



Bundesministerium
für Arbeit und Soziales



Marc Bovenschulte, Sebastian Abel,
Simone Ehrenberg-Silies, Kerstin Goluchowicz

Auswirkungen des Klimawandels auf technologische Entwicklungen und deren Folgen für Arbeitssicherheit und Gesundheit



Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales.
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.



**Auswirkungen des Klimawandels auf technologische
Entwicklungen und deren Folgen für Arbeitssicherheit
und Gesundheit**

Strategische Vorausschau der
Denkfabrik Digitale Arbeitsgesellschaft des BMAS

Berlin, März 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Hintergrund	3
2.1	Auswirkungen der Erderwärmung auf Wirtschaft, Arbeit und Soziales	3
2.1.1	Zunahme der (Arbeits)Migration und Braindrain	4
2.1.2	Europäische Arbeits- und Beschäftigungspolitik.....	5
3	Auswirkungen des Klimawandels auf Arbeitssicherheit und Gesundheit	6
3.1	Schwerpunkte der Forschung	6
3.2	Direkte Folgen des Klimawandels für den Arbeits- und Gesundheitsschutz.....	7
3.3	Indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf Arbeits- und Gesundheitsschutz	9
3.4	Indirekte Auswirkungen des Klimawandels durch Klimaschutzmaßnahmen.....	10
4	Auswirkungen des Klimawandels auf technologische Entwicklungen und deren Folgen für Arbeitssicherheit und Gesundheit	13
4.1	Anwendungsfeld Erneuerbare Energien	16
4.1.1	Windenergie	16
4.1.2	Photovoltaik.....	20
4.1.3	Trends in der Windkraft und Photovoltaik	22
4.2	Anwendungsfeld Neue Antriebskonzepte	23
4.2.1	Elektromobilität.....	23
4.2.2	Wasserstoff und Wasserstofftechnologien.....	27
4.2.3	Trends in den Antriebstechnologien.....	32
4.3	Anwendungsfeld Recycling	33
4.3.1	Erneuerbare Energien	33
5	Zukünftige Entwicklungen und Handlungsansätze	37

Autor*innen

Marc Bovenschulte

Sebastian Abel

Simone Ehrenberg-Silies

Kerstin Goluchowicz

1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie ist eine prospektive Bestandsaufnahme von Auswirkungen des Klimawandels auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz. Diese Auswirkungen sind sowohl direkter als auch indirekter Natur. Zur ersten Kategorie gehört die Erderwärmung und somit die Erhöhung der Umgebungstemperatur selbst. Bereits heute existieren Regionen wie der „Sun Belt“, in denen die Temperatur an einer deutlich wachsenden Zahl von Tagen über der „Betriebstemperatur“ des Menschen liegt. Dies führt einerseits zu einem unmittelbaren Rückgang der Arbeitsproduktivität, zum anderen zu einer Zunahme von gesundheitlichen Schäden (Hitzestress, Kreislaufschädigungen etc.). Auch wenn Mitteleuropa nach den gängigen Prognosen von Extremtemperaturen vergleichsweise weitgehend verschont bleibt, geben die zurückliegenden „Jahrhundertsommer“ doch einen Eindruck von deren Auswirkungen. Eine mögliche Anpassung von Arbeitszeitregelungen wäre eine denkbare Konsequenz. Die Klima- und Wettereffekte umfassen auch Trockenheit und Extremwetterereignisse sowie die Zunahme der UV-Einstrahlung, die allesamt eine weitere Gefährdung für die Arbeitssicherheit und körperliche Unversehrtheit insbesondere für Arbeiten unter freiem Himmel darstellen. In der Folge der Erwärmung und deren Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität aber auch auf die Infrastrukturen (Stichwort Lieferketten) wird ein Rückgang der Wirtschaftsleistung in nicht unerheblichem Umfang erwartet; dieser Rückgang des BIP wird weltweit verflochtene Volkswirtschaften wie die deutsche besonders treffen.

Bei einem Anstieg der Temperaturen in verschiedenen Weltregionen können sich in ungünstigen Fällen die Perspektiven für ein gesichertes Leben verringern mit dem Ergebnis, dass es klimabedingt zu erheblichen Migrationsbewegungen aus den zunehmend unbewohnbar werdenden Gebieten kommen kann. Die Effekte sind nicht nur eine mögliche verstärkte Migration nach Europa, sondern auch der Verlust von qualifizierten Arbeitskräften in den Herkunftsländern. Ein solcher Braindrain kann sich dort unmittelbar negativ auf die Arbeitssicherheit auswirken und die genannten direkten Hitzeeffekte noch potenzieren.

Die indirekten Auswirkungen des Klimawandels beziehen sich im Kontext der vorliegenden Untersuchung auf technologische Entwicklungen, die darauf abzielen, die Erderwärmung gemäß den Klimazielen von Paris durch die Emissionsreduzierung von Treibhausgasen zu verringern. Exemplarisch wurde diese Betrachtung am Beispiel erneuerbarer Energien (Photovoltaik und Windenergie) und neuer Antriebskonzepte (Elektromobilität, Wasserstofftechnologien) durchgeführt, da diese unmittelbar durch politische Maßnahmen wie etwa die Festlegung von Grenzwerten oder Vergütungsmodelle in ihrer Entwicklung und Anwendung gefördert werden und durch Konzepte und Maßnahmenbündel wie den „Green Deal“ zusätzliche Impulse erhalten.

Bei der Analyse der Auswirkungen dieser Technologien auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz ergeben sich zwei Regime entlang der Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus. Das eine betrifft die Herstellung und Nutzung dieser Technologien, die überwiegend in Industrieländern geschieht und bei der im hohen Umfang moderne Produktionsprozesse – zunehmend auch Industrie 4.0-Technologien – zum Einsatz kommen. Die neuen Fertigungstechnologien führen oftmals zur Vermeidung gefährlicher Tätigkeiten und tragen auf diese Weise zur Ermöglichung „Guter Arbeit“ bei. Allerdings wird es darauf ankommen, die etablierten Mechanismen und Verfahren insbesondere der Gefährdungsbeurteilung an die technologischen Entwicklungen anzupassen (bzw. diese zu antizipieren), um auch neue Gefährdungen zu erkennen und zu entschärfen. Dabei können auch die Möglichkeiten digitaler Technologien für ein Echtzeit-Monitoring genutzt werden (Sensoren für die Fertigung können auch Sensoren für den Arbeits- und Gesundheitsschutz sein); der Erfolg derartiger Maßnahmen ist jedoch daran gebunden, dass die Verantwortlichen für den Umgang mit und die Nutzung von derartigen Daten geschult werden.

Abweichend dazu stellen sich die Regime am Anfang und am Ende der Wertschöpfungskette dar. Sowohl die Rohstoffgewinnung für als auch die stoffliche Verwertung/das Recycling von (grünen) Technologien findet oftmals in Entwicklungs- und Schwellenländern unter prekären und vielfach gesundheits- und lebensgefährdenden Bedingungen statt; anstelle der Nutzung gefährdungsvermeidender Technologien und Schutzmaßnahmen arbeiten oftmals Kinder in diesen Bereichen (Verstöße gegen die ILO-Kernarbeitsnormen). Aufgrund der Abwesenheit eines formalisierten Arbeits- und Gesundheitsschutzes ist es in diesen Regimen zunächst nötig, basale Normen und Regularien einzuführen, anzuwenden und durchzusetzen, was aufgrund der fragilen ökonomischen Situation vieler Beteiligten zu zusätzlichen Herausforderungen führen dürfte. Grundsätzlich ist mit Blick auf die globalen Liefer- und Wertschöpfungsketten dafür Sorge zu tragen, dass der technologische Fortschritt in den grünen und anderen Technologien nicht zu Lasten von Schwellen- und Entwicklungsländern geht. Da der Abbau von Rohstoffen und die stoffliche Verwertung der Altprodukte aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Technologien und der neuen Antriebskonzepte vor einem langfristigen Boom stehen, werden die Probleme in den Entwicklungs- und Schwellenländern voraussichtlich zunehmen. Dies gilt nicht nur für die Gefährdung von Arbeiter*innen und Menschen ganz allgemein, sondern auch für die Umwelt, sodass zunehmend integrierte Lösungen aus Arbeits-, Produkt- und Umweltsicherheit notwendig sind. Insbesondere durch die weiter zunehmende Digitalisierung und die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft bietet sich mit Blick auf internationale Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsregime die Möglichkeit, derartige Lösungen zu implementieren.

Wichtige Handlungsfelder sind der internationale Erfahrungsaustausch, das Monitoring der klimabedingten Gefährdungspotenziale, eine gemeinsame Forschungsagenda für Arbeits- und Gesundheitsschutz, die Formulierung und Verbreitung gemeinsamer Standards, die Etablierung von internationalen Regeln zur Achtung von Arbeits- und Sozialstandards in Lieferketten und der an Bedeutung gewinnenden Kreislaufwirtschaft, die Berücksichtigung der klimabedingten Herausforderungen für die Arbeitswelt in angrenzenden Politikfeldern und die Anpassung nationaler Regelungen und Verfahren an die neuen Herausforderungen.

2 Hintergrund

Der Klimawandel, der neben der exponentiellen Zunahme der Flächen- und Ressourceninanspruchnahme, der Verbreitung/Nutzung digitaler Technologien, dem Bevölkerungswachstum etc. Teil der „Great Acceleration“ des Anthropozäns ist,¹ stellt Regionen weltweit durch Folgeerscheinungen wie Extremwetterereignisse und steigende Meeresspiegel vor wachsende und in ihrer Konsequenz dramatische gesellschaftliche, wirtschaftliche, ökologische Herausforderungen und damit auch für Frieden und Sicherheit.² Vor allem ärmere Regionen sind besonders stark betroffen, sodass Anpassungsstrategien häufig gar nicht wirken können, sofern überhaupt Ressourcen für diese zur Verfügung stehen. Ohne eine umfassende und tiefgreifende Umgestaltung der Wirtschafts- und Lebensweisen vor allem in den Industrienationen des globalen Nordens als Hauptverursacher des Klimawandels lässt sich die Erderwärmung kaum auf die im Übereinkommen vom Paris im Jahr 2015 (United Nations Climate Change Conference, COP 21) vereinbarte Zielmarke von deutlich unter 2°C bis zum Jahr 2100 gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter begrenzen. Ein wichtiger Baustein zur Erreichung dieses Ziels stellt die Transformation der vorhandenen wirtschaftlichen Strukturen zu einer grünen, CO₂-armen und ressourceneffizienten Wirtschaft dar. Unternehmen und ganze Sektoren sehen sich in Folge dessen in den kommenden Jahrzehnten einem zunehmenden Anpassungsdruck ausgesetzt, der bestehende Geschäftsmodelle grundlegend in Frage stellt.

Eine solche grüne Transformation impliziert, dass sich Qualität und – in Teilen – Quantität von Arbeitskräftenachfrage verändern werden. So ist zu erwarten, dass neue Arbeitsplätze entstehen, manche werden demgegenüber gänzlich verschwinden. Ebenso werden sich Berufsbilder wandeln oder auch neu entstehen, da sich neue Tätigkeiten und Qualifikationserfordernisse ergeben und in Form von korrespondierenden Kompetenzen am Arbeitsmarkt nachgefragt werden. Die Auswirkungen werden sektoral, regional, branchen-, schichten- und genderspezifisch (ungleicher Zugang zu Bildung und Benachteiligung auf dem Arbeitsmarkt) sehr unterschiedlich sein.

2.1 Auswirkungen der Erderwärmung auf Wirtschaft, Arbeit und Soziales

Unabhängig davon, wie sich die grüne Transformation der Wirtschaft und der Arbeitsgesellschaft bis zum Jahr 2040 verändert haben wird, werden wir in 20 Jahren zudem unter anderen klimatischen Voraussetzungen arbeiten und produzieren als heute. Selbst wenn das Ziel einer Erderwärmung von deutlich unter 2°C noch erreicht werden sollte, werden wir auch in unseren Breiten zunehmend mit Extremwetterereignissen wie Überschwemmungen und Hitzewellen konfrontiert sein. Bereits heute hat sich beispielsweise die Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen infolge des Klimawandels im nördlichen Europa verdoppelt.³

Eine unmittelbare wirtschaftliche Auswirkung des Klimawandels ergibt sich aus der Korrelation von zunehmender Temperatur und abnehmender Produktivität menschlicher Arbeit. Im Laufe des Jahrhunderts und als Folge des vom Menschen verursachten Klimawandels werden viele der mehr als 4 Milliarden Menschen, die in heißen Gebieten leben, negative Auswirkungen auf Gesundheit und Sicherheit und eine verringerte Arbeitsfähigkeit haben. Für einige Weltregionen wird erwartet, dass 30 bis 40 % der jährlichen Tageslichtstunden bis zum Jahr 2100 zu warm für menschliche Arbeit werden. In einer kumulierten Betrachtung kann sich dadurch – die Datenlage hierzu ist jedoch brüchig – ein

¹ Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. (2015): The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, p. 1-18. DOI: 10.1177/2053019614564785

² Detges, A.; Klingefeld, D.; König, C.; Pohl, B.; Rüttinger, L.; Schewe, J.; Sedova, B.; Vivekananda, J. (2020): 10 Insights on Climate Impacts and Peace – A Summary of what We know. Adelphi Research, Berlin, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam

³ Schiermeier, Q. (2019). Climate Change made Europe's Mega-Heatwave five Times more likely. *Nature* 571, 155, News vom 02.07.2019; <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02071-z>

Rückgang des globalen BIP um 20 % und mehr ergeben.⁴ Auch wenn Deutschland und Mitteleuropa im Vergleich zu anderen Weltregionen insgesamt relativ gering von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein werden (dabei kann es jedoch regional/temporär zu starken Unterschieden kommen), werden aufgrund weltweiter wirtschaftlicher Verflechtung auch hierzulande auf ökonomische sicherheitsrelevante Effekte spürbar werden; gerade Deutschland ist aufgrund seiner Exportabhängigkeit und der tiefen Einbindung in globale Liefer- und Wertschöpfungsketten besonders betroffen.^{5/6}

2.1.1 Zunahme der (Arbeits)Migration und Braindrain

In manchen Weltregionen – insbesondere in den „Sunbelt“-Breitengraden in Afrika, Australien, Lateinamerika, Indien und Südostasien – werden die Folgen der Erderwärmung deutlich dramatischer sein als in Mitteleuropa. Eine aktuelle Studie prognostiziert in Abhängigkeit von der tatsächlicher Erderwärmung und Bevölkerungswachstum sogar, dass in Zukunft zwischen 1 und 3 Milliarden Menschen in Gebieten mit einer mittleren Jahrestemperatur von über 29 C leben müssten.⁷ Dies könnte deutliche Auswirkungen auf die Binnenmigration in manchen Regionen haben, aber auch die Migration in Richtung Europa intensivieren. Eine Studie der Weltbank aus dem Jahr 2018 schätzt, dass der Klimawandel bis 2050 etwa 140 Millionen Menschen in Afrika, Südasien sowie Mittel- und Südamerika zwingen wird, innerhalb ihrer eigenen Grenzen zu migrieren; durch geeignete Mittel könne dieses Szenario jedoch um 80 % reduziert werden.⁸

Im neuen Migrations- und Asylpaket der Europäischen Kommission wird der Klimawandel als Fluchtursache und auch die Unterstützung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel in den Herkunftsländern erwähnt (Bekämpfung von Fluchtursachen),⁹ darüber hinausgehende Überlegungen zu zukünftig zu erwartenden Fluchtbewegungen in Richtung Europa und ihrer Bedeutung für die Arbeits- und Sozialpolitik und die Auswirkung der Migrationsbewegungen auf die Herkunftsländer (z. B. „Braindrain“ durch Abwanderung von qualifizierten Personen) werden nicht diskutiert. Dabei ist bekannt, dass insbesondere gut Ausgebildete am ehesten über die ökonomischen und sozial-kognitiven Ressourcen verfügen, um ihr Heimatland zu verlassen. Fehlen diese Fachkräfte, geht ein Teil des (unter Umständen nicht formal kodifizierten) Fachwissens verloren und damit auch das Wissen um den Arbeits- und Gesundheitsschutz – etwa im medizinischen Bereich ggf. der Infektionsschutz. Andererseits profitieren die Herkunftsländer von Menschen, die in Länder mit prosperierender Wirtschaft und starken Institutionen auswandern, da sie wichtiges Wissen und Werte transportieren, wenn Sie (zeitweise/wiederholt) in ihre Heimat zurückkehren, aber auch, wenn Sie dauerhaft mit ihr in Verbindung stehen. Vor dem Hintergrund einer zirkulären Migration besteht so die Chance eines beständigen

⁴ Kjellstrom, T.; Briggs, D.; Freyberg, C.; Lemke, B.; Otto, M.; Hyatt, O. (2016): Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts. *Annu. Rev. Public Health* 2016/37, p. 97-112

⁵ Peter, M.; Guyer, M.; Füssler, J.; Bednar-Friedl, B.; Knittel, N.; Bachner, G.; Schwarze, R.; von Unger, M. (2020): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland – Analysen und Politikempfehlungen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamts, Dessau

⁶ Detges, A.; Klingensfeld, D.; König, C.; Pohl, B.; Rüttinger, L.; Schewe, J.; Sedova, B.; Vivekananda, J. (2020): 10 Insights on Climate Impacts and Peace: A Summary of What We Know. Published by Adelphi Research, Berlin, and Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam

⁷ Xu, C.; Kohler, T. A.; Lenton, T. M.; Svenning, J.-C.; Scheffer, M. (2020): Future of the human climate niche. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117(21), S. 11350–11355

⁸ Worldbank (ed) (2018): *Groundswell – Preparing for Internal Climate Migration*. Washington – online unter <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29461>

⁹ Europäische Kommission (2020): Mitteilung der Kommission: Ein neuer Migrations- und Asylpakt. Brüssel, 23.9.2020; COM(2020) 609 – online unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0609&from=EN>

Wissen-, Technologie- und Demokratietransfers,¹⁰ solange die Erderwärmung nicht so stark voranschreitet, dass die Heimatregion gänzlich unbewohnbar wird. Temporäre (etwa für Studium und Ausbildung) und zirkuläre (wiederkehrende bzw. „pendelnde“) Migration gelten für die Europäische Kommission als aktive Elemente der gemeinsamen europäischen Migrationspolitik. Damit soll einerseits die Attraktivität der EU für hochqualifizierte Arbeitskräfte aus dem Ausland erhöht und gleichzeitig vermieden werden, dass durch die politischen Maßnahmen Fachkräfte (dauerhaft) aus den Herkunftsländern abwandern¹¹ – ein herausfordernder Balance-Akt für die Steuerung von Migration.

