Nachhaltigkeit, verbunden mit einem politischen Regulierungsrahmen, der als Antwort auf den stei-

genden Handlungsdruck auch Anreize für alternative Antriebstechnologien schafft, werden sich alternative Antriebskonzepte wie Elektro oder Wasserstoff stark verbreiten. Die Brennstoffzellentechnologie (grüner Wasserstoff) im Pkw-Bereich der deutschen Automobilindustrie wird aller Voraussicht nach für die nächsten 20 Jahre vergleichsweise unbedeutend sein. Im Fokus stehen Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen für batterieelektrische Autos. So übersteigt die Zahl der Neuzulassungen von Autos mit ausschließlich elektrischem Antrieb in Deutschland im Jahr 2021 mit rund 267.300 Neuzulassungen bereits mehr als die Gesamtanzahl im Vorjahr und stellt damit einen neuen Rekord dar.<sup>21</sup> Obwohl der Marktanteil noch deutlich unter den konventionellen, fossilen Antrieben liegt, entsprach der Anteil der Neuzulassungen teil- und vollelektrischer Antriebe im Jahr 2020 18,1 % für Hybridantriebe und 6,7 % für reine Elektro-Pkw (Kraftfahrtbundesamt [KBA] und Abbildung 11). 2030 soll laut einer Studie der Boston Consulting Group der Absatzanteil von Elektroautos in Deutschland und Europa auf bis zu 50 % steigen (Agora Verkehrswende, 2021).

Die großen Automobilkonzerne investieren massiv in die Elektromobilität. So hat Volkswagen im Jahr 2019 im Center of Excellence in Salzgitter eine Pilotanlage zur Batteriezellproduktion für Kleinserien eröffnet

## Abbildung 10: Anzahl der Beschäftigten in der Automobilindustrie in Deutschland von 2010 bis 2020 (Quellen: Statista und Statistisches Bundesamt).

Anzahl der Beschäftigten in der Automobilindustrie in Deutschland von 2010 bis 2020



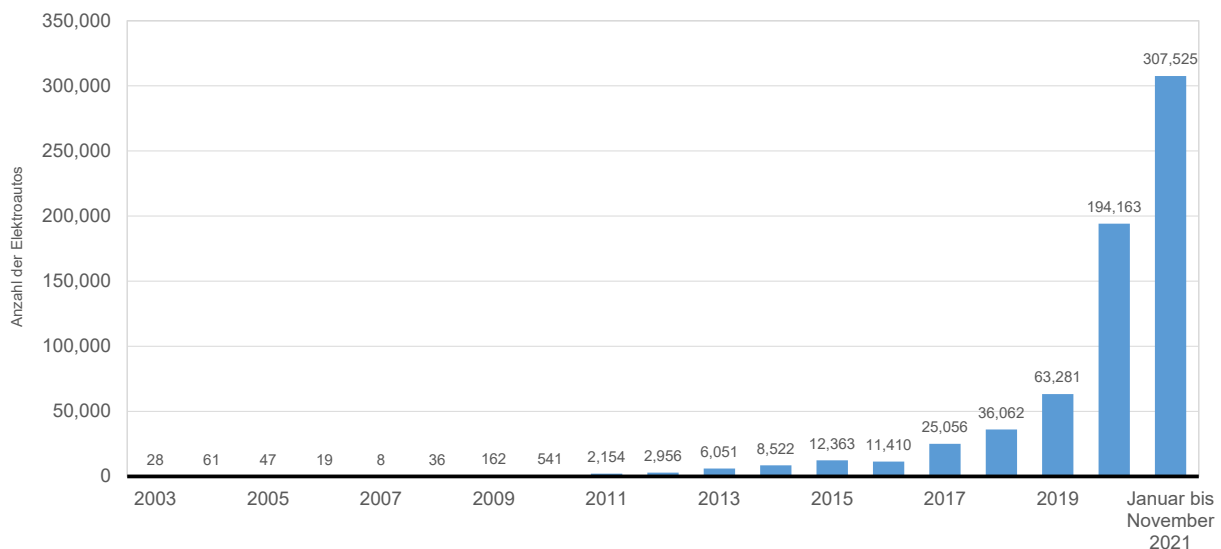
<sup>21</sup> In der Statistik werden die Neuzulassungen von rein batteriebetriebenen Elektroautos abgebildet. Batterieelektrofahrzeuge werden ausschließlich durch einen Elektromotor angetrieben, welcher die benötigte elektrische Energie aus einer Traktionsbatterie bezieht. Kords (2022a).

(Volkswagen Group, 2019). Auch Autobauer Opel will bis 2023 den Betrieb der eigenen Batteriefabrik am Werksstandort in Kaiserslautern aufnehmen. Für das Gemeinschaftsunternehmen ACC des Opel-Konzerns, der Muttergesellschaft Stellantis und der Total-Tochter stehen dabei eine nachhaltige Produktion und die Unabhängigkeit vom asiatischen Markt im Vordergrund. Mit dem überwiegenden Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und erneuerbarer Energien will ACC den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Vergleich zu konventionell produzierten Batterien aus Asien um bis zu 35 % reduzieren. Neben dem chinesischen Batteriehersteller CATL, der seine Batteriezellfabrik in Arnstadt ab

der zweiten Hälfte 2022 eröffnen will, baut auch Tesla zusätzlich zur im März 2022 neu eröffneten Fahrzeugfertigung ein Batteriewerk in Grünheide bei Berlin. Diese Entwicklung führt dazu, dass die Hersteller die Produktion von Verbrennern voraussichtlich bis Ende 2040 einstellen werden (Kaul et al., 2019). So sieht der US-amerikanische Automobilkonzern General Motors für das Jahr 2035 das Ende seiner Verbrennerproduktion. Auch Audi gab bekannt, dass der letzte neue Verbrenner im Jahr 2026 auf den Markt kommen soll, ab Anfang der 2030er Jahre soll es schließlich nur noch reine Elektroautos geben.

## Abbildung 11: Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis 2021 (Quelle: Statista und KBA).

Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis 2021



### Digitalisierung und Dekarbonisierung

Neben der Elektromobilität nehmen autonomes und vernetztes Fahren eine wichtige Rolle ein und bieten viele Potenziale für neue Geschäftsmodelle und Wettbewerber. Durch die Vernetzung des Autos mit dem Internet, mit anderen Fahrzeugen oder der Umgebung wird ein erheblicher Mehrwert für den Nutzer geschaffen: z. B. Sprachsteuerung, Fahrassistenzsysteme, Multimediadienste, Unfall- und Stauwarnung, Routenoptimierung. Softwarebasierte Mobilitätsdienstleistungen werden das Kernprodukt der zukünftigen Automobilindustrie sein, wodurch Automobilunternehmen zunehmend mit internationalen IT- und Softwareunternehmen wie Google, Microsoft, IBM, aber auch mit internationalen Mobilitätsanbietern wie Uber konkurrieren müssen, indem sie neue

Bereiche erschließen und in die Entwicklung dieser neuen Geschäftsmodelle investieren. Vor diesem Hintergrund ist beispielsweise die Entscheidung von BMW und Daimler im Jahr 2018 zu sehen, ihre Carsharing-Dienste DriveNow und Car2Go zu fusionieren. Gleichzeitig verändert sich das Verhältnis der Verbraucher\*innen zum Autobesitz durch neue Kundenbedürfnisse.

Vor allem in der jüngeren Generation nimmt der Stellenwert des eigenen Autos ab, „[...] während die damit verbundene Dienstleistung Mobilität an Bedeutung gewinnt und zum Wertschöpfungskern mit neuen Anforderungen an Technologie, Kompetenzen, Geschäftsmodelle, Kundenansprache und Organisation wird“ (Ehrenberg-Silies et al., 2021, S. 16). Im Vordergrund werden neue Mobilitätsmodelle

(Shared Mobility) sowie die Möglichkeiten multimodaler Mobilität stehen, also die Verknüpfung verschiedener Verkehrsmittel zu einer Mobilitätskette. Die Digitalisierung des Verkehrssystems und ein neues Konsumverhalten begünstigen hierbei die Nachfrage nach neuen Mobilitätsangeboten: Es können entweder Fahrzeuge durch mehrere Personen gemeinsam genutzt werden (Carsharing) oder die Fahrtstrecke kann mit anderen Personen geteilt werden, die eine ähnliche Route fahren möchten (Ridesharing bzw. Ridepooling).

Sowohl autonomes Fahren als auch Shared Mobility ermöglichen die effizientere Nutzung der Fahrzeuge und eine Verminderung der Standzeiten. Zwar führt dies tendenziell zu höheren Laufleistungen pro Fahrzeug, da potenziell mehr Personen durch Inanspruchnahme des Mobilitätsangebots ein Fahrzeug fahren. Dies hat jedoch gleichzeitig einen geringeren Fahrzeugbestand zur Folge. In jedem Falle wird es bis 2030 zu einer Verschiebung kommen der von im privaten Pkw zurückgelegten Kilometer hin zu solchen, die über Sharing-Modelle zurückgelegt werden. Einerseits sind die beschriebenen Trends eng miteinander verbunden, andererseits stehen sie wechselseitig in Beziehung. So bildet die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander und mit der Umgebung die Voraussetzung für das autonome Fahren genauso wie für die vollumfängliche Nutzung neuer Mobilitätskonzepte. Letztere werden neben dem autonomen Fahren wiederum als wichtige Treiber der Elektromobilität eingeschätzt, indem sie den Anwendungsbereich von E-Autos um neue Bereiche erweitern, in denen derzeit noch keine Elektromobilität sinnvoll ist. Begleitet werden diese Trends durch die stetig wachsende Bedeutung der Kreislauffähigkeit von Produkten (Baethge et al., 2019; Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, 2019).

Studien zufolge weicht die für 2030 prognostizierte Bandbreite für die Marktdurchdringung der Trends teilweise stark voneinander ab (siehe Abbildung 12). So ergeben sich in den Bereichen Pkw und Nutzfahrzeuge einerseits Parallelen, bezogen auf die Trends; jedoch variiert das Potenzial sowie die Geschwindigkeit der Trends für disruptive Veränderungen in den beiden Bereichen.

Die Bundesregierung fördert diese Transformation in Richtung Automotive 4.0 in den Bereichen Elektromobilität, Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe und autonomes Fahren. So hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) 2 Milliarden Euro für die Jahre 2020 – 2024 zusätzlich für Investitionen in einen innovativen Fahrzeugbau bewilligt. Dabei liegt der Fokus des ersten Fördermoduls auf der Umsetzung und Einführung digitaler Konzepte in

den Fertigungs- und Wertschöpfungsprozessen der deutschen Fahrzeugindustrie, während das zweite Fördermodul Forschung und Entwicklung für neue, innovative Produkte (automatisiertes Fahren, innovative Fahrzeuge) zum Schwerpunkt hat (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2020b).

**Abbildung 12: Erwartete Marktdurchdringung aktueller Trends in der Automobilbranche im Jahr 2030 (Quellen: (PwC, 2018), (McKinsey, 2018), (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation [IAO], 2018)).**

Trends	Erwartete Marktdurchdringung im Jahr 2030 gemäß Referenzszenarien in den Bereichen	
	Pkw	Nutzfahrzeuge
Alternative Antriebstechnologien	25 % der verkauften Pkw reine Elektrofahrzeuge	5–35 % der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben
	60 % der Pkw mindestens teil-elektrisch, bei schneller Adaption mindestens 50 % Plug-in-Hybride oder rein elektrisch	Große Bedeutung der Brennstoffzellen
Autonomes Fahren	Bis zu 15 % der Pkw vollständig autonom und 50 % teilautonom	Potenzial für disruptive Veränderungen
	Bis zu 40 % der Laufleistung autonom	Ab 2027 vollständig autonomes Fahren
Shared Mobility	Bis zu 10 % der Pkw werden geteilt genutzt.	Geringe Relevanz
	Bis zu 33 % der Laufleistung durch Shared Mobility	
Konnektivität	Alle Pkw zur Vernetzung untereinander und mit der umgebenden Infrastruktur möglich	80–90 % der Nutzfahrzeuge vernetzt

Aufgrund des Zusammenspiels der aktuellen Entwicklungen ist zu erwarten, dass der Wandel in der Branche von längerer Dauer sein wird mit weitreichenden Auswirkungen auf Beschäftigte und Beschäftigung sowohl bei den Fahrzeugherstellern als auch in der Zulieferindustrie. Insgesamt werden sich einer aktuellen Untersuchung zufolge 200.000 Stellenprofile stark verändern, für 500.000 Stellen wird ein berufsbegleitender Umschulungs- und Weiterbildungsbedarf (Re- und Upskilling) gesehen (Agora Verkehrswende, 2021). Die Herausforderung wird folglich qualitativer Art sein, fehlende technologiespezifische Kompetenzen aufzubauen und erfolgreich einzusetzen. OEM-Hersteller und große Zulieferer versuchen bereits mithilfe digitaler Lernplattformen (z. B. „Back2Code Campus“ von BMW, „Fakultät 73“ von Volkswagen, „Software Academy“ von Continental, „Bosch Learning Company“) und überbetrieblicher Angebote zur Entwicklung digitaler Fähigkeiten (z. B. „Wolfsburg42“, „Heilbronn42“ als regionale Ableger der französischen Coding-School „École42“), die-

se Herausforderung zu adressieren (Ehrenberg-Silies et al., 2021).

#### 4.3.1 Nachhaltige Antriebstechnologien in der Automobilindustrie

Nachhaltigkeit wird insbesondere für produzierende Unternehmen immer wichtiger. Denn neben der Politik stellen Kund\*innen höhere Anforderungen an Nachhaltigkeit von Produkten oder Prozessen und wollen sehen, dass auch die Unternehmen ihren Beitrag leisten. Dies trifft ebenfalls auf die Automobilbranche zu. BMW verfolgt in seiner Nachhaltigkeitsstrategie daher einen ganzheitlichen Ansatz, der sich am „Green Lean Digital“-Leitbild orientiert (Schneider-Maul, 2020). Darin werden die Anforderungen der Digitalisierung und der Nachhaltigkeit miteinander verbunden mit dem Ziel der größtmöglichen ökonomischen und ökologischen Effizienz. Konkret bedeutet dies, dass Prinzipien, Methoden und Technologien aus den drei Bereichen eingesetzt werden, um bei-

spielsweise neue Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs zu identifizieren. So strebt BMW an, bis 2025 den CO<sub>2</sub>-Anteil pro Fahrzeug gegenüber 2019 um 40 % zu senken und bis 2030 um 80 %. Die Entwicklung der Elektromobilität steht dabei im Mittelpunkt. Die steigende Anzahl der produzierten bzw. verkauften Elektroautos verdeutlicht die zunehmende Bedeutung der Batteriezellfertigung als Herz der Elektromobilität. Schätzungen zufolge befinden sich weltweit etwa 10 Millionen E-Autos auf den Straßen, die meisten davon in China (4,2 Mio.), gefolgt von Europa (3,2 Mio.) und den USA (1,7 Mio.). Im Jahr 2020 hat Europa erstmals China als Vorreiter abgelöst mit 1.368.167 neu zugelassenen E-Autos. Dabei ist im europäischen Vergleich Deutschland mit 394.943 Neuzulassungen Spitzenreiter (Verband der Automobilindustrie e. V. [VDA], 2021). Je nach Marktstudie wird der globale Anteil an produzierten bzw. verkauften Elektroautos ab dem Jahr 2030 auf 25–75 % geschätzt (Thielmann et al., 2018).

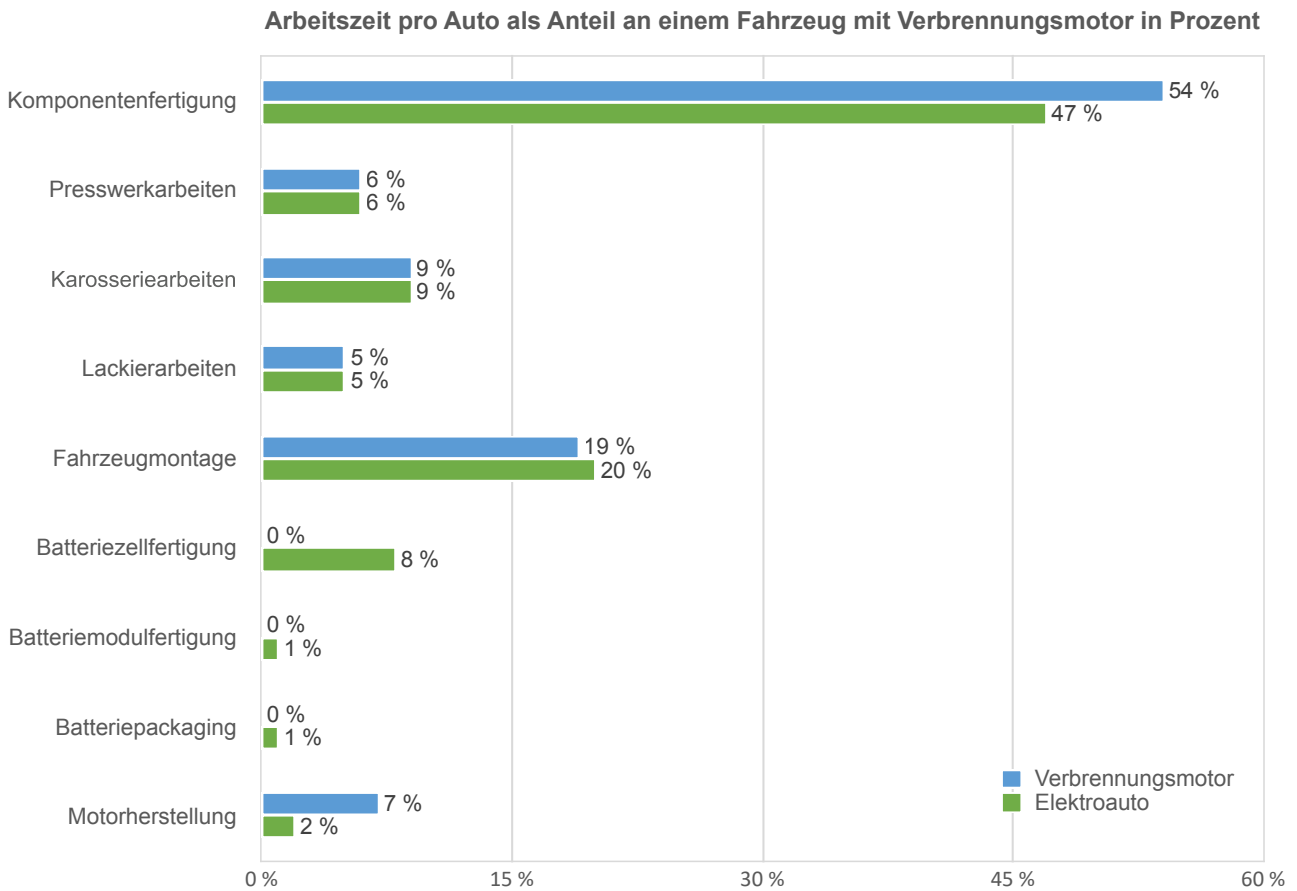
Im Zuge dieser Transformation hin zur Elektromobilität wird BMW ab 2024 am Stammwerk München die Produktion von Verbrennungsmotoren einstellen und das Werk auf Elektroautos umstellen: „Mit der Entscheidung, im fast 100 Jahre alten Werk München eine neue Montage zu bauen, zeigen wir, dass Transformation, wenn man sie strategisch und mutig angeht, Industriearbeitsplätze auch inmitten einer Großstadt sichern und ausbauen kann“ (BMW Group, 2020b). Neben der logistischen Herausforderung eines Umbaus hat das Vorantreiben der Elektromobilität auch Auswirkungen auf die Beschäftigten. Die dort gefertigten Verbrennungsmotoren mit 4, 6, 8 und 12 Zylindern werden zukünftig an den Standorten im österreichischen Steyr und im britischen Hams Hall produziert. In der Praxis bedeutet dies für die betroffenen Mitarbeitenden im BMW-Werk München, dass sie künftig in anderen Planungs- und Fertigungsbereichen am Standort München oder an weiteren bayerischen Standorten tätig sein werden. Erfahrungsgemäß fällt der Aufwand für die Komponentenfertigung für ein Elektroauto geringer aus als für einen Verbrennermotor (siehe Abbildung 13), wodurch Arbeitsplätze in den klassischen Produktionsbereichen Motor, Kupplung, Getriebe und Abgasanlage in Zukunft wegfallen werden. Dabei hängen die Auswirkungen der Elektromobilität auf die Beschäftigung mitunter von der Transformationsgeschwindigkeit ab: Ein schneller Umstieg auf elektrische Antriebe geht demnach mit einem Verlust von bis zu 10.000 Arbeitsplätzen (rund 4,8 %) im Stuttgarter Raum einher, während bei einem langsamen Wandel dagegen

mit einem Arbeitsplatzzuwachs von bis zu 6.300 Jobs (ca. 3 %) gerechnet wird (Kampe et al., 2018; Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH & IG Metall Region Stuttgart, 2019). Dieser Arbeitsplatzzuwachs kann allerdings nur ermöglicht werden, wenn die neuen Komponenten für Elektromobilität an denselben regionalen Standorten der Unternehmen erfolgen.

Korrespondierend plant BMW, verstärkt in das Kompetenzzentrum E-Antriebsproduktion in Dingolfing für den E-Antrieb und Hochvoltbatterien zu investieren. Die Anzahl der Mitarbeitenden soll sich hier mittelfristig von 1.000 auf bis zu 2.000 verdoppeln. Diese „Gründerstimmung“ zieht insbesondere die jüngeren Arbeitnehmer\*innen an, die großes Interesse haben, an der Batteriezellfertigung mitzuwirken. Zudem baut BMW die Produktion von Batteriekomponenten ab 2021 und von Hochvoltbatterien ab 2022 in den Standorten Leipzig und Regensburg aus, um die wachsende Zahl elektrischer Fahrzeuge mit Hochvoltbatterien zu versorgen.<sup>22</sup> In diesem Zusammenhang ergeben sich nicht nur Chancen auf neue Arbeitsplätze: Zusätzlich kann durch die Verlagerung der Produktion von Batteriekomponenten und Hochvoltbatterien an deutschen Standorten die Lieferknappheit bei Batteriezellen vermieden werden. Die Produktions- und Wertschöpfungsprozesse im Zusammenhang mit der Batteriezelle analysiert BMW im Kompetenzzentrum Batteriezelle. Die einzelnen Batteriezellen werden jedoch derzeit von Zulieferern bezogen und intern zu Batteriepaketen zusammengebaut.

<sup>22</sup> Neben den hauseigenen Batteriefertigungen in Dingolfing, Leipzig und Regensburg in Deutschland werden die Hochvoltbatterien in den Werken Spartanburg/USA, Shenyang/China sowie Rayong/Thailand produziert.

**Abbildung 13: Vergleich der Arbeitszeit pro Auto für Verbrennungsmotor bzw. Elektroantrieb (Quellen: Handelsblatt und BCG/(Buchenau & Tyborski, 2020)).**



Das Weltwirtschaftsforum (WEF) prognostiziert, dass bis 2030 weltweit insgesamt 10 Millionen Arbeitsplätze in der Batteriewertschöpfungskette geschaffen werden (World Economic Forum [WEF], 2019). Tatsächlich ist zumindest die Entwicklung und Produktion von E-Auto-Batterien bisher fest in asiatischer Hand, ein Umdenken hat jedoch eingesetzt. So kooperiert VW mit dem schwedischen Batteriehersteller Northvolt am Standort Salzgitter, wo bis 2024 eine Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen mit einer Anfangskapazität von 16 GWh entstehen soll (Menzel, Nora/Poll, Dietmar, 2021). Sollte es deutschen Unternehmen langfristig gelingen, die Batteriezellproduktion in Deutschland zu übernehmen (entsprechende Aktivitäten werden beispielsweise durch die BMBF-Förderung der Dachinitiative „Forschungsfabrik Batterie“ und vom BMWK mit dem IPCEI Batteriezellfertigung unterstützt), würde das nicht nur neue Arbeitsplätze schaffen, sondern hätte zusätzliche positive Effekte auf die Vergütung, insbesondere in Unternehmen mit Tarifbindung.

**Auswirkungen auf Beschäftigte und Beschäftigung**

Die Herausforderung wird folglich sein, die Beschäftigten durch eine Arbeitsplatz- oder Tätigkeitsverlagerung zu sichern und Arbeitsplatzverluste durch den Einsatz in den bedeutender werdenden antriebsunabhängigen Arbeitsbereichen Batteriezell- und Batteriemodulfertigung zu kompensieren. Konkret sind für das Batteriesystem folgende Komponenten und Produktionsstufen zu berücksichtigen (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation [IAO], 2018):

- Zellmodule (montieren)
- Batteriegehäuse (fertigen, umformen, fügen, prüfen)
- Batteriesystem (montieren, reparieren, recyceln)
- Batteriemanagercontroller (montieren)

Weitere Einsatzbereiche ergeben sich im Batteriepackaging sowie in der Leistungselektronik und im Thermomanagement der Batterie, sodass hier ins-

gesamt von über 95.000 neuen Arbeitsplätzen auszugehen ist. Zur Sicherstellung des Betriebs und der Wartung der entsprechenden Ladeinfrastruktur wird außerdem ein zusätzlicher Bedarf von etwa 70.000 neuen Fachkräften entstehen. Neben einem allgemein steigenden Fachkräftebedarf durch einen wachsenden Automobilmarkt führen auch die Fahrzeugdigitalisierung und technologischen Innovationen im Automobilbau zu einer verstärkten Nachfrage vor allem nach Ingenieur\*innen. So hat sich z. B. das Lenkrad von einem analogen Bauelement mit dem Trend hin zu verschiedenen Assistenzsystemen (z. B. Spurhalteassistent oder Tempomat) maßgeblich gewandelt. Diese Entwicklung schafft ebenfalls zusätzliche Arbeitsplätze sowohl bei Automobilherstellern als auch bei Zulieferern, welche die technischen Bestandteile wie Sensoren oder Platinen produzieren (Agora Verkehrswende, 2021).

In der Gesamtbetrachtung betreffen die Auswirkungen der voranschreitenden Elektromobilität langfristig gesehen daher weniger die Anzahl der Beschäftigten in der Automobilbranche als vielmehr die Anforderungen an die berufliche und akademische Ausbildung. Die Qualifikationsanforderungen verschieben sich aus Bereichen des Maschinenbaus und der Fahrzeugtechnik hin zur Software- und Elektrotechnik: Betroffene Beschäftigte aus der Automobilbranche werden folglich in eine ähnliche Branche bzw. in ein ähnliches Berufsbild wechseln, z. B. von der Motorgetriebefertigung zur Elektromotormontage. In diesem Rahmen kann die Mehrheit der Beschäftigten berufsbegleitend geschult werden. Für etwa 30 % der Beschäftigten wird jedoch ein höherer Qualifikationsbedarf erforderlich sein: Dies betrifft Arbeitnehmer\*innen aus der Automobilbranche, welche die Industrie bzw. das Berufsbild ändern und dort eine neue Tätigkeit ausüben werden (z. B. von der Montage in die Batteriezellfertigung) (Agora Verkehrswende, 2021). Letztere Konstellation setzt neue Qualifikationsbedarfe voraus, vor allem Prozess-, Produktions- und Entwicklungsingenieur\*innen sowie Spezialist\*innen für die Industrialisierung der Batteriezellfertigung. Es ist daher erforderlich, die Lehrinhalte der beruflichen Qualifizierung durch fachspezifische Inhalte zu erweitern und ganzheitlich an die Bedürfnisse neuer Berufsprofile anzupassen. Dabei sind alle Akteure der Wertschöpfungskette Batteriezellfertigung zu berücksichtigen. Entsprechend zielt die Förderrichtlinie „Förderung von Qualifizierungsmaßnahmen für die Batteriezellfertigung“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima auf „[...] die Aneignung neuer bedarfsorientierter Kompetenzen

in den Unternehmen, um so die Beschäftigungsfähigkeit der Arbeitnehmer\*innen zu erhalten, aufzuwerten und auszubauen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2021b). Vor diesem Hintergrund wird es notwendig sein, dass die Unternehmen während des Markthochlaufs Elektromobilität mittelfristig noch zweigleisig fahren, d. h. sowohl Verbrennungs- als auch Elektromotoren gleichzeitig herstellen und anbieten. Der erfolgreiche Mix beider Produktionslinien setzt voraus, dass organisatorische Rahmenbedingungen in den Werken und notwendige Qualifikationen in der Belegschaft gegeben sind. Nur durch eine mit Nachdruck verfolgte Qualifizierung im Bereich Elektromobilität kann das An- und Umlernen der betroffenen Beschäftigten tatsächlich gelingen und so zu positiven Beschäftigungseffekten und gleichzeitig zu einer grüneren Mobilität führen. Gelingt dies, kann mit der Batterieproduktion ein starker zukunftsfähiger Industriezweig in Deutschland geschaffen werden.

