

TEXTE

169/2021

Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen

Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht II: FALLBEISPIELE –

TEXTE 169/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3717 31 105 0

FB000625/2

Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen

Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und
Datengrundlagen für die Berechnung der
Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für
Ökobilanzen – Teilbericht II: FALLBEISPIELE –

von

Horst Fehrenbach, Mirjam Busch, Silvana Bürck,
Dr. Mascha Bischoff, Stefanie Theis, Joachim Reinhardt,
Judith Blömer
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Prof. Dr. Birgit Grahl
INTEGRAHL, Heidekamp

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

INTEGRAHL – Industrielle Ökologie
Schuhwiese 6
23858 Heidekamp

Abschlussdatum:

September 2020

Redaktion:

Fachgebiet I 2.5 Nachhaltige Raumentwicklung, Umweltprüfungen
Dr. Daniel Reißmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen

Ziel des Ressortforschungsvorhabens „Flächenrucksäcke für Güter und Dienstleistungen“ ist die Bereitstellung einer praktikablen Methode für die Einbeziehung von Fläche als Wirkungskategorie in Ökobilanzen. Dies beinhaltet neben einer transparenten methodischen Anleitung auch die Bereitstellung eines Grundstocks an Daten bzw. den Hinweis auf geeignete Datenquellen. Auf dieser Basis wurden vier Fallbeispiele bilanziert, die in diesem Teilbericht (II) dokumentiert werden.

In den vier Fallbeispielen werden die Flächenrucksäcke für folgende Produkte bzw. Dienstleistungen ermittelt:

- (1) der Strommix in Deutschland mit allen Energieträgern unter Einbeziehung der Rohstoffvorketten sowie der Umwandlung und Übertragung;
- (2) die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff sowie daraus erzeugten strombasierten Kraftstoffen auf Basis von Solarstrom in der Region Mittlerer Osten/Nordafrika (MENA);
- (3) bautechnische Tragelemente aus verschiedenen Materialien (Holz, Stahl, Stahlbeton);
- (4) Personen-Transport über 100 Kilometer mit Fokus auf verschiedene Antriebssysteme (E-Mobilität mit verschiedenen Stromoptionen, Diesel-Pkw mit B7 und Biodiesel aus verschiedenen Rohstoffen);

Die Ergebnisse sind für die temporäre Flächenbelegung und die Flächennutzungsänderung jeweils in Quadratmetern pro funktionale Einheit dargestellt und nach Naturfernepotenzial charakterisiert.

Abstract: Land rucksacks of goods and services

The project “Land rucksacks of goods and services” proposes a practical and operational method for including land use as an impact category in life cycle assessments. In addition to transparent methodological guidance, a comprehensive set of baseline input data and references to data sources are provided. In the following, four case studies modelling different products and services are presented.

The land rucksack case studies include the following products or services:

- (1) the average electricity mix in Germany including all energy sources, further raw material supply chains as well as conversion and transmission;
- (2) the production of "green" hydrogen as well as electricity-based fuels generated from it using solar power from the MENA region (Middle East & North Africa);
- (3) Structural load-bearing elements made of different materials (wood, steel, reinforced concrete);
- (4) Passenger transport over 100 kilometres assuming different propulsion systems (e-mobility with different electricity options, diesel cars with B7 and biodiesel from a range of feedstocks);

The results for each case study document temporary land occupation and land transformation, each in square metres per functional unit and characterised according to distance-to-nature potential.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung.....	15
Summary	30
1 Hintergrund zu diesem Teilbericht.....	45
1.1 Aufgabenstellung	45
2 Fallbeispiel 1: Strom	46
2.1 Welche Vergleichsoptionen werden betrachtet?	46
2.2 Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?	46
2.3 Verfügbare Datenquellen für die Flächenbelegung, die Flächennutzungsänderung und die Hemerobie.....	48
2.3.1 Daten zum deutschen Strommix	48
2.3.2 Daten zur temporären Flächenbelegung	48
2.3.2.1 Feste Biomasse	49
2.3.2.2 Biogas.....	50
2.3.2.3 Braunkohle.....	51
2.3.2.4 Weitere Komponenten	51
2.3.2.5 Gesamtschau der temporären Flächenbelegung der Energieträger	52
2.3.3 Daten zur Flächennutzungsänderung	52
2.3.4 Daten zur Hemerobie.....	54
2.4 Ergebnisse des Vergleichs	55
2.4.1 Temporäre Flächenbelegung	55
2.4.2 Flächennutzungsänderung.....	57
2.4.3 Hemerobie	58
2.5 Zusammenfassung Fallbeispiel Strom.....	63
3 Fallbeispiel 2: „Grüner“ Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe.....	66
3.1 Welche Technologien werden betrachtet?	67
3.2 Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?.....	68
3.3 Verfügbare Datenquellen für die Flächenbelegung, die Flächennutzungsänderung und die Hemerobie.....	68
3.3.1 Daten zur temporären Flächenbelegung	68

3.3.1.1	Daten zu solarthermischen Kraftwerken (CSP), Standort MENA-Region	68
3.3.1.2	Daten zu Photovoltaik, Standort MENA-Region	69
3.3.1.3	Daten zu Photovoltaik, Standort Deutschland	69
3.3.1.4	Daten zur Elektrolyse	70
3.3.1.5	Daten zur PtL-Produktion	70
3.3.1.6	Daten zur CO ₂ -Bereitstellung	71
3.3.1.7	Daten zur Meerwasserentsalzung und Deionisierung	71
3.3.2	Daten zur Flächennutzungsänderung	71
3.3.3	Daten zur Hemerobie	72
3.4	Ergebnisse des Vergleichs	72
3.4.1	Temporäre Flächenbelegung	73
3.4.2	Flächennutzungsänderung	74
3.4.3	Hemerobie	76
3.5	Zusammenfassung Fallbeispiel „grüner“ Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe	79
4	Fallbeispiel 3: Baustoffe	82
4.1	Welche Vergleichsoptionen werden betrachtet?	82
4.2	Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?	83
4.2.1	Brettschichtholzträger (nach DIN 1052 /24/ und EC5)	84
4.2.2	Stahlträger (nach DIN 1025-3)	84
4.2.3	Stahlbetonbalken (nach DIN 1045)	84
4.3	Verfügbare Datenquellen für die Flächenbelegung, die Flächennutzungsänderung und die Hemerobie	85
4.3.1	Daten zu Holz	85
4.3.2	Daten zu Beton	86
4.3.3	Daten zu Baustahl	87
4.4	Ergebnisse des Vergleichs	88
4.4.1	Temporäre Flächenbelegung	88
4.4.2	Flächennutzungsänderung	89
4.4.3	Hemerobie	90
4.5	Zusammenfassung Fallbeispiel Hallenträger aus verschiedenen Baustoffen	92
5	Fallbeispiel 4: Antriebsenergie für Personen-Transport	93
5.1	Welche Vergleichsoptionen werden betrachtet?	93
5.2	Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?	93
5.3	Welche Datenquellen stehen für die Flächenbelegung und die Flächennutzungsänderung zur Verfügung?	94

5.3.1	Daten zur temporären Flächenbelegung und Hemerobie.....	94
5.3.1.1	Daten zum Stromantrieb	94
5.3.1.2	Daten zur Biodiesel-Produktion.....	94
5.3.1.3	Daten zur Produktion von PtL.....	96
5.3.1.4	Daten zur Produktion von fossilem Diesel.....	96
5.3.1.5	Umrechnung auf Emission pro 100 km.....	96
5.3.2	Daten zur Flächennutzungsänderung	98
5.3.2.1	Daten zum Stromantrieb	98
5.3.2.2	Daten zur Biodiesel-Produktion.....	98
5.3.2.3	Daten zur Produktion von fossilem Diesel.....	99
5.3.2.4	PtL-Kraftstoff aus der MENA-Region	99
5.4	Ergebnisse des Vergleichs	100
5.4.1	Temporäre Flächenbelegung	100
5.4.2	Flächennutzungsänderung.....	101
5.5	Zusammenfassung Fallbeispiel Antriebssysteme	105
6	Schlussfolgerungen aus den Fallbeispielen	106
7	Quellenverzeichnis	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom mittlerer Deutscher Mix in 2019, im Vergleich mit dem Erneuerbaren Mix (mit Dachflächen-PV, aber ohne offshore-Windkraft und Wasserkraft), sowie für je 1 MWh Windkraft an Land, PV-FFA, Biogas und feste Biobrennstoffe; jeweils nur als Belegung und als Naturfernepotenzial.....	19
Abbildung 2:	Naturfernepotenzial (NFP) der Flächenbelegung der betrachteten Hallenträger.....	25
Abbildung 3:	Temporäre Flächenbelegung und NFP für die betrachteten Optionen verschiedener Antriebsenergien für einen Pkw über 100 km Fahrt.....	28
Figure 4:	Land occupation factors for 1 MWh of electricity from the average German mix in 2019, in comparison with the renewable mix (including rooftop PV but excluding offshore wind and hydropower), and for 1 MWh each of onshore wind, ground-mounted PV, biogas and solid biofuels; each as occupation only and distance-to-nature potential.	34
Figure 5:	Distance-to-nature potential (DNP) for temporary land occupation by the analysed different hall beams	40
Figure 6:	Temporary land occupation and DNP for the analysed options of different propulsion technologies for a passenger car journey of 100 km.....	43
Abbildung 7:	Systemraum zur Bestimmung der Flächenbelegung durch die Stromerzeugung	47
Abbildung 8:	Anteile fester Biomasse zur Stromerzeugung in Deutschland	49
Abbildung 9:	Flächenbelegungs-Faktor für 1 MWh Strom mittlerer deutscher Mix in 2019, differenziert nach Anteilen der einzelnen Energieträger	56
Abbildung 10:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh mittleren deutschen Strommix in 2019, im Vergleich mit dem Erneuerbaren Mix (mit Dachflächen-PV, aber ohne Offshore-Windenergie und Wasserkraft), sowie für je 1 MWh Windenergie an Land, PV-FFA, Biogas und festen Biobrennstoffe	57
Abbildung 11:	Vergleich der Flächennutzungsänderung unterschiedlicher Energieträger für 1 MWh Strom.....	58
Abbildung 12:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom mittlerer Deutscher Mix in 2019, differenziert nach Anteilen der einzelnen Energieträger und charakterisiert in Naturfernepotenzial	59
Abbildung 13:	Flächenbelegungs-Faktoren charakterisiert in Naturfernepotenzial für eine MWh Strom mittlerer Deutscher Mix in 2019, im Vergleich mit dem Erneuerbaren Mix sowie für	