2.1.2 Europäische Arbeits- und Beschäftigungspolitik

Bereits im Beschäftigungspaket von 2012 wurden Beschäftigungsaktionen für einen Übergang zu einer grünen Wirtschaft festgelegt, die überwiegend den Charakter von Koordinierung, Monitoring und gegenseitigem Lernen in Bezug auf die jeweiligen Policies in den Mitgliedstaaten der EU haben. Die Europäische Kommission beabsichtigt im Wesentlichen:

- die Förderung der Berücksichtigung grüner Arbeitsplätze in den nationalen Beschäftigungsplänen,
- die Stärkung grüner Qualifikationen,
- die Förderung einer effizienteren Nutzung der EU-Finanzinstrumente für intelligente grüne Investitionen,
- die Schaffung von Partnerschaften zwischen Akteuren des Arbeitsmarktes.¹²

Hinweise auf eine von der EU geplante Anpassung des Arbeitsschutzes und des Arbeitsrechts angesichts des Klimawandels sind nicht erkennbar. Auch in Vorbereitung auf die Europäische Arbeitsschutzstrategie 2021 – 2027 werden nach gegenwärtigem Stand keine spezifischen Herausforderungen, die sich aus dem Klimawandel ergeben, thematisiert.

Die europäische Arbeitszeitrichtlinie enthält zwar Sonderregelungen für einzelne Beschäftigtengruppen (mobile arbeitende Beschäftigte, Beschäftigte auf Offshore-Anlagen und Beschäftigte auf Fischereifahrzeugen), gibt aber keinerlei Hinweise auf eine mögliche Anpassung in Folge des Klimawandels und der Erderwärmung (längere Pausenzeiten etc.). Da eine der Verordnung zugrundeliegenden Grundannahmen lautet „Die Arbeitsbedingungen können die Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer beeinträchtigen. Die Gestaltung der Arbeit nach einem bestimmten Rhythmus muss dem allgemeinen Grundsatz Rechnung tragen, dass die Arbeitsgestaltung dem Menschen angepasst sein muss“,¹³ dürfte eine Anpassung an klimatische Einflüsse möglich sein, ohne den Charakter der Verordnung zu verändern.

¹⁰ Angenendt, S. (2014): Entwicklungspolitische Perspektiven temporärer und zirkulärer Migration. Stiftung für Wissenschaft und Politik, Berlin, S. 17 – online unter https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/studien/2014_S13_adt.pdf

¹¹ Rat der Europäischen Union (2008): Europäischer Pakt zu Einwanderung und Asyl. Ratsdokument 13440/08, Brüssel, S. 5 – online unter <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST%2013440%202008%20INIT/DE/pdf>

¹² Europäische Kommission (2012): Beschäftigungspaket von 2012: Einen arbeitsplatzintensiven Aufschwung gestalten. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM (2012) 173 final, S. 29-30 – online unter <https://ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=7619&langId=de>

¹³ Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (2003): Richtlinie 2003/88/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. November 2003 über bestimmte Aspekte der Arbeitszeitgestaltung. Amtsblatt der Europäischen Union vom 18.11.2003, Nr. L 299, S. 9-19 (hier: S. 9) – online unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0088&from=EN>

3 Auswirkungen des Klimawandels auf Arbeitssicherheit und Gesundheit

3.1 Schwerpunkte der Forschung

Um die Entwicklung von aktuellen und zukünftigen Schwerpunkten für den Arbeits- und Gesundheitsschutz zu ermitteln, wurde komplementär zu politischen und Umsetzungsmaßnahmen die Forschung zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Arbeitssicherheit/-schutz und Gesundheit analysiert. Zu diesem Zweck wurde zunächst eine offene Suchabfrage der Literaturdatenbank Scopus®¹⁴ für die Jahre 1990 bis 2020 durchgeführt mit dem Ziel einer Beschreibung der europäischen und weltweiten Forschungsschwerpunkte. Die genauen Suchparameter zur Eingrenzung können der Abbildungsbeschriftung in Abbildung 1 entnommen werden. Insgesamt wurden 277 Artikel, 41 Konferenzpaper, 12 Buchkapitel und 6 Bücher über die Suchabfrage identifiziert. Dabei steigt die Anzahl der Publikationen in diesem Themengebiet seit dem Jahr 2004 kontinuierlich an.

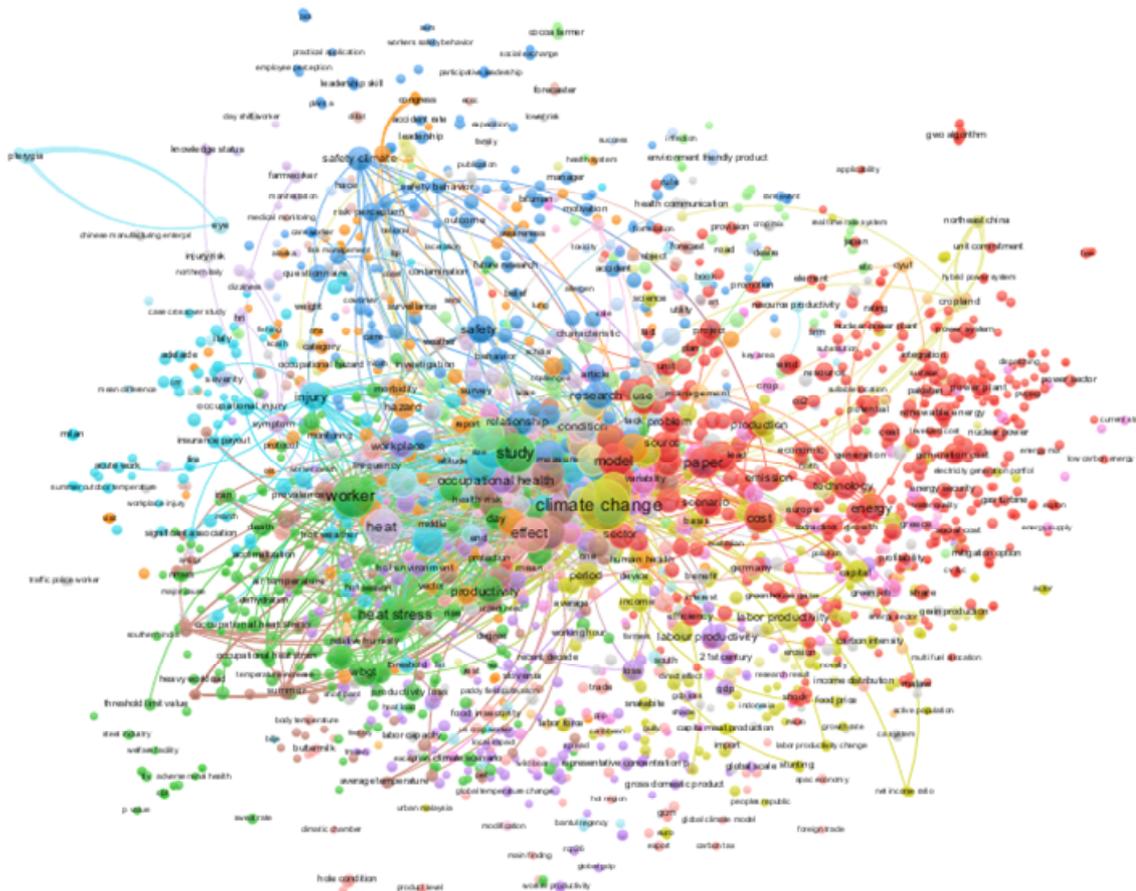


Abbildung 1: Auswertung der Scopus®-Literaturdatenbank nach den Stichworten „Climate Change OR Climate impact“ in Kombination mit „Occupational Health OR Occupational Safety OR Work Capacity OR Safe Work OR Generation Cost OR Labour Productivity“ (Quelle: iit 2020; Visualisierung: VOSviewer®).

¹⁴ 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>

Die inhaltliche Analyse dieser wissenschaftlichen Publikationen lässt einzelne größere thematische Cluster zu *Hitzestress und hitzebedingter Krankheiten*, *Auswirkungen von Unwetter- und Katastropheneignissen auf die Arbeitsproduktivität und Arbeitssicherheit*, *Auswirkungen des Klimawandels auf das ökonomische Wachstum*, *gesundheitliche Herausforderungen des Klimawandels in unterschiedlichen Weltregionen*, *Environmental Health Ethik* sowie *Technologien und genereller Arbeitssicherheit* erkennen. Eine weitergehende Differenzierung ist in der Gesamtheit der Suchbegriffe nicht möglich, weshalb diese für ausgewählte Technologie- bzw. Anwendungsfelder erfolgt (siehe dazu Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 9).

Da infolge der mit dem Anthropozän einhergehenden Entwicklung sowohl der Klima- als auch der technische Wandel auf absehbare Zeit noch an Dynamik gewinnen,¹⁵ werden auch die Herausforderungen für den Arbeits- und Gesundheitsschutz zunehmen. Um die diesen Entwicklungen innewohnenden Unsicherheiten zu reduzieren, liegt es nahe, die Anstrengungen in diesem Feld zu stärken und auch international zusammenzuführen und daraus strategische Ansätze abzuleiten. Nach Schulte *et al.* ist dabei die transdisziplinäre Stärkung der folgenden vier Bereiche notwendig:

- Forschung zu den Auswirkungen von verschiedenen Gefährdungen auf unterschiedliche Gruppen
- Monitoring und Früherkennung von Gefährdungen nach Art, Ort und Zeitpunkt
- Risikoabschätzung und Modellierung von Risiken
- Risikomanagement und Schaffung eines Gefährdungsbewusstseins inkl. Maßnahmen¹⁶

3.2 Direkte Folgen des Klimawandels für den Arbeits- und Gesundheitsschutz

Hitzestress ist gemäß dem ILO-Übereinkommen 155 über Arbeitsschutz und Arbeitsumwelt (1981)¹⁷ eine Gefahr für Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz und kann gemäß ISO 7243 sowohl für die Arbeit im Freien als auch in geschlossenen Umgebungen mittels WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) Referenz bestimmt werden.¹⁸ Die individuellen und kollektiven Folgen und Wirkungsketten von Hitzestress sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Neben dem Risiko eines (tödlichen) Hitzeschlags steigt durch Hitzestress das Risiko für Organversagen mit womöglich chronischen Folgen, sowie das Risiko für (Arbeits-) Unfälle durch mangelnde Konzentration. Hinzu kommen Gefährdungen wie etwa durch Feuchtigkeitsfilme aufgrund von Schwitzen (Rutschgefahr und Abrutschen an Werkzeugen etc.) oder beschlagene Gläser von Sicherheitsbrillen.

Lediglich für vereinzelte Fälle wie Zuckerrohrschneider in Mittelamerika und für in der Agrarproduktion Beschäftigte in den USA liegen erste Quantifizierungen für (tödliche) Hitzeschlagereignisse im Arbeitskontext vor, sodass eine systematischer Erfassung der hitzebedingten Todesfälle im Arbeitskontext – im Gegensatz zur Erfassung der hitzebedingten Übersterblichkeit in der Gesamtbevölkerung – nicht existiert.¹⁹

¹⁵ Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. (2015): The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, p. 1-18. DOI: 10.1177/2053019614564785

¹⁶ Schulte, P.A.; Bhattacharya, A.; Butler, C.R.; Chun, H.K.; Jacklitsch, B.; Jacobs, T.; Kiefer, M.; Lincoln, J.; Pendergrass, S.; Shire, J.; Watson, J.; Wagner, G.R. (2016): Advancing the framework for considering the effects of climate change on worker safety and health. *J. Occup. Environ. Hyg.*, Vol. 13(11), p. 847-65. doi: 10.1080/15459624.2016.1179388; p. 855

¹⁷ Siehe https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---normes/documents/normativeinstrument/wcms_c155_de.htm

¹⁸ Siehe <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:7243:ed-3:v1:en>

¹⁹ Kjellstrom, T.; Briggs, D.; Freyberg, C.; Lemke, B.; Otto, M.; Hyatt, O. (2016): Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts. *Annu. Rev. Public Health* 2016/37, p. 97-112

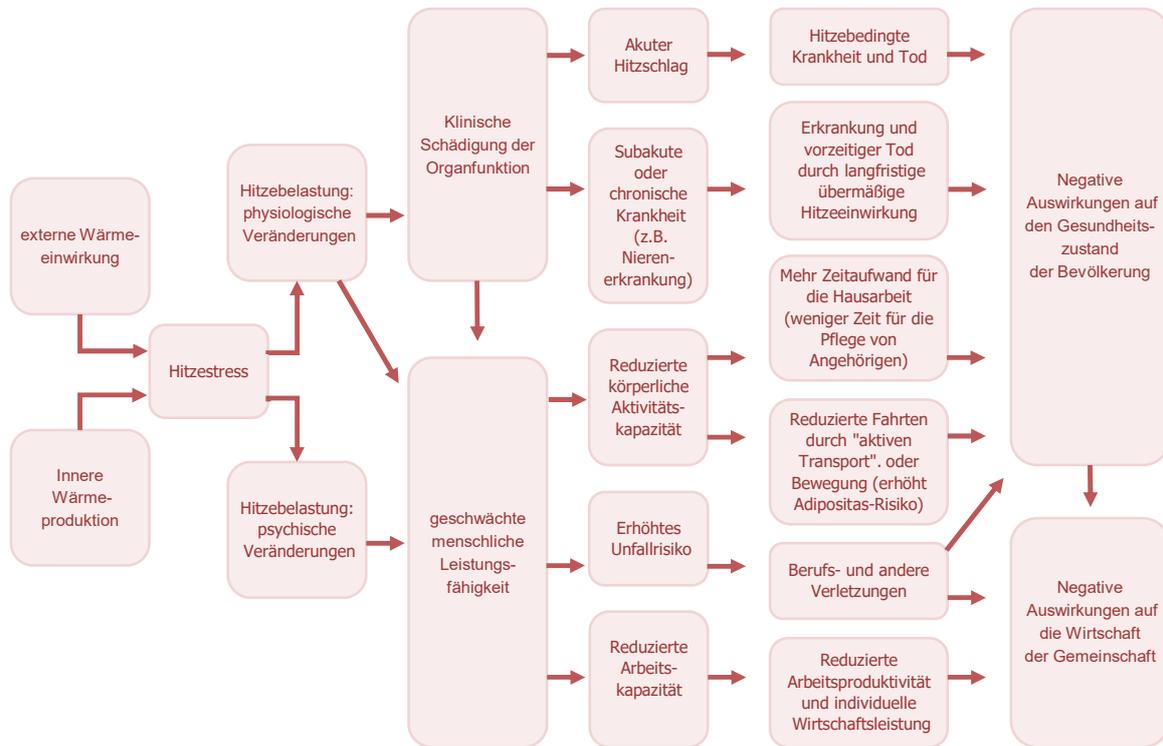


Abbildung 2: Schema für die Wirkungskette von Hitze stress auf die individuelle und kollektive Unversehrtheit und Leistungsfähigkeit (Quelle: Kjellstrom *et al.* 2016, Seite 99; eigene Übersetzung)

Da sich die Folgen des Klimawandels auf die Arbeit nicht auf die steigende Hitzeeinwirkung beschränken, ist es notwendig, zwischen direkten und indirekten Folgen zu unterscheiden. Direkte Folgen wirken sich unmittelbar auf die menschliche Physiologie und somit Gesundheit und Unversehrtheit aus. Dabei lassen sich die Folgen des Klimawandels auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz in sieben Gefährdungskategorien fassen: Dazu gehören neben 1) Hitze die 2) Zunahme der UV-Strahlung, 3) das Auftreten von Luftverschmutzung (z. B. Photo-Smog), 4), Wetterextreme wie Starkregen, Sturm und Gewitter aber auch Trockenheit und Dürre oder 5) das Auftreten von neuen Krankheiten durch neue Spezies (so die asiatische Tigermücke in Mitteleuropa und das von ihr übertragene Dengue-Fieber²⁰) und die damit einhergehende Änderung von Flora und Fauna. Zusätzlich ergeben sich noch indirekte Auswirkungen aufgrund 6) industrieller Entwicklungs- und Wandlungsprozesse sowie 7) Änderungen in der gebauten Umwelt.²¹

Die fünf erstgenannten direkten Faktoren beeinflussen insbesondere alle Arbeiten unter freiem Himmel, wie sie beispielsweise für die Landwirtschaft, das Baugewerbe, die Reinigung, Wartung und Instandsetzung von Infrastrukturen, Anlagen und Bauwerken, einen Großteil von Transport und Logistik, den Tourismus üblich sind.²² Abbildung 3 fasst die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Personen, natürliche Ressourcen und sozioökonomische Kontexte exemplarisch für Quebec/Kanada zusammen.

²⁰ BR Wissen (2020): Infektionen mit Dengue-Fieber nehmen zu. Hintergrund vom 13.07.2020 – online unter <https://www.br.de/wissen/tigermuecken-infektionen-mit-dengue-fieber-nehmen-zu-100.html>

²¹ Schulte, P.A.; Bhattacharya, A.; Butler, C.R.; Chun, H.K.; Jacklitsch, B.; Jacobs, T.; Kiefer, M.; Lincoln, J.; Pendergrass, S.; Shire, J.; Watson, J.; Wagner, G.R. (2016): Advancing the framework for considering the effects of climate change on worker safety and health. *J. Occup. Environ. Hyg.*, Vol. 13(11), p. 847-65. doi: 10.1080/15459624.2016.1179388; p. 855

²² Adam-Poupart, A.; Labrèche, F.; Smargiassi, A.; Duguay, P.; Busque, M.-A.; Gagné C.; Rintamäki, H.; Kjellstrom, T.; Zayed, J. (2013): Climate Change and Occupational Health and Safety in a Temperate Climate: Potential Impacts and Research Priorities in Quebec, Canada. *Industrial Health*, 51, p. 68–78. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0100>

Auswirkungen des Klimawandels auf technologische Entwicklungen und deren Folgen für Arbeitssicherheit und Gesundheit

Menschen					Natürliche Ressourcen			Sozio-ökonomischer Kontext	
Gefahren und Engpässe									
Vektorübertragene und zoonotische Krankheiten	Luftschadstoffe	Hitzewellen und erhöhte Temperaturen	Extreme Wetterereignisse	UV-Strahlung	Veränderungen der Produktion, Ernten, Arbeitsmethoden in der Landwirtschaft / Züchtung	Veränderungen bei den Ernten, Arbeitsmethoden in der Fischerei	Störung des Waldökosystems	Verschlechterung der Infrastrukturen der bebauten Umwelt	Zunahme aufstrebender "grüner" Industrien
Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten									
Gesundheit	Gesundheit	Gesundheit & Sicherheit	Gesundheit & Sicherheit	Gesundheit	Gesundheit	Gesundheit & Sicherheit	Gesundheit	Gesundheit & Sicherheit	Gesundheit & Sicherheit
Potenziell betroffene Industrien									
Bauwesen, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei, Tagebau, Transport, Öl und Gas, Windenergie, Umweltschutz	Transport, kommunale Dienstleistungen, Bauwesen, Landschaftsbau, Außenarbeiter, Bergbau	Bauwesen, Forstwirtschaft, Fischerei, Landwirtschaft, Jagd, Bergbau, Transport, kommunale Dienste, Tourismus, Gießereien, Gesundheitswesen, Windkraft	Umweltschutz, kommunale Dienstleistungen, Bauwesen, Fischerei, Transport, Tourismus, Bergbau, Forstwirtschaft	Landwirtschaft, Landschaftsbau, Baugewerbe, Fischerei, Forstwirtschaft, Außenarbeiter	Landwirtschaft, Zucht	Fischerei, Verarbeitung von Fischereierzeugnissen	Feuerwehr, Forstwirtschaft, kommunale Dienste, Transport, Landwirtschaft	Bauwesen, Transport, kommunale Dienstleistungen, Forstwirtschaft, Tourismus, Umweltschutz	Industrielle Landwirtschaft, Energie, Bauwesen, Innendienst, Recycling, Forstwirtschaft, Tourismus, Fischerei, Bergbau

Abbildung 3: Systematisierung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels in gemäßigten Breiten nach Risiken, Dimensionen der Arbeitssicherheit und Gesundheit sowie den potenziell betroffenen Industrien/Wirtschaftsbereichen (Quelle: Vereinfacht nach Adam-Poupart *et al.*, 2013, Seite 72, eigene Übersetzung).