#### 4.3.2 Nachhaltige Produktion und Wertschöpfung in der Automobilindustrie

Neben der Entwicklung nachhaltiger Antriebstechnologien bilden die nachhaltige Produktion und Wertschöpfung in der Automobilbranche die wichtigsten Felder, um die durch den zunehmenden Bedarf an Mobilität steigenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Batterien gelten als eine Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität. Dabei ist die Schließung von Material- und Stoffkreisläufen für eine nachhaltige Batterieproduktion unerlässlich. Angesichts der hohen Nachfrage nach Batterien und ihrer energie- und kostenintensiven Produktion stellt ihre Nachhaltigkeit durch umweltschonende Produktionsprozesse sowie die Kreislaufführung der Rohstoffe eine große Herausforderung dar. Gleichzeitig eröffnen sich aber Potenziale für neue Ideen und Produkte entlang der Wertschöpfungskette der Batterietechnologie.<sup>23</sup>

Die Lebensverlängerung durch Reparatur und Instandsetzung, die Weiternutzung in stationären Anwendungen (Second Life) und das Recycling bilden die zentralen Elemente der Kreislaufwirtschaft von Traktionsbatterien (acatech, Circular Economy Initiative Deutschland, Systemiq, 2020). Daneben werden auch Maßnahmen und Methoden der Effizienzsteigerung während der Nutzungsphase hinzugezählt, z. B. Ride- und Carsharing. So kann im Fall eines Fehlers die Lebenszeit von Batterien verlängert werden,

<sup>23</sup> Als Wertschöpfungskette wird hier der gesamte Weg vom Rohstoff über alle Zwischen- und Zulieferprodukte bis zur Systemintegration der Batterie sowie die spätere Verwertung („Second Life“) und das Recycling verstanden.

indem sie nach der Reparatur und Instandsetzung im selben oder in einem anderen Fahrzeug als Gebrauchtbatterie eingesetzt werden (z. B. Austausch einzelner Module oder Steuerungselemente). Der Anteil ungeplant reparaturbedürftiger Batterien wird jedoch als sehr gering eingeschätzt. Praxisrelevanter ist dagegen die Weiterverwendung der Batterie nach Ende ihrer geplanten Einsatzdauer im Sinne eines Second Life, etwa als stationärer Stromspeicher oder in mobilen Anwendungen wie Elektrorollern. Eine solche Umfunktionierung und Zweitnutzung ist nur möglich, wenn die sicherheitstechnischen Anforderungen beim Zerlegen, Lagern und Transportieren erfüllt und Gewährleistungs- und Sicherheitsfragen geklärt sind. Tatsächlich wird dem Second Life ein signifikantes Potenzial zur Reduktion von Umwelteinflüssen zugesprochen, das je nach Rahmenbedingungen schätzungsweise bei 15–70 % liegt (Thielmann et al., 2020).

Der Fokus in der Kreislaufwirtschaft von Batterien liegt jedoch im Recycling, um Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen langfristig zu reduzieren und eine Wiederverwendung wertvoller Rohstoffe wie Nickel, Mangan, Kobalt, Stahl oder Aluminium zu ermöglichen. Je nach Markthochlauf könnte Recycling im Jahr 2030 bei entsprechender Prozessoptimierung 10 % des Bedarfs an Batteriematerialien und -stoffen decken und 2050 bis zu 40 %.<sup>24</sup> In öffentlich geförderten Pilotprojekten wurden verschiedene Recyclingmethoden erprobt, z. B. Umicore, Batrec, Duesenfeld (Thielmann et al., 2020). Neben Informationen aus dem Produktlebenszyklus einer Batterie, der Materialzusammensetzung, dem Aufbau des Batteriesystems und der Batterienutzung sind insbesondere Daten aus Recyclingprozessen wichtig. So wird in dem Projekt DiRectION<sup>25</sup> angestrebt, eine solche Datenbank des Batterierecyclings über alle Prozesswege hinweg aufzubauen und mithilfe von Datenanalysen wesentliche Erkenntnisse abzuleiten. Die Verbindung von digitalen Lösungen und der Entwicklung umweltfreundlicher Materialien für eine optimierte Batteriezellproduktion wird ebenfalls in einem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt untersucht.<sup>26</sup>

Übergreifendes Ziel ist es, die Effizienz im Recycling von Rohstoffen zu steigern und damit die Kosten für Sekundärrohstoffe zu senken. Gleichzeitig lässt sich damit die Abhängigkeit von wichtigen Rohstoffen aus anderen Ländern langfristig vermindern, die etwa 50 % der Kosten ausmachen. Vor diesem Hintergrund kann die Batterieproduktion ein Anwendungsbeispiel für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft darstellen (Abbildung 14). Aktuell arbeitet BASF an der Entwicklung eines chemischen Verfahrens zur reinen Wiedergewinnung der Batterierohstoffe. Auch Volkswagen baut neben einer Batteriefabrik eine Wiederaufbereitungsanlage für Batterien in Salzgitter (Fröndhoff & Witsch, 2021). BMW untersucht die Möglichkeiten eines geschlossenen und nachhaltigen Wertstoffkreislaufs für Batteriezellen von der Auswahl der nachhaltigen Materialien über die Zusammensetzung der Batteriezelle bis zur Produktion und zum Recycling im Kompetenzwerk Batteriezelle.<sup>27</sup>

<sup>23</sup> Als Wertschöpfungskette wird hier der gesamte Weg vom Rohstoff über alle Zwischen- und Zulieferprodukte bis zur Systemintegration der Batterie sowie die spätere Verwertung („Second Life“) und das Recycling verstanden.

<sup>24</sup> Unter Batterierecycling wird der gesamte Prozess von der Deaktivierung der Batterie(komponenten) bis zur abgeschlossenen Gewinnung von verkaufsfertigen Rohstoffen (Rezyklaten) für die Herstellung neuer Batteriematerialien in vergleichbarer Qualität zum Primärmaterial verstanden.

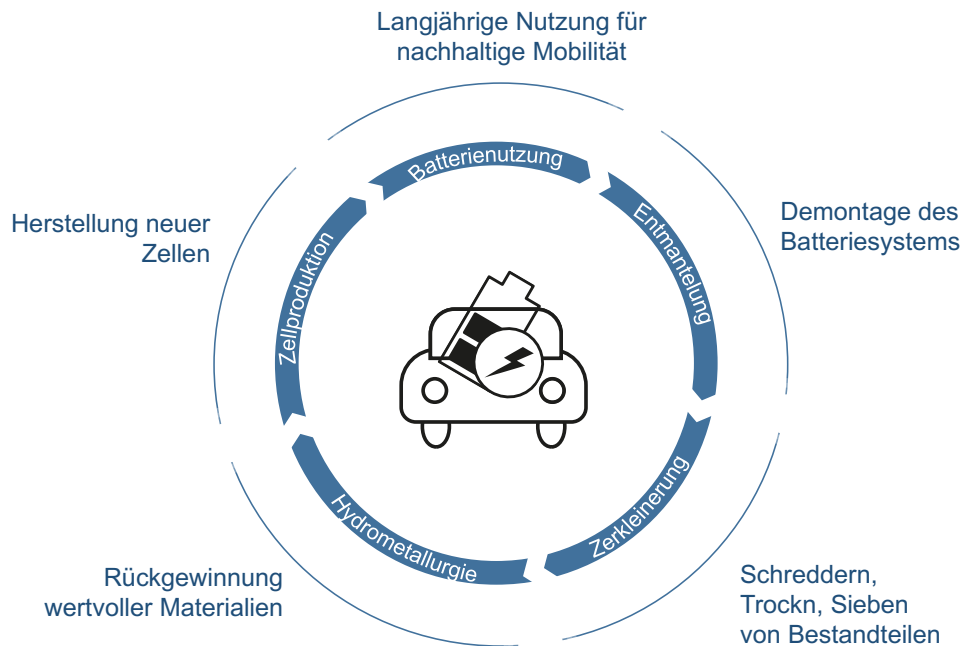
<sup>25</sup> Siehe die Website des Kompetenzclusters Recycling & Grüne Batterie: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/direction/>

<sup>26</sup> Siehe die Website des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/digibattpro-4-0--bw--digitalisierte-batterieproduktion-4-0.html>

<sup>27</sup> Siehe Website der BMW Group: <https://www.bmw.com/de/innovation/wertstoffkreislauf-einer-bmw-batteriezelle.html>



**Abbildung 14: Geschlossener Kreislauf für das Batterierecycling (eigene Darstellung nach Volkswagen AG 2019).<sup>28</sup>**



Entsprechend dem ganzheitlichen Ansatz wird der Kreislaufgedanke auch auf alle anderen Wertschöpfungsstufen und Materialien übertragen: Stahlabfälle werden beispielsweise über einen direkten Materialkreislauf wiederverwendet oder zu den Stahlproduzenten zurückgeschickt, wo sie zu neuem Stahl reproduziert werden. Bis 2030 sollen auf diese Weise die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Stahllieferkette der BMW Group um 2 Millionen Tonnen reduziert werden (BMW AG, 2021).

Der Nachhaltigkeitsgedanke setzt aber schon früher bei der Wertschöpfungskette an, indem bereits nachhaltige Rohstoffe die Basis bilden. So verwendet BMW beispielsweise Econyl®-Garne für Dachhimmel und Fußmatten und spart damit durch die Herstellung des recycelten Stoffes 90 % CO<sub>2</sub>-Emissionen, die sonst bei erdölbasiertem Nylon anfallen würden (BMW AG, 2021). Eine Antwort auf die Frage, wie ein nachhaltiges Auto im Jahr 2040 aussehen könnte, gibt der BMW iVision Circula, der vollständig recycelbar ist. Der Anspruch, die stoffliche Basis des kompletten Fahrzeugs hochwertig wiederzuverwerten – kein Downcycling der Kunststoffe –, erfordert neben der Materialauswahl/-kombination (z. B. gleiches Material für die Kabelisolierungen und die Steckverbindungen) auch eine entsprechende grüne Produktion mit neuen Konstruktionsprinzipien und Herstellungsverfahren,

etwa mechanische Verbindungen statt Kleben. Die Zusammenhänge zwischen Kreislaufwirtschaft und grüner Produktion zeigt Abbildung 15; in diesem Kontext sind neuartige Tätigkeitsprofile wie „Designer zirkuläre Produkte/Produktion (m/w/d)“ zu erwarten.

Ein weiterer Schritt Richtung Nachhaltigkeit in der Automobilbranche ist der Rückgriff auf erneuerbare Energien, die ein großes Potenzial zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen entfalten.

BMW folgt hierbei den lokalen Gegebenheiten der BMW-Werke. Seit 2020 beziehen alle Standorte der BMW Group sowie das Joint Venture BMW Brilliance Automotive (BBA) zu 100 % Grünstrom aus regenerativen Energiequellen. Abhängig vom Standort werden passende Technologien und Lösungen erarbeitet: Das Spektrum reicht dabei von Solarenergie, wie beispielsweise in Mexiko, über Biogas in Südafrika bis hin zu Windkraft in Leipzig. Da die Eigenproduktion den gesamten Energiebedarf nicht vollständig decken kann, kauft das Unternehmen Strom aus regenerativen Quellen hinzu – bevorzugt lokal. Zugleich wird die BMW Group künftig einen steigenden Anteil ihres Strombedarfs durch sogenannte Power Purchase Agreements (PPA) decken, also durch den direkten Bezug aus definierten Erzeugungsanlagen für erneuerbare Energien. Weiterhin arbeitet die BMW Group

<sup>28</sup> Siehe Website der Volkswagen AG: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/stories/batteriezellen-pilotproduktion-ist-gestartet-5383>

auch an Lösungen, erneuerbare Energien zu speichern. So ist beispielsweise die Speicherfarm im Werk Leipzig mit Hochvoltbatterien aus dem BMWi3 ausgestattet. Die Speicherfarm ist in das öffentliche Stromnetz integriert und stellt Regelleistung zur Stabilisierung des Netzes bereit (BMW Group, 2020a). Ziel ist es, alle Werke und Standorte perspektivisch klimaneutral zu betreiben. In Verbindung mit der fortschreitenden Elektrifizierung könnten Ansätze aus der Kreislaufwirtschaft die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 um bis zu 75 % reduzieren, wie die gemeinsame Studie von Accenture, dem World Economic Forum und dem World Business Council for Sustainable Development prognostiziert: „Dabei spielen Methoden der Kreislaufwirtschaft mit Blick auf Energie, Wasser, Abfall, Materialien, Fahrzeuglebenszyklus und -nutzung eine wichtige Rolle“ (World Economic Forum [WEF], 2021).

**Auswirkungen auf Beschäftigte und Beschäftigung**

Mit Blick auf die Beschäftigungseffekte werden neue Geschäftsmodelle für das zirkuläre Management von verbrauchten Batterien (z. B. Pfandmodelle, Leasingmodelle) sowie neue Akteure (z. B. Logistik, Demontage, Bewertung) entstehen und so zu einem schnellen Anstieg des Umlaufs von verbrauchten Batterien führen. Folglich hat die Kreislaufwirtschaft von Batterien nicht nur ein hohes Potenzial zu mehr Nachhaltigkeit, sondern auch zur Schaffung neuer Arbeitsplätze und Berufe wie Produktionstechnolog\*in. In diesem Zusammenhang ist eine Verschiebung von relevanten Arbeitsplätzen nach Deutschland zu erwarten, da die

Tätigkeiten um die Kreislaufführung oftmals regional sind. Speziell in der Automobilindustrie werden aufgrund der zunehmenden Komplexität durch die flexibleren und agileren Fertigungsprozesse Systemwissen und ganzheitliches Denken immer wichtiger (Priesack et al., 2018). Es zeigt sich zudem, dass gerade neue Technologien maßgeblich zum Klimaschutz beitragen und beispielsweise ein ressourceneffizientes zirkuläres Wirtschaften ermöglichen können (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V [BITKOM], 2020). Auch im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien sind IKT-Kompetenzen gefragt, da mithilfe von KI die Effizienz bei der Bereitstellung von erneuerbaren Energien erhöht, der Energieverbrauch optimiert und die Nutzung von Strom und Wasserstoff verbessert werden kann. Trotz des zunehmenden Einsatzes von KI ist der Bedarf an planenden, überwachenden und steuernden Tätigkeiten gestiegen. Der Mangel an IT-Expert\*innen und dem nötigen Fachwissen führt Umfragen zufolge dazu, dass oftmals digitale Anwendungen in den Betrieben nicht etabliert werden (Demary et al., 2021). Für die Entwicklung und Anwendung klimafreundlicher Technologien und Verfahren (z. B. neue Materialien, Fertigung) sind aus Unternehmensperspektive daher vor allem IT-Expert\*innen relevant. Um Fachkräftengpässe an der Schnittstelle von Digitalisierung und Dekarbonisierung entgegenzuwirken und Arbeitsplätze zu halten, ist sowohl die Anpassung der betrieblichen als auch der akademischen Weiterbildung zentral.

**Abbildung 15: Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen Kreislaufwirtschaft und grüner Produktion (eigene Darstellung).**



#### 4.4 Nachhaltige Bauindustrie

Die Baubranche vollzieht derzeit eine Reihe tiefgreifender paralleler Transformationsprozesse, die sich wechselseitig befördern. Speziell die Themen Klimaneutralität, zirkuläre Wertschöpfung, Konnektivität und Automatisierung (Wurm et al., 2021) stehen hierbei in starker Abhängigkeit zur erfolgreichen digitalen Transformation der Bauindustrie und angrenzender Branchen. So schafft das Building Information Modeling (BIM – die vollständige und integrierte Erfassung aller Baustoffe, Stoffströme und Materialeigenschaften sowie der Baupläne und Arbeitsabläufe; vgl. S. 60) als Treiber der Digitalisierung die bisher noch nicht zur Verfügung stehenden Grundvoraussetzungen, um Kreislauffähigkeit und energetische Nachweise zu ermöglichen und in ihrer Weiterführung einen Zirkularitätsindex und Carbon-Footprint von Bauobjekten und Komponenten zu entwickeln. Dieser Wandel vollzieht sich in der gesamten Wertschöpfungskette Planen, Bauen, Nutzung und Rückbau. Übergeordnete Koordination und Schnittstellenmanagement spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Neu gesteckte Nachhaltigkeitsziele beziehen sich nicht nur auf den Neubau, die vergleichsweise einfach zu realisieren sind, sondern auch auf den Erhalt von Gebäudebeständen, die energetische Gebäudesanierung und die digitale Erfassung von Baubeständen. So kann mit der Digitalisierung der Baubranche ein entscheidender Beitrag zur Dekarbonisierung geleistet werden.

Derartige Transferprozesse werden jedoch insbesondere bei KMU stark von der Unternehmenskultur und tradierten Arbeitsweisen getrieben und sind nach Einschätzung der im Zuge dieser Studie befragten Expert\*innen einer der Flaschenhälse bei der flächendeckenden Umsetzung digitaler Ansätze. Hier ist ein Prozess des Umdenkens in der gesamten Branche nötig; bleibt dieser aus, wird das zu starken Verwerfungen in der Branchenstruktur führen. Zudem sind KMU aufgrund ihrer verfügbaren Mittel – sowohl was Software- als auch Kompetenzaufbau angeht – in ihren Adaption- und Entwicklungsmöglichkeiten durch geringe Gewinnmargen benachteiligt.

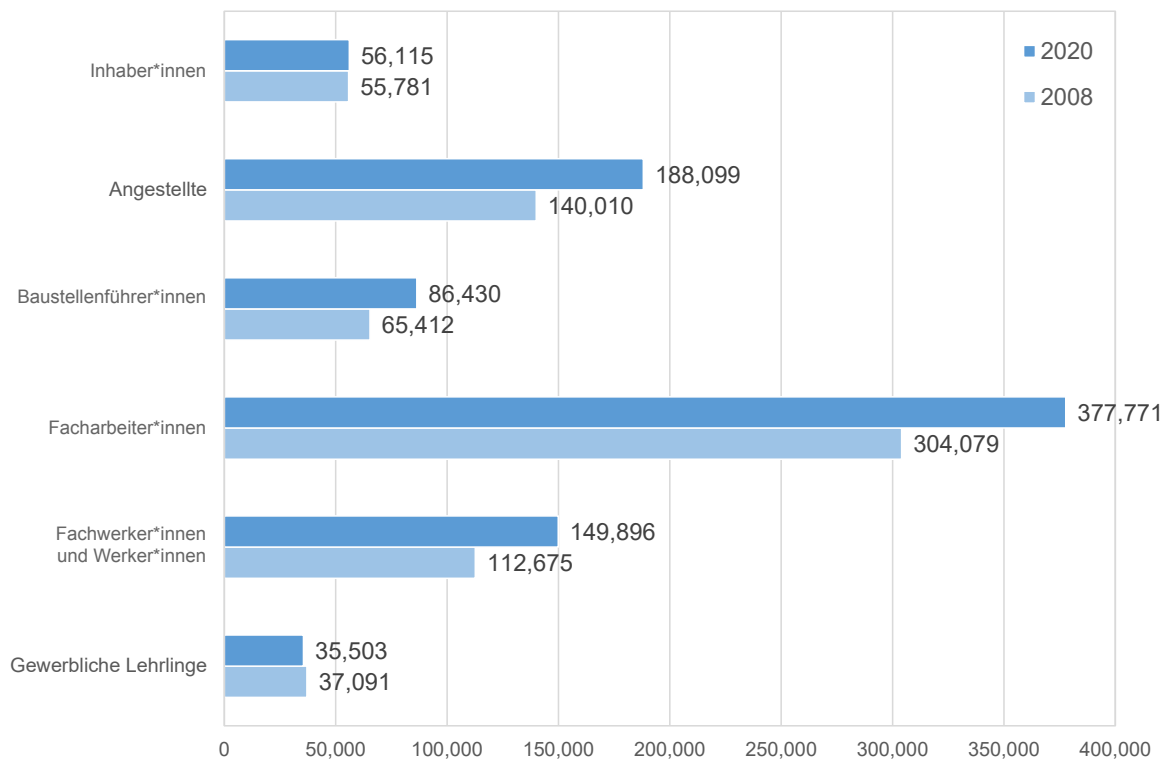
Die Baubranche zählt jedoch zu einer der Schlüsselbranchen der deutschen Wirtschaft. Im Jahr 2020 trug das Baugewerbe 6,1 % zur gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung bei und bildet damit den sechstgrößten Wirtschaftszweig in Deutschland (Rudnicka, 2022). Seit der Finanzkrise 2009 hat die Bau-

branche stetig an Bedeutung zugenommen und sich zuletzt in der Covid-19-Pandemie zur Stütze der deutschen Gesamtwirtschaft entwickelt. Dies zeigt sich an den steigenden Bauinvestitionen sowie der steigenden Anzahl der Beschäftigten im Gegensatz zur Gesamtwirtschaft. Tatsächlich hat die deutsche Bauindustrie im europäischen Vergleich im Jahr 2020 den größten Umsatz erzielt (Statista GmbH, 2021a). Zudem waren im Juni 2020 im Bauhauptgewerbe<sup>29</sup> insgesamt 893.814 Personen beschäftigt und damit 25 % mehr als noch im Juni 2009 (715.048) (vgl. Abbildung 16). Mit einem Anteil von 42,2 % dominieren die Facharbeiter\*innen (Maurer\*in, Betonbauer\*in, Zimmerer\*in) innerhalb der Branche. 9,7 % zählen zur Baustellenführung (Polier\*in, Schachtmeister\*in, Werkpolier\*in) und weitere 16,8 % sind den Fachwerker\*innen und Werker\*innen zugeordnet. Folglich waren knapp drei Viertel aller Mitarbeitenden in der Branche auf den Baustellen tätig. Der Anteil der Angestellten – einschließlich der technischen und kaufmännischen Auszubildenden – lag 2020 insgesamt bei 21,0 % (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V., 2020).

<sup>29</sup> Die Bauindustrie wird traditionell untergliedert in das Bauhauptgewerbe (v. a. Bauunternehmen), das Ausbaugewerbe (Sanitär, Elektro etc.), das sonstige Baugewerbe (z. B. Erschließung von Grundstücken) und den Planungsbereich (Architektur-/Ingenieurbüros). Charakteristisch für die Bauindustrie ist ein hoher Anteil an Kleinunternehmen. Zum Bauhauptgewerbe gehören die drei Teilbereiche Wohnungsbau, Wirtschaftsbau und öffentlicher Bau.

## Abbildung 16: Beschäftigtenstruktur im Bauhauptgewerbe (Datenquelle: Statistisches Bundesamt).

Beschäftigtenstruktur im Bauhauptgewerbe



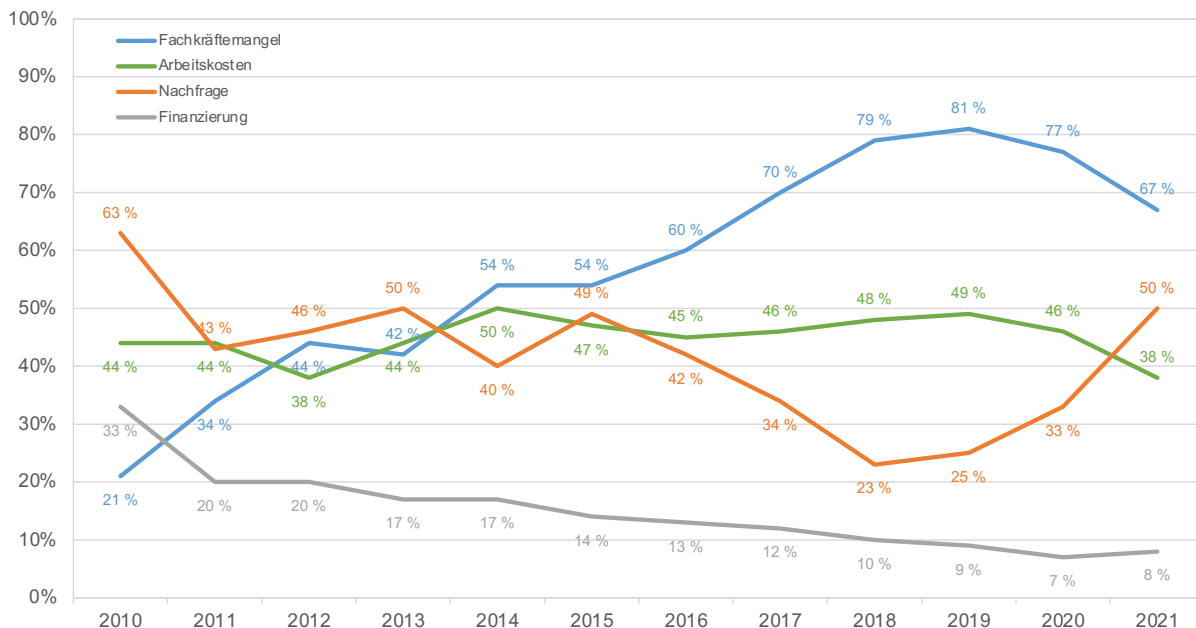
Infolge der steigenden Bauproduktion mussten die Bauunternehmen ihre Beschäftigten von 2009 bis 2020 auf 893.000 (+188.000) aufstocken. Insbesondere Bauingenieur\*innen und Baufacharbeiter\*innen profitierten von dieser Entwicklung: Die Zahl der offenen Stellen für Bauingenieur\*innen hat sich von 2009 bis 2020 mehr als verdreifacht, die für Baufacharbeiter\*innen fast verdoppelt. Trotzdem ist die Nachfrage nach qualifizierten Baufachkräften weiterhin hoch. Im Rahmen einer DIHK-Umfrage im Herbst 2021 gaben 80 % der befragten Bauunternehmen den Fachkräftemangel als Hauptrisiko für die wirtschaftliche Entwicklung ihres Unternehmens an (vgl. Abbildung 17). In der Industrie, im Handel oder im Dienstleistungssektor beklagten dies vergleichsweise zwischen 50 und 60 % (Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. [DIHK], 2021).

Die Sorge liegt unter anderem darin begründet, dass trotz positiver Baukonjunktur weniger Auszubildende in den Betrieben anfangen (2020: 13.160), als Bauarbeiter\*innen in den Ruhestand gehen (2020: ca. 15.000). Ein Grund hierfür ist nach Einschätzungen der befragten Expert\*innen das weiterhin schlechte Branchenimage und die teilweise noch immer vorherrschende tradierte und zu wenig technologie-

getriebene Arbeitsweise einer Vielzahl an Betrieben. Doch innovative Fertigungsverfahren, Einsatz von KI und Robotikanwendungen sowie Modularbauweise (d. h. Vorfertigungsmöglichkeiten in wetterunabhängigen Umgebungen) bieten neue Chancen für eine Aufwertung verschiedener Berufsstände. Um den Herausforderungen des Fachkräftemangels in der Bauindustrie zu begegnen, wurden bereits verschiedene weitere Maßnahmen eingeleitet: z. B. Integration der Arbeitslosen in den Bauarbeitsmarkt, Intensivierung der Nachwuchswerbung, Integration von ausländischen Fachkräften etc. (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V., 2021)

**Abbildung 17: Fachkräftemangel als größtes Risiko der Bauunternehmen (Datenquelle: Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. [DIHK], 2021).**

Umfrageergebnisse des DIHK in der Bauwirtschaft zu den größten Risiken für Unternehmen im Baugewerbe



**Transformation der Wertschöpfung**

Gegenwärtig erlebt die als innovationsträge geltende Branche einen Wandel durch mehrere Trends, die von Urbanisierung, Infrastruktur und demografischen Wandel über Digitalisierung sowie Klimawandel und Nachhaltigkeit reichen und die Branche und die Beschäftigung in unterschiedlichem Maße beeinflussen (Roland Berger GmbH & UniCredit Bank AG, 2016, S. 20). Digitalisierung und Nachhaltigkeit werden hierbei von Bauunternehmen und Architekt\*innen als die beiden wichtigsten Zukunftstrends eingeschätzt. Schwerpunkt aktueller Themenentwicklungen im Nachhaltigkeitsbereich sind die Energie- und Ressourceneffizienz, hier vor allem das energetische Bauen, die Einsparung von Baumaterialien und der Leichtbau, intelligente Energieeffizienzkonzepte, Green Buildings, das sogenannte White Roofing, Wasseraufbereitung, Recycling und Urban Mining – also die Rückgewinnung von Baumaterialien – sowie sorptive Systeme, gebäudeintegrierte Solar- und Klimatechnik und der Einsatz von Biomasse (Roland Berger GmbH und UniCredit Bank AG 2016; Syben 2018, Fraunhofer-Allianz Bau, 2021b). Darüber hinaus sind die Charakterisierung von Werkstoffen für das Recycling sowie Konzepte zur ganzheitlichen Bilanzierung (Ökobilanz, LCA, EF, LCC, Stoffstrom- und Materialflussanalysen) Gegenstand aktueller Überlegungen (Fraunhofer-Allianz Bau, 2021c). Auch innovative, neue Materialien und Baustoffe (sogenannte Advanced Materials) sind zunehmend

Grundlage moderner Gebäude, denn der Trend zu mehr Flexibilität und Adaptivität von Gebäuden stellt zusätzliche Anforderungen an leichte und nachhaltige Materialien, funktionalisierte Verbundstoffe sowie Subsysteme und hybride Konstruktionssysteme aus z. B. nachwachsenden Rohstoffen (Syben 2018, Fraunhofer-Allianz Bau, 2021a).