	je 1 MWh Windkraft (an Land), PV-FFA, Biogas und festen Biobrennstoffen.....	60
Abbildung 14:	Vergleich der Flächennutzungsänderung charakterisiert nach Naturfernepotenzial durch unterschiedliche Energieträger(mixe) für 1 MWh Strom	61
Abbildung 15:	Normierung der NFP-Ergebnisse für Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung anhand des durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauchs von 7,1 MWh pro Jahr; der Wert 1 EDW entspricht dabei dem durch auf 1 Einwohner*in im Durchschnitt verursachten NFP durch Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung.	62
Abbildung 16:	Schematische stark vereinfachte Herstellung von „grünem“ Wasserstoff bzw. strombasiertem/synthetischem Kraftstoff	67
Abbildung 17:	Flächenbelegungs-Faktoren für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff an den Standorten Deutschland mittels PV-FFA und MENA-Region mittels CSP	73
Abbildung 18:	Flächenbelegungs-Faktoren für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoffs an den Standorten Deutschland mittels PV-FFA und MENA-Region mittels CSP	74
Abbildung 19:	Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff, Standort Deutschland (PV-FFA) und Standort MENA-Region (CSP)	75
Abbildung 20:	Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoff, Standort Deutschland (PV-FFA) und Standort MENA-Region (CSP)	75
Abbildung 21:	Flächenbelegung, charakterisiert nach Hemerobieklassen, für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)	76
Abbildung 22:	Flächenbelegung, charakterisiert nach Hemerobieklassen, für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)	77
Abbildung 23:	Hemerobie der Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)	78
Abbildung 24:	Hemerobie der Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)	79
Abbildung 25:	Aufbau der drei Trägersysteme (Seitenansicht).....	83
Abbildung 26:	Temporäre Flächenbelegung der betrachteten Hallenträger	89
Abbildung 27:	Flächennutzungsänderung der betrachteten Hallenträger.....	90
Abbildung 28:	Naturfernepotenzial der temporären Flächenbelegung durch die betrachteten Hallenträger.....	91

Abbildung 29:	Naturfernepotenzial der Flächennutzungsänderung durch die betrachteten Hallenträger.....	91
Abbildung 30:	Temporäre Flächenbelegung und NFP für die betrachteten Optionen verschiedener Antriebsenergien für einen Pkw über 100 km Fahrt.....	101
Abbildung 31:	Flächennutzungsänderung und NFP für die betrachteten Optionen verschiedener Antriebsenergien für einen Pkw über 100 km Fahrt.....	102
Abbildung 32:	Normierung der NFP-Ergebnisse für Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung anhand der durchschnittlichen Pro-Kopf-Fahrleistung von 7.590 gefahrene PKW-km pro Jahr; der Wert 1 EDW entspricht dabei dem durch auf 1 Einwohner*in im Durchschnitt verursachten NFP durch Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung.	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fallbeispiele für Flächenrucksäcke im Rahmen des Projekts	45
Tabelle 2:	Anteile der Energieträgerarten zur Bruttostromerzeugung in Deutschland 2019	48
Tabelle 3:	Flächenbelegung für feste Biobrennstoffe.....	50
Tabelle 4:	Datengrundlage für die temporäre Flächenbelegung zur Erzeugung der Biogassubstrate	50
Tabelle 5:	Zusammenfassung der Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom nach Energieträgern	52
Tabelle 6:	Zusammenfassung der Flächennutzungsänderungs-Faktoren für 1 MWh Strom nach Energieträgern	53
Tabelle 7:	Zusammenfassung der Bandbreite der Hemerobieklassen nach Energieträgern.....	54
Tabelle 8:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom aus CSP-Anlagen, Standort MENA-Region	69
Tabelle 9:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom aus PV-FFA, Standort MENA-Region	69
Tabelle 10:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom aus PV-FFA, Standort Deutschland.....	70
Tabelle 11:	Stromverbrauch für die Herstellung von „grünem Wasserstoff“ und strombasiertem Kraftstoff.....	73
Tabelle 12:	Spezifische Flächenbelegung, Hemerobieklassen und Naturfernepotenzial für Weißtannen und Fichten.....	86
Tabelle 13:	Spezifische Flächenbelegung und Hemerobieklassen.....	87
Tabelle 14:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh EE-Strommix, Windenergie (an Land) und PV-FFA.....	94

Tabelle 15:	Flächenbelegungs-Faktoren für gefahrene 100 km durch ein mit EE-Strom angetriebenes Elektrofahrzeug	94
Tabelle 16:	Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MJ diverser Kraftstoffe sowie für gefahrene 100 km durch einen Diesel-Pkw	97
Tabelle 17:	Flächenbelegungs-Faktoren für die Verkehrsfläche eines Pkw für 1 Personenkilometer (Pkm)	97
Tabelle 18:	Faktoren für die Flächennutzungsänderung für gefahrene 100 km durch einen batterieelektrischen Pkw.....	98

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
aa-eq.	artificial area equivalent
AEL	Alkalische Elektrolyse
aF-Äq.	Artifizielle-Fläche-Äquivalent
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik
B7	Dieselmkraftstoff mit einer Beimischung von maximal 7% (Volumenprozent) Biodiesel zu konventionellem Diesel
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BWI-3	Dritte Bundeswaldinventur
CEM I	Portlandzement
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CPO	Crude palm oil (Rohpalmöl)
CSP	Concentrating Solar Power (dt.: Konzentrierende Solarkraft, solarthermische Kraftwerke)
DAC	Direct Air Capture (dt.: CO ₂ -Abscheidung aus der Atmosphäre)
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DNP	Distance to nature potential
EE	Erneuerbare Energie
FT	Fischer-Tropsch-Synthese
H₂	Wasserstoff
LCA	Life Cycle Assessment (dt.: Ökobilanz)
MENA	Middle East North Africa (dt.: Region Naher Osten Nordafrika)
NawaRo	nachwachsende Rohstoffe
NB	Nota bene
NFP	Naturfernepotenzial
PEM-EL	Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis (dt.: Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse)
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PME	Palmölmethylester
PtL	Power-to-Liquid (dt.: Konversion von Strom zu flüssigen Sekundärenergieträgern)
PtX	Power-to-X (dt. hier: Konversion von Strom zu flüssigen oder gasförmigen Sekundärenergieträgern)
PV	Photovoltaik-Anlage
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlage
RME	Rapsmethylester
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry (wissenschaftliche Gesellschaft der Ökotoxikologie und Umweltchemie)

Abkürzung	Beschreibung
TREMOD	Transport Emission Model
UBA	Umweltbundesamt
UCO	Used cooking oil (Altspeiseöl)
UNEP	United Nations Environment Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)

Zusammenfassung

Zum Ressortforschungsvorhaben *Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen* wurden drei Berichte angefertigt. Teilbericht I stellt die zugrundeliegende Methodik dar. Der hier vorliegende Teilbericht II beschreibt die Ergebnisse eines Praxistests dieser Methode anhand von vier Fallbeispielen. Teilbericht III dient der Dokumentation und Erläuterung eines Grundstocks an Daten bzw. liefert Hinweise auf Datenquellen.

Anlass und Aufgabenstellung

Das Instrument der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) bietet die Möglichkeit, systemübergreifende Analysen und Bewertungen unter Einbezug zahlreicher Umweltwirkungen zu erstellen. Mit dem Lebenswegprinzip können somit alle Arten von Produkten und Dienstleistungen umfassend untersucht und Schwerpunkte der Umweltlasten transparent gemacht werden, anhand derer Handlungsempfehlungen zur Minimierung dieser Lasten begründet werden können.

Die Modelle zur Berücksichtigung von Umweltwirkungen in der Ökobilanz werden entsprechend der üblichen Dynamik neuer Forschungserkenntnisse weiterentwickelt. Dabei gibt es Wirkungskategorien, für die wenig Dynamik in der Ausgestaltung der Modelle besteht (z.B. Klimawandel) und solche, bei denen etliche Modelle existieren, diese jedoch in der Forschung derzeit nicht konsensfähig sind.

Zu letzteren ist die Flächennutzung zu zählen: Sie stellt für die internationale Fachwelt seit Jahren eine Herausforderung dar. Die UNEP¹/SETAC²-Life Cycle Initiative hat die Flächenbewertung zu einem wesentlichen Schwerpunkt erhoben, zur Beurteilung von Flächennutzung in Ökobilanzen liegen mehrere Ansätze vor z. B. (de Baan et al. 2013; Brandão / Milà i Canals 2013; Chaudhary / Brooks 2018; Curran et al. 2016; Koellner et al. 2013; Lindner et al. 2019; Vidal-Legaz et al. 2016).

Auch das Umweltbundesamt (UBA) hat eine Methode für die Wirkungskategorie Flächennutzung empfohlen (Schmitz / Paulini 1999). In diesem Ansatz wird die Qualität von Fläche durch den Grad der menschlichen Eingriffsintensität definiert. Der aus der Landschaftsökologie stammende Begriff Hemerobie hat sich hierfür etabliert. Die Methode wurde von (Fehrenbach et al. 2015) weiterentwickelt und vielfach angewendet. Ein großes Hindernis für die breite Anwendung dieses Ansatzes stellen jedoch die Verfügbarkeit belastbarer generischer Daten für Produkte und Dienstleistungen dar und die methodische Abdeckung jeglicher Art von Flächennutzung. Der Ansatz bedarf somit methodischer Weiterentwicklung und einer Verbesserung der Datengrundlagen.

Beides sind zentrale Aufgaben dieses Forschungsprojekts, welches abschließend einen Vorschlag für eine Einbindung der Daten in eine fortschreibungsfähige Datenbank erarbeitet.