Unmittelbare Gefährdungen ergeben sich beispielsweise aus Blitzschlag, Sturmböen, Überschwemmungen bis hin zur Vernichtung der wirtschaftlichen Existenzgrundlage (Zerstörung von Ackerland, Aquakulturen etc.); insbesondere in weniger entwickelten Weltregionen kann dies durch die resultierenden Armutsrisiken u. a. zu einem Anstieg illegaler und krimineller Tätigkeiten und der Kinderarbeit unter Verletzung der ILO-Kernarbeitsnormen²³ aber auch Migrationsbewegungen (s. o.) führen. Die einzelnen Weltregionen sind dabei nicht nur gemäß der bestehenden und sich verändernden Klimazonen (in Kombination mit der lokal/regional korrespondierenden Ausprägung der Biosphäre) unterschiedlich betroffen, sondern auch in Abhängigkeit vom wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wohlstand.

Entwickelte Industriestaaten haben im Regelfall weitergehende Möglichkeiten, die Auswirkungen des Klimawandels durch entsprechende Maßnahmen abzufedern – dies umfasst gleichermaßen die Zugänglichkeit und Leistungsfähigkeit des Gesundheitssystems, die Belastbarkeit und Verlässlichkeit von Infrastrukturen, den Anteil von Beschäftigten unter freiem Himmel im Vergleich zu Beschäftigten in Innenräumen bis hin zur Verfügbarkeit von individuellen Schutzmaßnahmen. Dabei liegt der Fokus der Gefährdungsabwehr im Arbeitskontext stets auf einer Priorisierung nach dem TOP-Prinzip: An erster Stelle stehen Technische Maßnahmen zur Wahrung der Unversehrtheit, an zweiter Stelle Organisationale und erst an letzter Stelle Persönliche Maßnahmen.

3.3 Indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf Arbeits- und Gesundheitsschutz

Neben den direkten Folgen des Klimawandels ergeben sich auf unterschiedlichen Ebenen indirekte Folgen. Diese resultieren zum einen aus der Veränderung der Lebens- und Arbeitsumwelt und umfassen zum Beispiel Anpassungsmaßnahmen in der Agrarproduktion, in deren Folge neue Feldfrüchte – auch GVO, also gentechnisch veränderte Organismen – und korrespondierende Pestizide

²³ International Labour Organisation (Hg) (1998): Erklärung der ILO über grundlegende Prinzipien und Rechte bei der Arbeit und ihre Folgemaßnahmen. 86. Tagung der internationalen Arbeitskonferenz vom 18.06.1998, Genf, S. 4-5 (deutsche Fassung) – online unter https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---ilo-berlin/documents/normativeinstrument/wcms_193727.pdf

(vgl. die Glyphosat-Klagen gegen Bayer/Monsanto in den USA²⁴) zum Einsatz kommen; zumindest einige dieser Änderungen – so auch das Auftreten von neuen Zoonosen, wie am Beispiel von Sars-Cov2 und aktuell an dessen Mutation in dänischen Nerzfarmen²⁵ erkennbar ist – sind eine Gefahr für die Beschäftigten bzw. für die allgemeine Bevölkerung.

Ebenso sind hierunter Gefährdungseffekte zu finden, die aus der Bekämpfung (Feuerwehren bei der Waldbrandbekämpfung) und Beseitigung von Extremwetterereignissen und Wetterkatastrophen resultieren. So steigt bei Aufräumarbeiten nach Sturzfluten, Stürmen und Überschwemmungen die Wahrscheinlichkeit, mit chemischen (Säuren, Laugen, Lösungsmittel etc.), biologischen (Bakterien, Viren) oder mechanischen (Splitter, lungengängige Fasern und Stäube etc.) Gefahrstoffen in Kontakt zu kommen. Ebenfalls können anthropogene oder natürliche (Faul-) Gase auftreten.²⁶

3.4 Indirekte Auswirkungen des Klimawandels durch Klimaschutzmaßnahmen

Neben den genannten Folgen der Erderwärmung ergeben sich Auswirkungen auf Arbeitssicherheit und Gesundheit aufgrund von technischen, wirtschaftlichen und ggf. sozialen Innovationen, die mit dem Ziel der Einhaltung der Klimaziele in Verbindung stehen. Abbildung 4 fasst diese Effekte – gemeinsam mit den zuvor beschriebenen direkten Folgen des Klimawandels – exemplarisch zusammen.

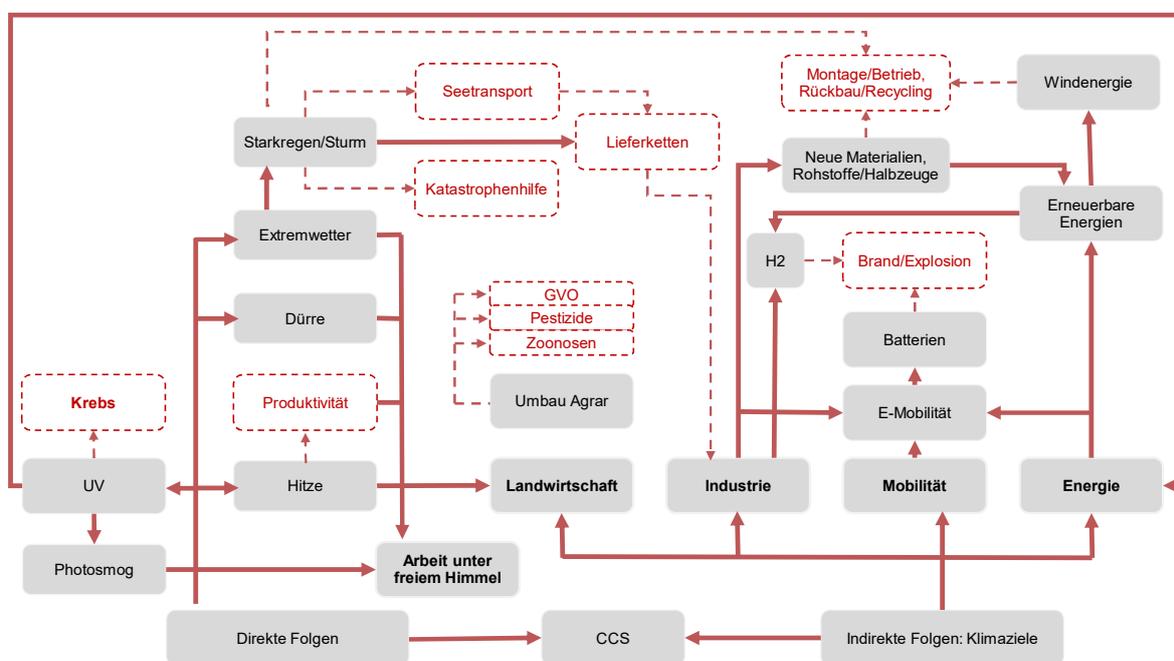


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung direkter und indirekter Auswirkungen des Klimawandels auf unterschiedliche Sektoren. CCS = Carbon Capture and Storage / CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Quelle: iit 2020).

²⁴ Fröndhoff, B.; Kort, K. (2020): Bayer vor Glyphosat-Einigung – So sieht der teure Plan aus. Handelsblatt vom 30.01.2020 – online unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/klagen-in-usa-bayer-vor-glyphosat-einigung-so-sieht-der-teure-plan-aus/25482884.html?ticket=ST-7743607-qZkNYQKFmru9bmPRHrBE-ap5>

²⁵ Agenturmeldung (2020): Mutiertes Coronavirus infizierte mehr als 200 Menschen. Der Spiegel online vom 06.11.2020 – online unter <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/corona-mehr-als-200-menschen-mit-von-nerzen-stammender-virusmutation-infiziert-a-18146614-c019-434f-a5f1-e5aa08e483c0>

²⁶ Schulte, P.A.; Chun, H.K. (2009): Climate Change and Occupational Safety and Health: Establishing a Preliminary Framework. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 6, p. 542–554. DOI: 10.1080/15459620903066008

Die Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz – EU-OSHA²⁷ hat die Thematik neuer Herausforderungen einer Wirtschaft 4.0 bzw. einer grünen Transition im Rahmen von Foresight-Aktivitäten aufgegriffen. Eine im Jahr 2013 erstellte Szenario-Analyse verbleibt für die betrachteten Technologien wie 3D-Druck, Windenergie, Nanotechnologie mit Blick auf Arbeitssicherheit/-schutz und die Gesundheit notwendigerweise vage. In der Schlussfolgerung heißt es zusammenfassend: „Auch wenn festgehalten werden kann, dass viele der in den Szenarien beschriebenen Risiken nicht neu sind, stellen sich doch im Bereich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der Arbeit neue Herausforderungen, da die Risiken in neuen Rahmen und unter anderen Bedingungen oder bekannte Risiken in neuen Kombinationen auftreten und verschiedene Arbeitnehmergruppen eventuell nicht angemessen im Bereich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der Arbeit ausgebildet sind. Daher sind Maßnahmen erforderlich, die das Bewusstsein schärfen und Arbeitgeber und Arbeitnehmer an grünen Arbeitsplätzen für die neu auftretenden Herausforderungen qualifizieren. Unabhängig davon, ob es um bekannte oder neue Risiken geht, bleibt die Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz ein wesentlicher Bestandteil der Erarbeitung geeigneter Präventionsmaßnahmen, die die Besonderheiten von grünen Arbeitsplätzen und der betroffenen Arbeitnehmer berücksichtigen.“²⁸

Dabei kann die mit der Industrie 4.0 einhergehende Datenbasierung von Produktions- und Nutzungsprozessen auch für die Gefährdungsbeurteilung und somit für die Gewährleistung von Arbeitssicherheit und Gesundheit eine große Chance bieten, indem die ursächlich für den Fertigungsprozess ermittelten Daten auch für die Gefahrenabwehr genutzt werden. Hinweise auf Fehlfunktionen und unvorhergesehene Ereignisse, die sich negativ auf den Produktionsprozess auswirken, sind stets auch potenzielle Gefahrenquellen. Je nach Sektor stehen dabei unterschiedliche Gefahrenquellen (siehe die TRBS im nachfolgenden Absatz) im Mittelpunkt. Unter Umständen müssen die Produktionsdaten der Industrie 4.0 durch ein Biomonitoring ergänzt werden, um weitere Gefährdungen rechtzeitig zu erfassen. Die Daten können sowohl kumulativ zur Identifizierung und Entschärfung von (potenziellen) Gefahrenquellen oder in Echtzeit zum Hinweis auf akute Gefährdungen (z. B. Überschreiten von gewissen Schwellenwerten) genutzt werden. Auch hier ist anzustreben, prädiktive Systeme zu entwickeln, die bereits mit einem gewissen Vorlauf auf mögliche Probleme (= Gefährdungen) hinweisen.²⁹ Wie bei allen Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung muss für eine sinnvolle Nutzung von Daten, die in der Industrie 4.0 anfallen/genutzt werden, dafür gesorgt werden, dass die für die Arbeitssicherheit und Gesundheit Verantwortlichen für die Analyse und Interpretation entsprechend qualifiziert sind und Zugang zu den benötigten Daten und Instrumenten haben („Digital skills development for OSH“).

²⁷ Siehe die Webseite der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz unter <https://osha.europa.eu/de>

²⁸ Bradbrook, S.; Duckworth, M.; Ellwood, P.; Miedzinski, M.; Reynolds, J.; Ravetz, J. (2013): Grüne Arbeitsplätze und Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit: Vorausschau auf neu auftretende Risiken im Zusammenhang mit neuen Technologien bis 2020. Studie im Auftrag der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz, Bilbao, S. 36 – online unter <https://osha.europa.eu/de/publications/reports/summary-green-jobs-and-occupational-safety-and-health-foresight-on-new-and-emerging-risks-associated-with-new-technologies-by-2020?src=asp-cu&typ=pdf&cid=2852>

²⁹ Eastern Kentucky University (2019): Using Predictive Analytics to Predict and Prevent Workplace Injuries. Webseite der Eastern Kentucky University – online unter <https://safetymanagement.eku.edu/blog/using-predictive-analytics-to-predict-and-prevent-workplace-injuries/>

Die Gefahrenabwehr bzw. die vorausgehende Gefährdungsbeurteilung sind in Deutschland durch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) in den Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)³⁰ und den Regeln für die Gefährdungsbeurteilung³¹ in Umsetzung und Konkretisierung des Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) und daraus abgeleiteter Verordnungen verfasst. Die Gefährdungen sind dabei wie folgt kategorisiert: Mechanische Gefährdungen; Elektrische Gefährdungen; Gefahrstoffe; Biologische Arbeitsstoffe; Brand- und Explosionsgefährdungen; Thermische Gefährdungen; Gefährdungen durch spezielle physikalische Einwirkungen; Gefährdungen durch Arbeitsumgebungen; Physische Belastung/Arbeitsschwere; Psychische Faktoren und darüber hinaus Sonstige Gefährdungen. Zudem existiert eine Aktualisierungsliste, in der neue Gefährdungsfaktoren berücksichtigt werden.

Die seit dem Jahr 2018 vorliegende Norm ISO 45001 beschreibt die Anforderungen an betriebliche Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagementsysteme und beinhaltet eine Anleitung für deren Umsetzung; sie ersetzt den vorausgegangen Standard BS OHSAS 18001 aus dem Jahr 2007.

³⁰ Siehe hierzu die Webseite der BauA unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/TRBS.html>. Die TRBS sind die nationale Umsetzung der Richtlinie 2009/104/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Benutzung von Arbeitsmitteln durch Arbeitnehmer bei der Arbeit (zweite Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) – siehe <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0104&from=EN>

³¹ Siehe hierzu die Webseite der BauA unter https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrungsbeurteilung/functions/BereichsPublikationssuche_Formular.html?nn=8703478

4 Auswirkungen des Klimawandels auf technologische Entwicklungen und deren Folgen für Arbeitssicherheit und Gesundheit

Vor dem Hintergrund der vorgenommenen Systematisierung wird in der weiteren Bearbeitung der Fokus auf solche Wirkungsketten gelegt, die Ihren Ursprung in (politischen) Maßnahmen zur Begrenzung der Erderwärmung haben und sich über den dadurch induzierten technologischen Fortschritt auch auf Arbeitssicherheit/-schutz und Gesundheit auswirken. Auf diese Weise wird der Blick unmittelbar auf die Kausalität *Klimawandel* → (*neue*) *Technologien* → *Arbeitsbedingungen* gelegt, um zu vermeiden, dass jede Form der Digitalisierung, Automatisierung etc. als ursächlicher Beitrag zum Klimaschutz gewertet wird (auch wenn bei vielen dieser Entwicklungen positive Sekundäreffekte denkbar sind bzw. als Anwendungsfelder dezidiert zu Umwelt- und Klimaschutz beitragen; etwa „KI für Ressourceneffizienz“). Orientierung zur Auswahl bieten hierbei etwa zurückliegende Gesetze und Vorgaben wie die Entwicklung der europäischen Abgasnormen (Euro 1-7), Gesetze und/oder Anreizsysteme zum Ausbau erneuerbarer Energien (das deutsche Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien – EEG³²), oder aber politische Schwerpunktsetzungen im Rahmen des europäischen „Green Deals“,^{33,34} sowie spezifischer und Sondermaßnahmen wie das in Folge der Covid-19-Pandemie beschlossene Konjunkturpaket der Bundesregierung „Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken“.³⁵

Mit den Maßnahmen sollen bereits eingeschlagene Wege weiter ausgebaut und die Potenziale sich abzeichnender Entwicklungen frühzeitig genutzt werden. Ein schon länger bestehender Trend ist demgemäß die Energiewende und der seitdem beschleunigte Ausbau erneuerbarer Energien wie Biogas, Photovoltaik und insbesondere Windkraft. Unmittelbar in Verbindung mit der Energiewandlung/Stromerzeugung steht die Frage der zukünftigen Mobilität, die neben der Priorisierung einzelner Verkehrsmittel, deren Restrukturierung im Gesamtverbund (intermodaler Verkehr) auch neue Antriebskonzepte wie die Elektromobilität umfasst. In dieser wiederum kommt es zum Einsatz neuer Materialien (Leichtbau und Verbundwerkstoffe für die Karosserie, Lithium in den Batterien) oder auch Treibstoffe wie Wasserstoff, von denen neue Gefahren ausgehen können.

Umgekehrt können durch neuartige Technologien aber auch Gefährdungspotenziale verringert oder an einigen Stellen sogar ganz beseitigt werden. Ein solches Leitbild der Gefährdungsreduzierung für Umwelt und Menschen verfolgt beispielsweise die „Green Chemistry“³⁶ mit ihren 12 grundlegenden Prinzipien;³⁷ eine dergestalt „sanfte“ Chemie bedeutet ohne Frage auch die Reduzierung/Minimierung von Gesundheitsgefahren für die Beschäftigten, da Gefahrstoffe (zum Beispiel explosive, giftige, kanzerogene oder fruchtschädigende Substanzen) gemäß den technischen Regeln für Gefahrstoffe

³² Siehe hierzu https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/

³³ Siehe hierzu https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

³⁴ Europäische Kommission (2019): Anhang der Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der Europäische Grüne Deal. COM (2019) 640 final. Brüssel.

³⁵ Bundesregierung (2020): Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken. Ergebnis des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020. Berlin – online unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunkt Papier.pdf?__blob=publicationFile&v=9

³⁶ Anastas, P.T.; Warner, J.C. (1998): Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press.

³⁷ Siehe hierzu die Webseite der American Chemical Society: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>

(TRGS)³⁸ vermieden/ersetzt werden können. Dabei sollen beispielsweise „klassische“ chemische Prozesse, die bei hohen Drücken und Temperaturen unter Einsatz toxischer Katalysatoren ablaufen, im Idealfall ersetzt werden durch (bio-) chemische Verfahren, die bei Raumtemperatur und normalem Atmosphärendruck ohne gefährliche Bei- und Abfallstoffe die gewünschten Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe erzeugen, sodass alle ohne Umweltbelastung abbaubar/wiederverwertbar sind.