Weltweit gingen im Jahr 2019 etwa 40 % der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Errichtung und Nutzung von Wohn- und Nichtwohngebäuden zurück (United Nations Environment Programme, 2020). Die Bauwirtschaft gilt zudem als besonders ressourcenintensiver Wirtschaftszweig in Deutschland: 90 % der in Deutschland geförderten mineralischen Rohstoffe werden verbaut (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2018). Hinzu kommen Zement (26,6 Millionen Tonnen) und Baustahl (5,5 Millionen Tonnen) in erheblichen Mengen (Schneider, 2016). Gleichzeitig sind Bau- und Abbruchabfälle jährlich für 55,4 % (230,9 Millionen Tonnen) des deutschen Abfallaufkommens verantwortlich (DESTATIS, 2021). Gerade in dieser Größenordnung des Rohstoffeinsatzes liegen große Einsparpotenziale. Entsprechend dem novellierten Klimaschutzgesetz darf der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Gebäudesektor im Jahr 2030 nur noch höchstens 67 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr betragen (Bundesklimaschutzgesetz 2021, 2021). Die Bundesregierung will dies durch eine steuerliche Förderung energetischer Sanierungsmaßnahmen (z. B. Heizungstausch, Fens-

tereinbau, Dämmung von Dächern und Außenwänden), Energieberatungen sowie eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung erreichen (Bundesregierung [BReg.], 2021).

Insbesondere vor dem Hintergrund des stetig drängenden Themas der Ressourcenschonung und speziell im Kontext der sich verschärfenden Klimadebatte rückt die klimaschädliche Wirkung des Zementeinsatzes immer stärker in den Mittelpunkt der Betrachtung. Denn fast 8 % der weltweit emittierten Treibhausgase gehen allein auf die Zementherstellung zurück (WWF Deutschland, 2019). In Deutschland wurden 2019 rund 34 Millionen Tonnen Beton verbaut und somit 20 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert (Witsch, 2020). Grund hierfür ist zum einen, dass für das Kalkbrennen oftmals fossile Energieträger wie Kohle eingesetzt werden, und zum anderen, dass der Kalk selbst beim Brennen CO<sub>2</sub> freisetzt. Moderne Verbundwerkstoffe wie Carbonbeton und die Verwendung nachwachsender Baustoffe können hier einen wesentlichen Beitrag zur Einsparung von CO<sub>2</sub> liefern. Sie bilden damit ein erhebliches Marktpotenzial für Unternehmen, um zukunftsfähige, innovative Lösungen zu entwickeln. Um der Branche eine möglichst zügige Adaption der bereits bestehenden Technologien in diesem Bereich zu ermöglichen, erscheint die Förderung entsprechender Genehmigungs- und Normungsverfahren dringend geboten. Andernfalls könnte die deutsche Bauwirtschaft gegenüber der internationalen Konkurrenz

den Anschluss verlieren, sollte sich in diesen Marktsegmenten aufgrund weniger strenger Regulierung die internationale Nachfrage stark ausweiten. Auch in Bezug auf den Umgang von Beschäftigten mit diesen neuen Werkstoffen ergibt sich politischer Handlungsbedarf. So verändert sich die Arbeitssituation für Beschäftigte in der Bauausführung potenziell erheblich, wenn sie im großen Umfang Textil- statt Stahlbeton verarbeiten würden. Gegenwärtig schreibt die Praxis auf Baustellen noch schwere Arbeitskluft und entsprechend robustes Schuhwerk vor, die die Stahlgitter erheblich belasten. Dies ist bei Carbonbeton nicht mehr in dieser Weise möglich. Für solche und andere, aus der Verwendung neuer Werkstoffe resultierende Veränderungen des Arbeitsalltages, müssen Beschäftigte entsprechend sensibilisiert und umgewöhnt werden (Glock et al., 2019).

Der Wandel wird folglich von der Notwendigkeit ressourcenschonenden, energieeffizienten Bauens getrieben. Entsprechend dem Konzept „Green Building“ ist die gesamte Wertschöpfungskette von Bauwerken unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit zu denken (siehe Abbildung 18). Im Fokus steht der Energiebedarf, aber auch weitere Kriterien wie die Standortwahl, die Flächennutzung, die nachhaltige Stoffauswahl (insbesondere Holz, Naturstein, Lehm, Ton, Ziegel) sowie Gesundheit und Umwelt spielen eine Rolle.

### Abbildung 18: Wertschöpfung über den Lebenszyklus von Bauwerken (eigene Darstellung).



#### Digitalisierung und Dekarbonisierung

Die Digitalisierung nimmt eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette ein. Voraussetzung für die Errichtung eines nachhaltigen, energieeffizienten und ressourcenschonenden Gebäudes ist zunächst eine umfassende Planung des finanziellen, organisatorischen und technischen Handlungsrahmens des Baugewerbes sowie die Entscheidung über die Wahl der Bauweise und Baustoffe. Angesichts der Materialengpässe, Lieferschwierigkeiten und steigenden Preise insbesondere für Holz (+400 %) und Baustahl (+40 %,) zu Beginn des Jahres 2021 wird die materialgerechte Planung immer wichtiger. So können allein dadurch Einstands-, Lager- und Bestellkosten ganzheitlich minimiert werden. Werden

diese strategischen Überlegungen auf den gesamten Planungs- und Bauprozess ausgeweitet, ergibt sich eine neue Dimension der Modellierung, Steuerung und Optimierung, die durch den Einsatz digitaler Tools realisiert werden: Neben der Künstlichen Intelligenz und dem Internet der Dinge bieten Robotik, additiver Druck, erweiterte Realität und virtuelle Realität der Baubranche neue wertvolle Möglichkeiten. So trägt der Einsatz von KI durch smarte Analysen von Sensor- und Wetterdaten zu einer steigenden Energieeffizienz bei, indem Prognosen ermöglicht und die Netzstabilität sowie Versorgung mit erneuerbaren Energien sichergestellt werden können. Dafür bedarf es Fachkräfte aus der Gebäudetechnik, die im Energiesektor entsprechend weitergebildet werden müssen.

Als Markenzeichen für die Digitalisierung der Baubranche gilt das Tool Building Information Modeling (BIM), womit sich Bauobjekte virtuell entwerfen und voll umfänglich – einschließlich der funktionalen Eigenschaften – darstellen lassen. BIM erleichtert die Konstruktion, die Ausrüstung, das Management sowie den Betrieb eines Objekts inklusive Wartung und Instandhaltung. Besonders hervorzuheben ist die zeitgleiche Einbindung und Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten vom Bauunternehmen über Architekt\*innen bis zur Eigentümer\*in über den gesamten Lebenszyklus eines Objekts, wodurch sich sowohl Kosten und Fehler als auch der Zeitaufwand in Bauprozessen erheblich reduzieren. Dass BIM vermehrt am Bau eingesetzt wird, zeigen Studienergebnisse des BIM-Monitors 2019: Während 20 % der befragten Baufirmen 2017 BIM genutzt haben, waren es 2019 bereits 28 %, die BIM mehrheitlich bei der Ausführungsplanung (73 %), bei der architektonischen Entwurfsplanung (65 %) und der gebäudetechnischen Fachplanung (61 %) einsetzen. Vorteile dieses Tools werden insbesondere in der 3D-Visualisierung und Animationsdarstellung (83 %) gesehen, bei der Erstellung von 2D-Zeichnungen aus 3D-Modellen (81 %), im Kollisionsmanagement sowie bei Mengenplanungen (71 %) (BauInfoConsult GmbH, 2019). Die Daten kommen dabei in erster Linie aus Suchmaschinen, doch auch Websites der Hersteller und persönliche Kontakte sind Informationsquellen für das BIM. In der Realität ist BIM Studienergebnissen zufolge noch kein Selbstläufer. Kritisch werden vor allem der Innovationsaufwand für die Software und Mitarbeiterschulungen sowie die Amortisationsdauer einer Umstellung auf BIM gesehen. Zudem ist die Kundennachfrage nach BIM-gesteuerten Projekten noch gering. Um die Digitalisierung in der Baubranche zu fördern, haben das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019 BIM Deutschland als nationales Zentrum für die Digitalisierung des Bauwesens ins Leben gerufen.<sup>30</sup>

Neben der konkreten Planung und dem Einsatz nachhaltiger Baustoffe hat die Sanierung und das Recycling von Gebäuden einen hohen Stellenwert in den Dekarbonisierungsbestrebungen, weshalb dies zu einem der Vorzeigeprogramme des europäischen „Green Deal“ wurde. Tatsächlich liegt die Sanierungsrate im europäischen Durchschnitt aktuell bei lediglich 1 Prozent. Zentrales Ziel der Kommission ist es, die Sanierungsra-

te von Gebäuden bis 2029 mindestens zu verdoppeln und den Energieverbrauch durch Wärmedämmung oder moderne Heizungsanlagen zu senken. Für die Sanierung relevant werden zusätzlich Smart Meter als Ersatz für analoge Stromzähler, die über das Internet mit den Netzbetreibern verbunden sind. Sie bieten den Vorteil, Daten zu steuern und zu speichern und diese Information auf vernetzte Elektrogeräte zu übertragen. Durch die Gebäudesanierung allein werden schätzungsweise bis zu 160.000 neue grüne Arbeitsplätze<sup>31</sup> in der Baubranche entstehen – mit innovativen Tätigkeitsfeldern, die neben den Bereichen Bau und Architektur auch den Bereichen Energie, Design und digitale Technologien zugeordnet werden können. Allerdings wird nach Expert\*inneneinschätzung fehlendes qualifiziertes Personal als Haupthemmnis zur Umsetzung der steigenden Sanierungsrate gesehen. Dies liegt teils auch daran, dass die kleinteiligen, aber arbeitsintensiven Arbeiten auf Baustellen sich nur in geringem Maße durch Maschinen ersetzen lassen.

Um das Recyclingproblem zu lösen, wird weiterhin mit dem Ansatz „Cradle to Cradle“ (C2C) ein kontinuierlicher Kreislauf der Stoffe verfolgt (siehe dazu auch Abbildung 5 auf Seite 23). Durch eine verbesserte Effizienz und die Wiederverwertung von Materialien werden Abfall und Ressourcenverbrauch in jeder Phase des Baus und während der Nutzung minimiert. Gleichzeitig können Bauunternehmen durch Berücksichtigung des C2C-Konzepts dem wachsenden Rohstoffmangel entgegenwirken. Für Bauarbeiter\*innen und die späteren Nutzer\*innen liegt der Vorteil darin, dass die verwendeten Materialien chemisch unbedenklich und damit unschädlich für Mensch und Umwelt sind. Voraussetzung ist, dass die verwendeten Produkte nachhaltig und rückführbar sind. Dafür bedarf es neben neuer Planungstools, Gebäudekonzepte und Bauprodukte insbesondere der Entwicklung eines entsprechenden Rücknahmesystems. Vor diesem Hintergrund kann Kreislaufwirtschaft nicht nur zu mehr Nachhaltigkeit, sondern zusätzlich zu neuen Geschäftsmodellen wie digitalen Software- und Cloudlösungen in der Baubranche führen (Schober, 2021). Mit Blick auf eine nachhaltige Stadtentwicklung unterstützt die Bundesregierung Kommunen bei der Gestaltung und Umsetzung, z. B. die Projekte „Zukunftsstadt 2030“ oder „Zukunftsstadt goes Europe“. Die Planung und der Bau einer Zukunftsstadt konfrontieren Fachkräfte aus den unterschiedlichen

<sup>30</sup> Als zentrale öffentliche Anlaufstelle des Bundes informiert, berät und vernetzt BIM Deutschland die Akteure im Bauwesen zum Einsatz von BIM beim Planen, Bauen, Betreiben und Rückbauen im Hoch- und Infrastrukturbereich. Vgl. <https://www.bimdeutschland.de/bim-deutschland/aufgaben/ueber-bim-deutschland>

<sup>31</sup> Unter einem „grünen Arbeitsplatz“ ist jegliche berufliche Tätigkeit zu verstehen, die Energie und Rohstoffe einspart, erneuerbare Energien fördert, Abfall und Verschmutzung reduziert oder die biologische Vielfalt und Ökosysteme schützt und damit zum Schutz der Umwelt und zur Bekämpfung des Klimawandels beiträgt.

Bereichen – wie beispielsweise Verkehrs-, Stadt- und Regionalplanung, Architektur und Baugewerbe, Energie- und Gebäudetechnik – mit neuen, umfassenden Aufgabenbereichen, die neben einer branchenübergreifenden Vernetzung ergänzende Zusatzqualifikationen zur Grundausbildung erfordern.

### Auswirkungen auf Beschäftigte und Beschäftigung

Die Dekarbonisierung und die damit einhergehende Modernisierung durch Digitalisierung des Gebäudesektors könnten zu bedeutenden Treibern in der deutschen Baubranche werden. Diese Transformation kann beschleunigt werden durch neue standardisierte Sanierungsansätze, eine Modernisierung der Wärmetechnik und einen verstärkten Rückgriff auf lokal erzeugte erneuerbare Energien, verbunden mit regionalen Lieferketten für relevante Baumaterialien.

Es ist allerdings zu beobachten, dass trotz des Fortschritts der technologischen Entwicklungen und Einsatzmöglichkeiten, die Digitalisierung der deutschen Bauindustrie nur langsam voranschreitet und im europäischen Vergleich hinterherhinkt.<sup>32</sup> Auch die Coronapandemie hat, anders als in anderen Branchen, nicht zu einem Digitalisierungsschub geführt (Berbner et al., 2021). Die Ursache kann einerseits in der positiven Baukonjunktur liegen, wodurch zum einen der Modernisierungsdruck nicht groß genug erscheint, andererseits zeichnet sich die Baubranche durch viele Kleinunternehmen – vertreten durch die ältere Generation – aus, die den neuen Methoden der Digitalisierung skeptisch gegenübersteht. Neben fehlender interner Akzeptanz sehen die Unternehmen jedoch die größte Herausforderung bei der Nutzung digitaler Lösungen in den fachlichen Kompetenzen ihrer Mitarbeitenden bzw. in dem Fachkräftemangel (Berbner et al., 2021). Daraus lässt sich die Notwendigkeit ableiten, Fachkräfte auf diesen Wandel vorzubereiten und entsprechend zu qualifizieren. Sowohl für die digitalen Transferprozesse als auch für ein grundlegendes Nachhaltigkeitsmindset sind im erheblichen Maße Qualifikationsanpassungen zu erwarten, denn unabhängig von der Unternehmensgröße kommt dem LCA und der Festlegung von Nachhaltigkeits-KPI bei Mittel- sowie Langfristzielen eine große Bedeutung zu. Insbesondere bei KMU ist damit nach Expert\*innenmeinung die Fragestellung verbunden, ob das hierfür benötigte Wissen und die Personalressourcen intern aufgebaut werden können oder es gar neuer Bauprojektstrukturen mit stärkerer

Zuarbeit bedarf, um einem Massensterben kleinerer Betriebe entgegenwirken zu können. Vor allem für Bauleiter\*innen, Poliere\*innen, Planer\*innen und Kalkulator\*innen wird sich die Arbeitsweise grundlegend verändern. Es ist auch anzunehmen, dass durch vermehrte automatisierte Prozesse und den Einsatz digitaler Hilfsmittel die Arbeitsprozesse effizienter und schneller ausgeführt werden können. Den Qualifizierungsbedarf versuchen Bauunternehmen derzeit sowohl über interne als auch externe Schulungsangebote abzudecken. Dabei werden jedoch fehlende Standards für BIM-Schulungen bemängelt (RG-Bau, 2018). Die vertiefende Untersuchung findet sich im Ergebnisbericht der Bergischen Universität Wuppertal (vgl. Helmus et al., 2018). BIM Deutschland kann an dieser Stelle mit einheitlichen Aus- und Weiterbildungskonzepten für öffentliche Bauprojekte eine Vorbildfunktion für KMU einnehmen.

Neben den neuen digitalen Kompetenzen gehen die Qualifikationserfordernisse des ressourceneffizienten und nachhaltigen Bauens über die notwendigen Fachkompetenzen hinaus und setzen eine ganzheitliche Denk- und Arbeitsweise voraus: „Die Fähigkeit zur ressourcenbezogenen, quantifizierbaren Optimierung von Gebäude- und Quartierskonzepten auf der Basis ingenieurtechnischer Methoden und der wirkungsvollen Integration der gewonnenen Erkenntnisse in den Planungsprozess unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus“ stellt für Ingenieur\*innen, Architekt\*innen und Planer\*innen ein besonderes Qualifikationsmerkmal dar und wird daher beispielsweise im Masterstudiengang „Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen“ an der TU München gelehrt.<sup>33</sup> Die Ausbildung verbindet die traditionellen Lehrinhalte im Bereich Entwurf und Planung auf den Maßstabsebenen Gebäude, Quartier, Stadt und Region mit vertieften Kenntnissen in den für das ressourceneffiziente und nachhaltige Bauen relevanten Kompetenzfeldern Bauphysik, Gebäudetechnik, Baukonstruktion und Lebenszyklusanalyse. Modernes Bauen setzt folglich eine höhere Flexibilisierung voraus und wird sich intensiver mit anderen Branchen vernetzen müssen. So z. B. mit der Forstwirtschaft, um Holz als nachwachsende Ressource stärker zu nutzen, oder mit der Energiebranche über gemeinsame Konzepte für eine dezentrale Energieversorgung und Optimierung der Energieeffizienz nachzudenken. Durch modulares und nachhaltiges Bauen, 3D-Druck und Robotik werden sich die Jobprofile in der Baubranche grundlegend wandeln.

<sup>32</sup> So hat Dänemark bereits 2012 eine BIM-Pflicht beim Bau öffentlicher Gebäude und Universitäten eingeführt. In Großbritannien gilt diese seit 2016 für öffentliche Bauprojekte. Ähnliche Vorgaben gibt es schon länger in Schweden und Finnland, die auf den IFC-Standard zur digitalen Beschreibung von Gebäudemodellen setzen.

<sup>33</sup> Siehe Studiengangsbeschreibung der TU München: <https://www.tum.de/studium/studienangebot/detail/ressourceneffizientes-und-nachhaltiges-bauen-master-of-science-msc>



Perspektivisch gesehen wird sich zeigen, dass Nachhaltigkeit bei der Auftragsvergabe eine zentrale Rolle einnehmen wird. Entsprechend werden Spezialist\*innen gefragt sein, welche die Lücke zwischen den klassischen Berufsfeldern wie Bauingenieur\*in, Umweltingenieur\*in, Architekt\*in und Gebäudetechniker\*in schließen. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, ist folglich ein Umdenken der Bauunternehmen in diese Richtung notwendig, denn wer traditionelle Handwerkskunst mit digitalem Know-how aufwerten kann, wird zukünftig die besseren Chancen haben.

Ein sehr anschauliches Beispiel für diese Entwicklung ist das Unternehmen Goldbeck mit Sitz in Bielefeld, das durch den Bau der Gigafactory von Tesla im brandenburgischen Grünheide auch außerhalb von Fachkreisen eine gewisse Bekanntheit erfahren hat. Goldbeck setzt konsequent auf eine durchgehende Digitalisierung und Automatisierung, die den unternehmenseigenen Systembau mit hoher Vorfertigung auszeichnet. Das explizite Vorbild von Goldbeck ist die Automobilindustrie mit ihren Modulplattformen (Kewes, 2020). Seit dem Jahr 2019 verfügt die Firma über ein kleines Team im Silicon Valley, um Kontakt zu Start-ups für digitales Bauen und zur Stanford University zu halten. Hier lehrt und forscht unter anderem Prof. Martin Fischer, dessen Ziel es ist, die Prozesse für Planung, Bau und Betrieb von Gebäuden zu verbessern sowie die Nachhaltigkeit der gebauten Umwelt zu erhöhen. Die Arbeiten fließen ein in Anwendungen für virtuelle Planung und Konstruktion (VDC). Im Silicon Valley hat zudem die Firma Autodesk ihren Sitz, deren „BIM 360“-Software Goldbeck einsetzt; Goldbeck wird von Autodesk wiederum als Best-Practice-Beispiel zur Anschauung genutzt (Voigt, 2020).

Die Transformation der Branche durch Digitalisierung, Nachhaltigkeit, Vernetzung und neue Beteiligungsformen ist daher Voraussetzung, um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken. Insgesamt könnten durch die digitale und ökologische Transformation der Baubranche bis 2050 etwa 275.000 zusätzliche Arbeitsplätze in Deutschland geschaffen werden (Helmcke, Stefan/Heuss, Ruth/Hieronimus, Solveigh/Engel, Hauke, 2021). Insbesondere gut ausgebildete und höher qualifizierte Fachkräfte werden zukünftig benötigt (z. B. für die Herstellung und Installation von Wärmepumpen oder den Einbau von Materialien für eine optimierte Gebäudedämmung), sodass auch eine höhere Vergütung zu erwarten ist. Einerseits könnte der Fachkräftemangel die Transformation und damit das Wachstum abbremsen, denn er stellt ein Hindernis beispielsweise für die Realisierung der erhöhten Sanierungsrate dar, andererseits haben Dekarbonisierung und Digitalisierung nach Expert\*inneneinschätzung das Potenzial, das Baugewerbe als Arbeitgeber insbesondere für die jüngere Generation attraktiver zu machen. Ziel muss es sein, die Quote von neuen Lehrlingen, Fachwerker\*innen sowie vor allem Facharbeiter\*innen zu erhöhen. Insbesondere Frauen könnten im Zusammenhang mit nachhaltigen Themen durch eine gezielte neue Imageverbesserung angeworben werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die Digitalisierung als grundlegendes Element der Wertschöpfung und Leistungserbringung (bei Ausweitung des Leistungsspektrums) in der Baubranche künftig durchsetzen, modulares, nachhaltiges Bauen effektiv vorantreiben und den Fachkräftemangel – zumindest in Teilen – entschärfen wird.

## 5. Datenanalyse von Aus- und Weiterbildungsangeboten

Ein rascher Technologiefortschritt und der sich hieraus ergebende geänderte Bedarf an die Fähigkeiten der Beschäftigten bauen Druck auf die Bildungs- und Ausbildungssysteme auf. Um spezifische Unterschiede zwischen Forschung, dem Stand der Aus- und Weiterbildung sowie Studieninhalten und Anforderungsprofilen in aktuellen Stellenausschreibungen in Unternehmen und weitere Effekte sichtbar zu machen, orientiert sich die folgende Analyse an einem bereits in der Literatur beschriebenen Ansatz. Börner et al. (2018) konnten mit ihrem Indikatoren-basierten Ansatz die

Reaktionsmöglichkeiten und die Diskrepanz zwischen dem akademischen, dem Bildungs- und dem Industriesystem am Beispiel eines sich dynamisch entwickelnden Bereiches, nämlich Data-Science und Data-Engineering, zeigen. Zudem weisen sie im genannten Beispielstudiengang Curricula eine vermittelnde Rolle zwischen Forschung und Arbeitsmarkt zu. Für den folgenden Abgleich der spezifischen Kompetenzanforderungen sowie Ausbildungsinhalte, wurde auf eine ähnliche Datengrundlage zurückgegriffen. Dabei stützt sich die Analyse auf weitestgehend öffentlich

zugängliche Datensätze und Portale, mit Ausnahme von wissenschaftlichen Publikationen, die nur kostenpflichtig zugänglich sind. Eine einheitliche Suchabfrage über alle Datensätze zum weitergefassten Thema erneuerbare Energien, Wasserwirtschaft, Umweltschutz und Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft, Bioökonomie sowie Mobilität soll hier den Vergleich der Angebote ermöglichen. Im Folgenden wurden 4 verschiedene Aspekte für die Analyse herangezogen:

- Forschungsinhalte durch die Analyse wissenschaftlicher Publikationen der Scopus®-Datenbank
- Aus- und Weiterbildungsangebote auf BERUFENET
- Hochschulstudiengänge von der Bewertungsplattform StudyCheck.de
- Studien- und Weiterbildungsangebote in Form von Massive Open Online Courses (MOOCs) der Plattform edX.

Zur Analyse der entsprechenden Inhalte wurde ein auf Text-Mining und KI-basierter Ansatz gewählt. Hierzu wurden zunächst die Datensätze der genannten Quellen erfasst und der so entstandene Textkorpus sowie dazugehörige Metadaten vorverarbeitet und bereinigt (Abbildung 19). Zur weiteren Beschreibung wurde, wenn möglich, die räumliche Verteilung betrachtet und in Form von Landkarten visualisiert. Im Falle der wissenschaftlichen Publikationen wurden die Datensätze in Form von Ko-Häufigkeitsnetzwerken in Kombination mit einer konventionellen Clustermethode ausgewertet. Zur Exploration der thematischen Zusammenhänge der unteren drei Datensätze wurde eine Word-Embedding-Methode aus dem Natural Language Processing (NLP) namens Word2Vec verwendet. Mit dieser lernt ein neuronales Netz Wortassoziationen (semantisches Netz) aus einem großen Textkorpus. In diesem Fall bestand der Trainingsdatensatz aus deutschen News- und etablierten Blogbeiträgen sowie Beschreibungen aus Forschungsprojekten aus dem Förderkatalog. Aufbauend auf diesen gelernten Assoziationen wurden die Daten mittels k-

Means-Algorithmus geclustert (ähnlichkeitsbasierte Zuordnung von Objekten zu einer Anzahl von k-Gruppen) und in Form einer Themenkarte dargestellt. Dies ermöglicht eine aggregierte Betrachtung der enthaltenen Themenkomplexe.

### Analyse von wissenschaftlichen Publikationen

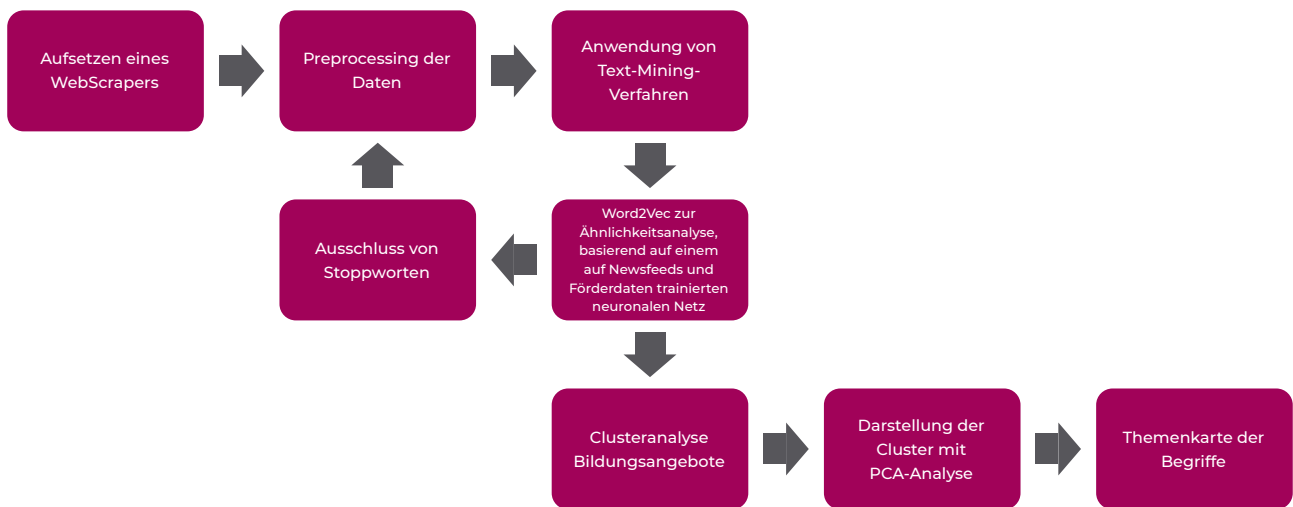
Für die Analyse der Forschungsinhalte wurden wissenschaftliche Zeitschriftenartikel, Konferenzbeiträge, Bücher und Buchkapitel in den zwei spezifischen Kontexten Kreislaufwirtschaft bzw. Bioökonomie im Kontext Qualität der Arbeit, Arbeitsbedingungen und/oder Skills-Entwicklung sowie „Green Skills“ der Scopus®-Literaturdatenbank<sup>34</sup> analysiert. Insgesamt wurden für 1.998 bzw. 543 Dokumente eine Textanalyse der Titel, Keywords und der Abstracts durchgeführt und Ko-Häufigkeiten der extrahierten Begriffe in einem Netzwerkgraphen dargestellt, um die aktuellen weltweiten Forschungsinhalte genauer beschreiben zu können und einen Einblick in den fachlichen Diskurs über Green Skills zu erhalten (vgl. hierzu Abbildung 20<sup>35</sup> und Abbildung 21<sup>36</sup>).

34 Scopus® ist eine der weltweit umfangreichsten Literaturdatenbanken und umfasst Angaben zu über 75 Millionen Artikeln aus fast 25.000 Titeln, darunter 23.500 peer-reviewed Zeitschriften. Zusätzlich sind 9 Millionen Konferenzbeiträge und knapp 200.000 Bücher auffindbar. Die Einträge umfassen die Bereiche Naturwissenschaften, Technik, Medizin, Sozialwissenschaften und Kunst- und Geisteswissenschaften – siehe auch <https://www.scopus.com/home.uri>

35 Auswertung der Scopus®-Literaturdatenbank nach den Stichworten „TITLE-ABS-KEY-AUTH(„circular economy“ OR „life cycle“ OR „bio economy“) AND TITLE-ABS-KEY-AUTH(„quality of work“ OR „working condistion\*“ OR „skill\*“) AND DOCTYPE ( ar OR cp OR bk OR ch)“; 1.041 Zeitschriftenartikel, 814 Konferenzbeiträge, 46 Bücher und 97 Buchkapitel – Stand: November 2021.