Die Anwendbarkeit der in Teilbericht I beschriebenen Methodik basierend auf der in Teilbericht III zusammengestellten Datengrundlage wird in diesem Teilbericht II anhand von vier Fallbeispielen überprüft:

- Der mittlere Strommix in Deutschland mit allen, insbesondere den erneuerbaren Energieträgern unter Einbeziehung der Rohstoffvorketten sowie der Umwandlung und Übertragung;

¹ United Nations Environment Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)

² Society of Environmental Toxicology and Chemistry (wissenschaftliche Gesellschaft der Ökotoxikologie und Umweltchemie)

- ▶ Die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff (H_2) sowie daraus erzeugten strombasierten Kraftstoffen auf Basis von Solarstrom in der MENA-Region (Middle East North Africa, dt.: Region Naher Osten Nordafrika);
- ▶ Bautechnische Trageelemente aus verschiedenen Materialien (Holz, Stahl, Stahlbeton);
- ▶ Personen-Transport über 100 Kilometer mit Fokus auf verschiedene Antriebssysteme (E-Mobilität mit verschiedenen Stromoptionen, Diesel-Personenkraftwagen (Pkw) mit B7³ und Biodiesel aus verschiedenen Rohstoffen).

Um die Ergebnisse vor dem Hintergrund möglicher Alternativen interpretieren zu können, werden entsprechende Vergleichsoptionen berechnet. So wird für das Fallbeispiel Strom der Flächenrucksack des Stroms aus dem deutschen Stromnetz, dem Erneuerbare-Energien (EE)-Strommix und den einzelnen erneuerbaren Energieträgern ermittelt und verglichen. Das Fallbeispiel „grüner“ Wasserstoff/synthetischer Kraftstoff zeigt die Unterschiede im Flächenbedarf für die Herstellung dieser beiden Stoffe auf, jeweils basierend auf Strom aus Solaranlagen in der MENA-Region im Vergleich zu Strom aus Photovoltaik-Anlagen (PV) mit Standort Deutschland. Für das Fallbeispiel Baustoffe werden als Vergleichsoptionen Stahlbetonträger, Stahlträger und Schichtholzträger betrachtet. Beim Fallbeispiel Personen-Transport werden die Ergebnisse des Mittelklasse-Pkw mit der Antriebsenergie Diesel (B7) und Biodiesel und die Ergebnisse des Elektrofahrzeugs mit (EE) betrachtet.

Fallbeispiel 1: Strom

Betrachtungsebene:

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird sowohl Strom aus dem deutschen Stromnetz (durchschnittlicher Produktionsmix im Jahr 2019), Strom aus einem mittleren Mix an erneuerbaren Energien als auch Strom jeweils aus den einzelnen erneuerbaren Energieträgern betrachtet.

Die Systemgrenze für die Produktion von Strom umfasst sowohl die Rohstoffgewinnung der Energieträger (fossile Rohstoffe, Uranerz, feste Biomasse (Holz) und Biomasse für die Biogasproduktion), als auch die Infrastrukturen. Zu letzteren zählen thermische Kraftwerksanlagen (Konversion von fossilen oder biogenen Primärenergieträgern), Anlagen zur direkten Konversion von Wind und Sonne und Übertragungsnetze (Einrichtungen zum Transport von Strom, Transformation). Anlagen auf bestehenden Bauwerken (z. B. Dachflächen-Photovoltaik) führen nicht zu zusätzlicher Flächenbelegung. Da Wasserflächen bislang methodisch nicht abgedeckt sind, werden Offshore-Windenergieanlagen und Wasserkraftwerke nicht betrachtet.

Daten

Für die Berechnung des Flächenrucksacks von Strom sind Daten zur Flächenbelegung, Flächennutzungsänderung und zur Hemerobie erforderlich. Diese Datensätze finden sich im Teilbericht III.

Für den deutschen Strommix werden die Anteile der einzelnen Energieträger am deutschen Strommix aus den Bilanzen der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat 2020) und der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) entnommen. Diesen Angaben zufolge hat Braunkohle mit 19,3 % den größten Anteil am deutschen Strommix, gefolgt von Wind (onshore (17,1 %)) und Erdgas (15,4 %). Weitere betrachtete erneuerbare Energieträger sind Bio-

³ Dieseldieselkraftstoff mit einer Beimischung von maximal 7% (Volumenprozent) Biodiesel zu konventionellem Diesel

gas (5,4 %), Photovoltaik-Freiflächenanlage (PV-FFA) (2,4 %) und die festen Biobrennstoffe (1,8 %).

Bei der Umrechnung der temporären Flächenbelegung der einzelnen Energieträger auf Strom werden die Flächenbelegungsdaten der Rohstoffe sowie der verschiedenen Infrastrukturen (Kraftwerksanlagen, Übertragungsnetze etc.) aggregiert. Dabei werden auch Flächenbelegungen außerhalb Deutschlands einbezogen, z.B. Kohleabbau oder Erdgasgewinnung und Transport (Pipelines) in den Ländern, aus denen die Rohstoffe importiert werden.

Für **feste Biomasse** wird eine Flächenbelegung nur bei direkter Holzentnahme aus dem Wald bzw. für die Nebenprodukte der Holzverarbeitung (Sägerestholz und sonstiges Industrierestholz) angerechnet. Altholz und Landschaftspflegeholz wird keine Flächenbelegung zugerechnet. Nach Daten von (Döring et al. 2018) beruht nur ein Anteil von 25 % der zur Stromerzeugung genutzten festen Biomasse auf direkt eingesetztem Waldholz, Sägerestholz und sonstigem Industrierestholz. Für diesen Anteil wird auf Basis der Holzentnahme nach der dritten Bundeswaldinventur (BWI-3) (BMEL 2015)⁴ und der mittleren Wirkungsgrade von Biomassekraftwerken eine temporäre Flächenbelegung von $441 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{MWh}$ Strom errechnet.

Für **Biogas** erfordert die Betrachtung der Flächenbelegung eine Differenzierung nach den verschiedenen Biogassubstraten. Die mittleren Anteile der Substrate entstammen (Daniel-Gromke et al. 2017), die Biogaserträge aus (KTBL 2013). Flächenerträge und weitere relevante Daten können Teilbericht III entnommen werden. Im Mittel ergeben sich $57,8 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{GJ}$ Biogas oder $517 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{MWh}$ Strom.

Die Datengrundlage für die Vorkette von **Braunkohle** bildet die (Statistik der Kohlenwirtschaft 2019). Für den Abbau einer Tonne Braunkohle ergibt sich eine temporäre Gesamt-Belegung von ca. $5 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{t}$ Braunkohle bzw. $5,4 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{MWh}$ Strom (angesetzter mittlerer Nettowirkungsgrad von 38 % nach (UBA 2021)), welche sowohl die Betriebsfläche umfasst ($3,2 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{t}$ Braunkohle), als auch die Fläche, die nach dem Abbau einer Nichtnutzung unterliegt ($0,54 \text{ m}^2$).

Für die anderen, überwiegend importierten Energieträger wie Erdgas, Steinkohle und Erdöl liegen die Datengrundlagen nicht in dieser hohen Differenzierung vor. Für sie werden Flächenbelegungsdaten aus (ecoinvent 2020) herangezogen. Auch hier sind Abbauflächen und Infrastrukturen vollständig einbezogen.

Detaillierte Darstellungen zu den Daten für **Umwandlung/Konversion**, (v.a. Kraftwerke) finden sich in Teilbericht III. Die Flächenbelegung der **Übertragung** beruht auf Daten der (Bundesnetzagentur 2021) sowie auf Auswertungen durch Consentec im Rahmen der Langfristszenarien (Pfluger et al. 2018). Hierfür wird allen Energieträgern eine Flächenbelegung von etwa $0,5 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{MWh}$ Strom angerechnet.

Bezüglich der **Flächennutzungsänderung** wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens für die meisten Energieträger belastbare Daten identifiziert bzw. abgeleitet. Dies ist nicht für alle Bereiche der Vorkette der Fall. So stehen für die importierten Rohstoffe wie Steinkohle, Erdöl und Erdgas auch in der (ecoinvent 2020)-Datenbank keine Daten zur Verfügung. Da Kraftwerke die zum Bereich Konversion/Umwandlung der Vorkette gehören jedoch eine äußerst geringe Flächennutzungsänderung aufweisen und in Deutschland der Zubau von thermischen Kraftwerken in den letzten zehn Jahren eher überschaubar gewesen ist, wird davon ausgegangen, dass diese Datenlücken im Ergebnis keinen nennenswerten Einfluss haben werden.

⁴ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Etwas anders einzuschätzen sind die Datenlücken bei den Rohstoffen, da z. B. Steinkohle keinen unerheblichen Anteil an der Bruttostromerzeugung Deutschlands einnimmt und in mehreren Importländern der Abbau im Tagebau erfolgt. Um hierfür Datensätze zu generieren, bedarf es eingehender Analysen und Primärdatenrecherche zum Abbau in diesen Ländern, was im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht geleistet werden konnte. Für das Fallbeispiel wird die Abdeckung mit Daten für eine richtungsweisende Aussage dennoch als ausreichend gewertet.

Ausgehend von den Angaben zur Flächennutzungsänderung in Teilbericht III weisen Energieträger mit hohem Flächenzuwachs auch die höchsten Faktoren zur Flächennutzungsänderung auf. Dies sind primär die PV-FFA (mit $2,4 \text{ m}^2/\text{MWh Strom}$) und Biogas (mit $1,4 \text{ m}^2/\text{MWh Strom}$). Braunkohle mit ihrem über die Jahre vergleichsweise kontinuierlichen Flächenzuwachs liegt bei $0,11 \text{ m}^2/\text{MWh Strom}$, deutlich vor der Windenergie auf Land mit $0,049 \text{ m}^2/\text{MWh Strom}$. Da die Waldfläche in Deutschland netto kaum zuwächst, liegt auch die Flächennutzungsänderung durch feste Biobrennstoffe praktisch bei null. Auch die Übertragung weist im Mittel der letzten Jahre nur eine geringfügige Ausdehnung auf und errechnet sich auf weniger als $0,003 \text{ m}^2/\text{MWh Strom}$.

Die Bestimmung der Hemerobie der belegten Flächen kann Teilbericht III entnommen werden. Insgesamt betrachtet variiert die Hemerobie von Hemerobiekategorie II (anteilig) bei festen Biobrennstoffen bis zu Hemerobiekategorie VII bei beispielsweise Braunkohle oder Infrastrukturen (z. B. Kraftwerke).