Im Oktober 2020 hat die Europäische Kommission ihre „Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit – Für eine schadstofffreie Umwelt“ veröffentlicht.³⁹ Diese stellt ein wichtiges Element zur Erreichung des „Null-Schadstoff-Ziels“ der Kommission dar und fasst die langfristige Vision einer Chemikalienpolitik in Europa zusammen, um den Schutz von Mensch und Umwelt vor gefährlichen Chemikalien weiter zu erhöhen. 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 („bio-based economy“). Eine solche kann einen signifikanten Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und somit zur Erderwärmung leisten.⁴⁰ Hierbei ist auch die Verwertung von pflanzlichen Reststoffen oder Abfällen (anstelle von extra produzierten Energiepflanzen) in Biogasanlagen zu berücksichtigen. Die stellen für Beschäftigte ein mehrfaches Risiko durch die Faulgase selbst (Erstickungsgefahr), die durch das Gas bestehende Explosionsgefahr und durch aus dem Faul- und Gärungsprozessen stammende Bakterien (pathogene Keime) auch in der Atemluft dar.

Mit Blick auf die zukünftige Entwicklung einer umfassenden Bioproduktion spielt für den Arbeits- und Gesundheitsschutz der Einsatz neuer molekularbiologischer 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 bzw. deren Systemen und Agenzien in Berührung kommt, ansteigen wird. Parallel zur Prüfung der biologischen Sicherheit muss daher überprüft und bewertet werden, welche Gefährdungen im Sinne des Arbeits- und Gesundheitsschutzes von den neuen Verfahren in den Produktionsprozessen ausgehen und welche Schutzmaßnahmen notwendig sind. Dabei ist insbesondere von Bedeutung, dass es sich bei den biologischen Systemen oftmals um prinzipiell selbstreplizierende Systeme (Organismen) handelt, sodass auch geringe Ausgangsexpositionen manifeste Langzeitfolgen haben können.⁴¹

³⁸ Siehe hierzu die Webseite der BauA unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS.html>

³⁹ European Commission (2020): 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. COM(2020) 667 final; Brussels – online unter <https://ec.europa.eu/environment/pdf/chemicals/2020/10/Strategy.pdf>

⁴⁰ Carus, M. (2017): Bio-based economy and climate change – Important links, pitfalls and opportunities. Nova-Institute on behalf of the UN Food and Agriculture Organization (FAO).

⁴¹ Howard, J.; Murashov, V.; Schulte, P.A. (2017): Synthetic biology and occupational risk. J. Occup. Environ. Hyg., Vol. 14 (3), p. 224-236; doi: 10.1080/15459624.2016.1237031

Der mit dem Ausbau einer biobasierten Ökonomie prinzipiell einhergehenden Stärkung der Kreislaufwirtschaft⁴² kommt auch im „Green Deal“ der Europäischen Kommission eine bedeutende Rolle zu; vorgesehen sind dazu laut Aktionsplan die folgenden Schwerpunkte:

- Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, einschließlich einer Initiative für nachhaltige Produkte, mit besonderem Schwerpunkt auf ressourcenintensiven Sektoren wie dem Textil-, Bau-, Elektronik- und Kunststoffsektor (März 2020),
- Initiativen zur Förderung von Leitmärkten für klimaneutrale und kreislaufforientierte Produkte in energieintensiven Industriezweigen (ab 2020),
- Vorschlag zur Förderung der CO₂-freien Stahlerzeugung bis 2030 (2020),
- Rechtsvorschriften für Batterien zur Unterstützung des Strategischen Aktionsplans für Batterien und der Kreislaufwirtschaft (Oktober 2020),
- Vorschläge für Rechtsreformen im Bereich Abfallwirtschaft (ab 2020).⁴³

Komplementär zu dem Aktionsplan betont auch ein unter dem Eindruck der Covid-19-Pandemie entstandener Bericht der Europäischen Kommission zur strategischen Vorausschau die Bedeutung von Technologien und Fertigungsverfahren/-modellen, die nicht nur geringe Auswirkungen auf die Erderwärmung haben (Dekarbonisierung der Produktion), sondern sich generell durch geringe Gefährdungspotenziale für den Menschen (Beschäftigte als mitunter besonders exponierte Teilmenge) und die Umwelt/belebte Natur auszeichnen. Der Gesamtanspruch an ein resilientes und „grünes“ Europa wird dabei wie folgt formuliert: „[Übersetzung durch die Autor*innen] Dazu gehört, dass wir unsere Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen beenden, unseren Einfluss auf die natürlichen Ressourcen reduzieren, die Artenvielfalt erhalten, eine saubere und kreislaufforientierte Wirtschaft entwickeln, eine giffreie Umwelt erreichen, Lebensstile, Produktions- und Konsummuster ändern, die Infrastruktur klimafest machen, neue Möglichkeiten für ein gesundes Leben, grüne Unternehmen und Arbeitsplätze schaffen, aktiv die Wiederherstellung von Ökosystemen verfolgen sowie unsere Meere und Ozeane retten.“⁴⁴

Für die weitere Auseinandersetzung mit den potenziellen Auswirkungen einer klimapolitisch induzierten bzw. beschleunigten Entwicklung und Nutzung neuer Technologien auf Arbeitsschutz/-sicherheit und Gesundheit werden im folgenden drei Anwendungsfelder vertieft. Durch eine vereinfachte Betrachtung der Wertschöpfungsstufen im Produktions- und Nutzungszyklus werden Aspekte der Rohstoffgewinnung, der Herstellung, der Nutzung und des Rückbaus bzw. der stofflichen Verwertung thematisiert. Der Lebenszyklus von technischen Anwendungen umfasst im Wesentlichen die folgenden Phasen: Entwurf und Planung, Herstellung (inkl. Beschaffung/Nutzung von Rohstoffen, Halbzeugen, Teilen), Transport und/oder Installation, Inbetriebnahme (und Integration in die Infrastruktur), Betrieb und Wartung, ggf. Retrofit, Demontage und schließlich Entsorgung/Wiederverwertung. An diesen Phasen sind verschiedene Arbeitnehmer*innengruppen in verschiedenen Arten von Arbeitsplätzen und Sektoren beteiligt, so etwa Industrie-/Maschinenmechaniker*innen, Elektroingenieur*innen, Schweißer*innen, Metallarbeiter*innen, Elektriker*innen, Installateur*innen von Solarenergiesystemen, Bauarbeiter*innen, Beschäftigte in Recycling und Abfallwirtschaft.

⁴² Carus, M. (2017): Bio-based economy and climate change – Important links, pitfalls and opportunities. Nova-Institute on behalf of the UN Food and Agriculture Organization (FAO).

⁴³ Europäische Kommission (2019): Anhang der Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der Europäische Grüne Deal. COM (2019) 640 final. Brüssel.

⁴⁴ European Commission (2020): 2020 Strategic Foresight Report: Charting the course to a more resilient Europe. Brussels, S. 22 – online unter https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/strategic_foresight_report_2020_1.pdf

4.1 Anwendungsfeld Erneuerbare Energien

Bei den Erneuerbaren Energien haben die Photovoltaik und die Windkraft mit Blick auf die Erzeugung von elektrischem Strom die mit Abstand größte Bedeutung. Die global installierte Leistung von Windenergie stieg von 24 Gigawatt im Jahr 2001 auf 650 Gigawatt im Jahr 2019 an.⁴⁵ Zum Vergleich: Die weltweit rund 443 Atomreaktoren kamen im Jahr 2019 auf eine kumulierte Gesamtleistung von 392 Gigawatt.⁴⁶ Auch die Leistung der weltweit installierten Photovoltaik ist seit dem Jahr 2009 von 23 Gigawatt auf 627 Gigawatt im Jahr 2019 angestiegen.⁴⁷ Bei der nachfolgenden Betrachtung gilt es zu beachten, dass zur Erreichung der Pariser Klimaziele ein fortgesetzter umfassender Ausbau der globalen Erneuerbare Energien-Kapazitäten notwendig ist. Die Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) geht beispielsweise davon aus, dass ein jährlicher Zubau von ca. 520 GW bis zum Jahr 2050 benötigt wird.⁴⁸ Laut IPCC müsste der Anteil an der Primärenergieversorgung nur für Wind- und Solarenergie von aktuell ca. 1,9 % um den Faktor 16 auf etwa 26 % gesteigert werden, um die Möglichkeit einer Temperatursteigerung von deutlich unter 2 °C zu erhalten.⁴⁹

4.1.1 Windenergie

Insbesondere für die Windenergie wird erwartet, dass der eingeschlagene Wachstumspfad auch angesichts der ambitionierteren Klimaziele der Europäischen Kommission fortgesetzt wird. So soll die in europäischen Küstengewässern installierte Offshore-Windenergieleistung von derzeit 12 Gigawatt auf 60 Gigawatt im Jahr 2030 und auf 300 Gigawatt im Jahr 2050 jeweils verfünffacht werden. Auch im Sinne eines grünen und gerechten Übergangs betont der Vizepräsident der EU-Kommission Frans Timmermans, dass darin eine große Chance „für saubere Energie, hochwertige Arbeitsplätze und nachhaltiges Wachstum“ liege.⁵⁰

Für den Ausbau von Windkraftwerken werden große Mengen an Rohstoffen benötigt, deren Mengen pro Megawatt installierter Leistung bis zu 90 Mal höher liegen als bei konventionellen (fossilen) Kraftwerken (allerdings ist der anschließende Betrieb der Anlagen für die regenerative Energiewandlung wesentlich ressourcenärmer als bei konventionellen Anlagen) Typische/relevante Rohstoffe für Windkraftanlagen sind:⁵¹

- Fundament: Zement
- Turm: Metall (Eisen, Stahl) oder Zement
- Maschinengondel: Eisen, Kupfer, Plastik, Aluminium, Chrom, Mangan, Selen, Molybdän, Niob
- Generatoren: Eisen und Seltene Erden (Neodym, Dysprosium, Praseodym, Bor, Terbium)
- Permanentmagnete in Generatoren (Praseodym, Neodym, Dysprosium)
- Getriebe: Rostfreier Stahl (Chrom, Mangan, Selen, Molybdän, Niob)
- Rotoren: Carbon, Glasfaser, Kunstharz

⁴⁵ Quelle: Statista 2020

⁴⁶ International Atomic Energy Agency (ed.) (2020): IAEA Releases 2019 Data on Nuclear Power Plants Operating Experience. 25.06.2020 – online unter <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-2019-data-on-nuclear-power-plants-operating-experience>

⁴⁷ Quelle: Statista 2020

⁴⁸ IRENA (2020): Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. S. 24 – online unter: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020> (Zugriff am 2.12.2020)

⁴⁹ IPCC (2018): Special Report: Global Warming of 1,5 °C, S. 132 – online unter: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-2/> (Zugriff am 2.12.2020)

⁵⁰ Frankfurter Rundschau (2020): Ehrgeizige Ziele für Windkraft: Brüssel will fünfmal mehr Offshore-Energie in der EU bis 2030. Meldung vom 10.11.2020, 76. Jahrgang, Nr. 271, S. 13

⁵¹ Die folgende Darstellung wurde entnommen aus: Müller, A. (2018): Rohstoffe für die Energiewende - Menschenrechtliche und ökologische Verantwortung in einem Zukunftsmarkt. Studie des Bischöflichen Hilfswerks MISEREOR e. V., Aachen, S. 16

Insbesondere die metallischen Rohstoffe und hier in hohem Maße die Seltenen Erden werden von einer Foresight-Studie der Europäischen Kommission als kritische Rohstoffe angesehen,⁵² die nicht selten aus Schwellen- und Entwicklungsländern importiert werden müssen. Damit kommt angesichts des Erneuerbare Energien-Booms der Herkunft der Rohstoffe und den Bedingungen für Mensch und Umwelt, unter denen sie gewonnen werden, eine hohe Bedeutung zu: „[Übersetzung durch den Autor] Es wird erwartet, dass die Nachfrage nach Rohstoffen wie ‚Spezialmetallen‘ in den kommenden Jahrzehnten erheblich zunehmen wird, und es besteht die Gefahr, dass neue Bergwerke eröffnet werden, ohne dass die Umweltstandards der Minen eingehalten werden. Da die EU, die USA und Japan (neben China, das aber selbst weltgrößter Produzent Seltener Erden ist⁵³) den Großteil des Materials verbrauchen, ist es an ihnen, einen Beitrag zur nachhaltigen Versorgung mit Rohstoffen zu leisten. Es gibt weltweit eine Reihe von Initiativen für nachhaltige Bergbauaktivitäten, darunter auch Zertifizierungssysteme, die sich mit unterschiedlichen Themen wie Umweltaspekten, Kleinbergbau, Sicherheitsfragen und Menschenrechten befassen.“⁵⁴

Die Frage der Arbeitssicherheit und körperlichen Unversehrtheit im Bergbau ist ein Thema, das insbesondere in Afrika, Asien und Lateinamerika oftmals stark unterentwickelt ist, es aber nicht zwangsläufig sein muss, wie das Beispiel Chile zeigt. So konnte die Anzahl der Unfälle in chilenischen Minen durch konsequente Sicherheits- und sanktionsbewährte Kontrollmaßnahmen von 33,3 verunfallten Minenarbeitern pro 1 Mio. verfahrenen Arbeitsstunden im Jahr 1989 auf 1,65 Fälle/1 Mio. Arbeitsstunden im Jahr 2018 gesenkt werden.⁵⁵ Zum Vergleich: In der deutschen Braunkohle betrug gemäß DGUV/DEBRIV im Jahr 2018 die Anzahl anzeigepflichtiger Betriebsunfälle pro 1 Mio. verfahrens Arbeitsstunden 2,3 Fälle.⁵⁶

Um insbesondere im Onshore-Einsatz eine hohe Zahl an Volllaststunden zu ermöglichen und materialbelastende Turbulenzen zu vermeiden, erreichen Windkraftanlagen heute 150 Meter und mehr Nabenhöhe. Typische Leistungsstärken für große Anlagen liegen bei rund 5 Megawatt, die leistungsstärkste und für den Offshore-Einsatz konzipierte Windkraftanlage wird (Stand 2020) eine Leistung von 12 Megawatt haben. Neben einer hochgradig belastbaren Mechanik wird eine aufwendige Leistungs- und Steuerungselektronik inkl. der meist hydraulischen oder elektrischen Systeme zur Ausrichtung der Rotorblätter benötigt. In der Herstellung von Windkraftanlagen kommen in hohem Maße Verbundmaterialien (zum Beispiel glasfaserverstärktes Epoxidharz für die Rotorblätter) zum Einsatz. Für die Arbeitssicherheit bedeutet dies, dass bei der Fertigung insbesondere der Kunststoffelemente darauf geachtet wird, dass keine Gesundheitsgefährdung durch Lösungsmitteldämpfe, (alveolengängige) Stäube und Fasern etc. auftreten. Die Herstellung von Rotorblättern erfolgt heute noch überwiegend in Handarbeit, wobei der politisch geförderte Ausbau der Windenergie und die damit verbundenen „Economies of Scale“ auch hier eine (teil-) automatisierte, industrielle Produktion für die Zukunft erwarten lassen. Die Automatisierung ermöglicht ggf. die Verwendung von einfacheren Halbzeugen oder neuen Materialien, die geringere Kosten und/oder günstigere Eigenschaften als die

⁵² European Commission (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study. Brussels; ISBN 978-92-76-15336-8 – online unter <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42882/attachments/1/translations/en/renditions/native>

⁵³ Witsch, K.; Menzel, S. (2020): Seltene Erden: Australien rüttelt an Chinas Dominanz. Handelsblatt vom 20.08.2020 – online unter <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/elektromobilitaet-seltene-erden-australien-ruettelt-an-chinas-dominanz/26111806.html?ticket=ST-620028-iTTcq5Hsr4JDJS6qomND-ap5>

⁵⁴ European Parliament (ed) (2012): Future Metal Demand from Photovoltaic Cells and Wind Turbines - Investigating the Potential Risk of Disabling a Shift to Renewable Energy Systems. Directorate G: Impact Assessment; Science and Technology Options Assessment (STOA); Brussels, p. 55 – online unter [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET\(2011\)471604_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET(2011)471604_EN.pdf)

⁵⁵ Gobierno de Chile (2018): Accidentabilidad Minera 2018. Gobierno de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Seguridad Minera, Santiago de Chile, p. 3

⁵⁶ DEBRIV (2020): Arbeitsunfälle in der Braunkohlenindustrie 2009 bis 2019 im Vergleich zur deutschen Wirtschaft. Stand 2/2020. Ohne weitere Angaben

aktuell genutzten Materialien haben. Ein Pick-and-Place-Prozess für die Ablage von zugeschnittenen Fasergelegen und ein robotergestützter Prozess für das automatisierte Schleifen und Polieren der Blattoberfläche sind Beispiele für eine Automatisierung. Beim Verkleben der Rotorblattkomponenten kann durch einen automatisierten Klebstoffauftrag die Fertigungsgeschwindigkeit erhöht und ein schneller aushärtender Kleber verwendet werden. Darüber hinaus lassen sich durch die genauere Dosierbarkeit Materialmengen reduzieren.⁵⁷ Wenngleich in erster Linie Kostensenkungen und Verbesserungen der Produktqualität im Mittelpunkt stehen dürfte, bieten automatisierte Verfahren durch die Kontaktminimierung mit den Komponenten der Rotorblätter bzw. den Bearbeitungsrückständen auch eine Möglichkeit zur Verbesserung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes von Beschäftigten.

Auch für die Montage von Windenergieanlagen ergeben sich umfassende Herausforderungen an die Arbeitssicherheit. Dies beginnt bereits mit dem Transport der großdimensionierten Bauteile (Rotorblätter), der sich insbesondere mit Blick auf entlegene und schwer zugängliche Standorte als Herausforderung für die Sicherheit des Personals erweisen kann. Zu den Gefahrenquellen gehören unbefestigte und nur bedingt für Schwertransporte ausgelegte Zufahrtswege, Witterungseinflüsse insbesondere an küstennahen Standorten und weitere Naturgefahren (Steinschläge und Erdbeben, Überschwemmungen etc.). Hinzu kommen psychische Belastungen durch die nervliche Anspannung beim Steuern und Rangieren von Transporten dieses Ausmaßes unter widrigen Bedingungen. Auch die Montage der Anlagen stellt zahlreiche Herausforderungen an die Arbeitssicherheit und Gesundheit. Da am Aufbau von Windkraftanlagen verschiedene Gewerke beteiligt sind, die zudem durch unterschiedliche Firmen ausgeführt werden, kommt der Koordination und Einhaltung einheitlicher Sicherheitsstandards eine enorme Bedeutung zu.⁵⁸

Bei der Montage und Wartung der Windenergieanlagen sind die allgemeinen Auflagen für das Arbeiten in großen Höhen bzw. unter besonderen Bedingungen (persönliche Schutz- und Sicherungsausrüstung (PSA), spezielle Unterweisung und Schulungen) zu beachten. Da Windkraftanlagen (hier insbesondere Starkwindanlagen) an Orten installiert werden, die sich naturgemäß durch hohe Windgeschwindigkeiten auszeichnen, kommt der Prävention von Verwehungen große Bedeutung zu. Dies gilt sowohl für die Absturzvermeidung der Beschäftigten als auch für die Sicherung von Gegenständen, damit diese nicht unkontrolliert umherfliegen. Hinzu kommen Schutzmaßnahmen vor Elektrizität (Generator!) und mechanischen Gefährdungen (bewegliche und/oder scharfkantige Teile). Bei Offshore-Anlagen bestehen zusätzliche Herausforderungen für die Unversehrtheit der Beschäftigten in Form eines sicheren Übergangs vom Schiff zur Windkraftanlage etc. Die Gefährdungspotenziale sind auf nationaler Ebene in der BGI 657 zusammengefasst⁵⁹ und dürften in Zukunft durch die Zunahme von Extremwetterereignissen noch an Bedeutung gewinnen.