36 Auswertung der Scopus®-Literaturdatenbank nach den Stichworten „TITLE-ABS-KEY-AUTH(„green skill\*“ OR „green job\*“ OR „ge-ening“) AND DOCTYPE(ar OR cp OR bk OR ch)“; 380 Zeitschriftenartikel, 69 Konferenzbeiträge, 16 Bücher und 79 Buchkapitel – Stand: November 2021.

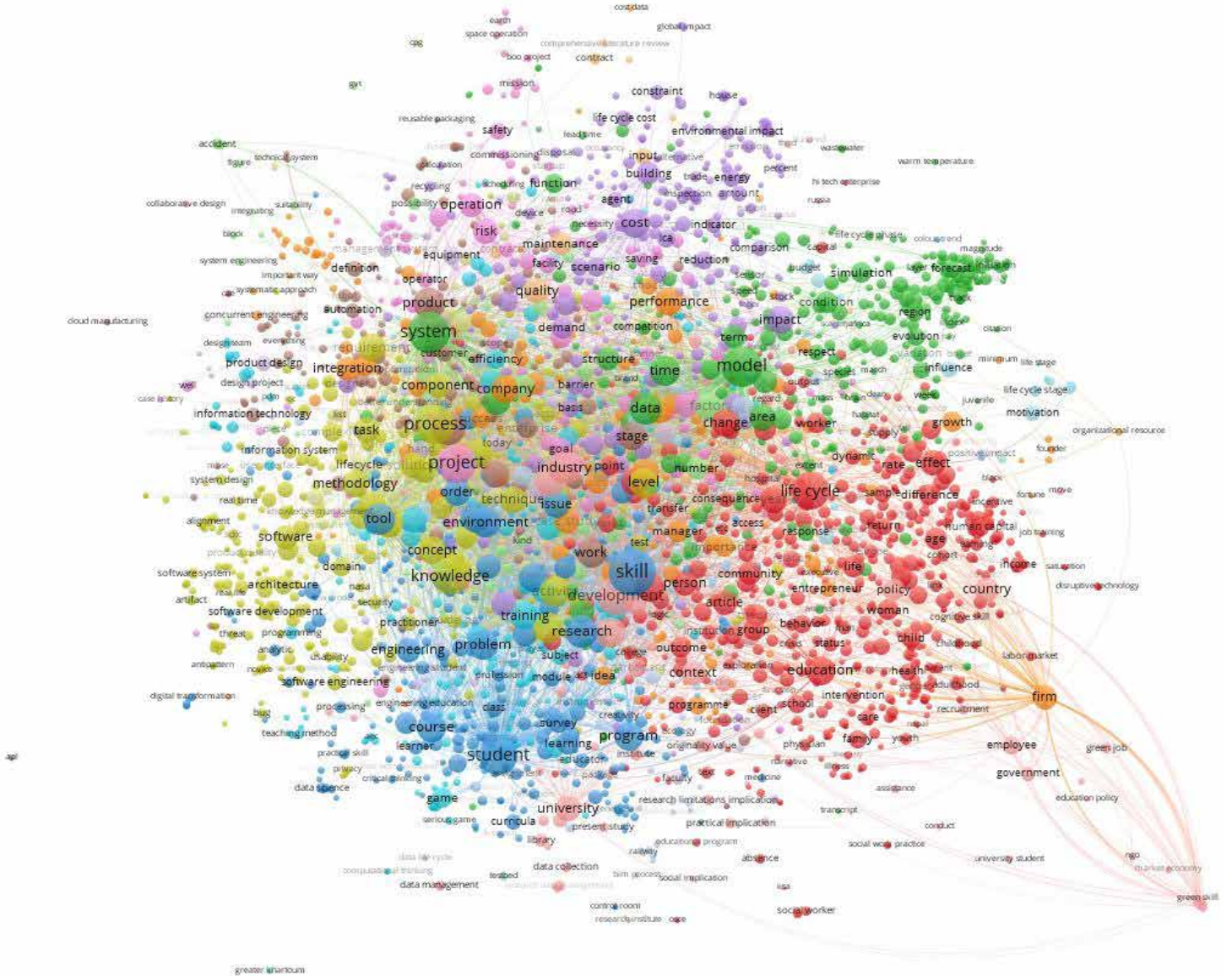
**Abbildung 19: Prozessdarstellung der Analyse der Weiterbildungsangebote (eigene Darstellung).**



Die Anzahl der Publikationen in diesem Themengebiet steigt seit dem Jahr 1998 kontinuierlich an und lag im Jahr 2019 bei 191 Publikationen. Hierbei sind vor allem Forschende in den USA, gefolgt von Großbritannien, Deutschland, Italien und Spanien aktiv. Abbildung 22 zeigt hierzu die räumliche Verteilung der affilierten Universitäten. Die algorithmenbasierte Textanalyse lässt einzelne größere Themencluster zu „Education und Mindset“, „Tools und Engineering“, „Modellierung und Forecast“, „Life Cycle Costs und Building“, „Automation und Product“ sowie „Software und Architecture“ erkennen. Die detailliertere Analyse der Inhalte zeigte jedoch ein sehr, wenn nicht sogar zu breites Themenspektrum häufig am Rande der fokussierten Fragestellung. Dennoch konnten folgende Schwerpunkte eines in der Literatur diskutierten erforderlichen zukünftigen Skills-Set herausgearbeitet werden:

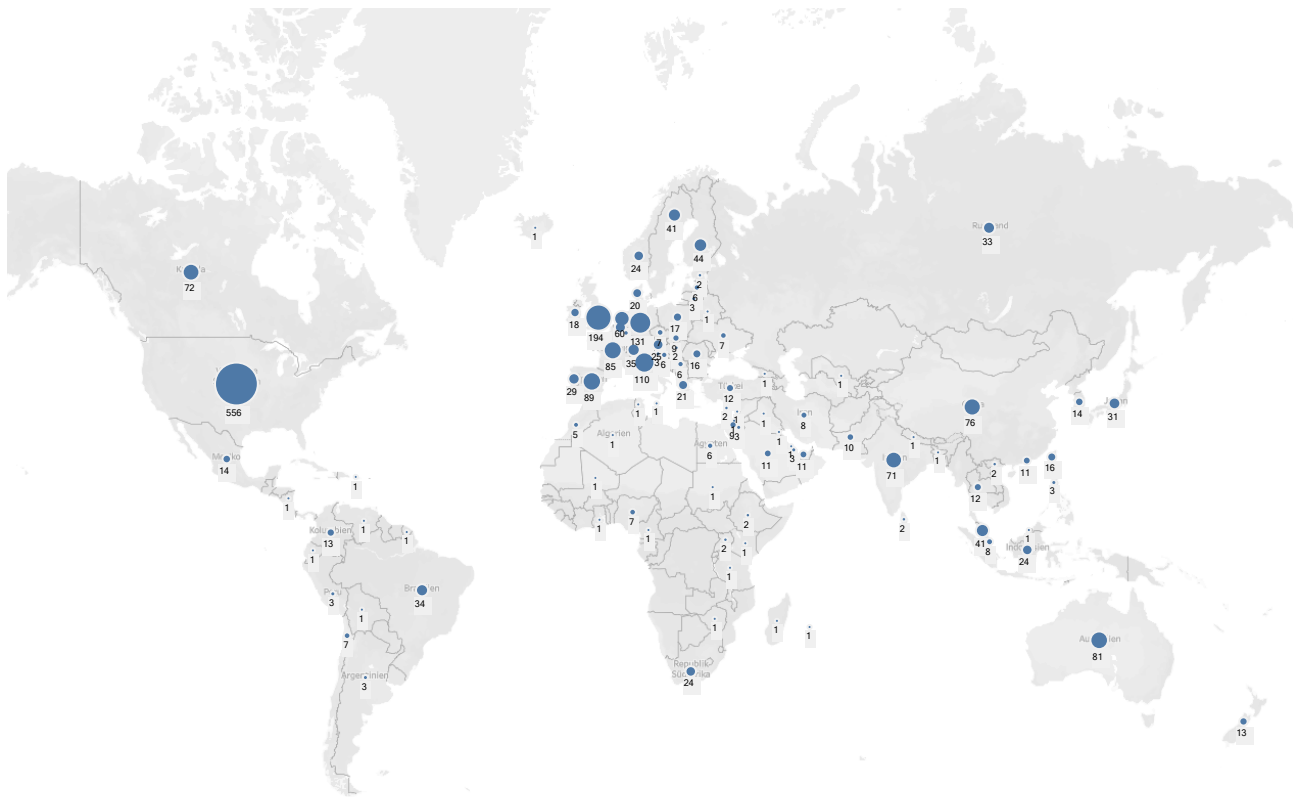
*Software Engineering and Development, Lifecycle Assessment, Market Value Chain and Consumer Interests, Green Business Models, Remanufacturing and Reverse Logistics, Multifunctional Team, Sustainable Performance in Construction, Circular Economy and Business Models, Mixed Model Assembly Lines, Software Training, Computer-Aided Engineering, Data Management, Noncognitive Skills.*

**Abbildung 20: Ko-Häufigkeiten wissenschaftlicher Publikationen zu den Schwerpunkten Kreislaufwirtschaft bzw. Bioökonomie im Kontext Qualität der Arbeit, Arbeitsbedingungen und/oder Skills-Entwicklung (Datenquelle: Scopus®; eigene Darstellung).**





**Abbildung 22: Regionale Verteilung wissenschaftlicher Publikationen zu den Schwerpunkten Kreislaufwirtschaft bzw. Bioökonomie im Kontext Qualität der Arbeit und Green Jobs (Datenquelle: Scopus®; eigene Darstellung).**



© 2022 Mapbox © OpenStreetMap

**Aus- und Weiterbildungsangebote auf BERUFENET**

Zur Analyse des derzeitigen Standes der Aus- und Weiterbildungsangebote wurden die Berufsinformationen auf der Seite BERUFENET<sup>37</sup> der Bundesagentur für Arbeit herangezogen und eine Suchabfrage mit Suchvariablen durchgeführt.<sup>38</sup> Als Suchergebnis wurden 34 Aus- und 46 Weiterbildungsberufe gefunden; eine detaillierte Auflistung geben Tabelle 1 und Tabelle 2. Die Angaben zu den spezifischen Digitalisierungsinhalten wurden mithilfe des oben beschriebenen Ansatzes untersucht und in Form von Wortakkumulationen zu den jeweiligen Suchvariablen zusammengefasst (Abbildung 23).

Spezifische Ausbildungsberufe sind in den Bereichen regenerative Energietechnik und Umweltschutz vorhanden. In anderen Schwerpunkten werden Ausbil-

dungsinhalte im Regelfall um Digitalisierungsinhalte ergänzt und mit gleicher Berufsbezeichnung weitergeführt. In diesen Berufen wird die Anwendung neuer digitaler Technologien in zunehmendem Maße zum alltäglichen Arbeitsinhalt gehören. Die Analyse legt folgende Schwerpunkte eines aktuellen Skills-Sets nahe:

*Robotic und Cobots, Echtzeit-Datenanalyse, AR und VR, IoT-Plattformen, Predictive Maintenance, 3D-Druck, 3D-Laserscanning, App-Entwicklung, Smart Grid, Smart Metering, Wearables, virtuelle Kraftwerke, autonome Systeme, digitales Wertstoff- und Abfallmanagement, Drohnentechnik.*

<sup>37</sup> Online verfügbar auf <https://berufenet.arbeitsagentur.de/>, zuletzt geprüft am 20.12.2021.

<sup>38</sup> Verwendete Suchvariablen: „umwelt“ oder „wasser“ oder „hydrolo“ oder „wasser“ oder „automo“ oder „mobili“ oder „energ“ oder „kreis“ oder „erneu“ oder „bioök“ oder „nachhalt“.

**Abbildung 23: Digitalisierungsinhalte der Aus- und Weiterbildungsangebote nach Stichworten – Stand: November 2021 (Datenquelle: BERUFENET; eigene Darstellung).**



**Tabelle 1: Übersicht der identifizierten Ausbildungsberufe – Stand: November 2021 (Datenquelle: BERUFENET; eigene Darstellung).**

Berufskundliche Gruppe	Abfrage	Berufsbezeichnung
Ausbildung Berufsfachschule	*automo*	Industrietechnologe/-technologin
	*energ*	Elektrotechnische/-r Assistent/-in
		Industrietechnologe/-technologin
		Techn. Assistent/-in - regenerative Energietechnik/Energiem.
	*erneu*	Techn. Assistent/-in - regenerative Energietechnik/Energiem.
	*nachhalt*	Umweltschutztechnische/-r Assistent/-in
	*umwelt*	Landwirtschaftlich-technische/-r Assistent/-in
Umweltschutztechnische/-r Assistent/-in		
Duale Ausbildung	*automo*	Automobilkaufmann/-frau
		Kraftfahrzeugmechatroniker/-in - Karosserietechnik
		Kraftfahrzeugmechatroniker/-in - Motorradtechnik
		Kraftfahrzeugmechatroniker/-in - Nutzfahrzeugtechnik
		Kraftfahrzeugmechatroniker/-in - Personenkraftwagentechnik
		Kraftfahrzeugmechatroniker/-in - System- und Hochvolttechnik
		Tankwart/-in
	*energ*	Dachdecker/-in
		Elektroanlagenmonteur/-in
		Elektroniker/-in - Automatisierungstechnik
		Elektroniker/-in - Betriebstechnik
		Elektroniker/-in - Energie- und Gebäudetechnik
		Elektroniker/-in - Gebäude- und Infrastruktursysteme
		Elektroniker/-in - Gebäudesystemintegration
		Elektroniker/-in - Maschinen- und Antriebstechnik (BBiG)
		Elektroniker/-in - Maschinen- und Antriebstechnik (HwO)
		Industrieelektriker/-in - Betriebstechnik
		Maler/-in und Lackierer/-in - Energieeff.- u. Gestaltungstech.
		Technische/-r Systemplaner/-in - Elektrotechnische Systeme
	*kreis*	Fachkraft - Kreislauf- und Abfallwirtschaft
	*umwelt*	Fachkraft - Abwassertechnik
		Fachkraft - Kreislauf- und Abfallwirtschaft
		Fachkraft - Rohr-, Kanal- und Industrieservice
		Fachkraft - Wasserversorgungstechnik
		Schornsteinfeger/-in
	*wasser*	Anlagenmechaniker/-in - Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik
		Bauzeichner/-in
		Fachkraft - Abwassertechnik
		Fachkraft - Rohr-, Kanal- und Industrieservice
		Fachkraft - Wasserversorgungstechnik
		Fachkraft - Wasserwirtschaft
		Rohrleitungsbauer/-in
		Wasserbauer/-in



**Tabelle 2: Übersicht der identifizierten Weiterbildungsberufe – Stand: November 2021 (Datenquelle: BERUFENET; eigene Darstellung).**

Berufskundliche Gruppe	Abfrage	Berufsbezeichnung
Andere Weiterbildung	*automo*	Automobil-Serviceberater/-in
		Kraftfahrzeug-Servicetechniker/-in
	*energ*	Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten
		Fachplaner/-in - Energie- und Gebäudetechnik
		Gebäudeenergieberater/-in
		Kraftwerker/-in
		Netzmonteur/-in
		Servicemonteur/-in - Windenergieanlagentechnik
		Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten Solartechniker/-in
	*erneu*	Fachagrarwirt/-in - Erneuerbare Energien/Biomasse
		Gebäudeenergieberater/-in
		Servicemonteur/-in - Windenergieanlagentechnik
		Solartechniker/-in
	*umwelt*	Gebäudeenergieberater/-in
		Natur- und Landschaftspfleger/-in
*wasser*	Netzmonteur/-in	
Kaufmännische Weiterbildung	*automo*	Betriebsmanager/-in - Kraftfahrzeugtechnik
		Betriebswirt/-in (Fachschole) - Kraftfahrzeuge
	*energ*	Fachwirt/-in - Energiewirtschaft
		Fachwirt/-in - Solartechnik
	*erneu*	Fachwirt/-in - Energiewirtschaft
		Fachwirt/-in - Solartechnik
	*umwelt*	Fachwirt/-in - Energiewirtschaft
		Fachwirt/-in - Umweltschutz
Meisterweiterbildung	*automo*	Karosserie- und Fahrzeugbauermeister/-in
		Kraftfahrzeugtechnikermeister/-in
	*energ*	Elektromaschinenbauermeister/-in
		Elektrotechnikermeister/-in
		Industriemeister/-in - Elektrotechnik
		Industriemeister/-in - Leitungsbau
		Kraftwerksmeister/-in - Produktion
		Kraftwerksmeister/-in - Produktion Elektrotechnik/Leittechnik
		Kraftwerksmeister/-in - Strahlenschutz
	*kreis*	Meister/-in - Kreislauf- u. Abfallwirtschaft u. Städtereinigung
	*umwelt*	Abwassermeister/-in
		Kraftwerksmeister/-in - Strahlenschutz
		Meister/-in - Kreislauf- u. Abfallwirtschaft u. Städtereinigung
		Meister/-in - Rohr-, Kanal- und Industrieservice
		Schornsteinfegermeister/-in
	*wasser*	Netzmeister/-in
		Wasserbaumeister/-in
		Wassermeister/-in

Tätigkeit nach Weiterbildung	*wasser*	Leiter/-in - Maschinenanlagen
Technikerweiterbildung	*automo*	Techniker/-in - Kraftfahrzeugtechnik
	*energ*	Techniker/-in - Elektromobilität
		Techniker/-in - Elektrotechnik (Energietechnik)
		Techniker/-in - Umweltschutz. (erneuerbare Energ., Energieber.)
		Techniker/-in - Windenergietechnik
	*erneu*	Techniker/-in - Umweltschutz. (erneuerbare Energ., Energieber.)
		Techniker/-in - Windenergietechnik
	*umwelt*	Techniker/-in - Geologietechnik
		Techniker/-in - Maschinenteknik (Umweltschutzverfahrenst.)
		Techniker/-in - Umwelt/Landschaft
		Techniker/-in - Umweltschutz. (erneuerbare Energ., Energieber.)
		Techniker/-in - Umweltschutz. (Labortechnik)
		Techniker/-in - Umweltschutz. (ohne Schwerpunkt)
		Techniker/-in - Umweltschutz. (Verfahrenstechnik)
		Techniker/-in - Umweltschutz. (Wasserver- u. -entsorgung)
	*wasser*	Techniker/-in - Bautechnik (Tiefbau)
Techniker/-in - Umweltschutz. (Wasserver- u. -entsorgung)		

### Hochschulstudiengänge von der Bewertungsplattform StudyCheck.de

Für die Analyse der aktuellen akademischen Ausbildungsinhalte wurde die Seite StudyCheck.de<sup>39</sup> herangezogen. Diese Seite ist ein privatwirtschaftliches Bewertungsportal für Hochschulangebote im Internet. Für die Bewertungen von Studiengängen werden neben individuellen Erfahrungsberichten auch Fächerkombinationen und Studieninhalte gepflegt. Mit den bislang 17.408 eingetragenen Studiengängen an 509 Hochschulen und Akademien bietet die Seite einen guten Überblick über die Studienmöglichkeiten. Da laut Statistischem Bundesamt im Studienjahr 2020/2021 bundesweit 422 Hochschulen gelistet werden, beinhaltet die Seite zudem weitere privatwirtschaftliche Angebote. Für die nachstehende Analyse der bundesweiten Studienangebote im oben festgelegten Kontext konnten über eine Suchabfrage<sup>40</sup> 527 Studiengänge identifiziert werden. Tabelle 3 zeigt exemplarisch das Studienangebot der besonders prominent vertretenen Städte Berlin und Nürtingen (vgl. Abbildung 25).

<sup>39</sup> Online verfügbar unter <https://www.studycheck.de/studium>, zuletzt geprüft am 22.12.2021.

<sup>40</sup> Verwendete Suchabfrage: „abfall\* or solar\* or wind\* or wasser\* or automobil\* or clean\* or kreislauf\* or renew\* or wasserstoff\* or bio-ökon\* or kreislaufwirt\* or nachhaltig\* or green\* or energieeffizien\* or lifecycle\* or susstain\* or umwelt\* or mobilit\*“.

**Tabelle 3: Exemplarische Übersicht der identifizierten Studiengänge für Berlin und Nürtingen (Datenquelle: StudyCheck.de; eigene Darstellung).**

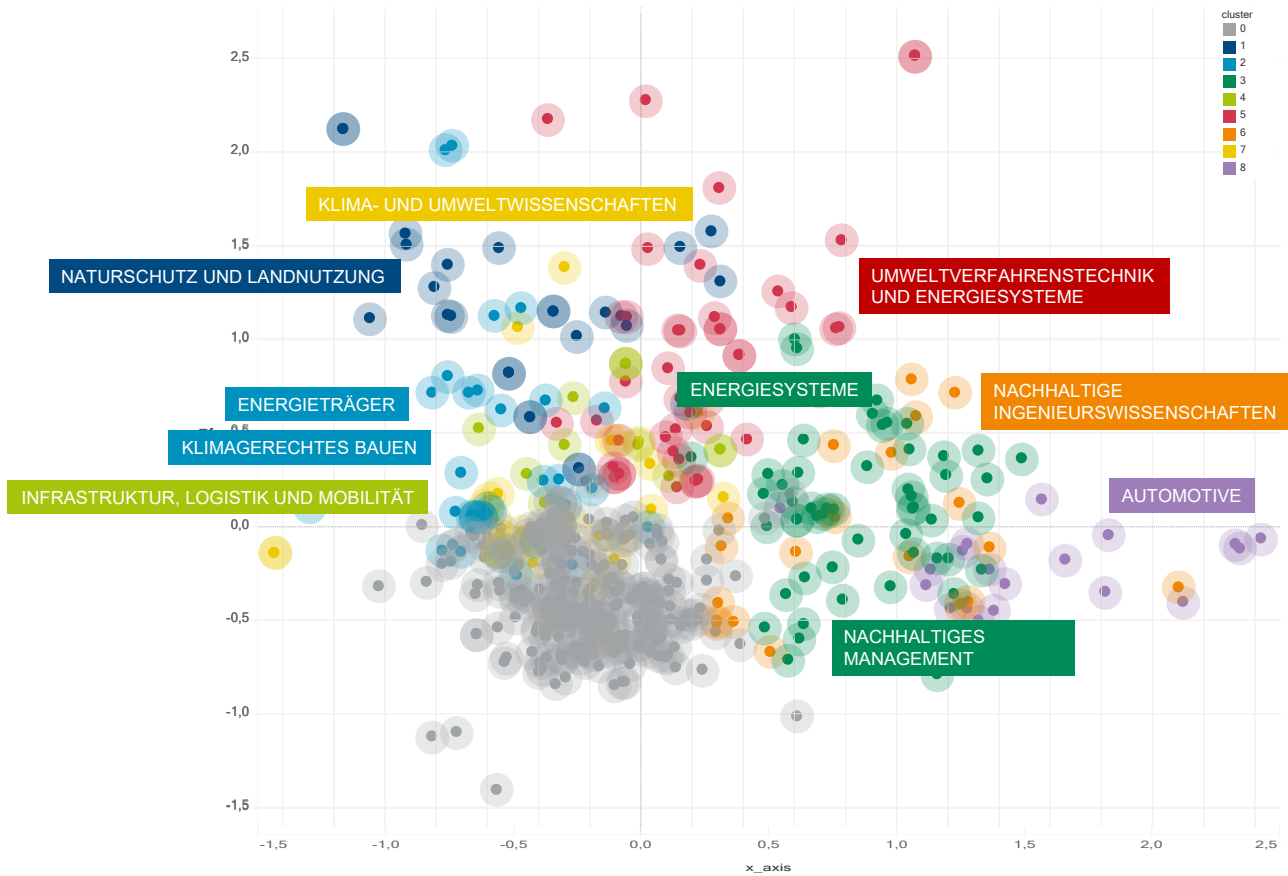
Stadt	Institution	Titel
Berlin	Berliner Hochschule für Technik (Berlin)	Green Engineering – Verfahrenstechnik (B.Eng.)
		Planung nachhaltiger Gebäude (M.Sc.)
		Umweltinformation - GIS (M.Sc.)
		Umweltingenieurwesen - Bau (B.Eng.)
		Urbane Infrastrukturplanung - Verkehr und Wasser (M.Eng.)
		Urbanes Pflanzen- und Freiraummanagement (M.Eng.)
		Wirtschaftsingenieur - Energie und Umweltressourcen (M.Sc.)
		Wirtschaftsingenieur - Umwelt und Nachhaltigkeit (B.Eng.)
	FU Berlin (Berlin)	Geografische Umweltforschung (M.Sc.)
	HTW - Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (Berlin)	Betriebliche Umweltinformatik (M.Sc.)
		Gebäudeenergie- und -informationstechnik (Nachhaltige Gebäudetechnik) (B.Eng.)
		Regenerative Energien (B.Sc.)
		Umweltinformatik (B.Sc.)
	HU Berlin (Berlin)	Integrated Natural Resource Management (M.Sc.)
	HWR Berlin (Berlin)	Nachhaltigkeits- und Qualitätsmanagement (M.A.)
	SRH Berlin University of Applied Sciences (Berlin)	Engineering and International Business – Focus on Renewable Energy, Water and Waste Management (M.Eng.) /Ingenieur
	TU Berlin (Berlin)	Automotive Systems (M.Sc.)
		Environmental Planning (Umweltplanung) (M.Sc.)
		Nachhaltiges Management (B.Sc.)
		Ökologie und Umweltplanung (B.Sc.)
Ökologie und Umweltplanung (M.Sc.)		
Process Energy and Environmental Systems Engineering (Prozess-, Energie- und Umweltsystemtechnik) (M.Sc.)		
Sustainable Mobility Management (MBA)		
Technischer Umweltschutz (B.Sc.)		
Technischer Umweltschutz (M.Sc.)		