Ergebnisse

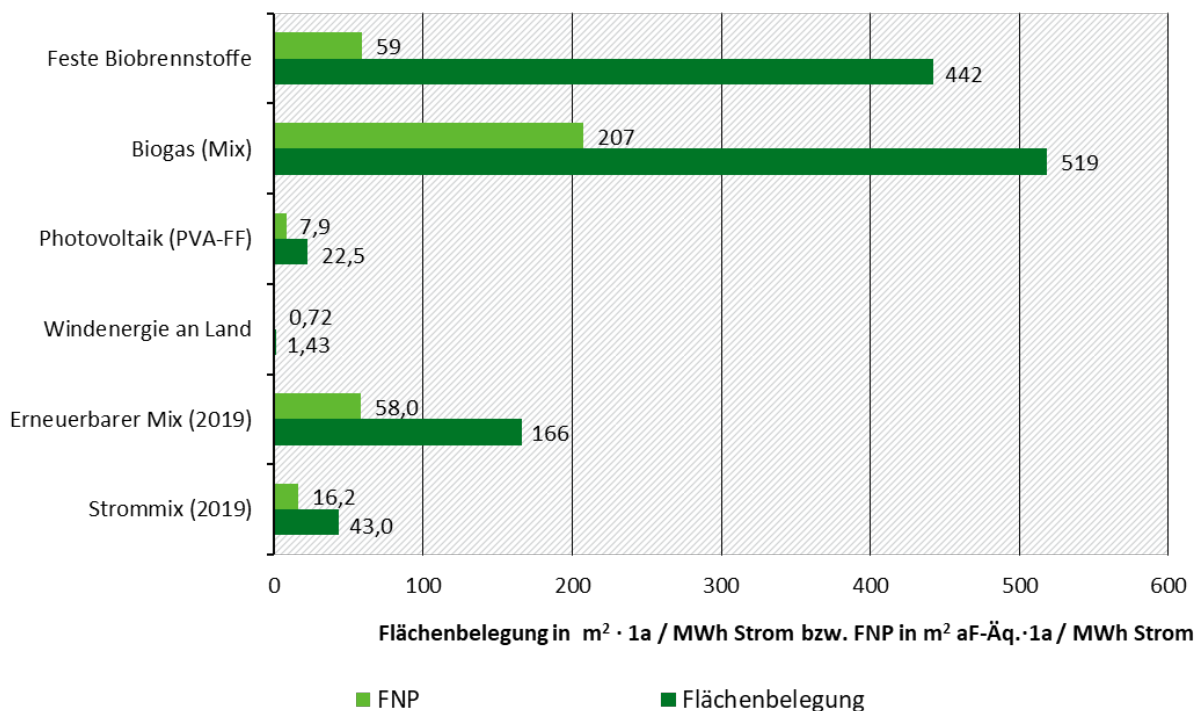
In Abbildung 1 sind die wesentlichen Ergebnisse zur **temporären Flächenbelegung** zusammengefasst. Der mittlere Strommix 2019 reiht sich dabei ein zwischen dem einerseits mit deutlich höheren Flächenbelegungen verbundenen Strom aus Biogas und fester Biomasse und dem andererseits weniger flächenintensiven Strom aus PV-FFA und Windenergie (auf Land). Der Flächenbelegungsfaktor für den Strommix wird dabei zu über 75 % durch Biogas dominiert, weitere 18 % sind den festen Biobrennstoffen zuzurechnen. Auf die anderen Energieträger entfallen <3,3 %. Durch die Beiträge von Biogas und fester Biomasse ist auch der EE-Mix viermal höher als der mittlere Strommix. Biogasstrom liegt sogar beim Zwölfwachen, wobei im Biogasmix auch Gülle und Bioabfall berücksichtigt sind, die als Substrate mit keiner Flächenbelegung verbunden sind.

Wie Abbildung 1 ebenfalls zeigt, verschieben sich die Verhältnisse beim nach Hemerobie charakterisierten Naturfernepotenzial (NFP) deutlich bei der festen Biomasse. Der durchschnittliche Charakterisierungsfaktor liegt hier bei 0,13 (erkennbar als Relation zwischen den beiden Balkenwerten im Diagramm). Bei den meisten anderen Energieträgern bzw. Mixen liegt der Faktor zwischen 0,35 und 0,54. Auffällige Verschiebungen ergeben sich daher nur für die feste Biomasse, deren NFP gleichauf liegt mit dem EE-Mix. Dessen nachteilige Bewertung gegenüber dem allgemeinen Strommix beruht hier nur mehr auf dem Anteil an Strom aus Biogas.

Auch bei der **Flächennutzungsänderung** dominieren die Beiträge bestimmter erneuerbarer Energieträger. Für den Strommix ($0,047 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.}/\text{MWh Strom}$) wie auch für den EE-Mix ($0,11 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.}/\text{MWh Strom}$) tragen Biogas mit $0,390 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.}$ und PV-FFA mit $0,26 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.}$ pro MWh Strom maßgeblich zum Ergebnis bei. Feste Biomasse trägt nichts zur Flächennutzungsänderung bei. Dies ist auch ein Grund, weswegen sich auch im NFP an der Rangfolge der einzelnen Energieträger bzw. Mixe nichts Wesentliches ändert. Bei PV-FFA zeigt sich jedoch ein deutlicher Unterschied zwischen Flächennutzungsänderung in Quadratmetern und als NFP: PV-FFA weist aufgrund des starken relativen Zuwachses rein in m^2 die höchste Flächennutzungsänderung unter den betrachteten Energieträgern auf. Da die Hemerobie auf der zusätzlichen Fläche nur geringfügig gegenüber der Ausgangslage zunimmt, reduziert sich das NFP im Vergleich deutlich.

Insgesamt betrachtet wird durch das Fallbeispiel nochmals deutlich, dass der größte Beitrag zu den Flächenrucksackergebnissen von Strom aus der Rohstoffbereitstellung resultiert und dies in besonderem Maße, wenn der Rohstoff aus Anbaubiomasse besteht. In deutlich geringerem Umfang tragen infrastrukturelle Einrichtungen (Konversionsanlagen, Übertragungsnetze) zu den Ergebnissen bei. Dies zeigt sich sowohl für die Flächenbelegung wie für die Flächennutzungsänderung.

Abbildung 1: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom mittlerer Deutscher Mix in 2019, im Vergleich mit dem Erneuerbaren Mix (mit Dachflächen-PV, aber ohne offshore-Windkraft und Wasserkraft), sowie für je 1 MWh Windkraft an Land, PV-FFA, Biogas und feste Biobrennstoffe; jeweils nur als Belegung und als Naturfernepotenzial



Erläuterung: Die Einheit aF-Äq. steht für artifizielle-Fläche-Äquivalent

Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Fallbeispiel 2: „Grüner“ Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe

Betrachtungsebene

In einer aktuellen Studie zur Klimaneutralität Deutschlands bis 2050 (Dambeck et al. 2020) wird beschrieben, dass für ein klimaneutrales Energiesystem Wasserstoff neben Strom eine sehr große Rolle spielen wird. Die Länder der sogenannten MENA-Region (Middle East and North Africa) werden aufgrund der im Vergleich zu Deutschland sehr hohen direkten Sonneneinstrahlung als vorteilhafte Standorte für Solarenergie eingeschätzt und könnten somit einen signifikanten Anteil des künftigen Bedarfs an regenerativen Energien decken.

In diesem Fallbeispiel werden die temporäre Flächenbelegung, die Flächennutzungsänderung und das Naturfernepotenzial der Fläche für die Bereitstellung von Solarenergie in der MENA-Region und in Deutschland betrachtet und, darauf aufbauend, die Umwandlung der erzeugten

Energie in sogenannten „grünen“ Wasserstoff⁵ sowie dessen Weiterverarbeitung zu strombasiertem Kraftstoff. Die Ergebnisauswertung erfolgt für die Herstellung einer MWh Wasserstoff und einer MWh strombasierten Kraftstoffes, jeweils basierend auf in der MENA-Region und in Deutschland hergestellter Solarenergie.

Zur Berechnung der Flächenrucksäcke von grünem Wasserstoff und synthetischem Kraftstoff werden für folgende Technologien die Flächenbelegungen, Flächennutzungsänderungen und Naturfernepotenziale ermittelt:

- ▶ Strom aus solarthermischen Kraftwerken (sog. CSP-Kraftwerke; engl. Concentrating solar power plants): Parabolrinnen-Kraftwerke und Solarturmkraftwerke mit Standort MENA-Region
- ▶ Strom aus einer Freiflächen-Photovoltaik-Anlage (PV-FFA) in Marokko (stellvertretend für die MENA-Region) sowie aus einer PV-FFA in Deutschland
- ▶ Umwandlung des Stroms zu „grünem“ Wasserstoff (H₂) per Elektrolyse
- ▶ Wasseraufbereitung/-entsalzung
- ▶ CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre (engl. direct air capture, kurz DAC)
- ▶ Power-to-Liquid-Prozess (PtL) zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Für das Fallbeispiel wurden Vereinfachungen vorgenommen und die Systemgrenze eng gefasst. Der Fokus liegt auf den aufgelisteten Prozessen. Komponenten wie z.B. die Herstellung der Anlagen und damit verbundene Infrastruktur, Hilfs- und Betriebsstoffe, Vorketten (z.B. für die Parabolspiegel oder PV-Module), Transporte, Übertragungsnetze etc. wurden hier nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Wirkungsbeiträge von Infrastrukturen mit hohen Durchsätzen über die Lebensdauer, ähnlich wie in vielen Ökobilanzen, auch hier das Ergebnis nicht entscheidend beeinflussen.

Daten

Die **temporäre Flächenbelegung** der CSP-Kraftwerke in der MENA-Region unterscheidet sich mit $11,3 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ Strom nur geringfügig von der temporären Flächenbelegung von $11,5 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ Strom der PV-FFA in der gleichen Region. Die Angaben gründen auf Literaturdaten und wurden auch unter Einbeziehung von Satellitenbilddauswertungen weiter in versiegelte, überschirmte sowie Rand- und Zwischenflächen aufgeteilt. Im Falle des PV-Stroms aus Deutschland liegt die ermittelte temporäre Flächenbelegung mit $22 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ Strom deutlich höher als in der MENA-Region. Dies ist bedingt durch die im Vergleich zu Deutschland über den Ganzjahresverlauf höhere Strahlungsintensität in der MENA-Region. Die Herleitung der Flächenbelegungsdaten ist ausführlich in Teilbericht III dargestellt. Für die Prozesse Elektrolyse, Power-to-Liquid, CO₂-Abscheidung und Wasseraufbereitung werden vereinfachend die Anlagenflächen bezogen auf den jährlichen Output der Anlagen abgeschätzt.