Es ist zu erwarten, dass durch Nutzung von Technologien zur Fernwartung die Notwendigkeit zur manuellen Kontrolle von Windturbinen abnehmen wird. Vor Ort in den Anlagen installierte Sensoren erfassen in Echtzeit den Winddruck, Füllstände von Schmiermitteln, den Zustand der Bremse und der Hydraulik, die elektrische Leistung, den Status der Rotoren und Generatoren etc. und übermitteln sie an eine Leitstelle.⁶⁰ Auf diese Weise wird der Aufstieg in die Turbinengondel und die Arbeit mit potenziell gefährlichen Installationen oder der Aufenthalt im Außenbereich reduziert, sodass die digitalen Monitoring- und Übertragungstechnologien trotz des weiterhin sehr dynamischen Ausbaus der Windenergie zu einer unmittelbaren Verminderung von Arbeitsunfällen führen dürfte. Ebenso führt die

⁵⁷ VDI Zentrum Ressourceneffizienz (ohne Jahr): Fertigung von Rotorblättern (Forschung). Webseite <https://windenergie.ressource-deutschland.de/herstellung-und-errichtung-Onshore/fertigung-von-rotorblaettern/>

⁵⁸ Webster, J.; Cabeças, J.-M. M.; Kuhl, K.; Ellwood, P.; Smith, P.; Gervais, R.; Dylan, S.; Väänänen, V. (2013): Occupational safety and health in the wind energy sector – European Risk Observatory Report. European Agency for Safety and Health at Work, Bilbao, S. 16

⁵⁹ Berufsgenossenschaft Energie Elektro Energie Medienerzeugnisse (2014): BGI 657 ‚Windenergieanlagen‘. Köln

⁶⁰ Lang, H. (2014): Condition Monitoring, Remote Management, Support – Wireless Kommunikation bei Windkraftanlagen. Beitrag auf der Webseite Smarter World vom 05.05.2014 – online unter <https://www.smarterworld.de/smart-automation-iiot/automatisierung/wireless-kommunikation-bei-windkraftanlagen.108483.html>

Verwendung prädiktiver Methoden der Zustandsüberwachung (predictive condition monitoring/maintenance) dazu, dass mittels der Analyse von Vibrationen, Temperaturveränderungen oder auch der Änderung im Schallmuster gezielt Hinweise auf bevorstehende Probleme erhalten werden können, sodass die sich abzeichnenden Mängel behoben werden können, bevor sie sich manifestieren.⁶¹ Die auf diese Weise permanent erhobenen Daten lassen sich grundsätzlich auch für eine Echtzeit-Gefährdungsbeurteilung nutzen, indem Hinweise auf Defekte, Verschleiß etc. als potenzielle Gefahrenquellen gegeben werden. Ebenso kann das Umfeldmonitoring (Wetterdaten, Winddruck) dazu genutzt werden, übergeordnete Gefährdungssituationen zu erfassen und einzuschätzen (z. B. Vermeidung von Abstürzen oder Gefährdung durch Blitzschlag); ein Aspekt, der vor dem Hintergrund der klimawandelbedingten Zunahme von Extremwetterereignissen (siehe Abschnitt 3.2) zukünftig noch an Bedeutung gewinnen wird.

Die datengestützte Analyse von Forschungsliteratur zum Thema „Windenergie und Arbeitsschutz/Gesundheitsschutz“ auf Basis der Literaturdatenbank Scopus® zeigt für die Jahre 2005 bis 2020 mit insgesamt 38 Publikationen – Artikel und einige Konferenzbeiträge vor allem aus arbeitsmedizinischer Sicht – eine vergleichsweise dynamische Entwicklung; die älteste Publikation stammt aus dem Jahr 1981. Abbildung 5 zeigt die thematischen Zusammenhänge dieser Beiträge. Hierzu wurden Ko-Häufigkeiten der extrahierten Begriffe im zeitlichen Verlauf dargestellt. Zusammenfassend betrachtet handelt es sich hierbei vor allem um Themen wie:

- Partizipative Ansätze zur Verbesserung der Gestaltung, Verwaltung und Organisation der Arbeit und zur Reduzierung von Arbeitsunfällen
- Kontaktallergien
- Sicherheitsstandards und Notfallmanagement
- Einsatz eines Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltmanagementsystems zur Vermeidung von Unfällen
- Arbeitssicherheitsrisiken im Lebenszyklus einer Windkraftanlage
- Risiken der Exposition im Herstellungsprozess von Windturbinenblättern und speziell bei faserverstärkten Kunststoffen
- Entsorgungspraktiken für Windturbinenblätter und deren Risiken
- Physische Belastungen und gesundheitliche Risikofaktoren beim Betriebs- und Wartungspersonal in Windparks
- Auswirkungen alternativer Energietechnologien auf Gesundheit und Sicherheit
- Lärmstudien, Lärmexposition und Schlaganfallrisiko am Beispiel von Windkraftanlagen, Maßnahmen der Geräuschkürzung

⁶¹ Tchakoua, P.; Wamkeue, R.; Ouhrouche, M.; Slaoui-Hasnaoui, F.; Tameghe, T.A.; Ekemb, G. (2014): Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges. *Energies*, Vol. 7, p. 2595-2630; doi:10.3390/en7042595

Sonnenlicht auf sie fällt, ist eine ausreichende Sicherung gegenüber elektrischen Strömen notwendig, um die Gefahr einer mitunter tödlichen Durchströmung oder die Entstehung eines Lichtbogens zu verhindern. Diese Sicherheitsmaßnahmen sind auch bei der Demontage sowie im Falle eines Unfalls – etwa bei einem Brand – zu beachten (Isolierung von Werkzeugen, Vermeidung von Durchnässung, sichere Erdung der Elemente). Für das Recycling gilt, dass insbesondere die hohe Integration der Module und die Vielfalt der verwendeten Materialien den Prozess der stofflichen Verwertung erschweren. Zum Einsatz kommen dabei mechanische, chemische und thermische Verfahren (Pyrolyse), die jeweils über ein eigenes Gefährdungspotenzial (z. B. Splitter, ätzende und korrosive Substanzen, Hitze und giftige Dämpfe) verfügen. Somit besteht die gleiche Herausforderung wie für die Verwertung von Elektroschrott mit den bekannten Problemen eines globalen und gegen die „Basel Convention“⁶³ verstoßenden Mülltourismus, der in verschiedenen Ländern des globalen Südens zu großflächigen Verwertung-Settings geführt hat, die aus Sicht des Umwelt-, Menschen und Beschäftigungsschutzes untragbar sind. Das bekannteste Beispiel dürfte die Müllhalde Agbogbloshie der ghanaischen Hauptstadt Accra sein; die Bedingungen, unter denen auch Kinder und Jugendliche hier insbesondere metallische Rohstoffe mit einfachsten Mittel (offene Feuer) und ohne jeden Schutz aus dem Elektroschrott gewinnen, hat traurige Berühmtheit erlangt.⁶⁴ Seit dem Jahr 2016 zielt ein vom Bundesministerium für Entwicklung und Zusammenarbeit gefördertes und von der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) und dem ghanaischen Umweltministerium umgesetztes Projekt darauf ab, die Umweltsituation aber auch die Arbeitsbedingungen der in Agbogbloshie arbeitenden Menschen zu verbessern.⁶⁵

Die datengestützte Analyse von Forschungsliteratur zum Thema „Photovoltaik und Arbeitsschutz/Gesundheitsschutz“ auf Basis der Literaturliteraturdatenbank Scopus® hat für die Jahre 1980 bis 2020 insgesamt 56 Publikationen – Artikel, Konferenzbeiträge und zu einem geringen Anteil Buchbeiträge vor allem aus dem Engineering-Bereich – ergeben; die älteste Publikation stammt aus dem Jahr 1980. Ein verstärktes Publikationsaufkommen zeigt sich in dem Thema vor allem Anfang der 1980er und dann erneut in den Jahren 2012 und 2020. Abbildung 6 zeigt die thematischen Zusammenhänge der Beiträge. Hierzu werden Ko-Häufigkeiten der extrahierten Begriffe im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die Inhaltsanalyse der Beiträge ergab die folgenden Fragestellungen/Schwerpunkte in den publizierten Forschungsarbeiten:

- Potenzielle Gefahren, Gesundheits- und Umweltprobleme bei der Herstellung, Verwendung und Entsorgung von Photovoltaikzellen
- Betrachtung der Risiken der Exposition von Beschäftigten in Photovoltaikanlagen gegenüber schädlichen biologischen, chemischen und psychophysischen Faktoren während der Installation, der Wartung und der Demontage, Methoden des Explosionsschutzes/des Flammenschutzes
- Endogene Sicherheit
- Methodiken zur eine Bewertung des Berufsrisikos für die Herstellung von photovoltaischen Zellen
- Risikobewertung des Hitzestress-Niveaus und Sonneneinstrahlung beim Montage- und Wartungspersonal
- Biomonitoring bei Herstellungs- und Recyclingprozessen
- Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltaspekte beim Plasma-Ätzen
- Öffentliche und berufliche Gesundheitsrisiken bei photovoltaische Energietechnologien
- Bewertung von Blendrisiken in einer Zentralempfänger-Solarstromanlage

⁶³ Umweltbundesamt (1995): Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung vom 22.03.1989. Berlin. Online unter – https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/basler_uebereinkommen.pdf

⁶⁴ Ottaviani, J. (2016): Die Elektroschrott-Republik. Spiegel online <https://www.spiegel.de/wirtschaft/elektroschrott-in-afrika-recyclingmethoden-schaden-a-1085773.html>

⁶⁵ Siehe <https://www.giz.de/de/weltweit/63039.html>

freiwerdende Partikel sehr leicht aufgenommen werden können.⁶⁶ Um das Gefährdungspotenzial abzuschätzen, sind nano(öko)toxikologische Untersuchungen nötig.

- Photovoltaikanlagen werden aufgrund der Flächenkonkurrenz zunehmend in Formen der Mischnutzung eingesetzt, etwa in vertikaler Bauweise auf Agrarflächen. Dadurch können sich zu den grundsätzlich für PV-Anlagen geltenden Gefährdungen (s. o.) jene Gefährdungen addieren, die aus der Landwirtschaft resultieren (Pestizide, Zoonosen, Allergene – vgl. Abbildung 4) und die den direkten Auswirkungen des Klimawandels unterliegen.
- Durch die stärkere Integration von PV-Anlagen in urbane Räume unter Nutzung vertikaler Flächen (Fassaden) kommt nicht nur der Anlagensicherheit eine wachsende Bedeutung zu, sondern auch dem Schutz der mit Installation, Wartung/Austausch und Rückbau befassten Beschäftigten. Sonnenbeschienene Flächen können dabei leicht zu Hitzeinseln werden, die zu Hitzestress (vgl. Abbildung 2) und ggf. auch zu Verbrennungen durch stark erhitzte Oberflächen führen.
- Für die heute noch vergleichsweise wenig genutzte Möglichkeit des Recyclings von Windenergie- und Photovoltaikanlagen – große Teile wie die Rotoren werden wenn überhaupt in erster Linie der thermischen Verwertung zugeführt – ist zukünftig aufgrund gesetzlicher Vorgaben eine deutlich höhere Quote und ein wachsendes Volumen zu erwarten, da viele der nach dem Inkrafttreten des EEG – Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien⁶⁷ im Jahre 2000 gebauten Anlagen nun nach und nach ihre Lebensdauer von etwa 20 Jahren erreichen bzw. überschreiten. Durch die Nutzung von Verbundmaterialien und hochintegrierten Bauteilen (Photovoltaik) stellen sich weitgehende technische Anforderungen an das Recycling (chemische und physikalische Verfahren), die mit entsprechenden Schutzvorkehrungen einhergehen müssen.

4.2 Anwendungsfeld Neue Antriebskonzepte

4.2.1 Elektromobilität

„Batterien, insbesondere optimierte Lithium-Ionen-Batterien, sind eine Schlüsseltechnologie für E-Pkw und die wichtigste Antriebstechnologie der Zukunft. Im Zeitraum 2020 – 2030+ wird sich ein deutlich ansteigender Markthochlauf vollziehen. Auch andere Kraftstoffe und Antriebstechnologien, wie Wasserstoff in Kombination mit der Brennstoffzelle oder synthetische Kraftstoffe werden im Rahmen ambitionierter Klimaschutzstrategien künftig eine Rolle spielen – allerdings weniger im Pkw-Bereich, sondern eher im Langstrecken- und Schwerlastverkehr sowie dem Schienen-, Flug- und Schiffsverkehr. Diese Segmente werden erst in späteren Phasen der Energiewende, also jenseits 2030, und eng verknüpft mit dem Ausbau Erneuerbarer Energien in die breitere Diffusion gehen.“⁶⁸

Ähnlich wie bei den Technologien zur klimaneutralen Energiewandlung wird auch bei den Batterien für die Elektromobilität ein erheblicher Teil der Rohstoffe für den globalen Markt unter Bedingungen abgebaut, die weder auf die Umwelt noch auf die im Abbau tätigen Beschäftigten Rücksicht nehmen. Was die globalen Auswirkungen von Lieferketten auf den Arbeitsschutz betrifft, so sind die Nachweise und Kausalitäten insgesamt zwar lückenhaft, was an der unvollständigen Datenerhebung und -verlässlichkeit in vielen Ländern liegt. Eine Extrapolation aus aggregierten Statistiken zeigt aber, dass Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit auch in globalen Lieferketten wichtige Themen sind.

⁶⁶ Bradbrook, S.; Duckworth, M.; Ellwood, P.; Miedzinski, M.; Reynolds, J.; Ravetz, J. (2013) Grüne Arbeitsplätze und Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit: Vorausschau auf neu auftretende Risiken im Zusammenhang mit neuen Technologien bis 2020. Studie im Auftrag der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz, Bilbao, S. 10 – online unter <https://osha.europa.eu/de/publications/reports/summary-green-jobs-and-occupational-safety-and-health-foresight-on-new-and-emerging-risks-associated-with-new-technologies-by-2020?src=asp-cu&typ=pdf&cid=2852>

⁶⁷ Siehe auch https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/

⁶⁸ Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S.; Grimm, A.; Hettesheimer, T.; Langkau, S.; Loibl, A.; Moll, C.; Neef, C.; Plötz, P.; Sievers, L.; Tercero Espinoza, L.; Edler, J. (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Fraunhofer-Institut für Systemanalyse und Innovationsforschung, Karlsruhe. S. 7

Dabei ist trotz der internationalen Verflechtung anerkannt, dass es weltweit nach wie vor eine enorme Belastung durch vermeidbare, schwere arbeitsbedingte Verletzungen, Todesfälle, Erkrankungen und vorzeitige Todesfälle gibt, die in Entwicklungsländern unverhältnismäßig höher ist als in fortgeschrittenen Volkswirtschaften.⁶⁹

Der peruanische Minenort Cerro de Pasco macht die Misere der Verantwortungs- und der Straflosigkeit besonders deutlich. Cerro de Pasco ist dabei zu einem weltweiten Negativsymbol für eine Rohstoffindustrie geworden, die sich lange Jahre bei der Gewinnung von Silber, Kupfer, Blei und später Zink weder um Umwelt noch Menschen gekümmert hat. Um Ansprüche der Bevölkerung auf Entschädigung geltend zu machen, muss nachgewiesen werden, dass eine der zahlreichen Krankheiten auf den Minenbetrieb und nicht eingehaltene Standards zurückzuführen ist. Zudem schieben sich die verschiedenen Unternehmen auch wechselseitig die Schuld zu., sodass nicht klar ist, wer letztendlich die Verantwortung trägt. Auch vor dem Hintergrund, dass heute der schweizerische Rohstoffkonzern Glencore zu 55 Prozent am Minenbetreiber Volcan Compañía Minera beteiligt ist, fragt die lokale Bevölkerung, warum sich internationale Unternehmen in ihren Herkunftsländern sehr wohl an Regeln halten, vor Ort jedoch nicht. Dabei wird allerdings auch angemerkt, dass mit dem Einstieg von Glencore positive Ansätze in Cerro de Pasco zu verzeichnen seien.⁷⁰

Ein anderes hervorstechendes Beispiel für den in dieser Hinsicht besonders prekären Startpunkt einer globalen Lieferkette ist der Abbau von Kobalt in der Republik Kongo; in deren Region Katanga lagert rund die Hälfte des weltweit vermuteten Kobalts, das mit rudimentären Methoden und oftmals mit Kinderarbeit abgebaut wird.⁷¹ Eine Verantwortung der Abnehmer aus den Industrieländern scheint hier ebenso wenig erkennbar zu sein, wie eine nationale Regulierung/Kontrolle. Auch ist die Ankündigung des chinesischen Batteriezellherstellers SVOLT, eine Möglichkeit gefunden zu haben, Batterien ganz ohne Kobalt herstellen zu können,⁷² unter Gesichtspunkten von Umweltverträglichkeit und dem Wunsch nach „sauberen“ Rohstoffen (hier: technischer Verzicht auf unter fragwürdigen Bedingungen geförderte Ressourcen und deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt) zwar ein großer Fortschritt, bedeutet für die lokale Bevölkerung aber unter Umständen den Verlust ihrer wirtschaftlichen Existenz; die grundlegenden Befunde und Ansatzpunkte, die für die Rohstoffgewinnung für die Erneuerbaren Energien beschrieben wurden (s. o.) gelten auch hier.