<b>Nürtingen</b>	HfWU Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (Nürtingen)	Agrarwirtschaft (B.Sc.)
		Betriebswirtschaft (B.A.)
		Betriebswirtschaft (B.Sc.)
		Controlling (M.A.)
		Digital Business, Management & Leadership / Digital Management, Marketing & Sales (MBA)
		Immobilienmanagement (M.Sc.)
		Immobilienwirtschaft (B.Sc.)
		International Finance (M.Sc.)
		International Management (MBA)
		Internationales Finanzmanagement (B.Sc.)
		Internationales Projektmanagement und Agiles Projekt- und Transformationsmanagement (MBA)
		Kunsttherapie (B.A.)
		Kunsttherapie (M.A.)
		Landschaftsarchitektur (B.Eng.)
		Landschaftsplanung und Naturschutz (B.Eng.)
		Nachhaltige Agrar- und Ernährungswirtschaft (M.Sc.)
		Organisations design (M.A.)
		Pferdewirtschaft (B.Sc.)
		Prozessmanagement (M.Sc.)
		Stadt Landschaft Transformation (M.Eng.)
		Stadtplanung (B.Eng.)
Theatertherapie (B.A.)		
Unternehmensrestrukturierung und Insolvenzmanagement (LL.M.)		
Volkswirtschaftslehre (B.Sc.)		
Zukunftstrends und Nachhaltiges Management (MBA)		

Zur weitergehenden Betrachtung wurde eine semantische Analyse der Beschreibungen der Studieninhalte sowie der Modulbeschreibungen durchgeführt. Hierbei konnten acht inhaltliche Cluster identifiziert und beschrieben werden. Die Ergebnisse werden in Abbildung 24 zusammengefasst. Ein Cluster konnte aufgrund der sehr homogenen Begrifflichkeiten im Kontext Nachhaltigkeit und Klimaschutz der Studiengänge durch das verwendete Neuronale Netz nicht weiter differenziert werden. Diese Studiengänge bil-

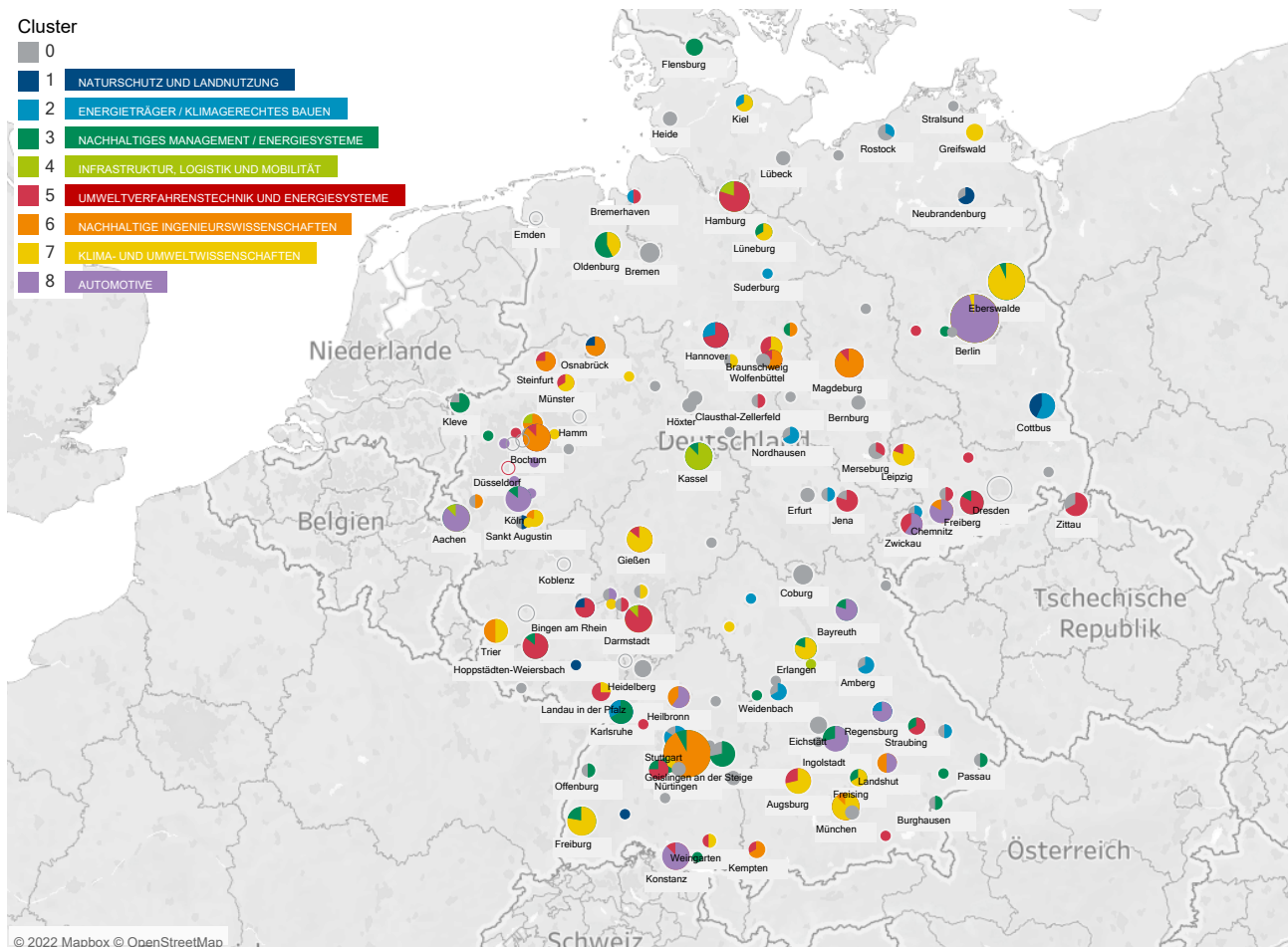
den das nicht näher beschriebene graue Cluster 0. Jedoch ist hier zu beachten, dass es sich hierbei um ein breit gefächertes Angebot an Studiengängen handelt. Die acht weiteren Cluster wurden mit folgenden Titeln versehen: Naturschutz und Landnutzung; Energieträger und Klimagerechtes Bauen; Energiesysteme und Nachhaltiges Management; Infrastruktur, Logistik und Mobilität; Umweltverfahrenstechnik und Energiesysteme; Nachhaltige Ingenieurwissenschaften; Klima- und Umweltwissenschaften; Automotive.

**Abbildung 24: Text-Mining-Analyse der Studieninhalte (Datenquelle: StudyCheck; eigene Darstellung).**



Auch wenn der gewählte Text-Mining-Ansatz aufgrund eines allgemein trainierten neuronalen Netzes im vorliegenden Fall keine weitergehende detaillierte Differenzierung ermöglicht, können die verbleibenden Cluster dennoch genutzt werden, um eine Verteilung der Studienangebote über das Bundesgebiet hinweg mit thematischen Schwerpunkten zu versehen (vgl. Abbildung 25). In der Karte zeigen sich einige regionale Schwerpunkte wie bspw. Berlin mit 26 Studiengängen, Nürtingen in Baden-Württemberg mit 25 Studiengängen, Eberswalde in Brandenburg mit 15 Studiengängen und Hamburg mit 10 Studiengänge. Weitere Städte folgen in dichter Reihenfolge. Zudem können hierdurch die aktivsten Institutionen (Top 12) benannt werden. Hierzu gehören die HfWU Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (verschiedene Standorte) mit 33 Studiengängen, HNE Eberswalde mit 15 Studiengängen, jeweils mit 9 Studiengängen die TU Berlin und die Universität Freiburg, jeweils mit 8 Studiengängen die Berliner Hochschule für Technik, die RWTH Aachen und die Universität Kassel sowie jeweils mit 7 Studiengängen die BTU Cottbus-Senftenberg, die Hochschule Trier, die Technische Hochschule Ingolstadt und die Universität Oldenburg.

**Abbildung 25: Räumliche Verteilung der Studienangebote (Datenquelle: StudyCheck; eigene Darstellung).**



**Studien- und Weiterbildungsangebote in Form von Massive Open Online Courses (MOOCs)**

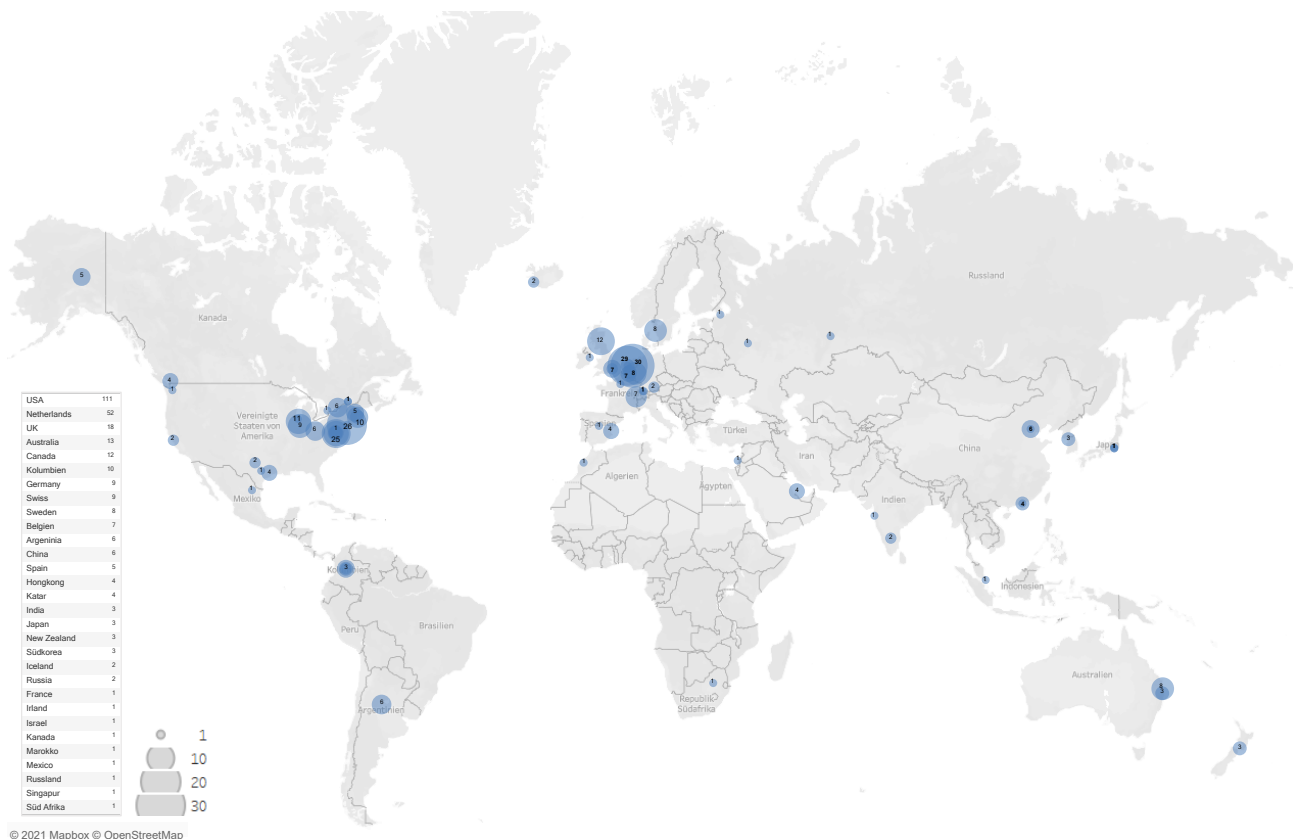
Zur Analyse des informellen Weiterbildungsangebotes im akademischen Bereich wurden die Angebote auf der Plattform edX<sup>41</sup> ausgewertet. Von den insgesamt gelisteten 3.498 Kursen konnten über die Suchabfrage<sup>42</sup> 297 Kurse Suchtreffer in 31 Ländern identifiziert werden. Das entspricht 8,49 % der Kurse. Auch hier

konnten die Weiterbildungsangebote nach den anbietenden Institutionen in ihrer regionalen Verteilung dargestellt werden (Abbildung 26).

41 edX ist eine von der Harvard-Universität, dem Massachusetts Institute of Technology und der Stanford-Universität initiierten, jedoch mittlerweile internationale Plattform für Massive Open Online Courses (MOOCs). Derzeit sind rund 90 Partneruniversitäten und weitere Institute gelistet. Laut eigener Analyse hatte edX Ende 2016 mehr als 10 Millionen Nutzer, die an über 1.270 Kursen teilnahmen (vgl. <https://blog.edx.org/year-review-edx-2016?track=blog>). In Deutschland beteiligen sich die TU München und die RWTH Aachen an der Bereitstellung frei zugänglicher Lerninhalte. Neben Universitäten beteiligen sich auch einige Organisationen außerhalb des akademischen Umfeldes.

42 Verwendete Suchabfrage: „water\* or automotive\* or clean\* or circular\* or renew\* or hydrog\* or bioeconom\* or renew\* or green\* or energy efficien\* or lifecycle\* or susstain\* and subject=Environmental science“. Zudem wurde eine weitere Anfrage zu den Suchbegriffen „nature\* or change or mobility“ gemacht, die manuell nachgefiltert wurde. In einer Nachrecherche wurden zudem manuell die Begriffe: nature, change, mobility und die Subject-Kategorie: Environmental Science nachgezogen.

**Abbildung 26: Räumliche Verteilung der identifizierten MOOCs mit Nachhaltigkeitsschwerpunkt (Datenquelle: edX, eigene Darstellung).**



Die Darstellung zeigt, dass regionale Schwerpunkte vor allem im Osten der USA und der Niederlande liegen. Die Kurse werden direkt in Kontext „Environmental Studies“ angeboten, aber auch in den Studienbereichen Engineering und Energie. Zudem fasst Tabelle 4 die in Deutschland angebotenen 7 Kurse an der RWTH Aachen und 2 Kurse an der TU München im entsprechenden Kontext zusammen. Im Vergleich werden von beiden Universitäten insgesamt 43 Kurse angeboten. Als Vergleich dient das wesentlich prominenter vertretende und differenzierte Angebot niederländischer Universitäten.

**Tabelle 4: Vergleich der von deutschen und niederländischen Institutionen angebotenen MOOCs mit Nachhaltigkeitsschwerpunkt (Datenquelle: edX, eigene Darstellung).**

Country	Name (Course Subject.Csv)	Title	Count of Title	Count of Title	
Germany	Architecture	Nature-based Urban Regeneration	1	1	
		Biology & Life Sciences	Biobased Products for a Sustainable (Bio)economy	1	1
			Hydrologie I	1	1
			Hydrologie II	1	1
	Business & Management	Innovation Strategies for Electric Mobility: The StreetScooter Case	1	1	
		Managing Disruptive Change	1	1	
	Energy & Earth Sciences	Flood Risk Management	2	1	
		Sustainable Development: The Water-Energy-Food Nexus	1	1	
	Engineering	Flood Risk Management	2	1	
		Hydrologie I	1	1	
		Hydrologie II	1	1	
		Introduction to Land Management	1	1	
	Environmental Studies	Flood Risk Management	2	1	
		Introduction to Land Management	1	1	
		Nature-based Urban Regeneration	1	1	
<b>Grand Total</b>			<b>18</b>	<b>9</b>	

Country	Name (Course Subject.Csv)	Title	Count of Title	Distinct ..
Netherlands	Architecture	Circular Economy for a Sustainable Built Environment	1	1
		Co-Creating Sustainable Cities	3	1
		Global Housing Design	1	1
		Nature Based Metropolitan Solutions	3	1
		Sustainable Urban Development	3	1
		Water Works: Activating Heritage for Sustainable Development	1	1
		Zero-Energy Design: an approach to make your building sustainable	1	1
	Art & Culture	Circular Fashion: Design, Science and Value in a Sustainable Clothing Industry	1	1
		Urban Design for the Public Good: Dutch Urbanism	1	1
	Biology & Life Sciences	Beyond Engineering: Building with Nature	1	1
		Biobased Products for a Sustainable (Bio)economy	2	1
		Drainage in Agriculture: controlling water and salt levels in the soil	1	1
		Introduction to Water and Climate	1	1
		Sustainable Food Security: The value of systems thinking	1	1
		Water Works: Activating Heritage for Sustainable Development	1	1
	Business & Management	Business Strategy and Operations in a Biobased Economy	1	1
		Capstone Business and Operations for a Circular Bio-Economy	1	1
		Capstone Economics and Policies for a Circular Economy	1	1
		Circular Economy: An Introduction	1	1
		Critical Raw Materials: Managing Resources for a Sustainable Future	1	1
		Economics and Policies in a Biobased Economy	1	1
		Engineering Design for a Circular Economy	1	1
		Managing Building Adaptation: A Sustainable Approach	1	1
		Sustainable Packaging in a Circular Economy	1	1
		The Transition to the Decarbonised Economy of Tomorrow	1	1
		Waste Management and Critical Raw Materials	1	1
		Water Works: Activating Heritage for Sustainable Development	1	1
		Zero-Energy Design: an approach to make your building sustainable	1	1

Chemistry	Biorefinery: From Biomass to Building Blocks of Biobased Products	1	1
	Capstone Chemistry and Technology for Sustainability	1	1
	Catalytic Conversions for Biobased Chemicals and Products	1	1
	From Fossil Resources to Biomass: A Chemistry Perspective	1	1
Data-Science	Drones for Agriculture: Prepare and Design Your Drone (UAV) Mission	1	1
Design	Circular Economy: An Introduction	1	1
	Circular Fashion: Design, Science and Value in a Sustainable Clothing Industry	1	1
	Engineering Design for a Circular Economy	1	1
	Nature Based Metropolitan Solutions	3	1
	Sustainable Packaging in a Circular Economy	1	1
	Water Works: Activating Heritage for Sustainable Development	1	1
Economics & Finance	Business Strategy and Operations in a Biobased Economy	2	1
	Capstone Business and Operations for a Circular Bio-Economy	1	1
	Capstone Economics and Policies for a Circular Economy	1	1
	Circular Economy: An Interdisciplinary Approach	1	1
	Economics and Policies in a Biobased Economy	1	11
	Landscape Finance: Investing in Innovation for Sustainable Landscapes	1	1
The Transition to the Decarbonised Economy of Tomorrow	1	1	
Energy & Earth Sciences	Agricultural Water Management: Water, Society and Technology Interactions	1	1
	Business Strategy and Operations in a Biobased Economy	1	1
	Capstone Business and Operations for a Circular Bio-Economy	1	1
	Capstone Economics and Policies for a Circular Economy	1	1
	Catalytic Conversions for Biobased Chemicals and Products	1	1
	Circular Economy: An Interdisciplinary Approach	1	1
	Climate Action in Biodiverse Landscapes	1	1
	Designing a climate neutral world: an introduction	1	1
	Drainage in Agriculture: controlling water and salt levels in the soil	1	1
	Drones for Agriculture: Prepare and Design Your Drone (UAV) Mission	1	1
	Economics and Policies in a Biobased Economy	1	1
	Environmental Gamechanger – Lead the Way to Sustainable Development	1	1
	EUCalc – Pathway Finder to a low-carbon EU-society	1	1
	From Fossil Resources to Biomass: A Chemistry Perspective	1	1
	Inclusive Energy Systems – Exploring Sustainable Energy for All	1	1
	Landscape Finance: Investing in Innovation for Sustainable Landscapes	1	1
	Landscape Governance: Collaborating Across Sectors and Scales	1	1
	Landscape Leadership: Catalyse Sustainable Development in Landscapes	1	1
	Plant Based Diets: Food for a Sustainable Future	1	1
	Sustainable Energy: Design a Renewable Future	1	1



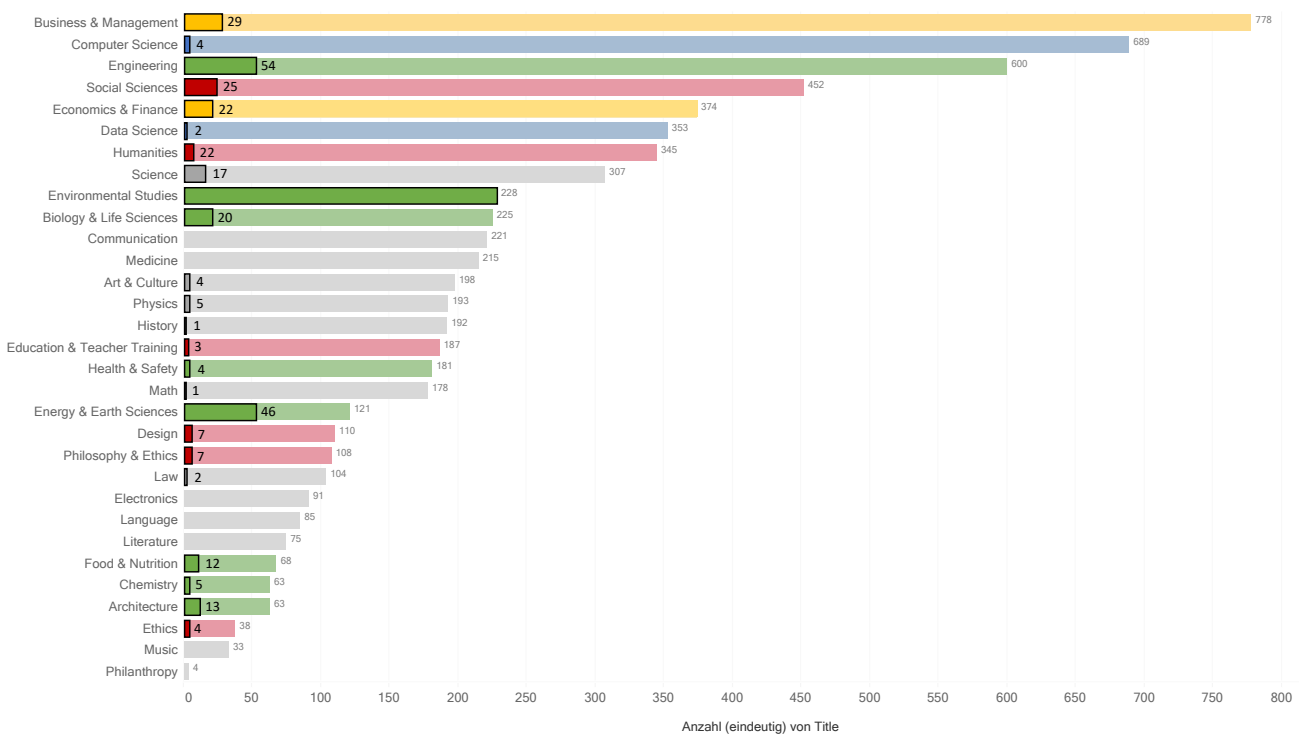
	Sustainable Food Security: Crop Production	1	1
	Sustainable Food Security: Food Access	1	1
	Sustainable Tourism: Rethinking the future	1	1
	Sustainable Tourism: Society & Environmental Aspects	1	1
	The Transition to the Decarbonised Economy of Tomorrow	1	1
	Tourism and Climate Change	1	1
	Zero-Energy Design: an approach to make your building sustainable	1	1
Engineering	Agricultural Water Management: Water, Society and Technology Interactions	1	1
	Beyond Engineering: Building with Nature	1	1
	Biorefinery: From Biomass to Building Blocks of Biobased Products	1	1
	Capstone Chemistry and Technology for Sustainability	1	1
	Catalytic Conversions for Biobased Chemicals and Products	1	1
	Circular Economy for a Sustainable Built Environment	1	1
	Circular Economy: An Introduction	1	1
	Co-Creating Sustainable Cities	3	1
	Critical Raw Materials: Managing Resources for a Sustainable Future	1	1
	Drinking Water Treatment	1	1
	Engineering Design for a Circular Economy	1	1
	EUCalc – Pathway Finder to a low-carbon EU-society	1	1
	Inclusive Energy Systems – Exploring Sustainable Energy for All	1	1
	Introduction to Water and Climate	1	1
	Managing Building Adaptation: A Sustainable Approach	1	1
	Sustainable Aviation: The Route to Climate-Neutral Aviation	1	1
	Sustainable Energy: Design a Renewable Future	1	1
	Sustainable Urban Development	1	1
	Sustainable Urban Freight Transport: A Global Perspective	1	1
	Urban Design for the Public Good: Dutch Urbanism	1	1
Waste Management and Critical Raw Materials	1	1	
Environmental Studies	Agricultural Water Management: Water, Society and Technology Interactions	1	1
	Beyond Engineering: Building with Nature	1	1
	Circular Economy for a Sustainable Built Environment	1	1
	Circular Economy: An Interdisciplinary Approach	1	1
	Climate Action in Biodiverse Landscapes	1	1
	Co-Creating Sustainable Cities	3	1
	Critical Raw Materials: Managing Resources for a Sustainable Future	1	1
	Designing a climate neutral world: an introduction	1	1
	Drainage in Agriculture: controlling water and salt levels in the soil	1	1
	Drones for Agriculture: Prepare and Design Your Drone (UAV) Mission	1	1
	Environmental Gamechanger – Lead the Way to Sustainable Development	1	1
	EUCalc – Pathway Finder to a low-carbon EU-society	1	1
	Food and Nutrition Security in Urbanizing Landscapes	1	1
	From Fossil Resources to Biomass: A Chemistry Perspective	1	1
	Global Housing Design	1	1

	Inclusive Energy Systems – Exploring Sustainable Energy for All	1	1
	Introduction to Water and Climate	1	1
	Landscape Finance: Investing in Innovation for Sustainable Landscapes	1	1
	Landscape Governance: Collaborating Across Sectors and Scales	1	1
	Landscape Leadership: Catalyse Sustainable Development in Landscapes	1	1
	Managing Building Adaptation: A Sustainable Approach	1	1
	Nature Based Metropolitan Solutions	3	1
	Plant Based Diets: Food for a Sustainable Future	1	1
	Sustainable Aviation: The Route to Climate-Neutral Aviation	1	1
	Sustainable Food Security: Crop Production	1	1
	Sustainable Food Security: Food Access	1	1
	Sustainable Food Security: The value of systems thinking	1	1
	Sustainable Packaging in a Circular Economy	1	1
	Sustainable Soil Management: Soil for life	1	1
	Sustainable Tourism: Rethinking the future	1	1
	Sustainable Tourism: Society & Environmental Aspects	1	1
	Sustainable Urban Development	3	1
	Sustainable Urban Freight Transport: A Global Perspective	1	1
	Tourism and Climate Change	1	1
	Urban Design for the Public Good: Dutch Urbanism	1	1
	Waste Management and Critical Raw Materials	1	1
Ethics	Climate Action in Biodiverse Landscapes	1	1
	Environmental Gamechanger – Lead the Way to Sustainable Development	1	1
	Landscape Governance: Collaborating Across Sectors and Scales	1	1
	Landscape Leadership: Catalyse Sustainable Development in Landscapes	1	1
	Tourism and Climate Change	1	1
Food & Nutrition	Food and Nutrition Security in Urbanizing Landscapes	1	1
	Plant Based Diets: Food for a Sustainable Future	1	1
	Sustainable Food Security: Crop Production	1	1
	Sustainable Food Security: Food Access	1	1
	Sustainable Food Security: The value of systems thinking	1	1
Humanities	Water Works: Activating Heritage for Sustainable Development	1	1
Philosophy & Ethics	Sustainable Tourism: Rethinking the future	1	1
	Sustainable Tourism: Society & Environmental Aspects	1	1
Physics	Sustainable Energy: Design a Renewable Future	1	1
	Sustainable Soil Management: Soil for life	1	1
Science	Biorefinery: From Biomass to Building Blocks of Biobased Products	1	1
	Capstone Chemistry and Technology for Sustainability	1	1
	Sustainable Soil Management: Soil for life	1	1
Social Sciences	Circular Fashion: Design, Science and Value in a Sustainable Clothing Industry	1	1
	Food and Nutrition Security in Urbanizing Landscapes	1	1
	Global Housing Design	1	1
<b>Grand Total</b>		<b>167</b>	<b>52</b>

Für den verwendeten Datensatz wurde zudem eine semantische Analyse der Beschreibungen der Studieninhalte sowie der Modulbeschreibungen durchgeführt. Die Clusterung ergab hier jedoch keine nennenswert neuen Erkenntnisse, sodass die Ergebnisse anhand der vorgegebenen fachlichen Kategorisierung ausgewertet wurden. Abbildung 27 fasst die identi-

fizierten Angebote in den Bereichen Umweltstudien, Biotechnologie & Life Science, Engineering, Business & Management, Architektur, Energie & Geowissenschaften zusammen. Der Vergleich mit den Bereichen aller Kursangebote auf der Plattform zeigt, dass mehrheitlich Kurse im Bereich Business & Management, Computer-Science und Engineering angeboten werden.

**Abbildung 27: Zuordnung der angebotenen MOOCs zu vorgegebenen fachlichen Schwerpunkten (Subjects). Die blass gefärbten Balken repräsentieren die Gesamtheit der Angebote, die intensiv gefärbten Balken die auf Nachhaltigkeit fokussierenden Angebote. Doppelte Zuordnung der Kurse zu fachlichen Schwerpunkten möglich (Datenquelle: edX, eigene Darstellung).**



## 6. Zukünftige Fähigkeiten und Möglichkeiten

### 6.1 Dekarbonisierungsfähigkeiten

Wie die Exploration und die Datenanalysen zeigen, besitzt eine Vielzahl von Anforderungen an grüne und grünere Tätigkeiten einen systemischen Charakter. Da die damit einhergehenden Fähigkeiten fall- oder zumindest doch branchenweise spezifiziert werden müssen, und die Dekarbonisierung von Wertschöpfung und Beschäftigung mit einer umfassenden Digitalisierung einhergeht, liegt es nahe, das Konzept der Digital Literacy als Referenz zu verwenden: „[Übersetzung durch die Autor\*innen] Digital Literacy bzw. digitale Grund- oder Allgemeinbildung ist die Fähigkeit, mithilfe digitaler Technologien sicher und angemessen auf Informationen zuzugreifen, sie zu verwalten, zu verstehen, zu integrieren, zu kommunizieren, zu bewerten und zu erstellen, um eine Beschäftigung, eine menschenwürdige Arbeit und Unternehmertum zu ermöglichen. Sie umfasst Kompetenzen, die auch als Computerkompetenz, IKT-Kompetenz, Informationskompetenz und Medienkompetenz bezeichnet werden“ (UNESCO, 2018, S. 6).

Auch für eine Sustainability Literacy existieren verschiedene Definitionen, die neben der ökologischen Nachhaltigkeit meist auch die soziale und in Teilen auch die wirtschaftliche Nachhaltigkeit beinhalten – die Kansas State University gibt eine exemplarische Übersicht über einige dieser Definitionen auf ihrer Website.<sup>43</sup> Allerdings sind diese für die im Rahmen dieser Studie relevanten Fragestellungen nur bedingt anwendbar, sodass stattdessen die Carbon Literacy als Ausgangspunkt gewählt wird. Diese hat ihren zentralen Ursprung in einem Partizipationsprojekt in Manchester – dem Carbon Literacy Project.<sup>44</sup> Darin wird die Definition wie folgt gefasst: „[Übersetzung durch die Autor\*innen] Ein Bewusstsein für die Kohlendioxidkosten und -auswirkungen alltäglicher Aktivitäten sowie die Fähigkeit und Motivation, Emissionen auf individueller, kommunaler und organisatorischer Ebene zu reduzieren“ (Carbon Literacy Project, 2013, S. 4).

Ähnlich wie die UNESCO-Definition für die Digital Literacy beschreibt auch die Definition für eine Carbon Literacy ein grundlegendes Verständnis der Treibhausgasproblematik und ein damit verbundenes „Mind Set“. Für eine Kategorisierung und Differenzierung der die Carbon Literacy ausmachenden Fähigkeiten

(„Action Set“) wird daher die OECD-Systematisierung für digitale Fähigkeiten als Referenz herangezogen. Diese bietet zudem eine klare Orientierung auf die Arbeitswelt, lässt aber auch eine grundsätzliche Übertragung auf andere lebensweltliche Domänen zu. Tabelle 5 zeigt die Gegenüberstellung der drei grundlegenden Kategorien von digitalen und Dekarbonisierungsfähigkeiten, wie sie im Zuge der vorliegenden Studie entwickelt/systematisiert wurden.