Bei der Elektrolyse wird Wasser mit Hilfe von elektrischem Gleichstrom in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. (Liebich et al. 2020b) zufolge wird für die Elektrolyseanlage, welche als versie-

⁵ Für die Herstellung von sog. grünem Wasserstoff kommt ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz.

gelte Fläche angesehen wird, eine temporäre Flächenbelegung von $0,012 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ Wasserstoff extrapoliert.

Für den Power-to-Liquid-Prozess (PtL) wird im Rahmen dieses Fallbeispiels die vereinfachte Herstellung eines durchschnittlichen flüssigen Kraftstoffs anhand der Fischer-Tropsch-Synthese (FT) angenommen. Die damit verbundene Flächenbelegung von $1,05 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ Kraftstoff wurde anhand der Daten aus (Liebich et al. 2020b) und ecoinvent 3.6 (Russo 2020) extrapoliert. Für die Herstellung einer MWh synthetischem Kraftstoff werden $1,35 \text{ MWh H}_2$ und $0,26 \text{ t CO}_2$ sowie nach (Liebich et al. 2020b) etwa $0,92 \text{ MWh}$ Strom benötigt.

Für die CO_2 -Bereitstellung wurde eine Abscheidung aus der Luft angenommen (DAC). Die vorhandenen Daten zur temporären Flächenbelegung basieren auf internen, vertraulichen Daten und werden daher nur im zusammenfassenden Anwendungsbeispiel aufgegriffen. Für die Ermittlung von $0,7 \text{ MWh}$ Energiebedarf pro t CO_2 wurden die Daten aus (Liebich et al. 2020b) herangezogen. Der Bedarf an thermischer Energie wurde in diesem Beispiel nicht berücksichtigt.

Für fast alle Verfahrensschritte dieses Beispiels werden größere Mengen aufbereiteten Wassers benötigt, die je nach Herkunft auch einer Entsalzung, bedürfen. Aus den im Fallbeispiel weiter ausgeführten Daten lässt sich ein Prozesswasserbedarf von etwa 1 t pro MWh Strom für die Solaranlagen in der MENA-Region ableiten.

Im Rahmen dieses Fallbeispiels wird mit einer durchschnittlichen **Flächennutzungsänderung** für CSP-Kraftwerke in der MENA-Region von 15% gerechnet.⁶ Flächennutzungsänderungen für PV-FFA in Deutschland werden mit $13,2 \%$ berücksichtigt. Die Flächennutzungsänderung der Betriebsflächen für die Prozesse Elektrolyse, DAC, PtL und Wasseraufbereitung werden in diesem Beispiel gleich Null gesetzt.

Zur Anwendung der **Hemerobiemethode** für Solaranlagen in der MENA-Region wurde der Kriterienkatalog für Brachflächen und Grünland herangezogen und in pragmatischer Weise an die Standortverhältnisse angepasst. Konkrete Analysen der naturräumlichen Gegebenheiten vor Ort wurden im Rahmen dieses Fallbeispiels nicht durchgeführt. Bezüglich der belegten Flächen ist diese Einschätzung jedoch als robust zu werten. Unsicherheiten bestehen, was den Bereich halbnatürlicher Flächen im Randbereich oder auch den Ausgangszustand der Flächen betrifft.

Für Solarenergie aus der MENA-Region wurde für versiegelte Flächen (Verankerungen etc.) die Hemerobiekategorie VII, für überschirmte Flächen (Überschirmung durch Heliostaten, Parabolrinnen und Solarpanels) die Hemerobiekategorie VI und für Rand- und Zwischenflächen (Flächen zwischen den überschirmten Flächen, Randbereiche, unbetonierte Zuwegungen, u. Ä.) die Hemerobiekategorie VI veranschlagt. Für die PV-FFA in Deutschland erfolgte eine Zuordnung der versiegelten Flächen in Hemerobiekategorie VII, der überschirmten Flächen in Hemerobiekategorie VI und der Rand- und Zwischenflächen in Hemerobiekategorie V. Ausführliche Informationen zur Herleitung sind dem zugehörigen Teilbericht III (Kapitel 3.4.6.3 und Kapitel 3.4.6.2) zu entnehmen. Die Betriebsflächen für die Prozesse Elektrolyse, DAC, PtL und Wasseraufbereitung werden als versiegelte Flächen betrachtet und der Hemerobiekategorie VII zugewiesen.

Ergebnisse

Der Strombedarf für die weiterverarbeitenden Prozesse Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese (PtL) spielt in Bezug auf die Flächenbelegung eine entscheidende Rolle. Für die Herstellung einer MWh Wasserstoff per Elektrolyse werden in etwa $1,5 \text{ MWh}$ Strom benötigt. Erfolgt eine Weiterverarbeitung des „grünen“ Wasserstoffs zu strombasiertem Kraftstoff mittels

⁶ Das bedeutet, im Durchschnitt der letzten Jahre kommt jährlich pro m^2 belegtem Bestand $0,15 \text{ m}^2$ an neuem Bestand hinzu, der folglich mit der Umwandlung anderer Flächen einhergeht.

Fischer-Tropsch-Synthese, werden für eine MWh Kraftstoff insgesamt etwa 3 MWh Strom benötigt. Hier gilt es zu beachten, dass in Abhängigkeit der gewählten Prozesse deutliche Unterschiede im Energiebedarf beobachtet werden können. Der Energiebedarf der Wasseraufbereitung und der für die Weiterverarbeitung zu synthetischem Kraftstoff notwendigen CO₂-Abscheidung sind vergleichsweise gering und tragen kaum zum Ergebnis bei.

Folgende Schlüsse können aus dem Fallbeispiel gezogen werden:

- ▶ Im Hinblick auf die **temporäre Flächenbelegung** ist die Produktion in der MENA-Region gegenüber mitteleuropäischen Standorten wie Deutschland im Vorteil. Dank der höheren Strahlungsintensität über den Ganzjahresverlauf liegt die temporäre Flächenbelegung sowohl für Wasserstoff als auch für synthetischen Kraftstoff (PtL) bei etwa der Hälfte der in Deutschland erforderlichen Fläche:
17 gegenüber 33 m² · 1a/MWh H₂ bzw. 36 gegenüber 69 m²a/MWh PtL.
- ▶ Die Frage, ob der Strom in der MENA-Region per CSP oder PV-FFA erzeugt wird, ist dabei nachrangig, da beide Technologien eine nahezu gleich hohe temporäre Flächenbelegung aufweisen.
- ▶ Charakterisiert nach Naturfernepotenzial verringern sich die Unterschiede: Die H₂-Produktion in der MENA-Region liegt dann noch beim 0,82-fachen derer in Deutschland, für PtL beim 0,8-fachen.

Die Ursache hierfür ist, dass die Rand- und Zwischenflächen in Deutschland mit einer geringeren Hemerobiemeinheitsklasse bewertet werden als die entsprechenden Flächen in den Großanlagen der MENA-Region, da Letztere erheblichen Eingriffen unterliegen (u.a. einebnen, verdichten) und teilweise dauerhaft von Vegetation freigehalten werden müssen.

Der Faktor Flächeneffizienz und der Faktor größere Eingriffsintensität gleichen sich somit in etwa aus, wobei in diesem Beispiel ein leichter Vorteil bei der Produktion in der MENA-Region verbleibt.

- ▶ Bezüglich der **Flächennutzungsänderung** liegen die Verhältnisse ähnlich wie bei der Belegung. Da in Zukunft ein dynamischer Zuwachs zu erwarten ist, ist dieser Vergleich hier nur begrenzt aussagekräftig.
- ▶ Die Ergebnisse zur Hemerobie der Flächennutzungsänderung zeigen sogar eine Ergebnisumkehr zugunsten der Produktion in Deutschland. Grund hierfür ist die unterschiedliche Hemerobie der Ausgangsflächen für die beiden Regionen. Während im Beispiel der MENA-Region die Ausgangsfläche nahezu unberührte Natur war, unterlag die Ausgangsfläche für die deutschen PV-Anlagen bereits vor Bebauung vielfältigen menschlichen Eingriffen. Ausführungen hierzu finden sich im Teilbericht III, Kapitel 3.4.6.2 und 3.4.6.3. Auch hier bleibt zu beachten, dass die Daten zur Flächennutzungsänderung aufgrund des zu erwartenden dynamischen Zuwachses nur bedingt aussagekräftig sind.

Fallbeispiel 3: Baustoffe

Betrachtungsebene

In diesem Fallbeispiel wird der Flächenrucksack für die Bereitstellung eines bautechnischen Tragelements (Hallenträger) aus unterschiedlichen Materialien betrachtet. Die von allen Optionen zu erfüllende Funktion wird wie folgt definiert: 10 m Spannweite und eine Auflast von 11,6 kN/m (ohne Trägereigengewicht).

Verglichen werden die Flächenrucksäcke eines Holzhallenträgers, eines Stahlhallenträgers und eines Stahlbetonhallenträgers.

Damit für diese verschiedenen, für den Bau von kleineren Industriehallen typischen Vertreter von Trägersystemen, die (sicherheits-)technischen Aspekte in der Vergleichbarkeit gewährleistet sind, wird in diesem Fallbeispiel auf die ausführlichen Ausarbeitungen hierzu in (Albrecht et al. 2008) zurückgegriffen und darauf basierend die jeweils benötigten Materialmengen abgeleitet.

Der Fokus in diesem Fallbeispiel liegt auf dem Vergleich der Baumaterialien (Waldfläche des geernteten Holzes, Erzabbau, Kalksteinabbau, etc.). Zusätzlich werden die besonders flächenintensiven Anteile der Herstellungsprozesse berücksichtigt (Energie für Stahl- und Zementherstellung).

Für die einzelnen Hallenträger werden folgende Flächenbelegungen betrachtet:

- ▶ Holzhallenträger: für den Holzbedarf abgeerntete Waldfläche; die Herstellung des Brett-schichtholzträgers erfolgt dabei einerseits aus Fichtenholz, andererseits aus Tannenholz.
- ▶ Stahlhallenträger: für den Eisenerzbedarf devastierte Fläche und Fläche für die benötigte Energie zur Stahlerzeugung (deutscher Strommix; Braunkohleabbau vereinfachend für Koks).
- ▶ Stahlbetonhallenträger: für den Eisenerzbedarf devastierte Fläche und Fläche für die benötigte Energie zur Stahlerzeugung (deutscher Strommix; Braunkohle, vereinfachend für fossi-le Brennstoffe sowie für den eingesetzten Koks); für den Beton benötigte Fläche der Zuschlagsstoffe (Sand, Kies), Steinbruchfläche für den Abbau des für den Zement benötigten Kalksteins (vereinfachend) und Energiebedarf für die Zementherstellung (deutscher Strom-mix, Braunkohleabbau).