In anderer Form stellt sich die Frage von Kinderarbeit zukünftig möglicherweise auch bei der Gewinnung von Lithium. In Bolivien befindet sich in dem rund 10.000 Quadratkilometer großen Salzsee Uyuni eine der größten Lithiumlagerstätten der Erde. Das Land hatte bereits einen Vertrag mit dem deutschen Mittelständler ACI Systems über die Gründung eines Joint Ventures geschlossen, um das Lithium abzubauen/anzureichern; der Vertrag wurde Ende des Jahres 2019 vor dem Hintergrund von Protesten der indigenen Bevölkerung annulliert.⁷³ Unabhängig von der internationalen Kooperation, die Bolivien zur Förderung und weiteren Verarbeitung eingeht, kann auch hier nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass es insbesondere im Umfeld des Lithiumabbaus (kaum im zu erwartenden industriellen

⁶⁹ Walters, J.; James, P. (2020): Supply Chains and their Present and Future Implications for Occupational Safety and Health. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA), Bilbao, p. 3

⁷⁰ Busch, A. (2020): Von der Münze Perus zur dreckigsten Mine der Welt: Welche Schuld tragen europäische Konzerne? Handelsblatt online vom 29.12.2020 – online unter <https://amp2-handelsblatt.com.cdn.ampproject.org/c/s/amp2.handelsblatt.com/politik/international/glencore-tagebau-in-cerro-de-pasco-von-der-muenze-perus-zur-dreckigsten-mine-der-welt-welche-schuld-tragen-europaeische-konzerne/26738494.html>

⁷¹ Staude, L. (2019): Der hohe Preis für Elektroautos und Smartphones. Deutschlandfunk vom 25.07.2019 – online unter https://www.deutschlandfunk.de/kobaltabbau-im-kongo-der-hohe-preis-fuer-elektroautos-und.724.de.html?dram:article_id=454818

⁷² Decker, K. (2020): SVOLT: Kobaltfreie Akkus für Elektroautos. Energyload vom 10.07.2020 – online unter <https://energyload.eu/stromspeicher/forschung/svolt-kobaltfreie-akkus/>

⁷³ Deutsche Welle (2019): Bolivien stoppt Lithium-Projekt mit deutscher Firma. Meldung vom 09.11.2019 – online unter <https://www.dw.com/de/bolivien-stoppt-lithium-projekt-mit-deutscher-firma/a-51100927>

Abbau selbst) zu Kinderarbeit kommen kann; diese ist in Bolivien in besonderer Weise in der gesellschaftlichen Realität und Praxis verwurzelt. Dabei ist Bolivien ein Sonderfall, da die Regierung im Jahr 2014 das „Gesetz 548“ zur Regulierung und Legalisierung der Arbeit von Kindern ab 10 Jahren erließ.⁷⁴ Im Jahr 2019 wurden die entsprechenden Passagen des Gesetzes auf internationalen Druck – insbesondere der ILO – zurückgenommen.⁷⁵

Bolivien hat bereits deutlich gemacht, dass es sich nicht mit der Rolle als reiner Rohstofflieferant begnügen wird, sondern anstrebt, eine höhere Wertschöpfung im Land zu realisieren – etwa in Form einer eigenen Batteriezellfertigung.⁷⁶ Auf Basis des Lithiums als zentrale und namensgebende Komponente der Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität werden zunächst die sandwichartig aufgebauten Batteriezellen gefertigt, die anschließend inkl. der elektronischen Managementsysteme zu den benötigten Akkupacks zusammengefügt werden. Der Bedarf für derartige Batteriezellen und Akkupacks steigt mit der Anzahl der produzierten/verkauften Elektroautos. Seit Anfang 2020 befinden sich weltweit über 7,5 Mio. Elektroautos auf den Straßen und ihr Anteil an den globalen Pkw-Verkäufen wird je nach Marktstudie ab dem Jahr 2030 auf 25 – 75 % geschätzt. Dies hat große Auswirkungen auf die globale Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien, die von 500 – 1.500 GWh (um 2025) auf 1.000 – 6.000 GWh (ab 2030) ansteigen dürfte.⁷⁷

Die Herstellung von Batteriezellen und Akkupacks erfolgt überwiegend automatisiert und in großindustriellem Maßstab (die von Tesla® geprägte Bezeichnung „Gigafactory“ verdeutlicht die Dimensionen⁷⁸), sodass die Arbeitssicherheit wie bei vergleichbaren industriellen Fertigungsprozessen durch technische und organisatorische Maßnahmen und einhergehend mit der Produktsicherheit der Akkus – etwa Vermeiden eines thermischen Durchgehens der Zellen – zu gewährleisten ist: „Da die Zellenproduktion weitgehend automatisiert ist, liegen die Hauptaufgaben unmittelbar betroffener Mitarbeiter vor allem im Bereich der Produktionslogistik und der Prozessüberwachung. Aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen müssen zudem Produktionsbedingungen geschaffen werden, die es für die Mitarbeiter notwendig machen, spezielle Schutzausrüstung zu tragen. Folglich sind die größten Belastungen des Mitarbeiters in diesem Bereich psychischer Natur, wobei jedoch auch Gefahren chemischer und thermischer Art im Umgang mit Rohstoffen und fertigen Zellen existieren.“⁷⁹ Da auch Länder wie Bolivien – weitere Kandidaten sind beispielsweise auch Chile und Argentinien, die ebenfalls über große Lithium-Lagerstätten verfügen – eine eigene Zellproduktion in industriellem Maßstab anstreben (s. o.), muss begleitend zur Fertigung ein Regime zur Gewährleistung und Kontrolle der Arbeitssicherheit und Gesundheit etabliert werden, um internationale Standards und „Good Practices“ zu implementieren.

⁷⁴ Ministerio de Comunicación Bolivia (2018): LEY N° 548: Código Niña, Niño y Adolescente – online unter https://comunicacion.gob.bo/sites/default/files/dale_vida_a_tus_derechos/archivos/LEY%20548%20ACTUALIZACION%202018%20WEB.pdf

⁷⁵ Ehringfeld, K. (2019): In Bolivien dürfen Kinder nicht mehr arbeiten - und das ist ein Problem. Der Spiegel online vom 21.10.2019 – online unter <https://www.spiegel.de/politik/ausland/bolivien-und-seine-kinderarbeiter-zurueck-in-der-rechtlosigkeit-a-1289863.html>

⁷⁶ Schiewe, L. (2019): High-Tech-Produzent statt Rohstofflieferant? Woran die ursprüngliche Lithiumstrategie Boliviens im Salar de Uyuni gescheitert ist. Universität Erfurt

⁷⁷ Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S.; Grimm, A.; Hettesheimer, T.; Langkau, S.; Loibl, A.; Moll, C.; Neef, C.; Plötz, P.; Sievers, L.; Tercero Espinoza, L.; Edler, J. (2022): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Fraunhofer-Institut für Systemanalyse und Innovationsforschung, Karlsruhe.

⁷⁸ Siehe dazu weiterführend https://de.wikipedia.org/wiki/Tesla_Gigafactory_1

⁷⁹ Enderlein, H.; Krause, S.; Spanner-Ulmer, B. (2012): Elektromobilität – Abschätzung arbeitswissenschaftlich relevanter Veränderungen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden, S. 39

Diese Maßnahmen sind in angepasster Form auch für die Herstellung der Akkupacks und schließlich der Elektrofahrzeuge zutreffend und anzuwenden. Da sich die Sicherheitsanforderungen nicht auf die Produktion von Batteriezellen, Akkupacks und Elektrofahrzeugen beschränkt ist, müssen auch der weitere Produktlebenszyklus und die damit verbundenen Wertschöpfungsstufen betrachtet werden (Tabelle 1). Hier stehen insbesondere das Vorliegen einer Hochvolt-Stromversorgung (400 bzw. 800 Volt) und die besondere Brand- und Explosionsgefahr der Batterie als neue Gefährdungslage im Fokus.⁸⁰

Zulieferer	Automobilhersteller	Werkstätten/Service	Verwertung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fertigung der Batteriezellen ▪ Fertigung des Antriebstranges ▪ Fertigung der Hilfsaggregate ▪ Fertigung der Elektromotoren ▪ Fertigung von Hochvoltbordnetzen ▪ [...] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fertigung der Hochvoltbatterien ▪ Einbau der Hochvoltbatterien ▪ Einbau der Zuliefererkomponenten ▪ Karosserieleichtbau ▪ Zusammenbau des Gesamtfahrzeuges ▪ Laden der Hochvoltbatterien ▪ [...] 	Reparatur/Service/Wartung <ul style="list-style-type: none"> ▪ am Elektromotor ▪ an der Hochvoltbatterie ▪ am Antriebsstrang ▪ an den Hilfsaggregaten ▪ Laden der Hochvoltbatterie ▪ [...] 	Autoverwertung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbau aller Komponenten ▪ Entladen der Hochvoltbatterie Recycling: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zerlegung der Komponenten ▪ Verwertung der Materialien ▪ [...]

Tabelle 1: Übersicht über zentrale Tätigkeiten entlang des Produktlebenszyklus' eines Elektrofahrzeugs anhand der Wertschöpfungsstufen, die sich an die Rohstoffgewinnung und Bereitstellung von Grundmaterialien, Vorprodukten und Halbzeugen anschließen (Quelle: Enderlein, H.; Krause, S.; Spanner-Ulmer, B. 2012, S. 36).

Da insbesondere die Beschäftigten in Werkstätten im Regelfall zwar für die Arbeit an/mit Niederspannungsbordnetzen (12 bzw. 24 Volt) ausgebildet sind, nicht jedoch für Hochvoltssysteme, sind je nach Vorkenntnissen/-qualifizierung geeignete Verhaltens- und Schulungsmaßnahmen durchzuführen, wie sie beispielhaft in der BGI/GUV-I 868 beschrieben sind;⁸¹ eine Betrachtung der mentalen Belastung Beschäftigter durch die Arbeit an/mit Hochvoltssystemen liegt gegenwärtig nicht oder nur sehr rudimentär vor.

Eine ähnliche Gefahrensituation ergibt sich für die Verwertung und das Recycling, wobei hier neben der Gefahr von Stromschlägen und Brand- und Explosionsgefahr auch chemische Gefährdungen wie beispielsweise Vergiftungen durch Lithium- und andere Stäube bestehen.⁸² Grundsätzlich bestehen bei der stofflichen Verwertung und beim Recycling Gefahren durch akute Verletzungen bei den Mitarbeiter*innen von Recyclingzentren. Ebenso besteht eine erhöhte Exposition gegenüber Schwermetallen, polybromierten Diphenylethern und Flammschutzmitteln bei Mitarbeiter*innen des Elektronikschrott-Recyclings.⁸³

Eine besondere Aufmerksamkeit verdient mit Blick auf die Batterietechnik der Umgang mit verunfallten Fahrzeugen, da sich hier der Kreis der potenziell Betroffenen über die fachlich zuständigen Berufe deutlich erweitert – zu nennen sind hier Angehörige von Feuerwehr, Polizei, Rettungssanitäter*innen aber auch Abschleppdiensten. Zudem besteht ein generelles Gefährdungspotenzial für Ersthelfer*innen.

⁸⁰ Först, A. (2018): Elektromobilität – ein Thema für den Arbeitsschutz? Berufsgenossenschaft Holz und Metall, Nürnberg

⁸¹ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung Spitzenverband (Hg.) (2012): Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen (BGI/GUV-I 868). Fachbereiche „Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse“ und „Holz und Metall“ der DGUV, Berlin

⁸² Enderlein, H.; Krause, S.; Spanner-Ulmer, B. (2012): Elektromobilität – Abschätzung arbeitswissenschaftlich relevanter Veränderungen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden, S. 21

⁸³ Schulte, P.A.; Bhattacharya, A.; Butler, C.R.; Chun, H.K.; Jacklitsch, B.; Jacobs, T.; Kiefer, M.; Lincoln, J.; Pendergrass, S.; Shire, J.; Watson, J.; Wagner, G.R. (2016): Advancing the framework for considering the effects of climate change on worker safety and health. J. Occup. Environ. Hyg., Vol. 13(11), p. 847-65. doi: 10.1080/15459624.2016.1179388. p. 852

inzwischen weltweit gefördert. In ihrer im Juni 2020 veröffentlichten Wasserstoffstrategie⁸⁴ geht die Bundesregierung davon aus, dass angesichts der drängenden Klimaproblematik die Nachfrage nach Wasserstoff mittel- bis langfristig steigen wird. Aufbauend auf Maßnahmen wie dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie und mit zusätzlichen Mitteln aus dem Corona-Konjunkturpaket⁸⁵ werden folgerichtig erhebliche Anstrengungen unternommen, um praxisnahe Technologien, Verfahren und neue Anwendungsfelder zu entwickeln, in denen H₂ zusätzlich zu den bisherigen Pfaden wie etwa den von Brennstoffzellen angetriebenen Fahrzeugen genutzt werden kann. Dafür stehen zusätzliche Mittel in Höhe von rund 9 Milliarden Euro bereit, mit denen auch internationale Energiepartnerschaften – zum Beispiel mit afrikanischen Ländern – gefördert werden (2 Mrd. der insgesamt 9 Mrd. Euro). Als wichtige Etappe für eine großskalige Verbreitung von Wasserstofftechnologien wird übereinstimmend ein Zeithorizont um das Jahr 2030⁸⁶ genannt: „Um den Einsatz dieser Technologien auch in Deutschland im Industriemaßstab zu demonstrieren, sollen bis 2030 industrielle Produktionsanlagen von bis zu 5 GW Gesamtleistung einschließlich der dafür erforderlichen Offshore- und Onshore-Energiegewinnung entstehen.“⁸⁷ Derartige politische Vorgaben und Meilensteine für die Kombination der Windenergie mit dem Energieträger H₂ wirken durch ihre Rahmensetzung als unmittelbare Verstärker und Konjunkturbeschleuniger für eine grüne und gerechte Transition.

Angesichts der Breite der Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff, die schon heute und somit in „traditionellen“ Anwendungskontexten von der chemischen Synthese, über die Nahrungsmittelindustrie und Metallerzeugung bis hin in die Elektronikindustrie reicht, können sich Wasserstofftechnologien in einer klimaneutralen Industrie unter Umständen zu einer Querschnittstechnologie vergleichbar der Digitalisierung entwickeln. Dabei kann Wasserstoff neben einer unmittelbaren Nutzung in unterschiedlichen Anwendungsgebieten aufgrund seiner hohen Speicher- und Transportfähigkeit auch eine wachsende Bedeutung für die Systemintegration von erneuerbaren Energien erlangen.⁸⁸ Aus Sicht der treibenden Klimaargumente kommt hierfür ausschließlich grüner und somit mittels erneuerbaren Energien gewonnener Wasserstoff in Frage, wobei für einen industriellen, großskaligen Hochlauf für eine gewisse Übergangszeit unter Umständen auch andere Quellen zum Einsatz kommen (müssen).⁸⁹

⁸⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Die Bundesregierung, Berlin – online unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16

⁸⁵ Siehe hierzu Bundesregierung (2020): Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken. Ergebnis des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020. Berlin – online unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunktepapier.pdf?__blob=publicationFile&v=9

⁸⁶ Hebling, C.; Ragwitz, M.; Fleiter, T.; Groos, U.; Härle, D.; Held, A.; Jahn, M.; Müller, N.; Pfeifer, T.; Plötz, P.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Sensfuß, F.; Smolinka, T.; Wietschel, M. (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Fraunhofer-Gesellschaft, Karlsruhe und Freiburg, S. 5 – online unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf

⁸⁷ Bundesregierung (2020): Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken. Ergebnis des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020. Berlin S. 9 – online unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunktepapier.pdf?__blob=publicationFile&v=9

⁸⁸ C. Hebling, M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller, T. Pfeifer, P. Plötz, O. Ranzmeyer, A. Schaadt, F. Sensfuß, T. Smolinka, M. Wietschel (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Fraunhofer-Gesellschaft, Karlsruhe und Freiburg, S. 1 – online unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf

⁸⁹ R. Schlögl, H. Lösch (2020): Wasserstoff ist das Öl der Zukunft. Gastkommentar im Handelsblatt vom 07.05.2020 – online unter <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-wasserstoff-ist-das-oel-der-zukunft-/25807356.html?ticket=ST-3570600-VZpYbRZ0SurXO7gV6qV4-ap5>

Auswirkungen des Klimawandels auf technologische Entwicklungen und deren Folgen für Arbeitssicherheit und Gesundheit

Mit Blick auf die absehbaren Entwicklungen der Wasserstoffwirtschaft bieten Roadmaps wie die in Abbildung 8 gezeigte einen Handlungsrahmen für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Deutlich wird dabei, dass bereits innerhalb eines Jahrzehnts ein deutlicher Schritt hin zu einer in Teilen wasserstoffbasierten und damit klimafreundlicheren Energiewirtschaft, Mobilität (in Ergänzung zur Elektromobilität⁹⁰) und auch Industrie möglich ist.

		2020	2030	langfristig
Skills	Beruflich	Bildungsstandards parallel zu technischen Standards Inventarisierung von Bedarfen und Potenzialen Zertifikate und Zusatzqualifikationen	Weiterbildung: Module für Up-Skilling und Zusatzqualifikationen	Grundständige Ausbildung
	Akademisch	Industrial Processing	Übergänge beruflich-akademisch	Weitere Ausdifferenzierung Bachelor/Master H ₂ -Systemtec
F&E	H ₂ -Erzeugung	H ₂ -Speicher: Technologie- und Produktionsforschung Errichtung Nationaler Technologieplattformen		
	Technologie	Onesite H ₂ -Erzeugung Tankstellen Methanpyrolyse Lastmanagement in Stahlerzeugung Systemkomponenten Protonenleitende Membran	Flexibilisierung Chlor-Alkali-Elektrolyse Reduzierung PGM-Bedarf für Kats in der PEM-Elektrolyse Weiterentwicklung Fischer-Tropsch-Synthese und Methanolsynthesen Edelmetallarme Katalysatoren	Luftabscheidung CO ₂ Ammoniak als Treibstoff für Schiffe Erhöhung Lebensdauer HT-Elektrolyse Erhöhte Betriebstemperaturen für NTElektrolyse
Markt	Nachfrage		4–20 TWh H ₂ in DE 6 Mt DRI Rohstahl (6 THw H ₂)	250–800 TWh H ₂ in DE 20–30 Mt DRI Rohstahl (38–56 THw H ₂)
	Erzeugungskapazität		1–5 GW in DE	50–80 GW in DE
Anwendung		100 Pkw-Tankstellen	400 Pkw-Tankstellen Aufbau Lkw-Tankstellen Pilotbetrieb H ₂ -Pipelines	1 Mio. Pkw, 5.000 Lkw 10 Mio. Pkw, 0,2 Mio. Lkw
			Einsatz EE-H ₂ für Hydrocracking EE-H ₂ für Ammoniak 1.000 Pkw-Tankstellen	Großtechnische Umsetzung, Ersatz bestehender Prozesse Ausbau H ₂ -Pipelines 5.000 Pkw-Tankstellen
Technologie	Erzeugung	AEL	PEM	H ₂ als Vorprodukt synthetische Kraftstoffe SOEC
	Anwendung	Kleinserien Pkw, Lkw Einkopplung von EE-H ₂ in bestehende Industrie-Prozesse	Großserien Pkw, Lkw EE-H ₂ für Ammoniak DRI mit Erdgas elektrisch beheizte Reformierung von CO ₂ und H ₂ O aus Erdgas	Bau industrieller Erzeugungsanlagen DRI mit Erdgas/H ₂ -Gemisch CO ₂ -Kreislauf Luftabscheidung CO ₂
Politik	Marktreize	Förderung H ₂ im Verkehr Investitionssicherheit schaffen Nischenmärkte schaffen (z. B. öffentliche Beschaffung)		
	Infrastruktur	Unterstützung Tankstellenaufbau Vereinfachte Genehmigungsverfahren Reallabore zur Validierung von Geschäftsmodellen		
	Regulierung	H ₂ ist Kraftstoff Anpassung Lkw Weights & Dimensionen 2015/719 Anpassung regulatorischer Rahmen im Energiesektor, u. a. für Strombezug Regulatorischer Rahmen u. a. für Strombezug von Elektrolyseuren angepasst an den Erfordernissen der Energiewende		

Abbildung 8: Roadmap für eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland (Quelle: iit nach Hebling *et al.* 2019, erweitert um die Dimension „Skills“).