---

<sup>43</sup> Siehe die Website der Kansas State University unter <https://guides.lib.k-state.edu/c.php?g=181637&p=3276381> (zuletzt geprüft am 15.12.2021).

<sup>44</sup> Siehe die Website des Carbon Literacy Project unter <https://carbonliteracy.com/> (zuletzt geprüft am 15.12.2021).

**Tabelle 5: Klassifizierung von Dekarbonisierungsfähigkeiten in Anlehnung an die OECD-Systematisierung digitaler Fähigkeiten.**

<b>Kategorien digitaler Fähigkeiten</b> (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2016a, 2016b)	<b>Kategorien von Dekarbonisierungsfähigkeiten</b> (Ableitung aus den Explorationsergebnissen)
<p>Die <b>Herstellung von IKT*</b>-Produkten und digital vermittelten Dienstleistungen – wie Software, Websites, E-Commerce oder Cloud-Computing – erfordert spezialisierte IKT-Fähigkeiten, d. h. Anwendungen zu programmieren und Netzwerke zu verwalten.</p>	<p><b>Planungs- und Entwicklungskompetenzen</b> beschreiben die theoretischen und praktischen Fähigkeiten, Prozesse und technische Geräte/Anlagen so zu planen, herzustellen/zu gestalten und darauf zu überprüfen, dass sich möglichst geringe Auswirkungen auf das Klima, die Umwelt und den Menschen ergeben. Dazu gehört auch die aktive Suche nach und prototypische Umsetzung von neuartigen Verfahren/Technologien mit dem Ziel einer maximalen Reduzierung von unerwünschten Auswirkungen auf das Klima und die Biosphäre sowie die Festlegung und Beschreibung der Ziele (KPI).</p>
<p>Die <b>Nutzung von IKT</b> in der täglichen Arbeit erfordert in einer zunehmenden Anzahl von Berufen generische IKT-Fähigkeiten, d. h., Beschäftigte müssen in der Lage sein, IKT zweckdienlich und im Sinne ihrer Aufgaben und Tätigkeiten zu nutzen, Informationen zu beschaffen und Software anzuwenden.</p>	<p><b>Anwendungs- und Anpassungskompetenzen</b> umfassen Fähigkeiten, um bestehende (technische) Systeme und Arbeitsmittel eigenständig und evidenzbasiert so in die Arbeit/Arbeitsabläufe zu integrieren und zu nutzen, dass die jeweiligen Nachhaltigkeits-KPI erreicht bzw. übertroffen und/oder umwelt-, klima- und gesundheitsschädliche Einflüsse in der operativen Nutzung minimiert werden.</p>
<p>IKT verändern die Art und Weise der Arbeit und erhöhen die Nachfrage nach <b>IKT-komplementären Fähigkeiten</b>, wie beispielsweise die individuelle Fähigkeit zur Informationsverarbeitung, Problemlösung, Eigenverantwortlichkeit und Kommunikation.</p>	<p><b>Systemische Kompetenzen</b> umfassen Fach- und Kontextwissen, aber auch Einstellungen, die den Schutz der Umwelt und des Klimas in den Mittelpunkt des Handelns stellen, und die umfassend und abwägend in den (Arbeits-)Alltag integriert sowie proaktiv und eigenverantwortlich angewendet und kommuniziert werden.</p>

\* IKT = Informations- und Kommunikationstechnologien.

Sowohl die IKT-komplementären Fähigkeiten (digitale Fähigkeiten) als auch die systemischen Kompetenzen (Dekarbonisierungsfähigkeiten) repräsentieren erkennbar die jeweiligen Literacies (siehe oben) und weisen zudem über Charakteristika wie Eigenverantwortlichkeit und Kommunikation eine hohe Ähnlichkeit zueinander auf. Die systemischen Kompetenzen lassen sich zudem in Stellenausschreibungen identifizieren, wie Abbildung 7 auf Seite 31 zeigt. Dort heißt es dazu: „Sie begeistern sich für die Entwicklung von nachhaltigen Zukunftstechnologien im Antriebs- und Energieerzeugungsbereich und haben den eigenen Antrieb, diese in den Markt zu bringen. Systematisches und vernetztes Denken und eine eigenverantwortliche Arbeitsweise zeichnen Sie aus.“

Die generelle Bedeutung von Kommunikationsfähigkeit und anderen systemischen Kompetenzen (Tabelle 5) für eine datengetriebene Ökonomie – und damit auch für die unternehmerische Praxis („Operations & Excellence“) der Dekarbonisierung – wurde auf Grundlage computergestützter Analysen und Modellierungen herausgestellt: „[Übersetzung durch die Autor\*innen] Schließlich zeigen wir die zunehmende Bedeutung einzigartiger menschlicher Fähigkeiten, wie Kommunikation, Verhandlung und Überzeugung. Diese Fähigkeiten werden derzeit in der Forschung zu wenig untersucht und sind in der Ausbildung für den Arbeitsmarkt nicht ausreichend vorhanden. In einer zunehmend datengetriebenen Wirtschaft steigt die Nachfrage nach ‚weichen‘ sozialen Fähigkeiten, wie

Teamarbeit und Kommunikation, parallel zu wachsenden Nachfrage nach ‚harten‘ technischen Fähigkeiten und Werkzeugen“ (Börner et al., 2018, S. 12630). Auch in anderen „Jobs der Zukunft“ gelten die weichen Faktoren als stilbildend (Börsch et al., 2020).

„Literacy“-Ansätze finden sich bereits heute in bestehenden Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrplänen, wie etwa für die duale Ausbildung „Chemikant (m/w/d)“. So beinhaltet beispielsweise das Lernfeld „Stoffsysteme trennen und reinigen“ ein Lernziel, das auf Nachhaltigkeitskompetenzen der Auszubildenden abzielt: „Sie können Energieträger rationell einsetzen und wenden die Vorschriften, Bestimmungen und Regeln der Arbeitssicherheit, des Gesundheits- und Umweltschutzes an“ (Kultusministerkonferenz [KMK], 2018, S. 10). Ähnliche Lernziele finden sich auch in weiteren Lernfeldern. Eine explizite Orientierung auf den Klimaschutz und die Minimierung von Treibhausgasen (neben CO<sub>2</sub> auch Methan, Lachgas und andere) ist hingegen in den seltensten Fällen erkennbar.

Nicht nur in der Praxis, sondern auch und insbesondere in der Aus- und Weiterbildung können Grundsätze wie die der „Grünen Chemie“ (siehe Seite 33) gewissermaßen als für eine Branche spezifizierte Umweltschutz-Grundkompetenzen (unter Einschluss der Dekarbonisierungsfähigkeiten) angesehen werden. Derartige Grundsätze können auch die bestehenden Umweltnormen ergänzen:

**Umweltmanagement, z. B.:**

- ISO 14001 für allgemeines Umweltmanagement
- ISO 14006 Umweltmanagementsysteme – Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung<sup>45</sup>
- ISO 50001 für Energiemanagement

**Treibhausgasbilanzierung, z. B.:**

- ISO 14064-1 zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene
- ISO 14064-2 zur quantitativen Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von Reduktionen der Treibhausgasemissionen oder Steigerungen des Entzugs von Treibhausgasen auf Projektebene
- ISO 14067 zur Bestimmung des Carbon-Footprints von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung

Diese Normen finden auch in der akademischen Ausbildung und natürlich in der betrieblichen Praxis Anwendung, wenn die entsprechenden Institutionen/Unternehmen entsprechend zertifiziert sind. In der akademischen Ausbildung ist zudem zu beobachten, dass verschiedene Universitäten wie die Leuphana Universität Lüneburg oder die BTU Cottbus einen deutlichen Schwerpunkt auf Nachhaltigkeitsthemen inkl. Cleantech legen oder auch das gesamte Hochschulprofil darauf ausrichten. Generell sind in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung, die eine wichtige Quelle für Fachkräfte der Cleantech-Unternehmen inkl. des Maschinen- und Anlagenbaus darstellt, deutliche Trends in Richtung Nachhaltigkeit und Klimaneutralität zu beobachten. So heißt es angesichts des Klimawandels beispielsweise zum Studiengang „Umweltingenieurwissenschaften“ der RWTH Aachen: „Hier sind ingenieurwissenschaftlicher Sachverstand und effiziente Planungsstrategien gefragt – zur Reduktion der Treibhausgase, zum Schutz der Rohstoffvorräte und zur Aufbereitung wertstoffreicher Abfälle“ (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen [RWTH Aachen], 2021). An der Technischen Universität Braunschweig existieren stellvertretend für zahlreiche ähnliche Angebote an weiteren Hochschulen eine Professur für nachhaltige Produktion und Life Cycle Engineering<sup>46</sup> sowie der Studiengang „Sustainable Production“.<sup>47</sup> Da die entsprechenden Studiengänge an den verschiedenen Hochschulen ähnliche Herausforderungen und Zielsetzungen in den Blick nehmen, zeigen sie untereinander eine gewisse Ähnlichkeit. Als Beispiel für die Struktur der Studieninhalte kann der Modulplan des Studiengangs „Nachhaltige Ingenieurwissenschaft“ der Leibniz Universität Hannover dienen (Abbildung 28).

**6.2 Beschäftigungsperspektiven für Frauen**

Grundsätzlich lässt sich der Trend beobachten, dass in jenen (technischen) Studiengängen, die explizit Nachhaltigkeitsthemen adressieren, der Anteil an Frauen zum Teil deutlich höher ist als in den tradierten technik- und ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen. So liegt der Anteil weiblicher Studierender am Studiengang Umwelt- und Verfahrenstechnik der Hochschule Augsburg zwischen 30 und 50 %, wäh-

<sup>45</sup>Hierzu bestehen in Form weiterer Normen Spezifikationen auf Ebene der Produktkategorien wie etwa die DIN EN 50693 „Verfahren zur quantitativen, umweltgerechten Produktgestaltung durch Ökobilanzen und Umweltdeklarationen mittels Produktkategorie-regeln für elektronische und elektrotechnische Geräte“ oder die DIN EN 16524 „Mechanische Produkte - Methodik zur Verminderung der Umweltauswirkungen bei Produktgestaltung und Entwicklung“.

<sup>46</sup>Siehe die Website unter <https://www.tu-braunschweig.de/iwf/hplce>

<sup>47</sup>Siehe die Website unter <https://www.tu-braunschweig.de/fmb/studium/bachelor/sustainable-engineering-of-products-and-processes/sustainable-production>

rend er beim Studiengang Maschinenbau bei 10 % liegt. Begründet wird dies mit dem Umstand, dass insbesondere Frauen im Zuge der Sinnstiftung daran Interesse haben, einen Beitrag zu Umwelt- und Klimaschutz zu leisten (Haerdle, 2021). Ähnliche Beobachtungen gibt es auch an anderen Hochschulen wie etwa der Hochschule Rhein-Main in Frankfurt. Hier ist im Bachelor-Studiengang „Umwelttechnik“ der Frauenanteil von 28 % im Wintersemester 2008/2009 auf 41,2 % im Wintersemester 2019/2020 angestiegen,<sup>48</sup> während er in der gleichen Zeit von 7,2 % auf 4,2 % im Bachelor-Studiengang „Maschinenbau“ zurückging (Gender- und Frauenforschungszentrum der Hessischen Hochschulen [gFFZ], 2020). Auch in den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Expert\*inneninterviews insbesondere, aber nicht ausschließlich in der chemischen und Kunststoffindustrie wurde dieser Trend sowohl aus Sicht der Unternehmen als auch von Universitäten und Forschungseinrichtungen bestätigt (siehe Abschnitt 4.2). Neben der für Frauen attraktiven „Purpose“-Orientierung dürfte bei Nachhaltigkeitsstudiengängen der Umstand eine wichtige Rolle spielen, dass diese aufgrund ihrer stark interdisziplinären Ausrichtung durchlässiger und zugänglicher sind als tradiert männlich geprägte Strukturen des Technikverständnisses (und seiner Protagonisten) (Ihsen, 2017), das mitunter auf Beherrschung nicht nur der Technik selbst, sondern auch des der Technik ausgesetzten Objekts gründet. Auch wenn die Frage eines geschlechterspezifischen Zugangs zur Nachhaltigkeit nicht abschließend geklärt zu sein scheint, gibt es verschiedene Signale, die eine Lesart zulassen, nach der Frauen „einen anderen Nachhaltigkeitszugang haben, weil sie der männlich geprägten Industriegesellschaft ferner stehen, sie kritisch sehen und sie verändern wollen. Ähnlich kann auch der Frauen zugeschriebene Nachhaltigkeitszugang der Sorge, der Für- und Vorsorge, kritisch gewandt werden. Denn dann wird die moderne Industriegesellschaft reflektiert und werden deren Sorglosigkeit andere Strategien gegenübergestellt“ (Winterfeld, 2012, S. 20). Tatsächlich hat eine empirische Analyse von Frauen in internationalen Führungspositionen gezeigt, dass in dieser Gruppe das Ziel der Nachhaltigkeit und auch der Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks überdurchschnittlich ausgeprägt ist. Zudem sind Frauen demnach in der Entscheidungsfindung deutlich datenaffiner als männliche Manager (Huber-Straßer, 2019), was eine unmittelbare Voraussetzung dafür sein dürfte, die Potenziale der Digitalisierung (Datenerhebung, -verarbeitung und -nutzung) auch tatsächlich im Sinne der Dekarbonisierung zu realisieren. Eine weibliche Führungsperson fasst die Nachhaltigkeitsorientierung von Frauen wie folgt zusammen: „Vielleicht

ist der Veränderungswille bei den Frauen größer, weil sie traditionell eher nicht in den Hierarchien vertreten waren“ (Winterfeld, 2012, S. 33); in diesem Kontext ist auch die in Abschnitt 4.2 geschilderte Erwartung zu sehen, dass Frauen überproportional in den neu entstehenden Positionen der „Chief Sustainability Officer“ vertreten sein werden.

Insgesamt lässt sich hier die Beobachtung ableiten, dass die Dekarbonisierung somit insbesondere im akademisch ausgebildeten Führungssegment überdurchschnittliche Beschäftigungsperspektiven für Frauen bieten. Dieser Entwicklung kommt zugute, dass in der jüngsten Vergangenheit der Anteil von Frauen in Vorständen börsennotierter Unternehmen in Antizipation der bevorstehenden gesetzlichen Vorgaben angestiegen ist – am stärksten in TecDax-Unternehmen (Kirsch et al., 2022, S. 26–27). Keines der hier und in Abschnitt 4.2 genannten Einzelphänomene – seien es Studierendenzahlen, Anteile an spezifischen Führungspositionen, Interviewaussagen, Umfrageergebnisse oder Konnotationen inkl. positiver Klischees – bietet einen hinreichenden Nachweis, dass Frauen von einer ausgeprägten Dekarbonisierungs- oder Nachhaltigkeitstransformation besonders profitieren bzw. sie diese besonders vorantreiben. Aus dem Zusammenfügen der Phänomene und schwachen Signale lässt sich jedoch unschwer ein plausibler und konsistenter Gesamttrend ableiten, der genau dies nahelegt.

<sup>48</sup>Mit einem absoluten Hoch von 43,3 % im Wintersemester 2005/2006.

**Abbildung 28: Modulplan des Bachelor-Studiengangs „Nachhaltige Ingenieurwissenschaft“ der Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau (Stand: 18.11.2021; Quelle: Universität Hannover49).**

	1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester	5. Semester	6. Semester			
1	<b>Grundlagen der Elektrotechnik: Gleich- u. Wechselstromnetzwerke (6 LP)</b> Klausur	<b>Grundlagen der Elektronik II: Elektrische und magnetische Felder (6 LP)</b> Labor (1 LP) Klausur + Studienleistung	<b>Thermodynamik I + Chemie (7 LP)</b> Klausur	<b>Thermofluiddynamik (5 LP)</b> Klausur	<b>Erneuerbare Energien (5 LP)</b> Klausur	<b>Modul Bachelorarbeit (13 LP)</b> Bachelorarbeit (11 LP) Präsentation (1 LP) Studienleistung Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten (1 LP) Studienleistung			
2							<b>Einführung in die Nachhaltigkeits-wirtschaft (5 LP)</b> Studienleistung + Präsentation	<b>Grundlagen der Mess- und Regelungstechnik (4 LP)</b> Klausur	
3				<b>Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung (5 LP)</b> Klausur	<b>Kreislauftechnik (5 LP)</b> Klausur				<b>Nachhaltiges Produktdesign/ Stud. Designprojekt (5 LP)</b> Klausur + Studienleistung
4							<b>Konstruktionslehre I / Konstruktives Projekt (4 LP)</b> Klausur + Studienleistung	<b>Fortgeschrittene Konstruktionslehre (3 LP) + Konstruktives Projekt II (2 LP)</b> Klausur + Studienleistung	
5				<b>Mathematik I (8 LP)</b> Kurzklausuren/Klausur	<b>Mathematik II (8 LP)</b> Kurzklausuren/Klausur				<b>Werkstoffkunde I (5 LP)</b> Klausur
6							<b>Grundlagen der Technischen Mechanik I (5 LP)</b> Klausur	<b>Grundlagen der Technischen Mechanik II (5 LP)</b> Klausur	
7	<b>Bachelorprojekt (4 LP)</b> Studienleistung	<b>Wissenschaftsphilosophie und Ethik der Technikwissenschaft (5 LP)</b> Studienleistung	<b>Polymerwerkstoffe (3 LP)</b> Labor Materialprüfung (2 LP) Klausur + Studienleistung	<b>Tutorien oder Studium Generale (2 LP)</b> Klausur/Mündlich	<b>Wahlpflichtmodul I (5 LP)</b> Klausur/Mündlich				
8						<b>Mobilitätsfenster</b>			
9	LP	32	32	31	28	29	28		
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									

Profildgebende Module  
 Grundlagenmodule  
 Studierende, die im **Master Energietechnik** studieren wollen, wählen statt Thermofluiddynamik Wärmeübertragung I und als Wahlpflichtmodul I Strömungsmechanik I  
 Studierende, die im **Master Mechatronik und Robotik** studieren wollen, wählen statt Mess- und Regelungstechnik Messtechnik I (Grundlagen der Messtechnik) und als Wahlpflichtmodul I Regelungstechnik I

49 Siehe die Website der Universität Hannover unter <https://www.maschinenbau.uni-hannover.de/de/studium/studienangebot-der-fakultaet/nachhaltige-ingenieurwissenschaft-b-sc/>

## 7. Zusammenfassende Reflexion und Ausblick

Da eine Vielzahl der Substitutionsmechanismen fossiler Energien und Rohstoffe auf die Nutzung grünen Stroms setzt, kommt dem Ausbau der erneuerbaren Energien eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung zu; für den Ausbau sind, wie exemplarisch im „Sofortprogramm Windenergie an Land“ beschrieben, vereinfachte Genehmigungsverfahren, eine Reform des Artenschutzes etc. nötig (Rosenkranz et al., 2020). Der massive Ausbau kann jedoch zu einer „Greenflation“ und damit zu einem Paradox führen: Je umfassender die Ausrichtung auf eine CO<sub>2</sub>-freie Wirtschaft gelingt, desto stärker steigen die Preise (Koch, 2022). Absehbar sind zudem kurzfristige Engpässe beim Ausbau der Produktionskapazitäten und Infrastrukturen für erneuerbare Energien (Becker & Lutz, 2021) sowie mittelfristig beim Auf-/Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur und der Systemintegration von Wasserstoff inkl. Sektorkopplung. Zu erwarten ist, dass aufgrund der politischen Prioritätensetzung auf den Ausbau der erneuerbaren Energien und grünen H<sub>2</sub> in diesen Segmenten mit besonders attraktiven Konditionen – Vergütung wie Arbeitsbedingungen/-inhalte im Sinne „guter Arbeit“ (Fuchs, 2006) – um bestehende Fachkräfte geworben wird, denen mittels Re- und Upskilling der Übergang in die grünen Energien eröffnet/erleichtert wird. Dadurch kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Sog- bzw. Kamineffekt, der besonders klassische Handwerkssegmente betreffen dürfte. Auf diese Weise könnte sich das generelle Fachkräfte- und Handwerker\*innenangebot in (energie-)technischen Segmenten weiter verschärfen (Zentralverband des Deutschen Handwerks [ZDH], 2021). Bei einer solchen Entwicklung bietet sich aber folgerichtig auch die Möglichkeit, dass Basisarbeit durch den absehbaren Kamineffekt aufgewertet werden kann, indem durch Anerkennungsmechanismen praktisch erworbener Fähigkeiten und Fertigkeiten eine „kleine Berufsfachlichkeit“ gefördert und so die Fachkräftelücke verringert wird (Bovenshulte, Peters et al., 2021). Neben den erneuerbaren Energien sind bei den Dekarbonisierungsmaßnahmen weiterhin Engpässe für die energetische Sanierung von Gebäuden erkennbar; hier werden rund 100.000 zusätzliche Fachkräfte benötigt (Kenkmann & Braungardt, 2021).

Gemäß der „Related Variety“ (Frenken et al., 2007) besteht auch für traditionelle Industrien die Möglichkeit einer durch die Dekarbonisierung ausgelösten und durch die Digitalisierung unterstützten Pfaderneuerung, die in weiteren Schritten auch zu einer Pfadneukreation (= neues Geschäftsmodell) führen kann. Auch Industrien wie die Kohlewirtschaft, deren Geschäftsmodelle auf fossilen Rohstoffen/Energieträgern beruhen, haben die Chance, neue Wertschöpfungspoten-

ziale in angrenzenden Bereichen zu erschließen (z. B. erneuerbare Energien statt fossiler Energie – siehe Abbildung 3), zumal die Unternehmen im Regelfall sowohl über umfassendes technisches Know-how als auch über hochqualifizierte (und gut bezahlte) Beschäftigte verfügen (Brandt et al., 2021). So bieten sich im Sinne eines gerechten Übergangs große Chancen, die Beschäftigten, ausgehend von ihrem hohen Qualifikationsniveau, für Cleantech-Technologien und Anwendungen weiterzubilden. Das Verbleiben in sich ändernden industriellen Kontexten ist mit der entsprechenden Neugestaltung von Wertschöpfung und Beschäftigung in regionalen Ökosystemen im Sinne vorsorgender Transformationsgemeinschaften anstelle von nachsorgenden Transfergesellschaften eine gangbare Perspektive. Demgegenüber steht als Beschäftigungsalternative ein sehr weitgehender Tätigkeitswechsel, etwa in die angesichts des demografischen Wandels wachsende Sozial- oder Gesundheitswirtschaft. Jedoch scheint es aus Gründen der beruflichen Identität, der Kompetenzen und Erfahrungen sowie nicht zuletzt der Vergütung unwahrscheinlich, dass Bergleute in nennenswertem Umfang zu professionellen Pflegekräften werden.

Mit Blick auf die Dekarbonisierungsfähigkeiten werden sich die größten Änderungen im Bereich der Upstream-Prozess- und Produktentwicklung ergeben, da sich neben der maximalen Produktivität aufgrund der CO<sub>2</sub>-Bepreisung die Minimierung von Treibhausgasen als zweites Produktionsparadigma durchsetzen wird. Somit müssen die meist akademisch ausgebildeten Entwickler\*innen, Prozessingenieur\*innen etc. über zusätzliches Dekarbonisierungswissen verfügen, um die entsprechenden Ziele zur Emissionsreduzierung in den Systemen technisch anlegen zu können; dieser Trend ist in den entsprechenden Studiengängen deutlich zu erkennen. In kleinen und mittelständischen Unternehmen könnte dabei die Fähigkeit zum Life Cycle Assessment und zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zu einer Mangelqualifikation werden, da der Bedarf gemäß den Sektorenzielen (Abbildung 1 auf Seite 12) erkennbar hoch ist und qualifizierte – und für KMU bezahlbare – Fachkräfte nicht im nötigen Umfang verfügbar sind (aufsteigende Gehaltsspirale). Ähnlich wie sich Bundesprogramme gezielt an KMU wenden, um den Aufbau der notwendigen digitalen Kompetenzen zu unterstützen, kann es sinnvoll sein, ähnliche Unterstützungsmaßnahmen auch für die Bewältigung der Dekarbonisierungsherausforderungen anzubieten.

Für den Maschinen- und Anlagenbau kann die Dekarbonisierung ähnlich wie für die Bauindustrie eine anhaltende Sonderkonjunktur bedeuten (Neuhold,



2021), da in praktisch allen Sektoren neue Cleantech-Verfahren und Techniken (inkl. Wartung etc.) benötigt werden; dies gilt auch und gerade für Grundstoffindustrien wie Stahl, Chemie und Zement (Agora Energiewende & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2019). Mit Blick auf die zur Erreichung der Klimaneutralität notwendigen Technologien wird zusammenfassend festgestellt: „Nicht wenige von ihnen galten vor wenigen Jahren noch als hoch innovativ, haben aber durch aktive Setzung der richtigen politischen Rahmenbedingungen und der folgenden Weiterentwicklung durch Entrepreneur\*innen eine Reife erreicht, mit der sie heute ihre Märkte dominieren und fossiler Konkurrenz in vielerlei Hinsicht überlegen sind. Diese State-of-the-Art-Technologien bilden das Rückgrat des Wegs zur Klimaneutralität und zeigen gleichzeitig, wie erfolgreiche Skalierung von Klimainnovationen gestaltet werden kann. Häufig konnte sich Deutschland in diesem Prozess als Leitmarkt etablieren und profitiert noch heute volkswirtschaftlich von der daraus resultierenden Technologieführerschaft“ (Deutsche Energie-Agentur GmbH [dena], 2021, S. 9).

Die Nutzung neuer Technologien zur Dekarbonisierung geht weitgehend einher mit dem Einsatz digitaler Technologien zur Messung, Steuerung, Modellierung und Simulation von Prozessen und Verfahren. Die parallel stattfindende digitale und Dekarbonisierungstransformation ist somit nicht zwingend eine doppelte Herausforderung, da die Digitalisierung maßgeblich auf die Dekarbonisierung von Wertschöpfungsprozessen einzahlen kann, wenn sie entsprechend gestaltet und mit Zielen versehen wird. Auf der Kompetenzebene unterstreichen die von der OECD vorgenommene Systematisierung der Digitalisierungsfähigkeiten und die in dieser Studie erstellte Systematisierung der Dekarbonisierungsfähigkeiten diese positive Verknüpfung anhand ihrer hohen Übereinstimmung (vgl. Tabelle 5 auf Seite 76).

Der Einsatz von neuen Verfahren, Prozessen und Technologien wird gemäß den Anwendungs- und Anpassungsfähigkeiten der Dekarbonisierung ebenfalls die Erweiterung der bestehenden Kompetenzen im Downstream-Produktionsprozess erfordern. Dies geschieht auch ohne expliziten Dekarbonisierungsdruck, wenn etwa neue Produktionssysteme eingeführt und die Beschäftigten entsprechend geschult werden. Da bis zum Jahr 2030 die breite Anwendung neuer emissionsreduzierender Technologien in verschiedenen Branchen und Industrien zu erwarten ist (Agora Energiewende & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2019; Deutsche Energie-Agentur GmbH [dena], 2021), ergeben sich dementsprechend schon mittelfristig umfassende Qualifizierungsbedarfe.

Bei weitgehend statischen Prozessen wie der taktgebundenen Großserienproduktion resultieren für Fachkräfte in der Produktion oftmals weitreichende, aber im Prinzip „einmalige“ Anpassungsqualifizierungen, zum Beispiel beim Übergang vom Verbrennungsmotor zur Elektromobilität. Da jedoch in zahlreichen Industrien der Trend zur Individualisierung und zur „Massenfertigung Losgröße 1“ unübersehbar ist, kann sich die Notwendigkeit zur Anpassungsqualifizierung an grünere/grüne Produktionsprozesse auch als kontinuierlicher Prozess darstellen. Dementsprechend kommt den Leitkompetenzen der Dekarbonisierung eine wichtige Rolle als generellem Referenz- und Handlungsrahmen zu, um auch in variablen Situationen stets die Vorgaben (KPI) einer Emissionsminimierung erfüllen zu können.

Dies wird besonders dann notwendig sein, wenn sich Wertschöpfungsmodelle stärker hin zu einer Projektwirtschaft entwickeln. Diese Tendenz kann durch die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft induziert bzw. verstärkt werden, wenn aufgrund volatiler Stoffströme die bestehenden Volllastprozesse nicht aufrechterhalten werden können, wie dies aktuell – wenn auch aus anderen Gründen – in verschiedenen globalen Lieferketten der Fall ist. Gleiches gilt für die Verfügbarkeit von grüner Energie, die zumindest für eine Übergangszeit nicht immer im benötigten Umfang bereitstehen könnte. Statt binärer Systeme („an“ <-> „aus“) sind unter solchen Bedingungen flexible Systeme mit Input-Folgefähigkeit nötig (Outscaling statt Upscaling von Prozessen). Eine derartige Flexibilität hat zwangsläufig die Erhöhung der Resilienz zur Folge, vgl. Versorgungsengpässe in der Covid-19-Pandemie. Da die Digitalisierung bisher schon ein Hebel zur Flexibilisierung war und diese durch die Dekarbonisierung einen zusätzlichen Schub erfährt – vgl. Ähnlichkeit der digitalen und der Dekarbonisierungsfähigkeiten –, kommt es zu einer weiteren Flexibilisierung von Wertschöpfungsprozessen (Asikainen et al., 2021, vi).