Nicht betrachtet wurden der Maschinenpark u. ä. bei der Holzbereitstellung, dem Abbau der Gesteine/Bereitstellung der Gesteinskörnungen, Hilfs- und Betriebsmittel, Transporte und Infrastruktur, mit dem Bau verbundene Energieaufwendungen, Energieaufwendungen für die Bearbeitung des Holzes, das Warmwalzen des Stahls oder das Gießen des Betons, Lebenszyklus und Betrachtungen zum Lebenswegende der Produkte bzgl. Allokation von Stahlschrott, Kaskaden-nutzung von Holz etc.

Daten

Im Folgenden wird die Datengrundlage differenziert nach Baumaterialien dargestellt. Ausführliche Informationen zu den Daten sind den Ausführungen hierzu im Fallbeispiel sowie Teilbericht III zu entnehmen.

Für die Herstellung des **Brettschichtholzträgers** wird in diesem Fallbeispiel von jeweils 1,5 m³ (jeweils Fichten- oder Tannenholz) ausgegangen. Folgende Flächenbelegungszahlen und Hemerobieklassen liegen dabei zu Grunde (siehe auch Teilbericht III):

- Weißtanne: $1.072 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{m}^3$ (Hemerobieklassse II: 10 %, III: 25 %, IV: 64 %; Mittelwert IV)
- Fichte: $802 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{m}^3$ (Hemerobieklassse II: 3 %, III: 6 %, IV: 27 %, V: 64 %; Mittelwert V)

Die Flächennutzungsänderung für Produkte von Waldflächen (v.a. Holz) beträgt, wie in Teilbericht III beschrieben, annähernd Null.

Für **Beton** sind sowohl Daten für Zement (vereinfachend: Fläche des Kalksteinabbaus) und Zuschläge (Fläche für Sand- und Kiesgewinnung) erforderlich. Da die Herstellung von Zement als energieintensiv eingestuft wird, werden auch die Flächen für den benötigten Strom (deutscher Strommix) und die benötigten fossilen Brennstoffe (hier vereinfachend ca. 26 % Braunkohle, Rest: alternative Brennstoffe) in den Berechnungen berücksichtigt. Hierfür wird auf die Daten aus dem ersten Fallbeispiel und Teilbericht III zurückgegriffen. Die Flächenbelegung für die benötigten Ausgangsstoffe beträgt für Bausand und Baukies $0,196 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{t}$ und für Kalkstein $0,152 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{t}$.

Für alle Infrastrukturtypen wird die Hemerobieklassse VI angenommen, lediglich für die Lagerhalden wird Hemerobieklassse VII angesetzt. Sowohl für Bausand als auch für Kalk- und Dolomitsteine wird eine Flächenbelegung durch Betriebsgebäude, Aufbereitungsanlagen und Fördertechnik von $0,096 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{t}$ mit der Hemerobieklassse VII angenommen.

Die Flächennutzungsänderung beträgt für Bausand und Baukies $0,037 \text{ m}^2/\text{t}$ und für Kalkstein $0,01 \text{ m}^2/\text{t}$ (Andruleit et al. 2017).

Für die **Stahlherstellung** in diesem Fallbeispiel (Stahlträger und Armierungsstahl im Stahlbeton), werden, unter anderem basierend auf den durchschnittlichen Daten für warmgewalzte Stahlerzeugnisse für Deutschland in 2017 (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2018), folgende Werte berechnet:

- Stahlbetonträger (203 kg Stahl, $1,85 \text{ m}^3$ Beton): 228 kg Eisenerz und 86 kg Koks bzw. vereinfachend Braunkohle; 1,1 MWh Strom
- Stahlträger (1.206 kg Stahl): 1.357 kg Eisenerz und 514 kg Koks bzw. vereinfachend Braunkohle; 6,4 MWh Strom

Für den Eisenerzabbau wird auf Datensätze aus (ecoinvent 2020) zurückgegriffen.

In diesem Beispiel wird für Koks vereinfachend die gleiche Menge an Braunkohle angesetzt (Koks wird aus Kohle hergestellt). Die Flächenbelegungen für Braunkohle wurden bereits im vorigen Fallbeispiel zu Strom aufgeführt. Ebensolches gilt für die Daten zum Strom.

Ergebnisse

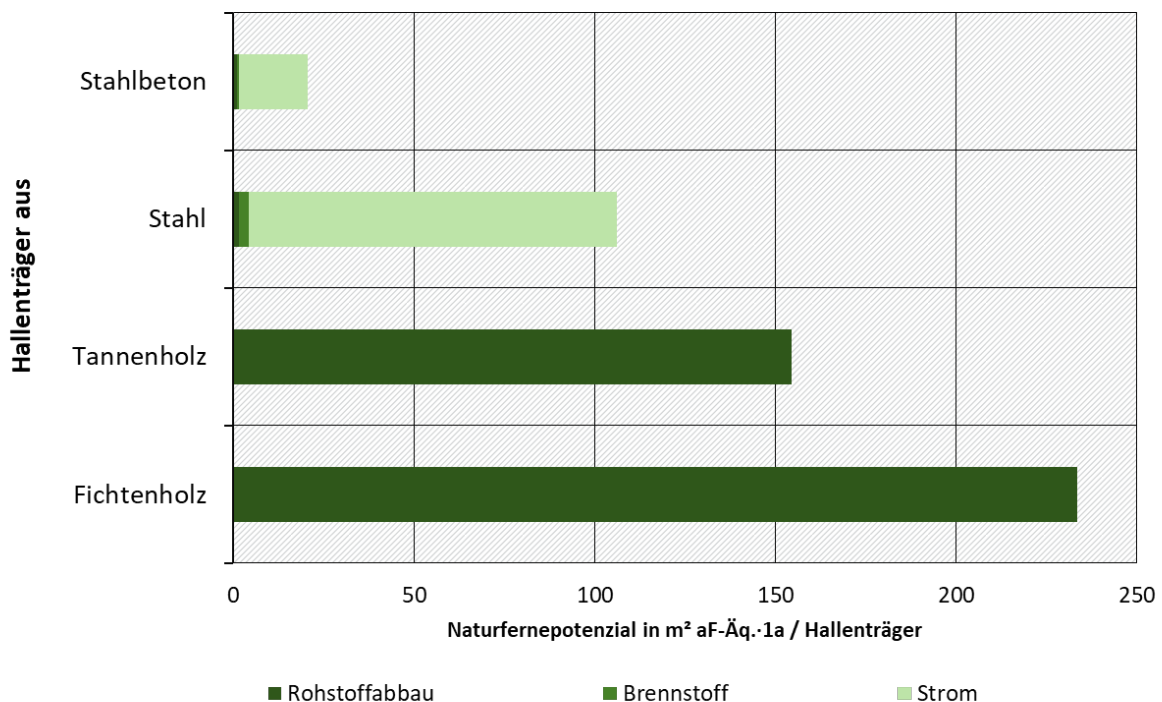
Die **temporäre Flächenbelegung** der beiden holzbasierten Trägersysteme liegen mit ca. $1,170 \text{ m}^2 \text{ a}$ pro Hallenträger aus Fichtenholz und ca. $1,560 \text{ m}^2 \text{ a}$ pro Hallenträger aus Tannenholz deutlich über denen der Hallenträger aus Stahl- und Stahlbeton. Für den Hallenträger aus Stahl lag die temporäre Flächenbelegung bei ca. $280 \text{ m}^2 \text{ a}$ pro Hallenträger, für den aus Stahlbeton bei ca. $50 \text{ m}^2 \text{ a}$ pro Hallenträger. Für die Bereitstellung der holzbasierten Systeme werden in diesem vereinfachten Anschauungsbeispiel keine Brennstoffe und kein Strom benötigt und die Last ist demnach einzig durch den Rohstoffabbau verursacht. Durch die höhere Stahlmenge und den damit verbundenen höheren (flächenintensiven) Strombedarf ist die temporäre Flächenbelegung des Stahlhallenträgers deutlich größer als die des Stahlbetonhallenträgers. Die temporäre Flächenbelegung für den Abbau der Rohstoffe Eisenerz, Braunkohle, Kalkstein sowie Bausand

und -kies ist im Vergleich sehr gering. Es gilt zu beachten, dass sich die Ergebnisse der beiden Stahl enthaltenden Produkte in Abhängigkeit zur Wahl der Herstellungsrouten ändern können.

Die Ergebnisse der **Flächennutzungsänderung** zeigen ein ganz anderes Bild, da die beiden Holzhallenträger eine Flächennutzungsänderung von annähernd Null haben. Die Flächennutzungsänderung des Stahlbetonhallenträgers beträgt ca. $0,35 \text{ m}^2/\text{Hallenträger}$ und die des Stahlhallenträgers ca. $1,18 \text{ m}^2/\text{Hallenträger}$. Im Ergebnis spielt hier der Stromverbrauch die entscheidende Rolle, weswegen die stromintensiven Produkte, d.h. die aus Stahl und somit v.a. der Stahlhallenträger, im Ergebnis herausragen. Der Stromverbrauch ist damit sogar deutlich relevanter als der Abbau der mineralischen Rohstoffe (Kalk, Eisenerz).

In Abbildung 2 ist das **Naturfernepotenzial (NFP)** für die Flächenbelegung dargestellt. So werden $20 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. a pro Stahlbetonhallenträger}$, $107 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. a pro Stahlhallenträger}$, $155 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. a pro Tannenholz-Hallenträger}$ bzw. $234 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. a pro Fichtenholz-Hallenträger}$ berechnet. Bedingt durch die Einstufung von Tannenholz in die Hemerobiekategorie III im Vergleich zur Hemerobiekategorie V für Fichtenholz und dem damit einhergehenden geringeren Charakterisierungsfaktor für Tannenholz, ergibt sich für die beiden Holzsysteme eine Ergebnisumkehr.