Ähnlich wie in anderen transformativen technologischen Entwicklungen ist auch bei den Wasserstofftechnologien zu beobachten, dass diese gegenwärtig weltweit eine hohe Aufmerksamkeit erfahren und somit im Spannungsfeld aus Kooperation und Wettbewerb signifikante Sprünge zu erwarten sind. Wasserstoffstrategien wie die der Bundesregierung existieren sowohl auf Ebene von

⁹⁰ Spitzner, Eike-Christian; Bösch, Eyke; Coskina, Paradiso; Cordeiro, Sophie; Kleemann, Janine (2020): Wasserstoff - Rohstoff der Zukunft?! iit perspektive Nr. 52, Berlin – online unter https://www.iit-berlin.de/de/publikationen/wasserstoff-rohstoff-der-zukunft/at_download/download

Regionen (bzw. Bundesländern/-staaten) als auch auf europäischer Ebene und international (zum Beispiel für Japan seit dem Jahr 2017, für China seit 2016, für die USA mit Vorläufern seit 2005).

Dabei wird das Potenzial von H₂ bzw. von Technologien zur Erzeugung, Speicherung/Transport und Nutzung von Wasserstoff als Chance zum Strukturwandel gesehen, wie exemplarisch das gemeinsame Eckpunktepapier der ostdeutschen Kohleländer zur Entwicklung einer regionalen Wasserstoffwirtschaft von Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg deutlich macht. Darin heißt es, dass Wasserstoff als zukünftig bedeutender Energieträger gerade für die Energieregionen im Osten Deutschlands, die sich aufgrund des Ausstiegs aus der Kohleverstromung in einem tiefgreifenden Wandlungsprozess befinden, eine Chance auf klimaneutrale Wertschöpfung und Beschäftigung bietet.⁹¹ Ähnliche Perspektiven bieten sich auch für andere Energieregionen, die sich im Wandel befinden. Zudem bieten sich für Länder im globalen Süden neue Perspektiven der (ökonomischen) Entwicklung im Zuge der geplanten Energiepartnerschaften (s. o.). Mit Blick auf die für die neue Wasserstoffökonomie notwendigen beruflichen Qualifikationen – sowohl in Europa als auch international und insbesondere auch im globalen Süden – ergibt sich gegenwärtig noch eine erkennbare Leerstelle. In einer der wenigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die sich explizit mit dieser Thematik befassen, wird etwa mit Blick auf die USA festgestellt, dass das Wachstum in der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie zu weitreichenden neuen Beschäftigungsmöglichkeiten führen dürfte, die sich in einer Vielzahl von Branchen, Fertigkeiten, Aufgaben und Einkünften manifestieren werden. Allerdings existieren viele dieser Arbeitsplätze derzeit noch nicht, sodass sich demzufolge keine korrespondierenden Berufsbezeichnungen in den offiziellen Klassifikationen finden. Es ist demnach jedoch zu erwarten, dass diese Arbeitsplätze andere Fähigkeiten und andere Ausbildungsinhalte als derzeit Bestehende erfordern, sodass die entsprechenden Anforderungen neu erfasst und bewertet werden müssen, um sicherzustellen, dass dieser schnell wachsende Teil der Wirtschaft über ein ausreichendes Angebot an ausgebildeten und qualifizierten Arbeitskräften verfügt.⁹² In Ergänzung dazu hat das Europäische Exzellenznetzwerk “Safety of Hydrogen as an Energy Carrier” ein “International Curriculum on Hydrogen Safety Engineering” entwickelt.⁹³

Zum Thema Arbeitssicherheit betonen Branchenakteure wie der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband, dass der Einsatz von Wasserstoff im Bereich Mobilität (Brennstoffzellenfahrzeuge, H₂-Tankstellen) oder in der Industrie im Vergleich zu anderen vergleichbaren Technologien nicht gefährlicher sei und die entstehenden Risiken „ohne besonders aufwendige Maßnahmen“ bewältigt werden können.⁹⁴ Beispielsweise seien Unfallsituationen mit Wasserstofffahrzeugen nicht gefährlicher als solche mit Fahrzeugen, die mit Kraftstoffen wie Benzin, Flüssiggas oder Erdgas betrieben werden. Allerdings wird auch festgestellt, dass spezifische Vorgehensweisen und Know-how erforderlich sind, z. B. bei der Sicherung von Unfallstellen oder bei der Unfallbekämpfung. Zudem wird angemerkt, dass – insbesondere im Kontext eines großskaligen weltweiten Technologie-Rollouts – die zunehmende „harmonisierte Normung und internationale Regelwerke“ von großer Bedeutung für den sicheren Einsatz von H₂- und Brennstoffzellentechnologie

⁹¹ Günther, W.; Steinbach, J.; Dalbert, C.; Willigmann, A. (Hg.) (2020): Eckpunktepapier der ostdeutschen Kohleländer zur Entwicklung einer regionalen Wasserstoffwirtschaft. Dresden, Magdeburg, Potsdam, S. 3 – online: https://mule.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/MLU/00_Aktuelles/2006/200615_Wasserstoff_Eckpunktepapier_Kohlelaender.pdf

⁹² Bezdek, Roger H. (2019): The hydrogen economy and jobs of the future. *Renew. Energy Environ. Sustain.* 4, 1/2019, p. 1– online unter <https://www.rees-journal.org/articles/rees/pdf/2019/01/rees180005s.pdf>

⁹³ Dahoe, A.E.; Molkov, V.V. (2007): On the development of an International Curriculum on Hydrogen Safety Engineering and its implementation into educational programmes. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 32/ 8, S. 1113-1120 – online unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319906002850>

⁹⁴ Wurster, R.; Schmidtchen, Dr. Ulrich (2011): DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium, S. 23 – online unter <https://www.dwv-info.de/wissen-und-unwissen/publikationen/>

sein, neben einer kontinuierlichen wissenschaftlichen Forschung und technischer Weiterentwicklungen.

Auf diese Anforderungen muss mit Maßnahmen der Bewusstseinsbildung und des „Mainstreamings“ im Sinne von Verbreitung des notwendigen Handhabungswissens reagiert werden. So betont die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) bereits in ihrem Leitfaden zu „Wasserstoff und dessen Gefahren“ aus dem Jahr 2008, dass dieses spezielle Know-how z. B. im Umgang mit brennendem Wasserstoff oder mit speziellen Behältnissen (kryogene Speicher) für flüssigen und tiefkalten Wasserstoff bei vielen Feuerwehren noch nicht vorhanden ist und es entsprechend zu „nicht angemessenen Reaktionen“ kommen kann.⁹⁵

Die auch hier durchgeführte komplementäre Analyse der Forschungsliteratur zum Thema „Wasserstoffantrieb, Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicherung und Arbeitsschutz/Gesundheitsschutz“ auf Basis der Literaturlatenbank Scopus® hat für die Jahre 1990 bis 2020 insgesamt 19 Publikationen – überwiegend Fachartikel und Konferenzbeiträge, in geringem Umfang auch Buchveröffentlichungen – ergeben; die älteste Publikation zum Thema ist im Jahr 1951 erschienen. Die resultierende Stichwortanalyse inkl. der thematischen Verknüpfungen (Ko-Häufigkeiten) ist in Abbildung 9 grafisch dargestellt. Die Inhaltsanalyse der Beiträge ergab die folgenden Fragestellungen/Schwerpunkte in den publizierten Forschungsarbeiten:

- Gesundheitliche Risiken und zulässige Expositionsgrenzen für Dosen von Lösungsmitteln, Partikeln und Gasen
- Emissionsmessung flüchtiger Gase aus der Wasserstoffproduktion
- Vergleichende Risikobewertung von Fahrzeugwartungstätigkeiten: Hybrid-, batterieelektrische und Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge
- Echtzeittechniken
- Anwendungen von Prozesssicherheitskonzepten auf die Wasserstoffwirtschaft
- Risikobewertung und Sicherheitsplanung für Forschungslabore
- Sicherheitstraining für die Wasserstoffwirtschaft
- Richtlinien zur Vermeidung von Schocks in Elektrolysezellenräumen.
- Management von Gesundheits- und Sicherheitsrisiken in Öl und Gas
- Optionen für Betankungs- und On-Board-Speichersysteme für wasserstoffbetriebene Untertage-Bergbaugeräte

⁹⁵ AGBF (2008): Wasserstoff und dessen Gefahren – Ein Leitfaden für Feuerwehren. S. 2 – online unter https://www.fwvbw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf

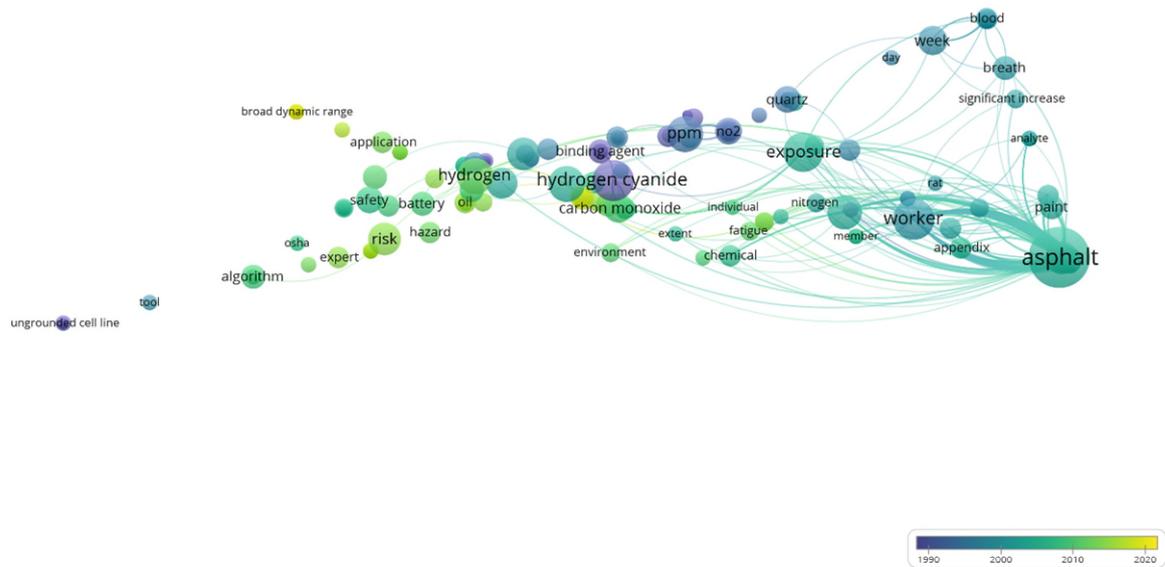


Abbildung 9: Auswertung der Scopus®-Literaturdatenbank nach den Stichworten "hydrogen" AND (vehicle* OR mobility) OR "hydrogen storage" OR "storage of hydrogen" OR "hydrogen propulsion" OR "fuel cell*" OR "green hydrogen" OR "production of hydrogen" OR "hydrogen economy" OR "hydrogen fuel*" in Kombination mit "occupational health" OR "occupational safety" OR "safe work". Die Farben repräsentieren die Erscheinungsjahre der Publikation, die Kreisgrößen die Worthäufigkeiten in den Publikationen (Quelle: iit 2020; Visualisierung: VOSviewer®).

4.2.3 Trends in den Antriebstechnologien

- Mit der Verbreitung neuartiger Antriebskonzepte steigt die Zahl der potenziell mit ihnen in Berührung kommenden Berufe. Dies gilt nicht nur für die Fahrzeuge selbst, sondern auch für die zu ihrem Betrieb notwendigen Infrastrukturen (Ladestationen, Wasserstoffnetz). All diese heute oder in Zukunft betroffenen Berufe müssen auf den richtigen Umgang mit den Technologien sowohl im Normalbetrieb als auch im Falle einer Unregelmäßigkeit/eines Unfalls vorbereitet werden. Eine Herausforderung ist hierbei das Erreichen der relevanten Akteure in der Fläche.
- Es wird erwartet, dass im Zuge der Herausbildung einer Wasserstoffwirtschaft zahlreiche neue Berufe entstehen, die heute noch nicht bekannt sind. Dementsprechend muss bei der Formulierung der entsprechenden Curricula darauf geachtet werden, dass Maßnahmen für Arbeitssicherheit und Gesundheit implementiert werden.
- Aufgrund des geringen Wirkungsgrades ist das Potenzial von synthetischen Kraftstoffen auf Basis von grünem Wasserstoff noch unklar. Diese aufgrund der Gewinnung mittels Power-to-Gas (*via* Elektrolyse und den dabei entstehenden Wasserstoff) auch eFuels genannten Stoffe erlauben prinzipiell die fortlaufende Verwendung von bestehenden Verbrennungsmotoren oder auch Düsentriebwerken.
- Aufgrund der Lebensdauer von Batterien für die Elektromobilität fallen gegenwärtig (Stand 2020) noch vergleichsweise wenige Altbatterien an. Durch den in den letzten Jahren zu beobachtenden deutlichen Nachfrageanstieg wird sich das Aufkommen in absehbarer Zeit deutlich erhöhen. Die heutigen Erfahrungen beruhen auf intensiv betreuten Pilotanlagen, nicht auf einem Routinebetrieb. Beim Auf- und Ausbau entsprechender technischer Kapazitäten für die stoffliche Verwertung oder aber die Nachnutzung als stationäre Batteriespeicher sind Maßnahmen zum Schutz vor unkontrollierten Entladungen aber auch vor Stäuben etc. sicherzustellen und beim Hochlauf der Kapazitäten eng zu monitoren/anzupassen.

4.3 Anwendungsfeld Recycling

Vor dem Hintergrund der Anstrengungen, das Prinzip der Kreislaufwirtschaft stärker zu implementieren, kommt dem Recycling und der stofflichen Verwertung von Abfällen eine wachsende Bedeutung zu. Dies gilt nicht nur allgemein für die Wiederverwertung von biologischen Materialien und Kunststoffen (vgl. „Green Chemistry“ und Bioökonomie auf Seite 11f.), sondern insbesondere auch für das Recycling von technischen Produkten – hier reicht die Spannbreite von Geräten der Telekommunikation wie Mobiltelefone über Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen und Kühlschränke bis hin zu Fahrzeugen und ganzen Industrieanlagen. Insbesondere dieses Recycling technischer Produkte, zu denen auch Solar- und Windenergieanlagen zählen, ist überdurchschnittlich unfallträchtig. Untersuchungen in den USA haben ergeben, dass die Zahl tödlicher Ereignisse bis zu siebenmal höher lag (Referenzjahr 2016) als der Durchschnitt über alle industriellen Sektoren. Verglichen mit allen Industrien kam es zudem zu mehr als fünfmal mehr Handverletzungen und mehr als dreimal mehr Verletzungen der oberen Extremitäten.⁹⁶ Auch wenn Recycling nur ein Teil der Kreislaufwirtschaft ist, wird an den genannten Referenzen bereits deutlich, welche Herausforderung diese für den Arbeits- und Gesundheitsschutz darstellen kann.

In einer aktuellen Foresight-Studie werden vier Hauptprobleme benannt, die voraussichtlich signifikante Konsequenzen für Arbeitsschutz und Gesundheit im Hinblick auf eine entstehende Kreislaufwirtschaft haben:

- Die Auswirkungen des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft auf die gesamte Produktionskette und die Rolle der Informations- und Kommunikationstechnologien: Wichtige Instrumente für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft und für die Prävention von Berufsrisiken.
- Wartung und Reparatur: Unerlässlich für eine bessere Haltbarkeit der Güter, neuer Kontext für die Arbeitsbedingungen.
- Recycling-Reshoring von (industriellen) Aktivitäten.
- Transport und Logistik: Eine unerwartete Entwicklung im Warenfluss, aber nicht zwangsläufig gleichbedeutend mit einer Zunahme der zurückgelegten Wegstrecken.⁹⁷

4.3.1 Erneuerbare Energien

Das Recycling von Photovoltaik-Modulen wird – je nach Perspektive – als große Herausforderung oder großer Markt beschrieben. Dabei beziehen sich die folgenden Ausführungen auf poly- und monokristalline Photovoltaikmodule, deren Marktanteil weltweit auf ca. 95 % (Deutschland: ca. 90 %) geschätzt wird. Zudem bestehen für viele Dünnschichtmodule, z. B. auf Cadmium-Tellurid-Basis (CdTe), bereits weitestgehend geschlossene Recycling-Kreisläufe aufgrund der Knappheit und des hohen Werts der verwendeten Materialien als auch ihrer Toxizität.⁹⁸ 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 Erneuerbaren Energien-Gesetzes an ihr Nutzungsende kommt, größere und stark wachsende Mengen an zu recycelnden PV-Modulen an. IRENA erwartet für das Jahr 2030 bereits ein potenzielles kumuliertes Recycling-Aufkommen von ca. 400.000 bis 1.000.000 t in Deutschland (Abbildung 10), weltweit

⁹⁶ Novakovich, J.; Anderson, V.P.; Eastlake, A. (2020): Wholesale Recycling: High Rates of Injuries and Illnesses. NIOSH Science Blog vom 01.07.2020 – online unter <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2020/07/01/wholesale-recycling/>

⁹⁷ Héry, M.; Malenfer, M. (2020): Development of a circular economy and evolution of working conditions and occupational risks—a strategic foresight study. Eur J Futures Res 8, 8, p. 4. <https://doi.org/10.1186/s40309-020-00168-7>

⁹⁸ Deng, R.; Chang, N.L.; Ouyang, Z.; Chong, C.M. (2019): A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 109 (2019) 532–550, S. 533.

kumuliert bis zum Jahr 2050 sogar bis zu 78 Mio. t.⁹⁹ Im Fokus der Diskussion stehen dabei neben der Glasabdeckung und dem Aluminiumrahmen insbesondere die wertvollen Rohstoffe wie Silizium, Blei, Zink, Zinn und Silber in der Solarzelle. Aufgrund der vormals eher geringen anfallenden Mengen an Photovoltaik-Modulen und des vergleichsweise großen Recycling-Aufwands wurde bislang ein Großteil auf Mülldeponien und in Verbrennungsanlagen entsorgt. Dies ändert sich nun massiv, getrieben durch die Skaleneffekte des zu erwartenden Recycling-Aufkommens, neuartigen Recyclingverfahren sowie neuen EU-Recycling-Vorschriften im Hinblick auf gesteigerter vorgeschriebene Sammel- und Recycling-Quoten für Modulhersteller (WEEE-Direktive: Waste Electrical & Electronic Equipment).¹⁰⁰

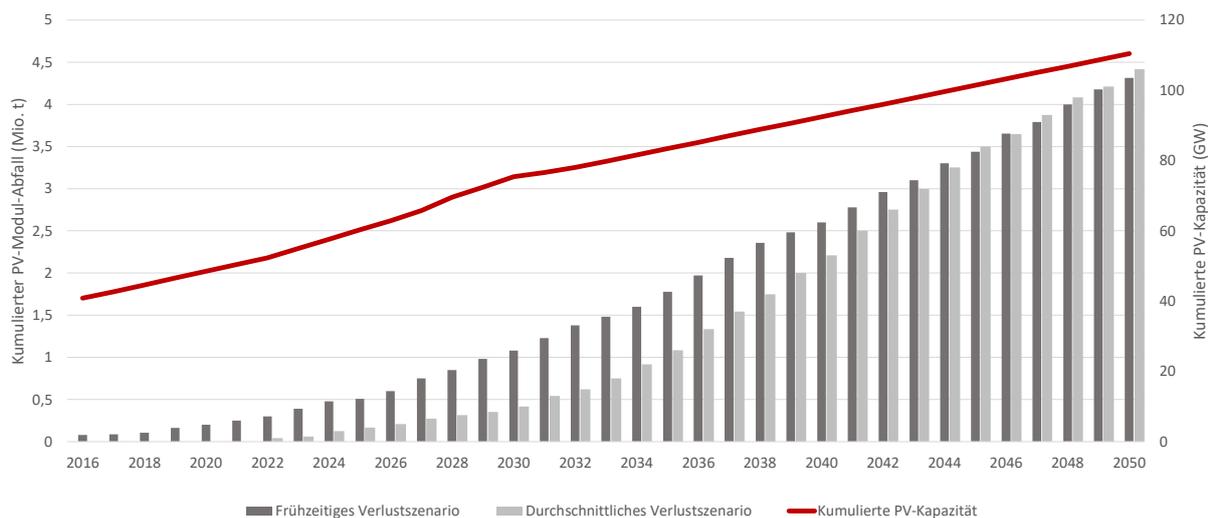


Abbildung 10: Erwartetes Recycling-Aufkommen für PV-Module in Deutschland bis zum Jahr 2050 (Quelle: IRENA 2016).