In Zukunft können Tätigkeitsprofile wie „Stoffstrom-Manager (m/w/d)“ und „Landfill-Miner (m/w/d)“ in der Kreislaufwirtschaft als wahrscheinlich gelten, ebenso „Prozesskybernetiker (m/w/d)“ in der chemischen Industrie und „Designer zirkuläre Produkte/Produktion (m/w/d)“ in der Automobilindustrie, abgewandelt auch im Baugewerbe. In der hochlaufenden Wasserstoffökonomie ist ein Profil „Elektrolyseur Operator (m/w/d)“ gegenwärtig kaum absehbar, während ein „Systemintegrator Wasserstoff (m/w/d)“ naheliegt. Für die exemplarisch genannten Profile ist es allerdings nicht zwingend, dass dafür (grundständige) Ausbildungsangebote entstehen. Vielmehr können bestehende Fachkräfte, die ein zu diesen Tätigkeitsfeldern weitgehend kompatibles Profil aufweisen, im betrieblichen Kontext über ein „Training on the job“ mit dem

noch fehlenden Fachwissen ausgestattet werden. Dieses Phänomen wurde u. a. für den EE-Sektor anhand einer Analyse von Stellenanzeigen beschrieben: „Der hohe Anteil (23 %) an Stellengesuchen für technische Fachkräfte ohne nähere berufliche Spezifizierung legt außerdem die Vermutung nahe, dass der eigentliche Abschluss häufig nachrangig bewertet wird“ (Spangenberg et al., 2016, i); aktuelle Analysen bestätigen dies auch für das „Ergrünen“ von anderen Berufen (Bauer et al., 2021). Gerade mit Blick auf die Kreislaufwirtschaft kann die Technisierung und Digitalisierung von Prozessen zu einem Übergang von manuellen Sortier- und Trenntätigkeiten zu steuernd-überwachenden Tätigkeiten führen. Insbesondere in der Abfallwirtschaft und im Recycling besteht somit die Chance für eine Aufwertung der Tätigkeiten, die sich gemäß den neuen Arbeitsinhalten sowohl in einer besseren Vergütung als auch in einer deutlichen Reduzierung des Gefährdungspotenzials niederschlagen dürfte.

Mit Blick auf die für die Dekarbonisierung notwendigen Fachkräfte ist somit deutlich absehbar, dass parallel zum Markthochlauf der Schwerpunkt zunächst auf Weiterbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen oder fallweise der Ergänzung bestehender Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrpläne liegt. Eine ähnliche Entwicklung ist auch in der akademischen Ausbildung erkennbar, doch ist das System aufgrund a) des hohen akademischen Bedarfs in der Prozess- und Technologieentwicklung und b) der dezentralen Akkreditierungsmechanismen auch bei neuen Themen wie dem grünen Wasserstoff schon fortgeschrittener, sodass erste eigenständige Studienangebote existieren. Vergleichbare grundständige Berufsausbildungen sind erst zu erwarten, wenn durch ein Ausrollen in die Fläche – etwa in Form eines Auf-/Ausbaus einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur – eine entsprechende quantitative Nachfrage entsteht. Ein solcher Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur stellt aufgrund der Eigenschaften von Wasserstoff hohe Anforderungen an die Sicherheit und an das Material von Rohrleitungen, Speichertanks, Ventilen etc. („H<sub>2</sub>-Readiness“), sodass neben einem unsachgemäßen Umgang eine unmittelbare Gefahr durch minderwertige Imitate und Produktfälschungen besteht. Aus Sicht des Arbeitsschutzes, vor allem aber der Betriebssicherheit, besteht somit die Notwendigkeit eines Systems der Zertifizierung und Nachvollziehbarkeit der Herkunft, um die Produkt- und Systemsicherheit sicherzustellen (Explosionsschutz und Ausfallsicherheit kritischer Infrastrukturen).

Parallel zur Digitalisierung kommt es auch und verstärkend im Zuge der Dekarbonisierung zu einer Aufwertung von Tätigkeiten – mit Blick auf die systemischen Kompetenzen gilt dies für die Dekarbonisierung voraussichtlich umfassender als für die Digitalisierung. Die für die Digitalisierung postulierte Polarisierung

wird durch die Dekarbonisierung, den mit ihr verbundenem „schleichenden Systemwechsel“ hin zu Cleantech-Verfahren und Technologien und somit das „Greening of Jobs“ nicht verstärkt. Im Gegenteil kann es hier sogar zu einer Stärkung des mittleren Qualifizierungssegments kommen, wenn tatsächlich vermehrt flexible und diskontinuierliche Produktions- und Wertschöpfungsprozesse zum Einsatz kommen, da diese zu einer Zunahme von situativ bedingten Nichtrouletinätigkeiten führen; derartige Tätigkeiten sind nur schwer automatisier- und damit substituierbar. Ein solcher Wandel führt gleichsam zwangsläufig zu einer fortschreitenden Flexibilisierung und Entgrenzung von Arbeit über die Dimensionen „Ort“ und „Zeit“ hinaus. Denn Arbeitsinhalte und -prozesse konfigurieren sich vielfach neu und dennoch muss stets das „zweite Produktionsparadigma ‚CO<sub>2</sub>-Minimierung‘“ erfüllt werden, indem im Prozess der Arbeit zielgerichtet neues Wissen erworben und angewendet wird (systemische Kompetenzen der Dekarbonisierung).

Neben den fachspezifischen Dekarbonisierungskompetenzen und den „weicheren“ Fähigkeiten, wie der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen, die für alle Berufe, Hierarchieebenen und Sektoren relevant sein können (Cedefop, 2019, S. 4), wird es bei der Emissionsminderung und der damit verbundenen ökologischen Transformation der Wertschöpfung auf umfassende Digitalisierungskompetenzen in den unterschiedlichen Qualifizierungsniveaus ankommen. Tatsächlich zeigt die Analyse der beruflichen und der akademischen Ausbildungsinhalte (siehe Abschnitt 5), dass zwar punktuell die explizite Verbindung aus Digitalisierung und Dekarbonisierung angestrebt wird, etwa bei einer Fortbildung für die grüne Wasserstoffökonomie (Heinze Akademie, 2021), die strategische Zusammenführung, wie sie in den verschiedenen Industrien erkennbar ist und gefordert wird (Demary et al., 2021), bisher aber nur unzureichend berücksichtigt wird. In der Analyse konnten kaum Angebote „Digitalisierung für die Dekarbonisierung“ identifiziert werden.

Mit Blick auf die (akademischen) Ausbildungsangebote fällt zudem auf, dass Deutschland auf Grundlage der hier analysierten Daten zumindest bei neueren Formaten wie Massive Open Online Courses (MOOCs) keineswegs zu den Vorreitern gehört. Verglichen mit den Niederlanden ist das Angebot etwa von Nachhaltigkeits-MOOCs erheblich kleiner und weniger differenziert (Tabelle 4). Dies kann unter Umständen ein schwaches Signal dafür sein, dass der Bereich der niedrigschwelligen Aus- und vor allem Weiterbildung zur Dekarbonisierung in Deutschland nicht schnell genug Fahrt aufnimmt bzw. nicht ausreichend beachtet wird.

Die Dekarbonisierung kann zukünftig in bestimmten, in erster Linie durch akademische Ausbildung gepräg-

ten Tätigkeitsfeldern für Frauen deutliche Chancen auf Beschäftigung bieten. Dies gilt einerseits angesichts der anhaltenden und demografisch bedingten Schrumpfung der Erwerbsbevölkerung (DESTATIS, 2019) und der sich verschärfenden Fachkräftesituation – insbesondere bei der energetischen Sanierung und dem (Infrastruktur-)Ausbau der erneuerbaren Energien inkl. grünen Wasserstoffs – in quantitativer Hinsicht (mehr Stellen für Frauen), andererseits mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch in qualitativer Hinsicht (bessere Stellen für Frauen). Eine aktuelle Bestandsaufnahme zeigt jedoch, dass in „ergrünenden“ Berufen vorwiegend Männer tätig sind. Dies gilt besonders für Bauberufe, die etwa für die genannte energetische Sanierung und den Auf-/Ausbau von Infrastrukturen besonders relevant sind, und kann den zu erwartenden quantitativen Fachkräfteengpass und den Pull-Effekt zumindest teilweise relativieren. Auch sonst gilt: „In keinem der dargestellten Berufe haben Frauen einen ähnlich großen oder größeren Anteil an der Beschäftigung als Männer“ (Bauer et al., 2021, S. 121). Allerdings kann sich diese Situation kurz- und mittelfristig aufgrund struktureller Änderungen wandeln, denn das Thema Dekarbonisierung springt auch in KMU von der operativen Ebene (Prozess-Engineering) auf die strategische Ebene (Business-Engineering). Infolgedessen kann es zu einer „Nachbesetzungswelle“ von Frauen in bisher deutlich männerdominierten Unternehmen bzw. Einheiten inkl. Führungspositionen kommen, weil sich durch die organisationale Verankerung der Dekarbonisierungsthematik neue Tätigkeitsfelder ergeben. Diese Felder können vor dem Hintergrund der Diskussion um Geschlechtergleichheit, Gender-Pay-Gap, mehr Frauen in Führungsrollen zu einer – bei gleicher Qualifikation – „systemischen Bevorzugung“ von Frauen führen. Dabei fällt auf, dass wegen der im Vergleich mit traditionellen Studienfächern höheren Repräsentanz von Frauen in „Nachhaltigkeitsstudiengängen“ auch ein entsprechendes Angebot an qualifizierten Bewerberinnen existiert. Dieser Effekt wiederum dürfte in der interdisziplinären Ausrichtung der betreffenden Studiengänge, dem damit verbundenen Aufbrechen männlich geprägter Technikbilder und in der „Purpose“-Orientierung begründet sein.

Als möglicher weiterer Grund für die bevorzugte Einstellung von Frauen kann als „schwaches Signal“ die tendenziell stärker weibliche Konnotation der Dekarbonisierungsleitkompetenzen wie Multiperspektivität, Kommunikation/Interaktion und Empathie angeführt werden: „Fähigkeiten, die als ‚soft skills‘ bezeichnet und Frauen zugeschrieben werden, sind für nachhaltige Veränderungen ‚basic skills‘“ (Winterfeld, 2012, S. 40). Sie gelten zudem generell als Kern von Tätigkeiten der Unternehmensführung und -organisation (Börsch et al., 2020, S. 12). Die Gefahr, dass Nachhal-

tigkeit und Dekarbonisierung deswegen als „Frauenthemen“ abgetan werden, besteht angesichts der politischen Zielvorgaben und des praktischen Handlungsdrucks sicher nicht.

# Literaturverzeichnis

- acatech, Circular Economy Initiative Deutschland, Systemiq (Hrsg.). (2020).** Ressourcenschonende Batterie-kreisläufe. Mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben. München. [https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/6077e41addfd577bdda103cb/1618469932441/TB\\_Kurzfassung+DE](https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/6077e41addfd577bdda103cb/1618469932441/TB_Kurzfassung+DE)
- Agora Energiewende & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (Hrsg.). (2019).** Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin. [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung\\_Industrie/164\\_A-EW\\_Klimaneutrale-Industrie\\_Studie\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf)
- Agora Verkehrswende (Hrsg.). (2021).** Autojobs unter Strom: Wie Elektrifizierung und weitere Trends die auto-mobile Arbeitswelt bis 2030 verändern werden und was das für die Politik bedeutet. Berlin. [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/BCG-Jobstudie/64\\_Jobeffekte.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/BCG-Jobstudie/64_Jobeffekte.pdf)
- Aguilar-Hernandez, G. A., Dias Rodrigues, J. F. & Tukker, A. (2020).** Macroeconomic, social and environmental impacts of a circular economy up to 2050: A meta-analysis of prospective studies. *Journal of Cleaner Production*(278), Artikel 123421, 1–11.
- Arbeitgeberverband Chemie und verwandte Industrien für das Land Hessen e.V. (2017).** Digitaler Wandel in der chemischen und pharmazeutischen Industrie: Eine Befragung der Mitgliedsunternehmen von HessenChemie. Wiesbaden/Köln. [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2017/366818/Gutachten\\_Digitaler\\_Wandel\\_HessenChemie.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2017/366818/Gutachten_Digitaler_Wandel_HessenChemie.pdf)
- Asikainen, T., Bitat, A., Bol, E., Czako, V., Marmier, A., Muench, S., Murauskaite-Bull, I., Scapolo, F. & Stoermer, E. (2021).** The Future of Jobs is Green (EUR 30867 EN). Luxembourg. [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC126047/JRC126047\\_01.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC126047/JRC126047_01.pdf) <https://doi.org/10.2760/218792>
- Baethge, C. B., Boberach, M., Hoffmann, A. & Wintermann, O. (2019).** Plattformarbeit in Deutschland: Freie und flexible Arbeit ohne soziale Sicherung. Gütersloh.
- Bauer, S., Thobe, I., Wolter, M. I., Zika, G., Röttger, C., Helmrich, R., Schandock, M., Mohaupt, F. & Müller, R. (2021).** Branchen und Berufe für den Übergang in eine Green Economy: Eine aktualisierte Bestandsaufnahme (Umwelt, Innovation, Beschäftigung 03/2021). Dessau-Roßlau. GWS; IAB; BIBB; IÖW. [http://downloads.gws-os.com/2021-03-18\\_uib\\_03-2021\\_branchen\\_berufe\\_green\\_economy.pdf](http://downloads.gws-os.com/2021-03-18_uib_03-2021_branchen_berufe_green_economy.pdf)
- BauInfoConsult GmbH (Hrsg.). (2019).** BIM-Monitor 2019. <https://bauinfoconsult.de/produkte/bim-monitor-2019-trends-und-entwicklungen/>
- Becker, L. & Lutz, C. (2021).** Jobmotor Klimaschutz: Beschäftigungseffekte durch ambitionierten Klimaschutz (GWS RESEARCH REPORT 2021/01). Osnabrück. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (gws). <http://papers.gws-os.com/gws-researchreport21-1.pdf>
- Berbner, R., Elsholz, C., Schüch, L. & Hoffmann, S. M. (2021).** Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Corona in der Bauindustrie. <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/pwc-herausforderungen-der-deutschen-bauindustrie-2021.pdf>
- Bezdek, R. H. (2019).** The hydrogen economy and jobs of the future. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 4(1), 1–6. <https://doi.org/10.1051/rees/2018005>
- BMW AG (Hrsg.). (2021).** So nachhaltig produziert BMW Autos. <https://www.bmw.com/de/innovation/nachhaltigkeit-bei-bmw.html>
- BMW Group (Hrsg.). (2020a).** BMW Group Bericht 2020: Unsere Verantwortung. Unsere Zukunft. <https://bericht.bmwgroup.com/home/start/>

- BMW Group. (2020b, 18. November).** Werk München bekommt eine neue Fahrzeugmontage [Press release]. <https://www.bmwgroup-werke.com/muenchen/de/aktuelles/pressemeldungen/neue-fahrzeugmontage.html>
- Böckmann, C. (2022).** Wasserstoff sichert Jobs. *Metall*, 74(1/2), 10–15. [https://www.igmetall.de/download/20220103\\_metallo\\_2022\\_01\\_02\\_barrierefrei\\_b23672dc1acf5e29728c17b85785a50f614f2ffc.pdf](https://www.igmetall.de/download/20220103_metallo_2022_01_02_barrierefrei_b23672dc1acf5e29728c17b85785a50f614f2ffc.pdf)
- Bork, H. & Ernhofer, W. (2021).** BASF bastelt in China am „grünen“ Verbundstandort. *Process*. <https://www.process.vogel.de/basf-bastelt-in-china-am-gruenen-verbundstandort-a-1009781/>
- Börner, K., Scrivner, O., Gallant, M., Ma, S., Liu, X., Chewning, K., Wu, L. & Evans, J. A. (2018).** Skill discrepancies between research, education, and jobs reveal the critical need to supply soft skills for the data economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(50), 12630–12637. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804247115>
- Börsch, A., Bommer, M. & Elting, J. (2020).** Die Jobs der Zukunft: Berufswelt bis 2035 – fünf Trends (Datenland Deutschland). München. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/Innovation/deloitte-datenland-deutschland-jobs-der-zukunft.pdf>
- Bovenschulte, M. (9. August 2021).** Wasserstoff als Beruf. *Frankfurter Rundschau (FR)*, 77(183), S. 10. <https://www.fr.de/meinung/gastbeitraege/wasserstoff-als-beruf-90910674.html>
- Bovenschulte, M., Abel, S., Ehrenberg-Silies, S. & Goluchowicz, K. (2021).** Auswirkungen des Klimawandels auf technologische Entwicklungen und deren Folgen für Arbeitssicherheit und Gesundheit. *Strategische Vorausschau der Denkfabrik Digitale Arbeitsgesellschaft*. Berlin. Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit).
- Bovenschulte, M., Peters, R. & Burmeister, K. (2021).** Basisarbeit – Stützen der (Arbeits-)Gesellschaft. *Strategische Vorausschau der Denkfabrik Digitale Arbeitsgesellschaft*. Berlin. Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit); Foresight Solutions; Schaltzeit GmbH.
- Brandt, A., Bovenschulte, M., Nögel, L., Strach, H. & Buhl, C. M. (2021).** Pfadabhängigkeiten in der Braunkohlewirtschaft: Potenzial- und Risikoanalyse für die mit den Wertschöpfungsketten der braunkohlefördernden und verarbeitenden Wirtschaft verknüpften Unternehmen. Leipzig/Berlin. Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit).
- Bringezu, S. & Banse, M. (2020).** Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie. Juni 2020. Kassel. <https://kobra.uni-kassel.de/bitstream/handle/123456789/11591/PilotberichtMonitoringBiooekonomie2020.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Buchenau, M. & Tyborski, R. (2020).** Studie: E-Mobilität vernichtet keine Auto-Jobs, doch viele Chancen bleiben ungenutzt. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autoindustrie-studie-e-mobilitaet-vernichtet-keine-auto-jobs-doch-viele-chancen-bleiben-ungenutzt/26222606.html?ticket=ST-947472-vAIUqkG4dJuuteeKE-vis-ap5>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). (2021a).** Fachkräfte-Nachwuchs für Grünen Wasserstoff. [https://www.fona.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/WASCAL-Masterprogramm\\_IMP-EGH.php](https://www.fona.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/WASCAL-Masterprogramm_IMP-EGH.php)
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.). (2021b).** H2 Atlas AFRIKA – Potenzialatlas Grüner Wasserstoff in Afrika. Berlin/Bonn. [https://www.fona.de/medien/pdf/200831\\_PH2-ATLAS\\_AFRIKA\\_-\\_Potenzialatlas\\_Gruener\\_Wasserstoff\\_in\\_Afrika.pdf](https://www.fona.de/medien/pdf/200831_PH2-ATLAS_AFRIKA_-_Potenzialatlas_Gruener_Wasserstoff_in_Afrika.pdf)
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). (2021c).** Potenzialatlas Wasserstoff: Afrika könnte Energieversorger der Welt werden. [https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/\\_documents/potenzialatlas-wasserstoff-afr-ergieversorger-der-welt-werden.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/_documents/potenzialatlas-wasserstoff-afr-ergieversorger-der-welt-werden.html)
- Bundesministerium für Bildung und Forschung & Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.). (2020).** Nationale Bioökonomiestrategie. Berlin. [https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2020-06/bmbf\\_nationale\\_biooekonomiestrategie\\_langfassung\\_deutsch.pdf](https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2020-06/bmbf_nationale_biooekonomiestrategie_langfassung_deutsch.pdf)

- Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie & Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (2020).** Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung: Fortschreibung. Berlin. [https://www.ki-strategie-deutschland.de/files/downloads/201201\\_Fortschreibung\\_KI-Strategie.pdf](https://www.ki-strategie-deutschland.de/files/downloads/201201_Fortschreibung_KI-Strategie.pdf)
- Bundesklimaschutzgesetz 2021 (2021).** [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/ksg\\_aendg\\_2021\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_bf.pdf)
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.). (2020).** Elektromobilität mit Wasserstoff / Brennstoffzelle. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/elektromobilitaet-mit-wasserstoff.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2018).** Schlaglichter der Wirtschaftspolitik. Monatsbericht September 2018. Berlin. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/schlaglichter-der-wirtschaftspolitik-09-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=29](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/schlaglichter-der-wirtschaftspolitik-09-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=29).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (Dezember 2019).** Energieeffizienzstrategie 2050. Berlin. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=10)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2020a).** Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2020b).** Eckpunkte zur Umsetzung des Konjunkturpakets Ziffer 35c Zukunftsinvestitionen, Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie sowie Forschung und Entwicklung. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-konjunkturpaket-35c.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-konjunkturpaket-35c.pdf?__blob=publicationFile&v=10)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2020c).** Was sind eigentlich Carbon Contracts for Difference? Energiewende direkt. <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/12/Meldung/direkt-erklaert.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2021a).** Altmaier: „Rekordmittel für die Gebäudesanierung sind wichtiges Signal für mehr Klimaschutz und Arbeitsplätze“. Pressemitteilung. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/09/20210922-altmaier-rekordmittel-fur-die-gebauedesanierung-sind-wichtiges-signal-fur-mehr-klimaschutz-und-arbeitsplatze.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2021b).** Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Qualifizierungsmaßnahmen für die Batteriezellfertigung. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-der-richtlinie-zur-foerderung-von-qualifizierungsmaßnahmen-fur-die-batteriezellfertigung-2021-07-08.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=26](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-der-richtlinie-zur-foerderung-von-qualifizierungsmaßnahmen-fur-die-batteriezellfertigung-2021-07-08.pdf?__blob=publicationFile&v=26)
- Bundesregierung. (2018, 15. Oktober).** Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Aktualisierung 2018. Berlin.
- Bundesregierung (Hrsg.). (2021).** Bauen und Wohnen. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundlich-wohnen-1672900>
- Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. (2020).** Statusbericht Kreislaufwirtschaft 2020 vorgelegt – BDE lobt umfassende Branchenübersicht und Handlungsempfehlungen: Pressemitteilung vom 17.11.2020 [Press release]. Berlin. <https://www.bde.de/presse/statusbericht-kreislaufwirtschaft-2020/?print=1>
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (Hrsg.). (2020).** Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Kurzstudie. Berlin. [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05\\_bitkom\\_klimastudie\\_digitalisierung.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf)
- Bundesverband WindEnergie e.V. (Hrsg.). (2019).** Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Hintergrundpapier. Berlin. [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier\\_Recycling\\_von\\_Windenergieanlagen\\_-\\_20191115.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf)

- Cabernard, L., Pfister, S., Oberschelp, C. & Hellweg, S. (2021).** Growing environmental footprint of plastics driven by coal combustion. Nature Sustainability. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00807-2>
- Carbon Literacy Project (Hrsg.). (2013).** Carbon Literacy: The Carbon Literacy Standard. Version 1.05. Manchester. <https://web.archive.org/web/20151119075654/http://www.carbonliteracy.com/wp-content/uploads/2014/06/The-Carbon-Literacy-Standard-Version-1.05-CLP.pdf>
- Carus, M. (2017).** Biobased Economy and Climate Change — Important Links, Pitfalls, and Opportunities. Industrial Biotechnology, 13(2), 41–63. <https://doi.org/10.1089/ind.2017.29073.mca>
- Cedefop. (2019).** Skills for green jobs: European synthesis report (2018. Aufl.). Cedefop reference series: Bd. 109. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2801/750438>
- Chemietechnik (Hrsg.). (2020).** Pyrolyse als Chance für den Klimaschutz. <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/pyrolyse-als-chance-fuer-den-klimaschutz-397.html>
- Chemietechnik (Hrsg.). (2021).** LOHC-Technologie: Rekordanlage zur Wasserstoff-Speicherung entsteht in Dormagen. <https://www.chemietechnik.de/anlagenbau/rekordanlage-zur-wasserstoff-speicherung-entsteht-in-dormagen-280.html>
- Demary, V., Plünnecke, A. & Schaefer, T. (2021).** Dekarbonisierung – Digitale Fachkräfte gesucht: IW-Kurzbericht 51/2021.
- DESTATIS. (2019).** Bevölkerung im Erwerbsalter sinkt bis 2035 voraussichtlich um 4 bis 6 Millionen. Pressemitteilung Nr. 242 vom 27. Juni 2019 [Press release]. Wiesbaden. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/06/PD19\\_242\\_12411.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/06/PD19_242_12411.html)
- DESTATIS. (2021).** Abfallaufkommen in Deutschland im Jahr 2019 weiter auf hohem Niveau [Press release]. Wiesbaden. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21\\_261\\_321.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21_261_321.html)
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). (2021).** Tech for Net Zero Allianz: Klimaneutralität 2045 – Neue Technologien für Deutschland. Berlin. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/TfNZ\\_Klimaneutralitaet\\_2045\\_-\\_Neue\\_Technologien\\_fuer\\_Deutschland.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/TfNZ_Klimaneutralitaet_2045_-_Neue_Technologien_fuer_Deutschland.pdf)
- Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. (Hrsg.). (2021).** Aufschwung droht ausgebremst zu werden – Standort Deutschland attraktiver für Unternehmen gestalten (DIHK-Konjunkturumfrage Herbst 2021). Berlin. <https://www.dihk.de/resource/blob/59916/7a59af35e5b789ca6a03efd1c10e4c11/dihk-konjunkturumfrage-herbst-2021-data.pdf>
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Hrsg.). (2021).** Die Abteilung Hochtemperaturwärmepumpe (HTP). Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse. <https://www.dlr.de/di/desktopdefault.aspx/tabid-15753/>
- Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau, Die Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa, Die Senatorin für Wissenschaft und Häfen & Senatskanzlei (Hrsg.). (2021, 21. Dezember).** Wasserstoffstrategie Land Bremen. In der Senatssitzung am 21. Dezember 2021 beschlossene Fassung. Freie Hansestadt Bremen. [https://www.rathaus.bremen.de/sixcms/media.php/13/top%205\\_20211221\\_Wasserstoffstrategie\\_Land\\_Bremen.pdf](https://www.rathaus.bremen.de/sixcms/media.php/13/top%205_20211221_Wasserstoffstrategie_Land_Bremen.pdf)
- Dispan, J. & Mender, L. (2020).** Branchenanalyse kunststoffverarbeitende Industrie 2020: Beschäftigungstrends, Kreislaufwirtschaft, digitale Transformation (Working Paper Forschungsförderung Nr. 186). Düsseldorf. [https://www.boeckler.de/pdf/p\\_fofoe\\_WP\\_186\\_2020.pdf](https://www.boeckler.de/pdf/p_fofoe_WP_186_2020.pdf)
- Dittrich, B. (2020).** Kohleausstieg: Die Lausitz zwischen Skepsis und Hoffnung. Vorwärts.
- dpa (10. Januar 2022).** Weniger Plastikmüll exportiert. Frankfurter Rundschau (FR), 78(7), S. 17. <https://www.fr.de/wirtschaft/2021-weniger-plastikmuell-aus-deutschland-exportiert-zr-91224475.html>

- Dresden International University (Hrsg.). (2022).** Studieninformation M.Sc.-Studiengang Wasserstofftechnologie und -wirtschaft: Berufsbegleitend. Start: April 2022. Dresden.
- Egenolf-Jonkmanns, B., Glasner, C., Seifert, U., Küper, M., Schaefer, T., Merten, F., Scholz, A. & Taubitz, A. (2021).** Wasserstoffimporte. Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030. Köln. [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/Gutachten/PDF/2021/Bereitstellung\\_von\\_Wasserstoff\\_bis\\_2030.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2021/Bereitstellung_von_Wasserstoff_bis_2030.pdf)
- Ehrenberg-Silies, S., Bovenschulte, M., Burmeister, K. & Goluchowicz, K. (2021).** Deep Dive: Zukünftige Kompetenzprofile für die Automobilwirtschaft. Strategische Vorausschau der Denkfabrik Digitale Arbeitsgesellschaft. Berlin. Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit).
- Ellen MacArthur Foundation (Hrsg.). (2021).** Completing the Picture – How the circular economy tackles climate change. Cowes. <https://emf.thirdlight.com/link/w750u7vysuy1-5a5i6n/@/download/1>
- Europäische Kommission (Hrsg.). (2021).** Europäischer Grüner Deal: Erster klimaneutraler Kontinent werden. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de#thematicareas](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de#thematicareas)
- European Bioplastics e.V. (Hrsg.). (2020).** Bioplastics market data. <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- European Commission (Hrsg.). (2020a).** Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. Brussels. [https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/new\\_circular\\_economy\\_action\\_plan.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/new_circular_economy_action_plan.pdf)
- European Commission (Hrsg.). (2020b, 14. Oktober).** Chemicals Strategy for Sustainability – Towards a Toxic-Free Environment: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. (Communication 667 final). Brussels. <https://ec.europa.eu/environment/pdf/chemicals/2020/10/Strategy.pdf>
- Fraunhofer Academy (Hrsg.). (2022a).** Energiewende praktisch – Basiswissen für Ihren Umstieg auf Wasserstoff. Fraunhofer IST. <https://www.academy.fraunhofer.de/de/weiterbildung/energie-nachhaltigkeit/Wasserstoff/basiswissen-wasserstoff.html>
- Fraunhofer Academy. (2022b).** Werden auch Sie Wasserstoff-Pionier! Fraunhofer-Weiterbildungen zu Wasserstofftechnologien. <https://www.academy.fraunhofer.de/de/weiterbildung/energie-nachhaltigkeit/Wasserstoff.html>
- Fraunhofer-Allianz Bau (Hrsg.). (2021a).** Advanced Materials. <https://www.bau.fraunhofer.de/de/forschungsbereiche/Baustoffe.html>
- Fraunhofer-Allianz Bau (Hrsg.). (2021b).** Energie- und Ressourceneffizienz. <https://www.bau.fraunhofer.de/de/forschungsbereiche/Ressourceneffizienz.html>
- Fraunhofer-Allianz Bau (Hrsg.). (2021c).** Modulares Bauen. <https://www.bau.fraunhofer.de/de/forschungsbereiche/Modularbau.html>
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (Hrsg.). (2018).** ELAB 2.0 Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland. Stuttgart. [https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-5313834.pdf](https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5313834.pdf)
- Frenken, K., van Oort, F. & Verburg, T. N. (2007).** Related variety, unrelated variety and regional economic growth. *Regional Studies*(41(5), 685–697. <https://doi.org/10.1080/00343400601120296>
- Freytag, B. (2021).** Brutal günstig und unvorstellbar viel: Strom für Grüne Industrie. Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ). <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klima-nachhaltigkeit/energie-wende-chemische-industrie-fordert-mehr-oekostrom-17248364.html>