Abbildung 2: Naturfernepotenzial (NFP) der Flächenbelegung der betrachteten Hallenträger



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Bezüglich der Flächennutzungsänderung charakterisiert nach Hemerobie zeigt sich tendenziell das gleiche Bild wie bereits bei der Flächennutzungsänderung ohne Charakterisierung.

Zusammenfassend hat der Stahlbetonhallenträger die geringste temporäre Flächenbelegung, auch im Naturfernepotenzial. Es sei hier jedoch angemerkt, dass im Rahmen einer vollständigen Ökobilanz unter Einbeziehung weiterer Wirkungskategorien (z. B. Klimawandel, Versauerung, abiotische Ressourcen etc.) deutlich andere Ergebnisse zu erwarten sind. Bezüglich der Flächennutzungsänderung und des Naturfernepotenzials der Flächennutzungsänderung sind die Ergebnisse für die beiden holzbasierten Systeme in jedem Falle deutlich vorteilhafter.

Fallbeispiel 4: Antriebsenergie für Personen-Transport

Betrachtungsebene

In diesem Fallbeispiel wird die Bereitstellung der Antriebsenergie für 100 Personenkilometer (Pkm) für ein Kompaktklassefahrzeug mit verschiedenen Antriebsarten betrachtet. Verglichen wird hierbei der Antrieb jeweils mit

- ▶ Diesel (B7),
- ▶ reinem Biodiesel (als Mix, wie er im Jahr 2019 dem Diesel beigemischt wurde, sowie separat für die Komponenten Rapsölmethylester und Palmölmethylester)⁷
- ▶ batterieelektrischem EE Strom (einmal als mittlerer EE-Strommix, einmal mit Windenergie und PV-FFA zu je 50 %).

Zusätzlich wird aus dem dritten Fallbeispiel PtL als strombasierter Kraftstoff auf Basis von Solarstrom in der MENA-Region in dieses Fallbeispiel mit einbezogen.

Fossiler Diesel wird ebenfalls analog zu den bereits für das Strom-Fallbeispiel ermittelten Flächenbelegungen und Flächennutzungsänderungen für fossile Energieträger behandelt. Die Fahrzeugherstellung ist nicht Gegenstand dieses Fallbeispiels. Es wird jedoch auch die Flächenbelegung für die Verkehrswegebenutzung mit einbezogen.

Daten

Für den **Stromantrieb** wird auf die Daten zur Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung aus Fallbeispiel 1 zugegriffen. Die Flächenbelegungsdaten setzen sich danach mit und ohne Charakterisierung und umgerechnet auf 100 km⁸ wie folgt zusammen:

- ▶ EE-Strommix: $2,32 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$; $0,82 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq} \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$
- ▶ Wind (onshore): $0,02 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$; $0,01 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq} \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$
- ▶ PV-FFA: $0,032 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$; $0,11 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq} \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$

Die Darstellung der Flächenbelegung von **Biodiesel** erfordert eine Differenzierung nach den primären Ausgangssubstraten. Nach (BLE 2020) wird der in Deutschland in Verkehr gebrachte Biodiesel zu 47 % auf Grundlage von gebrauchtem Altpflanzenöl, zu 28 % aus Rapsöl und zu 21 % aus Palmöl produziert. Dem Altpflanzenöl werden aufgrund der Tatsache, dass es ein Abfallstoff ist keine Lasten angerechnet.

Die Daten zur Flächenbelegung für Rapsöl werden Teilbericht III entnommen. Für die Umrechnung von Rapssaat auf Rapsmethylester (RME, Biodiesel auf Rapsölbasis) werden Daten und Berechnungsweise der BioEm-Studie (Fehrenbach et al. 2016) verwendet. Die temporäre Flächenbelegung für 1 MJ RME errechnet sich danach unter Anrechnung der Nebenprodukte auf $0,107 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}$. Charakterisiert nach Hemerobie ergibt sich ein Naturfernepotenzial (NFP) von $0,051 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq}^9 \cdot 1\text{a}$ pro MJ RME.

⁷ Reiner Biodiesel wird als Kraftstoff kaum eingesetzt, er wird hier dennoch als Option dargestellt, damit der Beitrag des Biokraftstoffs in einem Kraftstoffmix wie B7 erkennbar wird.

⁸ Nach dem oben erwähnten ifeu Transport Emission Model (TREMOM) benötigt ein Elektroauto der Kompaktklasse im Mittel ohne Ladeverluste etwa 14 kWh pro 100 km (Meyer et al. 2019).

⁹ Artifiziale-Fläche-Äquivalent

Die Flächenbelegung für Palmöl kann ebenfalls auf der Datenbasis der BioEm-Studie (Fehrenbach et al. 2016) bestimmt werden. Danach beträgt die temporäre Flächenbelegung für 1 MJ PME unter Anrechnung der Nebenprodukte $0,071 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}$ pro MJ PME. Charakterisiert nach Hemerobie beträgt das Naturfernepotenzial $0,018 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot 1\text{a}$ pro MJ PME.

Für **Diesellokraftstoff** liegt der Flächenbelegungswert bei $0,00024 \text{ m}^2 1\text{a}/\text{MJ}$ – der gleiche Wert trifft nach Charakterisierung nach Hemerobie zu, da die Flächenbelegung hier vollständig in Klasse VII fällt.

Für einen **B7-Kraftstoff** mit 7 % Vol. Biodiesel unter Berücksichtigung der Dichten ($0,89 \text{ kg}/\text{Liter}$ Biodiesel, $0,832 \text{ kg}/\text{Liter}$ fossiler Diesel) und der spezifischen Heizwerte ($37,2 \text{ MJ}/\text{kg}$ Biodiesel, $43,1 \text{ MJ}/\text{kg}$ fossiler Diesel) ergibt sich eine Flächenbelegung von $0,0034 \text{ m}^2 1\text{a}/\text{MJ}$ bzw. ein Naturfernepotenzial von $0,0015 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot 1\text{a}$ pro MJ.

Für die Umrechnung auf 100 km Fahrt werden auf der Basis von (Meyer et al. 2019) folgende Energieverbräuche angerechnet:

- Stromantrieb: $14 \text{ kWh}/100 \text{ km}$;
- Dieselantrieb: $4,7 \text{ Liter}/100 \text{ km}$, entspricht $170 \text{ MJ}/100 \text{ km}$

Die Belegung der Verkehrsfläche für die Dienstleistung einer Pkw-Fahrt über 100 km ist für alle Antriebsoptionen gleich und liegt bei $0,213 \text{ m}^2/100 \text{ km}$ (siehe Teilbericht III).

Die Faktoren zur **Flächennutzungsänderung** können ebenfalls aus dem Datenbericht entnommen und anteilig umgerechnet bzw. Fallbeispiel 1 entnommen werden. Für Biodiesel belaufen sich die Daten wie folgt:

- Rapsmethylester (RME): Ohne Charakterisierung: $0,00029 \text{ m}^2$ pro MJ RME
($= 0,107 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} \cdot 0,0027 \text{ m}^2/\text{a} \cdot \text{m}^2$); mit Charakterisierung (Differenz): $0,000036 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.}$ pro MJ RME
- Palmölmethylester (PME): Ohne Charakterisierung: $0,00212 \text{ m}^2$ pro MJ PME
($= 0,071 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} \cdot 0,03 \text{ m}^2/\text{a} \cdot \text{m}^2$); mit Charakterisierung (Differenz): $0,00053 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.}$ pro MJ PME

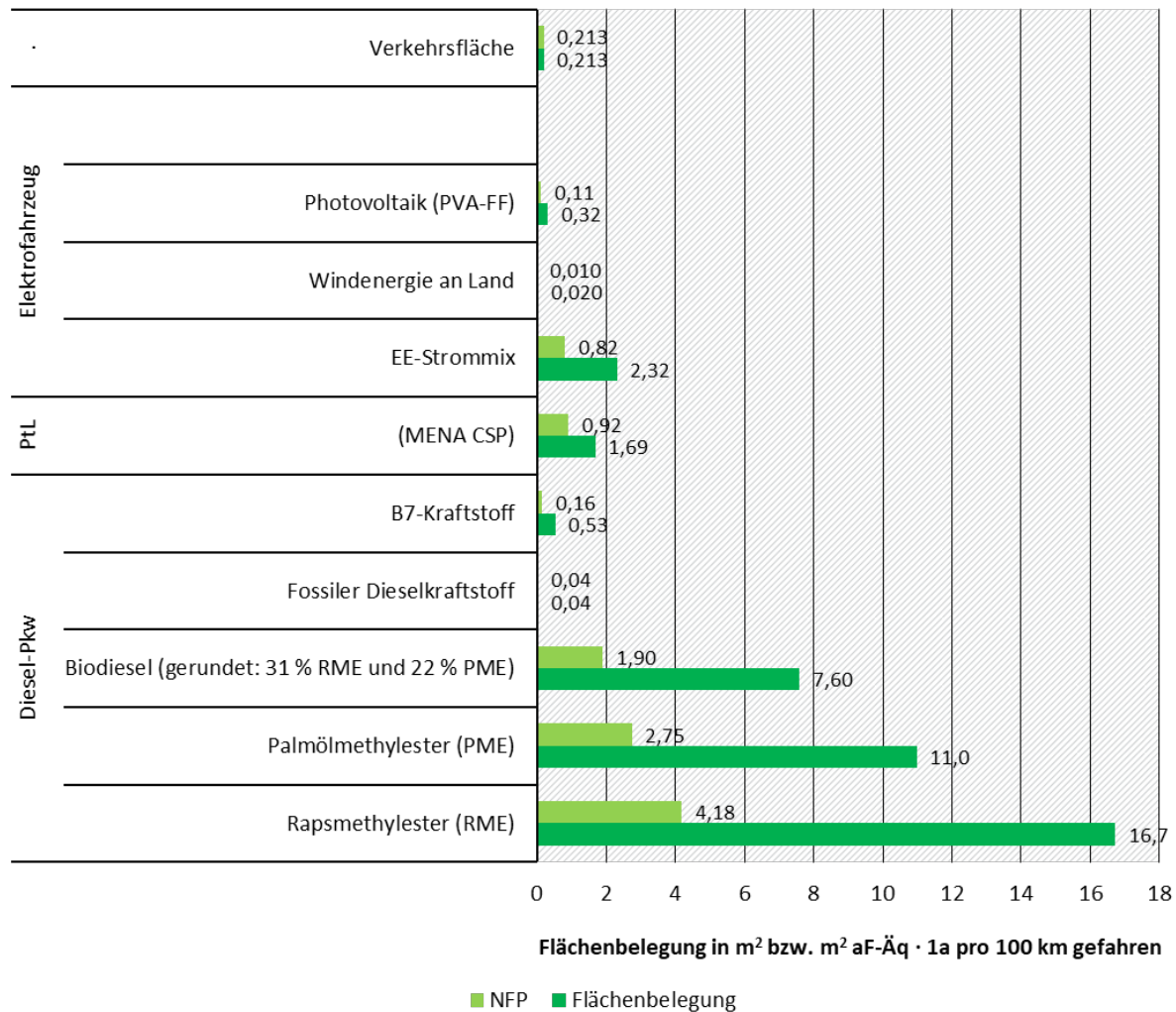
Zur Flächennutzungsänderung für Erdöl und Erdölprodukte weisen die verfügbaren Datenbanken (darunter auch ecoinvent) keine Sachbilanzdaten aus. Da davon auszugehen ist, dass die Faktoren zur Flächennutzungsänderung ebenfalls sehr niedrig ausfallen, werden diese im Rahmen dieses Fallbeispiels vernachlässigt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Flächenbelegung sind in Abbildung 3 zusammengestellt. Sie zeigt mit und ohne Charakterisierung deutlich, dass die **Flächenbelegung** vom Anteil und der Art des Biokraftstoffs dominiert wird. Rapsmethylester (RME) ist dabei aufgrund der vergleichsweise geringen Flächenenerträge mit den höchsten Beiträgen verbunden. Palmölmethylester (PME) liegt aufgrund der höheren Flächenenerträge gegenüber Raps im Vorteil. Auch was das NFP betrifft, wird Palmöl aufgrund der dauerhaften Anbausysteme mit vergleichsweise geringen Eingriffen während der Kulturphase günstiger bewertet als der annuelle Rapsanbau. Noch günstiger ist der aktuelle mittlere Biodieselmix, da er einen hohen Anteil Altpflanzenöle beinhaltet, denen keine Flächenbelegung zugerechnet wird. Fossiler Diesel ist mit sehr niedrigen Belegungen verbunden, sodass auch B7 mit ca. 6,5 % energetischem Anteil an Biodiesel rechnerisch auf eine sehr geringe Flächenbelegung kommt.