Während hierzu beispielsweise in Europa neue effiziente Recyclingverfahren entwickelt – etwa durch das Fraunhofer Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik im Rahmen des EU-geförderten ELSI Projekts (Industrial scale recovery and reuse of all materials from end of life silicon-based photovoltaic modules) – und große Recycling-Kapazitäten geschaffen werden, wie beispielsweise durch den Veolia-Konzern im südfranzösischen Rousset nahe Marseille, stellt sich die Frage, wie mit zukünftigen hohen Recycling-Aufkommen von mit toxischen Materialien wie Blei oder Cadmium belasteten Modulen beispielsweise in afrikanischen Schwellenländern umgegangen werden wird.¹⁰¹

Mit Blick auf globale Zusammenhänge ist festzustellen, dass insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern ein sprunghafter Ausbau von kleinen PV-Anlagen für einzelne Haushalte und sogenannte „Micro Grids“ für Dörfer und ländliche Gemeinschaften zu einer deutlichen Verbesserung der Bevölkerung mit Elektrizität führt. Eine fallbasierte Studie ausgewählter Länder zeigt, dass Länder wie Kenia aber insbesondere auch Bangladesch hier große Fortschritte machen.¹⁰² Da nicht zu erwarten ist, dass ausgediente PV-Module und ggf. vorhandene Batteriespeicher in (zukünftige) zertifizierte

⁹⁹ IRENA (2016): End-of-Life Management – Solar Photovoltaic Panels, S. 60 und S. 32 – online unter: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>

¹⁰⁰ Deng, R.; Chang, N.L.; Ouyang, Z.; Chong, C.M. (2019): A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 109 (2019) 532–550, S. 534.

¹⁰¹ Bakhiyi, B.; Labrèche, F.; Zayed, J. (2014): The photovoltaic industry on the path to a sustainable future - Environmental and occupational health issues. In: Environment International 73 (2014) 224–234, S. 226.

¹⁰² von Hirschhausen, C.; Ansari, D.; Banzer, F.; Dumitrescu, R.; Heinemann, G.; Kemfert, C. (2020): Stromzugang im Globalen Süden: Dezentrale erneuerbare Energiesysteme bieten echte Alternative. DIW Wochenbericht N. 48/2020, S. 891-890 – online unter https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.805123.de/20-48-3.pdf

Recyclingströme eingespeist werden, sondern vor Ort zu Lasten von Mensch und Umwelt verwertet werden, muss in jeglicher Hinsicht für die Definition, Umsetzung und Einhaltung von lokal realisierbaren Mindeststandards gesorgt werden. Insbesondere Bangladesch ist im Hinblick auf gefährliche Arbeitsbedingungen nicht nur durch die Katastrophe von „Rana Plaza“ ins Bewusstsein der Öffentlichkeit gedrungen, sondern auch durch seine zum Teil lebensgefährlichen „Abwrackwerften“¹⁰³ für Schiffe an der Küste des Golf von Bengalen: „Der Abwrackvorgang erfolgt bisher ganz überwiegend in Abwrackeinrichtungen, die hohe Ankaufspreise bieten, jedoch in den Bereichen Umweltschutz, Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit nur sehr niedrige Standards einhalten.“¹⁰⁴ Derartige Praktiken können das Gefährdungspotenzial beim Recycling der nun massenhaft verwendeten PV-Module multiplizieren (siehe in Abschnitt 4.1.2 die informelle Elektroschrottverwertung im ghanaischen Accra).

Analog zur Photovoltaik wird das Thema Windenergieanlagen-Rückbau und -Recycling ab den 2020er Jahren zunehmend in den Mittelpunkt rücken, da nun ebenfalls die ersten größeren EEG-geförderten Windparks aus der Förderung fallen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die anfallenden Millionen Tonnen Beton, Stahl oder Aluminium über bestehende Recyclingstrukturen verwertet werden können. Als deutlich problematischer werden dagegen die Rotorblätter beurteilt, die insbesondere aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (kurz GFK) sowie in deutlich geringerem Maße aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (kurz CFK) bestehen¹⁰⁵. Da es bislang relativ wenige Erfahrungen, Kapazitäten sowie Standardisierungen auf diesem Gebiet gibt, sind neben ökologischen gerade auch Aspekte des Arbeitsschutzes im Zusammenhang mit Rückbau und Recycling zu untersuchen. Laut Umweltbundesamt kann es z. B. beim Zerlegen der Rotorblätter zu Gefahrensituationen kommen, da von den beim „Sägen entstehenden Stäuben Risiken für Mensch und Umwelt ausgehen“.¹⁰⁶

Auch die weitere Verwertung von häufig verwendeten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) stellt laut UBA ein entsprechendes gesundheitliches Risiko dar, da z. B. bei der thermischen Behandlung lungengängige Partikel entstehen können. Ein weiteres Beispiel bezieht sich auf die teilweise Praxis des Rückbaus ohne Kraneinsatz, der vor allem auf dem „Umziehen“ einer Windenergieanlage (WEA) mittels entsprechender Kraftfahrzeuge geschieht. Zudem kommt es zur Verteilung von Splintern und Stäuben glasfaserverstärkter Kunststoffe (GFK) in der unmittelbaren Umgebung aber möglicherweise auch zu einer signifikanten Kontamination des lokalen Bodens durch „Restmengen an Betriebsflüssigkeiten“ aus der WEA. Neben dem beträchtlichen arbeitsschutztechnischen Risiko können stürzende WEA zudem zur Bodenverdichtung beitragen. Diese Beispiele verdeutlichen die Bedeutung der Etablierung und auch der Durchsetzung entsprechender Sicherheitsstandards. Denn gerade die gängige Praxis, im Rahmen des Rückbaus eine Vielzahl an Subunternehmern einzusetzen, kann laut der UBA-Untersuchung aufgrund des hohen Koordinationsaufwands und komplexer Verantwortlichkeitsbeziehungen „zu arbeitsschutzrechtlich bedenklichem Verhalten“ führen.¹⁰⁷

¹⁰³ Gwin, P. (2014): Schiffe verschrotten in Bangladesch. National Geographic, Deutsche Ausgabe, Heft 5/2014, S. 144-125 – online unter <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/schiffe-verschrotten-bangladesch>

¹⁰⁴ Die Bundesregierung (2018): Entwurf eines Gesetzes zu dem Internationalen Übereinkommen von Hongkong von 2009 über das sichere und umweltgerechte Recycling von Schiffen (Übereinkommen von Hongkong). Berlin, 25.05.2018 – online unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Gesetze/Gesetze-19/gesetz-vertragsgesetz-hkue-honkong.pdf?__blob=publicationFile

¹⁰⁵ Bundesverband Windenergie (2019): Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen, online unter: <https://www.windenergie.de/themen/anlagentechnik/publikationen-anlagentechnik/>

¹⁰⁶ Umweltbundesamt (2019): Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen, S. 91 ff.

¹⁰⁷ Umweltbundesamt (2019): Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen, S. 91 ff.

Das Thema Recycling wird für Windenergieanlagen in Europa künftig auch deshalb deutlich an Bedeutung gewinnen, da unverzichtbare metallische Rohstoffe wie Seltene Erden in Europa praktisch nicht vorkommen/gefördert werden; sie sind daher als kritische Rohstoffe zu betrachten. Um die Abhängigkeit von Importen zumindest teilweise zu vermindern, ist ein umfassendes Recycling nötig,¹⁰⁸ was wiederum die Bedeutung einer sicheren Arbeitsgestaltung in den korrespondierenden Prozessschritten unterstreicht.

¹⁰⁸ European Commission (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study. Brussels; ISBN 978-92-76-15336-8 – online unter <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42882/attachments/1/translations/en/renditions/native>

5 Zukünftige Entwicklungen und Handlungsansätze

Die umfassende Dekarbonisierung der Volkswirtschaften bietet nicht nur die Chance auf „grüne“ Wertschöpfung und Beschäftigung, sondern insbesondere auch auf Arbeitsplätze, die sich aufgrund des Einsatzes neuer und Hochtechnologien durch eine hohe Qualifizierung und korrespondierende Einkünfte auszeichnen. Da noch nicht alle Qualifikationsbedarfe mit Blick auf grüne Technologien absehbar sind, bietet es sich an, auch die Auswirkungen auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz zu ermitteln. Bei den korrespondierenden Branchen handelt es sich schon heute nicht mehr um Nischensektoren, in denen die entsprechenden Produkte entwickelt und hergestellt werden, sondern um etablierte und oftmals rasch wachsende Märkte. Da im Zuge der allgemeinen technologischen Entwicklung auch die technischen sowie Umwelt- und Sicherheitsstandards beständig gestiegen sind, ist eine moderne Fertigung (Industrie 4.0), wie sie gegenwärtig und zukünftig im Zuge des „Green Deals“ entsteht, im Durchschnitt effizienter, emissions- und gefahrenärmer, als beispielsweise konventionelle Industrien, die seit 50 Jahren existieren.

Da eine Industrie 4.0 davon geprägt ist, aus einer Vielzahl von Echtzeitinformationen und Sensordaten stets optimale Parameter für die effektive und effiziente Produktion und die weltweite Kopplung der Wertschöpfung bereitzustellen, kann der Wert der Digitalisierung auch für den Arbeitsschutz genutzt werden. So können (potenzielle) Gefahrenquellen nicht nur unmittelbar überwacht, sondern mittels Musterbildung und „predictive analytics“ prinzipiell auch antizipiert werden. Eine derartige Zielsetzung steht nach gegenwärtiger Einschätzung im Einklang mit der für Frühjahr angekündigten Europäischen Arbeitsschutzstrategie 2021 – 2027. Der Rat der Europäischen Union machte hierzu in seiner Mitteilung vom Dezember 2019 deutlich, dass insbesondere durch präventive Maßnahmen eine „Vision Zero“ mit Blick auf tödliche Arbeitsunfälle und -erkrankungen anzustreben sei.

Eine Datennutzung für Arbeits- und Gesundheitsschutz setzt jedoch voraus, dass die handelnden Akteure unter Wahrung des Datenschutzes Zugang zu den Daten erhalten und über die nötigen Qualifikationen verfügen, um mit diesen Daten im Sinne der Gefährdungsvermeidung/-entschärfung zu arbeiten. Ggf. müssen die Daten aus den Produktionsprozessen zudem ergänzt werden um Biomonitoringdaten – das US-amerikanische „NIOSH Center for Direct Reading and Sensor Technologies“ bietet hierfür Beispiele –, um negative Einflüsse auf den menschlichen Organismus erfassen zu können. Grundsätzlich bietet sich über ein „Big Data/Industry 4.0 for OSH“ die Möglichkeit, den Arbeits- und Gesundheitsschutz in einem datengestützten „rolling cycle“-Prozess zur Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz in die immer rascheren Innovations- und Produktionszyklen zu integrieren (doppelter Nutzen durch „Sensors for Production = Sensors for OSH“). Ein solcher Ansatz kann ggf. in Ergänzung/im Rahmen des „OSH-Barometers“ der EU-OSHA umgesetzt werden.

Der mit dem Strukturwandel einhergehende Systemwechsel in der Energiewandlung hin zu erneuerbaren Energien wird somit begleitet von Fertigungstechnologien, die geeignet sind, schädliche und ungewollte Einflüsse zu reduzieren. Die Kombination aus Grenzwertverschärfungen, Verbot bestimmter Substanzen/Produktionsmittel (zum Beispiel bleihaltiges Lötzin) und Technologien der Industrie 4.0 führen zu prinzipiell „sanfteren“ bzw. eigensicheren Technologie-Settings (Safety by Design), die auch für die Beschäftigten ein höheres Maß an Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz bedeuten. Die Bedeutung derartiger Mechanismen wird auch im Foresight-Bericht „Charting the course towards a more resilient Europe“ der Europäischen Kommission betont. Unter dem Eindruck des in Folge der Covid-19-Pandemie abermals gestärkten „Green Deal“ der Europäischen Kommission wird unter Gesichtspunkten des Umgangs mit Krisen die Rolle von Technologien und Produktionsregimen betont, die nicht nur die Erderwärmung nicht weiter antreiben, sondern die darüber hinaus generell eine möglichst geringe Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen – und zwar auch über Europa hinaus.

Dabei zeigen Beispiele wie die Green Chemistry, dass sich „sanfte“ Technologie-Settings positiv auf die Trias aus Umweltsicherheit, Produktsicherheit und Arbeitssicherheit auswirken. Auch die europäische REACH-Verordnung (EG 1907/2006) zur Bewertung und Zulassung von chemischen Substanzen zeigt

auf, wie Umwelt- und Arbeits-/Gesundheitsschutz auch institutionell zusammengeführt werden können (im Falle von Deutschland BMU/UBA und BMAS/BauA). Es ist daher anzustreben, Fragen der Arbeitssicherheit und Gesundheit stärker mit dem Schutz der Umwelt und Natur zu verschränken. Dies gilt insbesondere auf internationaler Ebene, da der Beginn und das Ende von Lieferketten über die Lebenszyklusphasen (also upstream und downstream der Endfertigung und Nutzung in Industrieländern) oftmals von prekären Umständen sowohl für die dort tätigen Menschen als auch für ihre direkte Umwelt gekennzeichnet sind. Vor dem Hintergrund eines Booms der Rohstoffnachfrage und eines nachfolgenden Abfallaufkommens im Bereich Elektromobilität und Erneuerbare Energien muss dafür gesorgt werden, dass internationale Umwelt- und Sicherheitsstandards formuliert und umgesetzt werden.

Innerhalb Europas formuliert die Rahmenrichtlinie für Arbeitssicherheit und Gesundheit (Direktive 89/391 EEC) einheitliche Mindestanforderungen; die Mitgliedsstaaten sind gehalten, strengere Regeln auf nationaler Ebene festzulegen (zum Beispiel das deutsche Arbeitsschutzgesetz). Fraglich ist, in welchem Rahmen die zuständigen Institutionen für Arbeitssicherheit und Gesundheit Themen wie globale Lieferketten adressieren. Es könnte notwendig sein, einen Mechanismus zu schaffen, der es den zuständigen Institutionen ermöglicht, auf der Arbeitsebene gemeinsame Sichtweisen zu entwickeln, um übergreifende Maßnahmen zu formulieren. Ziel müssen durchgängig sichere Wertschöpfungs- und Lieferketten insbesondere auch in Schwellen- und Entwicklungsländern unter Berücksichtigung eines schrittweisen Übergangs in eine Kreislaufwirtschaft sein.

Fazit

Die exemplarische Analyse der Auswirkungen von politisch induzierten „grünen“ Technologien (und darüber hinaus) auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz macht deutlich, dass sich für Industrieländer und Schwellen-/Entwicklungsländer zwei deutlich unterschiedliche Situationen ergeben. Da die Produktion der Technologien zumindest aktuell zu großen Teilen in Industrieländern erfolgt, ist es vergleichsweise einfach, die dort etablierten Schutz- und Sicherheitsregime im Zuge des technischen Fortschritts an die neuen Herausforderungen anzupassen. Dabei bieten 4.0-Technologien das Potenzial, auch den Arbeits- und Gesundheitsschutz auf eine neue, evidenzbasierte Ebene zu heben.

Anders stellt sich die Situation in Schwellen- und Entwicklungsländern dar, die oftmals weder für die Rohstoffgewinnung noch für die stoffliche Verwertung von Altgeräten über geeignete Prozesse, Regularien und Konditionen verfügen. Hier sind im Sinne der UN-Ziele für eine nachhaltige Entwicklung grundlegende Maßnahmen zu treffen, damit der grüne Übergang in Europa nicht zu Lasten von Mensch und Umwelt in diesen Ländern geht.

Handlungsansätze

- Strukturierter und international-partizipativer Prozess („Working Party“) zur Abschätzung der Anforderungen an den Arbeits- und Gesundheitsschutz parallel zu der Ermittlung beruflicher Qualifikationen für neue und grüne Technologien.
- Entwicklung eines internationalen Monitoring-Systems zur Erfassung der klimabedingten Gefährdungspotenziale und Formulierung gemeinsamer Standards zur Risikoabschätzung als Kernelemente einer gemeinsamen Forschungsagenda für Arbeits- und Gesundheitsschutz.
- Umsetzung einer Echtzeit-Gefährdungsbeurteilung in mit Industrie 4.0-Technologien ausgestatteten Fertigungsstätten und Arbeitsorten auf Basis von datengetriebenen OSH-Instrumenten; Entwicklung „digitaler Skills“ für OSH.
- Nutzung des technischen Fortschritts zur Etablierung Impact-arter und eigensicherer Herstellungs- und Nutzungsregime (Safety by Design) über den gesamten Lebenszyklus von Produkten (insbesondere vor dem Hintergrund einer wachsenden Kreislaufwirtschaft). Dabei integrierte Betrachtungsweise von Produkt-, Arbeits- und Umweltsicherheit.
- Implementierung wirksamer Mechanismen zur Sicherstellung des Arbeitsschutzes am Beginn (Rohstoffgewinnung) und am Ende (Abfallverwertung/Recycling) globaler Lieferketten.

Wir danken den Expert*innen der Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz der Europäischen Union (EU-OSHA), der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BauA) und dem Nationalen Institut für Arbeitssicherheit und Gesundheit der Vereinigten Staaten von Amerika (NIOSH), die uns bei der Anfertigung dieser Studie mit Ihren konstruktiven Anmerkungen und Reflexionen wertvolle Hinweise geliefert haben.

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.