- Fröndhoff, B. & Stratmann, K. (2022).** Wettlauf um Wasserstoff: Covestro sichert sich große Mengen aus Australien. Handelsblatt. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/klimaneutralitaet-wettlauf-um-wasserstoff-covestro-sichert-sich-grosse-mengen-aus-australien/27977444.html?ticket=ST-3331405-DJkngJY-UhxkjLHZTxIBb-ap5>
- Fröndhoff, B. & Witsch, K. (2021).** Rohstoff Müll: Die 800-Milliarden-Euro-Chance der Industrie. Handelsblatt. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft-rohstoff-muell-die-800-milliarden-euro-chance-der-industrie/27751730.html?ticket=ST-8808224-jXZ2b9peDuFyQTYT6b6F-cas01.example.org>
- Fuchs, T. (2006).** Was ist gute Arbeit? Anforderungen aus der Sicht von Erwerbstätigen (INQA-Bericht Nr. 19). Dortmund, Berlin, Dresden. [http://www.inqa.de/SharedDocs/PDFs/DE/Publikationen/inqa-19-was-ist-gute-arbeit.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.inqa.de/SharedDocs/PDFs/DE/Publikationen/inqa-19-was-ist-gute-arbeit.pdf?__blob=publicationFile)
- Gaßner, H. (2021).** Rechtshürden für Elektrolyseure beseitigen. Tagesspiegel Background Energie & Klima. <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/rechtshuerden-fuer-elektrolyseure-beseitigen>
- Gender- und Frauenforschungszentrum der Hessischen Hochschulen (Hrsg.). (2020).** gFFZ-Gender-Monitor. <https://www.gffz.de/gendermonitor/frauenanteil-im-bachelor/bachelor-studiengaenge-geordnet-nach-der-hoehe-des-frauenanteils>
- Geres, R., Kohn, A., Lenz, S., Ausfelder, F., Bazzanella, A. M. & Möller, A. (2019).** Roadmap Chemie 2050: Auf dem Weg zu einer treibhausneutralen chemischen Industrie in Deutschland.
- Gersmann, H. (17. Dezember 2021).** Plastik neu denken. Frankfurter Rundschau (FR), 77(294), S. 12. <https://www.fr.de/wirtschaft/plastik-neu-denken-91183414.html>
- Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V. (2020a).** Über uns: Willkommen beim Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie. <https://www.gkv.de/de/ueber-uns/>
- Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V. (2020b).** Überblick Kunststoffverarbeitung. <https://www.gkv.de/de/branchen/ueberblick.html>
- Glock, G., Goluchowicz, K., Priesack, K., Apt, W., Strach, H. & Bovenschulte, M. (2019).** QuaTOQ – Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation: Branchenbericht: Einzelhandel und Handelslogistik (Forschungsbericht 522/3). Berlin. <https://www.bmas.de/DE/Service/Medien/Publikationen/Forschungsberichte/Forschungsberichte-Arbeitsmarkt/fb522-3-quatoq.html>
- Grimm, V., Janser, M. & Stops, M. (2021).** Neue Analyse von Onlinestellenanzeigen: Kompetenzen für die Wasserstofftechnologie sind jetzt schon gefragt (IAB -KURZBERICHT 11/2021). Nürnberg. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB). <https://doku.iab.de/kurzber/2021/kb2021-11.pdf>
- Hackelsberger, A. L., Rheinbay, L., Funke, C., Machur, W., Holst, A., Braun, N., Demandt, M. & Berg, H. (2021).** Germany's Transition to a Circular Economy: How to Unlock the Potential of Cross-Industry Collaboration. econsense; Accenture; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. [https://econsense.de/app/uploads/2021/06/econsense\\_ACN\\_WI\\_Circular-Economy-Study.pdf](https://econsense.de/app/uploads/2021/06/econsense_ACN_WI_Circular-Economy-Study.pdf)
- Haerdle, B. (2021).** Tüfteln für den Klimaschutz: Studiengang Umwelttechnik. Süddeutsche Zeitung (SZ). <https://www.sueddeutsche.de/kolumne/studium-umwelttechnik-karriere-1.5336742>
- Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. (Hrsg.). (2020).** Beschäftigtenstruktur im Bauhauptgewerbe. <https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild/beschaefigtenstruktur-im-bauhauptgewerbe>
- Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. (Hrsg.). (2021).** Fachkräftesituation im Bauhauptgewerbe. <https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/news-detail-zuf/fachkraeftesituation-im-bauhauptgewerbe>

- Hausmann, R. (2021).** Green Growth at the End of the Flat World. Project Syndicate. <https://www.project-syndicate.org/commentary/green-growth-and-end-of-flat-energy-world-by-ricardo-hausmann-2021-12>
- Heinze Akademie (Hrsg.). (2021).** Expert\*innen Qualifizierung Wasserstoffsysteme. Info-Flyer. Hamburg. [https://heinze-akademie.de/app/uploads/2021/12/Infolyer\\_Wasserstoff.pdf](https://heinze-akademie.de/app/uploads/2021/12/Infolyer_Wasserstoff.pdf)
- Helmcke, S., Heuss, R., Hieronimus, S., Engel, H. (2021).** Net-Zero Deutschland: Chancen und Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2045. [https://www.mckinsey.de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/2021-09-10%20net-zero%20deutschland/210910\\_mckinsey\\_net-zero%20deutschland.pdf](https://www.mckinsey.de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/2021-09-10%20net-zero%20deutschland/210910_mckinsey_net-zero%20deutschland.pdf)
- Helmus, M., Meins-Becker, A., Kelm, A., Klusmann, B., Pütz, C. & Zibell, M. (2018).** Ergebnisbericht zur Expertenbefragung im Rahmen der RG-Bau Studie zur „Digitalisierung und Beschäftigung in der Bauwirtschaft“. Wuppertal. [file:///C:/Users/GOLUCH~1/AppData/Local/Temp/23/20181203\\_Endbericht\\_Umfrage\\_RKW\\_v1.1\\_brk.pdf](file:///C:/Users/GOLUCH~1/AppData/Local/Temp/23/20181203_Endbericht_Umfrage_RKW_v1.1_brk.pdf)
- Huber-Straßer, A. (2019).** Datenaffin und nachhaltig – Frauen in Führungspositionen. KPMG Klardenker. <https://klardenker.kpmg.de/datenaffin-und-nachhaltig-frauen-in-fuehrungspositionen/>
- Ihsen, S. (2017).** Wandel und Widerstand. Zur Entwicklung einer genderorientierten Technikkultur. In U. Kempf & Wrede Birgitta (Hrsg.), IZG-Forschungsreihe: Bd. 19. Gender-Effekte: Wie Frauen die Technik von morgen gestalten (S. 5–20).
- IRENA. (2020).** Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA\\_Global\\_Renewables\\_Outlook\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Global_Renewables_Outlook_2020.pdf)
- Janser, M. (2018).** The greening of jobs in Germany: First evidence from a text mining based index and employment register data (IAB-Discussion Paper 14/2018). Nürnberg. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB). <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/182154/1/dp1418.pdf>
- Kamberi, A. & Kergel, H. (2021).** Klimaneutralität mit dem „Internet des Wasserstoffs“. Berlin. VDI/VDE Innovation + Technik GmbH. [https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/Internet\\_des\\_Wasserstoffs\\_Poster\\_A3.pdf](https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/Internet_des_Wasserstoffs_Poster_A3.pdf)
- Kampe, C., Walter, A. & Porep, D. (2018).** Arbeit 4.0 in Brandenburg: Zusammengefasste Ergebnisse zu Digitalisierungsniveaus – Beschäftigungseffekten – Arbeitsformen – Qualifizierungsbedarfen. Potsdam. [https://www.wfbb.de/de/system/files/media-downloads/wfbb\\_studie\\_digitalisierung.pdf](https://www.wfbb.de/de/system/files/media-downloads/wfbb_studie_digitalisierung.pdf)
- Kaul, A., Hagedorn, M., Hartmann, S., Heilert, D., Harter, C., Olschewski, I., Eckstein, L., Baum, M., Henzelmann, T. & Schlick, T. (2019).** Automobile Wertschöpfung 2030/2050: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. (Endbericht). IPE; ika; fka; Roland Berger. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=16](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16)
- Kempermann, H., Ewald, J., Fritsch, M., Kestermann, C., Okos, T. & Zink, B. (2021).** Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte der Strukturförderung im Rheinischen Revier: Studie für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE). Köln/Düsseldorf. IW Consult.
- Kenkmann, T. & Braungardt, S. (2021).** Das Handwerk als Umsetzer der Energiewende im Gebäudesektor. Policy Paper. Freiburg. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Handwerker-als-Umsetzer-Policy-Paper.pdf>
- Kewes, T. (2020).** Zwei Brüder aus Bielefeld bauen die Tesla-Fabrik in Brandenburg. Handelsblatt. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand/familienunternehmer/jan-hendrik-und-joerg-uwe-goldbeck-zwei-brueder-aus-bielefeld-bauen-die-tesla-fabrik-in-brandenburg/25970252.html>
- Kirsch, A., Sondergeld, V. & Wrohlich, K. (2022).** Deutlich mehr Vorständinnen in großen Unternehmen – Beteiligungsgebot scheint bereits zu wirken: Managerinnen-Barometer: Frauenanteile. DIW Wochenbericht(3/2022), 22–33. [https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.833636.de/22-3-2.pdf](https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.833636.de/22-3-2.pdf)

- Knappe, F., Reinhardt, J., Oetjen-Dehne, R., Buschow, N., Ritthoff, M., Wilts, H. & Lehmann, M. (2021).** Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes (Texte 92/2021). Dessau-Roßlau. [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7808/file/7808\\_Kunststoffrecycling.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7808/file/7808_Kunststoffrecycling.pdf)
- Koch, M. (10. Januar 2022).** Grüne Preisspirale. Frankfurter Rundschau (FR), 78(7), S. 3. <https://www.fr.de/hintergrund/gruene-preisspirale-91225253.html>
- Kölling, M. (2021).** Gunst der Geografie. Handelsblatt. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/stahlkonzern-posco-gunst-der-geografie/7538042.html?ticket=ST-9022090-eucCaerfdwqV1mIJsZaC-cas01.example.org>
- Koot, M. & Wijnhoven, F. (2021).** Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model. Applied Energy(291), Artikel 116798. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116798>
- Kords, M. (2022a).** Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis 2021. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-deutschland/>
- Kords, M. (2022b, 19. Januar).** Anzahl der Beschäftigten in der Automobilindustrie in Deutschland von 2010 bis 2020. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/30703/umfrage/beschaeftigtenzahl-in-der-automobilindustrie/>
- Kraftfahrtbundesamt. Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2018.** Flensburg. [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b\\_jahresbilanz.html?nn=644526](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html?nn=644526)
- Krichewsky-Wegener, L., Abel, S. & Bovenschulte, M. (2020).** Skills Development for Hydrogen Economies – Damit aus einer Wasserstoffstrategie eine Wasserstoff(weiter)bildungsstrategie wird (iit perspektive Nr. 55). Berlin. Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit).
- Krzywdzinski, M., Butollo, F., Flemming, J., Gerber, C., Wandjo, D., Delicat, N., Herzog, L., Bovenschulte, M. & Nerger, M., (2021)** Wachsende Kluft zwischen Vorreiterunternehmen und Nachzüglern: Digitalisierung, Automatisierung und organisatorischer Wandel in Folge der COVID19-Krise (Policy Brief). Berlin.
- Kultusministerkonferenz (Hrsg.). (2018).** Rahmenlehrplan für den Ausbildungsberuf Chemikant/Chemiekantin. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 01.12.2000 i.d.F. vom 23.02.2018. Berlin/Bonn.
- Landratsamt Sonneberg & Staatliche Berufsbildende Schule Sonneberg (Hrsg.). (2019).** Aus- und Weiterbildungsmodulare in der Wasserstofftechnologie: Teilvorhabenbeschreibung des vom BMBF geförderten Verbundprojekts H2-Well PEM4Heat. [https://sbbs-son.de/wp-content/uploads/2021/05/Teilvorhabenbeschreibung\\_PEM4Heat\\_SBBS\\_aktuell\\_3007\\_FINAL.pdf](https://sbbs-son.de/wp-content/uploads/2021/05/Teilvorhabenbeschreibung_PEM4Heat_SBBS_aktuell_3007_FINAL.pdf)
- Lohse, A. (2020).** STEAG will Thyssenkrupp-Stahlwerk mit Wasserstoff versorgen. Poser-to-X GmbH. <https://power-to-x.de/steag-will-thyssenkrupp-stahlwerk-mit-wasserstoff-versorgen/>
- Magenheim-Hörmann, T. (24. Januar 2022).** Wasserstoff auf dem Gleis. Frankfurter Rundschau (FR), 78(20), S. 15. <https://www.fr.de/hintergrund/wasserstoff-auf-dem-gleis-91256531.html>
- Malanowski, N. & Awenius, M. (2017).** Digitalisierung in der Pharmazeutischen Industrie: Großunternehmen sind vorne mit dabei. In Digitalisierung und Industrie 4.0: Technik allein reicht nicht (S. 163–184).
- Malanowski, N., Niehaus, J. & Awenius, M. (2017).** Digitalisierung in der Chemischen Industrie. In Digitalisierung und Industrie 4.0: Technik allein reicht nicht (S. 139–162).
- McKinsey (Hrsg.). (2018).** Route 2030: The fast track to the future of the commercial vehicle industry. <https://www.mckinsey.de/industries/automotive-and-assembly/our-insights/route-2030-the-fast-track-to-the-future-of-the-commercial-vehicle-industry>

- Menzel, Nora/Poll, Dietmar. (2021).** Batterieproduktion in Deutschland: Hier entstehen neue Werke. <https://www.produktion.de/co2-neutrale-industrie/batterieproduktion-in-deutschland-hier-entstehen-neue-werke-124.html>
- Merten, F., Scholz, A., Krüger, C., Heck, S., Girad, Y., Mecke, M. & Goerge, M. (2020).** Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Wuppertal/Berlin. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; DIW Econ GmbH. <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Hrsg.). (2021a).** Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen. Berlin. [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/broschuere\\_h2-genehmigungsleitfaden.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/broschuere_h2-genehmigungsleitfaden.pdf)
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Hrsg.). (2021b).** Innovation und Fortschritt: Atlas der Wasserstoff-Netzwerke in Deutschland. Berlin. <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/12/2021-11-12-NOW-Atlas-H2-Inhalt-DIGITAL.pdf>
- Neuhold, M. (2021).** Globalisierung und Kreislaufwirtschaft im Maschinenbau. <https://www.produktion.de/wirtschaft/globalisierung-und-kreislaufwirtschaft-im-maschinenbau-126.html>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (Hrsg.). (2016a).** New skills for the digital economy: Measuring the demand and supply of ICT skills at work (OECD Digital Economy Papers Nr. 258). Paris.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (Hrsg.). (2016b).** Skills for a digital world: 2016 Ministerial meeting on the digital economy. Background Report (OECD Digital Economy Papers Nr. 250). Paris.
- Priesack, K., Apt, W., Glock, G., Goluchowicz, K. & Bovenschulte, M. (2019).** QuaTOQ – Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation: Branchenbericht: Chemie- und Pharmaindustrie (Forschungsbericht 522/4). Berlin. <https://www.bmas.de/DE/Service/Medien/Publikationen/Forschungsberichte/Forschungsberichte-Arbeitsmarkt/fb522-4-quatoq.html>
- Priesack, K., Glock, G., Strach, H., Krabel, S. & Bovenschulte, M. (2018).** QuaTOQ – Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation: Branchenbericht: Automobil (Forschungsbericht 522/1). Berlin. <https://www.bmas.de/DE/Service/Medien/Publikationen/Forschungsberichte/Forschungsberichte-Arbeitsmarkt/fb522-1-qualitaet-der-arbeit-branchenbericht-automobile.html>
- Puls, T. & Fritsch, M. (2020, 7. September).** Eine Branche unter Druck: Die Bedeutung der Autoindustrie für Deutschland (43/2020). Köln. [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/Report/PDF/2020/IW-Report\\_2020\\_Autoindustrie.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2020/IW-Report_2020_Autoindustrie.pdf)
- PwC (Hrsg.). (2018).** Five Trends Transforming the Automotive Industry. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/automotive/assets/pwc-five-trends-transforming-the-automotive-industry.pdf>
- Quasching, V., Orth, N., Weniger, J., Bergner, J., Siegel, B. & Zoll, M. (2021).** Solarstromausbau für den Klimaschutz: Wie viel Photovoltaik ist in Deutschland zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens erforderlich? Berlin. Hochschule für Technik und Wirtschaft. <https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/HTW-Studie-Solarstromausbau-fuer-den-Klimaschutz.pdf>
- Rat der Europäischen Union (Hrsg.). (2021).** Künftige Governance des Europäischen Forschungsraums (EFR): Schlussfolgerungen des Rates (angenommen am 26.11.2021) (14308/21). Brüssel. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14308-2021-INIT/de/pdf>
- RG-Bau (Hrsg.). (2018).** Digitalisierung und Beschäftigung in der Bauwirtschaft.
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (Hrsg.). (2021).** Umweltingenieurwissenschaften B.Sc. <https://www.rwth-aachen.de/go/id/bkkf>

- Roland Berger GmbH & UniCredit Bank AG (Hrsg.). (2016).** Bauwirtschaft im Wandel: Trends und Potenziale bis 2020. München.
- Rosenkranz, G., Schäfer, M. & Graichen, P. (2020).** Sofortprogramm Windenergie an Land: Was jetzt zu tun ist, um die Blockaden zu überwinden (Impuls). Berlin. [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020-01\\_DE-RE-Boost-2030/A-EW\\_198\\_OnshoreSofort\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020-01_DE-RE-Boost-2030/A-EW_198_OnshoreSofort_WEB.pdf)
- Rubel, H., Zum Meyer Felde, A., Oltmanns, J., Lanfer, C. & Bayer, L. (2020).** It's Time to Close Our Future Resource Loops. <https://web-assets.bcg.com/72/a9/be8d79d94fa3ae10c84b446fd063/de-circelligence-by-bcg.pdf>
- Rudnicka, J. (2022).** Verteilung der Bruttowertschöpfung in Deutschland nach Wirtschaftszweigen im Jahr 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252123/umfrage/anteil-der-wirtschaftszweige-an-der-bruttowertschoepfung-in-deutschland/>
- Schneider, M. (2016).** Zementindustrie im Überblick 2016/2017. Berlin. [https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie\\_ueberblick/VDZ\\_Zementindustrie\\_im\\_Ueberblick\\_2016\\_2017.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2016_2017.pdf)
- Schneider-Maul, R. (2020).** Green Lean Digital – das neue Mantra der Industrie. <https://www.capgemini.com/de-de/2020/01/green-lean-digital/>
- Schober, K.-S. (2021).** Wie die Kreislaufwirtschaft zu mehr Nachhaltigkeit und neuen Geschäftsmöglichkeiten im Baugewerbe führen kann. <https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Es-wird-Zeit-f%C3%BCr-die-Kreislaufwirtschaft-in-der-Baubranche.html>
- Simon, F. (2019).** Energie-Renovierungen als „Flaggschiff“ des europäischen Green Deals. <https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/energie-renovierungen-als-flaggschiff-des-europaeischen-green-deals/>
- Singer-Brodowski, M. & Grapentin-Rimek, T. (2018).** Executive Summary: Die Transformation der beruflichen Bildung für nachhaltige Entwicklung voranbringen. Wissenschaftliche Beratung Weltaktionsprogramm BNE. Berlin. Freie Universität Berlin. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35777.81765>
- Spangenberg, P., Draeger, I., Kapp, F., Kruse, L., Nraciss, S. & Hartmann, M. (2016).** Technische Ausbildungsberufe im Bereich Erneuerbare Energien: Analyse von Stellenanzeigen zur Identifizierung technischer Arbeitsfelder, Ausbildungsberufe und Qualifikationsanforderungen aus Unternehmenssicht für 2014/2015. Bonn. [https://www.wilabonn.de/images/PDFs/Serena/Analyse\\_Ausbildung\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.wilabonn.de/images/PDFs/Serena/Analyse_Ausbildung_Erneuerbare_Energien.pdf)
- SPD, B90/Die Grünen, FDP (Hrsg.). (2021).** Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit: Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Berlin. [https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag\\_2021-2025.pdf](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf)
- Stark, A. (2021).** Konsortium plant weltweit ersten elektrisch beheizten Steamcracker-Ofen: 90 % weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen. Process. <https://www.process.vogel.de/konsortium-plant-weltweit-ersten-elektrisch-beheizten-steamcracker-ofen-a-1010526/>
- Statista GmbH (Hrsg.). (2021a).** Construction in Germany 2021. <https://www.statista.com/study/46581/construction-in-germany/>
- Statista GmbH (Hrsg.). (2021b).** Production capacity of bioplastics worldwide from 2019 to 2025, by type. <https://www.statista.com/statistics/678684/global-production-capacity-of-bioplastics-by-type/>
- Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE. (2019).** Die beschäftigungspolitischen Implikationen des Automobilsektors für die chemische, die gummi- und kunststoffverarbeitende Industrie. Berlin, Hannover. [https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/20191009-StAuU\\_CGK-Sektoren-Fraunhofer\\_Web.pdf](https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/20191009-StAuU_CGK-Sektoren-Fraunhofer_Web.pdf)

- tagesschau.de (Hrsg.). (2021).** Elektromobilität: Wohin mit ausgepowernten E-Auto-Batterien? Ard. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/batterien-elektroautos-recycling-101.html>
- Thielmann et al. (2018).** Energiespeicher-Monitoring 2018: Leitmarkt- und Leitanbieterstudie: Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität. Karlsruhe. [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Monitoring\\_2018.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Monitoring_2018.pdf)
- Thielmann et al. (2020).** Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Karlsruhe. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2016).** Das anthropogene Lager. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2017, 8. Mai).** Urban Mining. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2021).** Indikator: Beschäftigte im Bereich Erneuerbare Energien. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-beschaeftigte-im-bereich-erneuerbare#die-wichtigsten-fakten>
- UNESCO. (2018).** Global framework of reference on digital literacy skills for indicator 4.4.2: Percentage of youth/adults who have achieved at least a minimum level of proficiency in digital literacy skill: Draft Report (Information Paper Nr. 51). Montreal. <http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/ip51-global-framework-reference-digital-literacy-skills-2018-en.pdf>
- United Nations Environment Programme (Hrsg.). (2020).** 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi. [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR\\_FULL%20REPORT.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf)
- United States Environmental Protection Agency. (2021, 16. Februar).** Basics of Green Chemistry. <https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry>
- Verband der Automobilindustrie e. V. (2020, 11. April).** Deutsche Automobilindustrie investiert rund 45 Milliarden Euro in Forschung und Entwicklung [Press release]. <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/200411-Deutsche-Automobilindustrie-investiert-rund-45-Milliarden-Euro-in-Forschung-und-Entwicklung.htm>
- Verband der Automobilindustrie e. V. (Hrsg.). (2021, 23. April).** Erstes globales E-Mobility-Ranking. <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/210423-Erstes-globales-E-Mobility-Ranking>
- Voigt, F. (2020).** Goldbeck – ein deutscher Baumeister im Silicon Valley. Redshift by Autodesk. [https://redshift.autodesk.de/goldbeck-im-silicon-valley/?utm\\_source=CSF&utm\\_medium=webpage&utm\\_campaign=Germany](https://redshift.autodesk.de/goldbeck-im-silicon-valley/?utm_source=CSF&utm_medium=webpage&utm_campaign=Germany)
- Volkswagen Group. (2019, 23. September).** Volkswagen Konzern startet Batteriezellentwicklung und -fertigung in Salzgitter [Press release]. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-konzern-startet-batteriezellentwicklung-und-fertigung-in-salzgitter-5381>
- Weckend, S., Wade, A. & Heath, G. (2016).** End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels. <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- Wiechert, W., Scheper, T. & Weuster-Botz, D. (2018).** Neue Schubkraft für die Biotechnologie: Miniaturisierung, Automatisierung und Digitalisierung revolutionieren die Entwicklung biotechnologischer Prozesse und Produkte. [https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Positionspapiere/PP\\_Schub\\_Biotechnologie\\_2018\\_A5.pdf](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/PP_Schub_Biotechnologie_2018_A5.pdf)
- Wille, J. (12. Januar 2022a).** Wir schaffen das! Interview mit dem Solarforscher Eicke Weber. Frankfurter Rundschau (FR), 78(9), S. 12. <https://www.fr.de/wirtschaft/die-bremser-haben-schlechte-karten-91229724.html>

- Wille, J. (14. Februar 2022b).** Recycling ist möglich. Frankfurter Rundschau (FR), 78(37), S. 8. <https://www.fr.de/wissen/recycling-ist-moeglich-91345755.html>
- Winterfeld, U. von. (2012).** Macht für Nachhaltigkeit: Spitzenfrauen – Veränderungspotenziale von Führungskfrauen in Umwelt und Technik. Broschüre 3. Wuppertal. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. [https://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/Spitzenfrauen3.pdf](https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Spitzenfrauen3.pdf)
- Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH & IG Metall Region Stuttgart (Hrsg.). (2019).** Whitepaper. Transformation Elektromobilität in der Region Stuttgart. Stuttgart. [https://fachkraefte.region-stuttgart.de/wp-content/uploads/2019/07/Zusammenfassung-der-Studie-Transformation-Elektromobilit%C3%A4t-in-der-Region-Stuttgart\\_Juni.pdf](https://fachkraefte.region-stuttgart.de/wp-content/uploads/2019/07/Zusammenfassung-der-Studie-Transformation-Elektromobilit%C3%A4t-in-der-Region-Stuttgart_Juni.pdf)
- Witsch, K. (25. November 2020).** Klimakiller Beton: So will die deutsche Zementindustrie CO<sub>2</sub>-neutral werden. Handelsblatt. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/klimaschutz-klimakiller-beton-so-will-die-deutsche-zementindustrie-co2-neutral-werden-/26652040.html?ticket=ST-1692541-eGFO0zHtH3kfhIA3oAoa-ap5>
- World Economic Forum (Hrsg.). (2019).** A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030. [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_Vision\\_for\\_a\\_Sustainable\\_Battery\\_Value\\_Chain\\_in\\_2030\\_Report.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf)
- World Economic Forum (Hrsg.). (2021).** Raising Ambitions: A new roadmap for the automotive circular economy. [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Raising\\_Ambitions\\_2020.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Raising_Ambitions_2020.pdf)
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (Hrsg.). (2020).** Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe (DiLink). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. <https://www.di-link.de/>
- Wurm, J., Pauli, M., Turber, F., Brechenmacher, E., Wechsler, M. & Glockner, H. (2021).** Bauen von morgen: Zukunftsthemen und Szenarien. Bonn. [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2021/bauen-von-morgen-dl.pdf;jsessionid=12B7D163412D451D8B2D98ADF3257B7F.live11293?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2021/bauen-von-morgen-dl.pdf;jsessionid=12B7D163412D451D8B2D98ADF3257B7F.live11293?__blob=publicationFile&v=2)
- WWF Deutschland (Hrsg.). (2019).** Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie: Hintergrund und Handlungsoptionen. <https://www.wwf.de/2019/april/zement-zerrt-am-klima>
- Zentralverband des Deutschen Handwerks (ZDH). (2021).** Klimaschutz nur mit mehr beruflich Ausgebildeten erreichbar: <https://www.zdh.de/presse/veroeffentlichungen/interviews-und-statements/klimaschutz-nur-mit-mehr-beruflich-ausgebildeten-erreichbar/>

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales kostenlos herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während des Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Europa-, Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in wel-

cher Anzahl diese Publikation dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Außerdem ist diese kostenlose Publikation – gleichgültig wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Publikation dem Empfänger zugegangen ist – nicht zum Weiterverkauf bestimmt.

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.