Eine Fahrt über 100 km mit einem batteriebetriebenen Elektro-Pkw belegt dagegen mehr Fläche als ein Diesel-Pkw mit B7, wenn man den mittleren Mix erneuerbaren Strom ansetzt. Dies beruht auf den Anteilen an Strom von Biogas und fester Biomasse (siehe hierzu auch Fallbeispiel 1). Mit Strom aus Windkraft (an Land) oder PV (Freiland) ist die Belegung jedoch geringer als mit einem B7-Diesel-Pkw. Strom aus Windkraft liegt sogar deutlich niedriger.

Abbildung 3: Temporäre Flächenbelegung und NFP für die betrachteten Optionen verschiedener Antriebsenergien für einen Pkw über 100 km Fahrt



Erläuterung: Die Einheit aF-Äq. steht für artifizielle-Fläche-Äquivalent

Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Die Ergebnisse des Vergleichs für die **Flächennutzungsänderung** weichen in zwei wesentlichen Punkten von den Ergebnissen der temporären Flächenbelegung ab:

- Den höchsten Wert erzielt **PtL** auf Basis von Solarstrom aus der MENA-Region. Die Gründe dafür liegen darin, dass zum einen für die Technologie ein sehr dynamischer Zuwachs unterstellt wird¹⁰ und zum anderen in der starken Erhöhung der Hemerobie, da die Ausgangsflächen überwiegend natürliche Ökosysteme darstellen, während die CSP-Anlagen eine erheb-

¹⁰ Angesetzt wird ein jährlicher Zuwachs an Flächen von 15 % bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung.

liche Überprägung dieser Naturräume bedingen. Aufgrund des erwarteten starken dynamischen Wachstums im gesamten Sektor muss dieser Vergleich jedoch möglicherweise in naher Zukunft neu bewertet werden.

- Den zweithöchsten Wert erzielt **Palmölmethylester** (PME) und liegt damit auch deutlich vor Rapsmethylester (RME). Hierin spiegelt sich die starke Ausweitung der Palmölproduktion im Hauptherkunftsland Indonesien wider.

Fazit

Mit den hier beschriebenen vier Fallbeispielen wurde ein Praxistest der Methode des Flächenrucksacks durchgeführt. Dank der Breite der Beispiele zeigt sich, dass die Methode grundsätzlich für jede Art von Lebensweg von Produkten oder Dienstleistungen anwendbar ist. Dabei zeigen sich auch gewisse Muster in den Ergebnissen, wie z. B.:

- Beinhaltet ein System Biomasse als Rohstoff, wird hierdurch in der Regel das Ergebnis dominiert gegenüber abiotischen Rohstoffen.
Dies zeigt sich am Beispiel der Baustoffe besonders deutlich: Im Falle der Stahlerzeugung dominiert der Strom (mit einem Anteil von 6 % Biogas) gegenüber den Rohstoffen (Eisenerz, Kohle) mit Abstand den Flächenrucksack.
- Unter den Biomassen selbst sind die Unterschiede sehr groß; diese machen sich fest an den Flächenerträgen (Palmöl besser als Rapsöl), an der jeweiligen Hemerobie (Holz besser als Agrarbiomasse) wie auch an der spezifischen Flächennutzungsänderung (Rapsöl besser als Palmöl)
- Geographische Faktoren lassen sich gut abbilden (Bsp. Grüner Strom für Wasserstoff in der MENA-Region oder Deutschland)

Die Fallbeispiele wurden unter verschiedenen Vereinfachungen der betrachteten Systeme durchgeführt, da sie vor allem zur Verifizierung der Methodik bzw. deren Anwendbarkeit dienen. Dabei wurden auch Grenzen und Weiterentwicklungsbedarf identifiziert.

Summary

A final report in three parts was prepared for the project Land rucksacks of goods and services. Final Report Part II provides a detailed description of the results of a method test carried out in four case studies. Final Report Part I describes the underlying methodology. Final Report Part III documents and explains the available data sets and provides references to data sources.

Purpose and objectives

Life cycle assessment (LCA) is a tool for carrying out analyses and evaluations across a range of systems under consideration of a wide spectrum of environmental impacts. By applying the life cycle principle, all types of products and services can be comprehensively assessed. As a result, key environmental impacts and burdens are identified and recommendations for action can be made to minimise these burdens.

In line with the usual dynamics of active research fields, the models for calculating environmental impacts in LCA are constantly in development to include novel findings. There are impact categories for which there is little change in model design (e.g. climate change) and those for which a number of competing models exist. In these cases, scientific consensus has yet to be reached.

Land use is among the categories under debate. It has been a challenge for international experts for several years. The UNEP¹¹/SETAC¹²(de Baan et al. 2013; Brandão / Milà i Canals 2013; Chaudhary / Brooks 2018; Curran et al. 2016; Koellner et al. 2013; Lindner et al. 2019; Vidal-Legaz et al. 2016)-Life Cycle Initiative has made the issue of land use assessment a major focus and several approaches are available for assessing land use in life cycle assessments (e.g. (de Baan et al. 2013; Brandão / Milà i Canals 2013; Chaudhary / Brooks 2018; Curran et al. 2016; Koellner et al. 2013; Lindner et al. 2019; Vidal-Legaz et al. 2016).

The German Environment Agency (Umweltbundesamt, UBA) has published recommendations for a method for the impact category “Natural habitat use” (Schmitz / Paulini 1999). In this approach, the quality of area is characterised according to the degree of human impact intensity. The term *hemeroby*, a concept developed in landscape ecology, has become established for this. The method has since been further developed and applied (Fehrenbach et al. 2015). However, a major obstacle to the widespread application of this approach is the availability of robust generic data for products and services and the extension of the methodology to include any type of land use. The approach thus requires further methodological development and improved input data.

In the current research projects, these were thus the key objective. Furthermore, an approach for integrating the data into a database that can be maintained and updated was proposed.

To verify the applicability of the methodology described in Final Report Part I based on the data compiled in Final Report Part III, the present Final Report Part II was prepared to test the method in four case studies. These included modelling of:

- the average electricity mix in Germany including all energy sources, especially renewable energies under consideration of raw material supply chains, conversion and transmission;

¹¹ United Nations Environment Programme

¹² Society of Environmental Toxicology and Chemistry

- ▶ the production of "green" hydrogen (H₂) as well as electricity-based fuels generated from it utilising solar power in the MENA region (Middle East North Africa) compared to solar power in Germany;
- ▶ structural load-bearing elements made of a range of construction materials (glued laminated timber, steel, reinforced concrete);
- ▶ passenger transport over a distance of 100 km, with a focus on different types of propulsion technology (e-mobility with different electricity options, diesel passenger cars with B7¹³ and biodiesel from different biogenic feedstocks).

To interpret the results in the context of possible alternatives, comparisons for appropriate options were carried out. In the electricity case study, the land rucksacks of electricity from the German electricity grid, the renewable energy (RE) electricity mix and the individual renewable energy sources were determined and compared. The case study "green" hydrogen/synthetic fuel demonstrates the differences in land occupation for the production of these two products, each based on electricity from solar plants in the MENA region compared to electricity from photovoltaic (PV) plants located in Germany. For the case study construction materials, reinforced concrete beams, steel beams and glulam beams were compared. For the passenger transport case study, the results of the medium-sized car with diesel (B7) and biodiesel as the drive energy, as well as the results of the electric vehicle with (EE) were considered.

Case study 1: Electricity

Scope

The project explores land use aspects of electricity from the German power grid (average production mix in 2019), electricity from an average mix of renewable energy and electricity from the individual renewable energy sources.

The system boundary for the production of electricity includes both raw material extraction of the energy sources (fossil raw materials, uranium ore, solid biomass (wood) and biomass for biogas production) and their respective infrastructures. The latter include thermal power plants (conversion of fossil or biogenic primary energy sources) and plants for direct conversion of wind and sun, as well as transmission grids (facilities for transporting electricity, transformation). Installations on existing structures (e.g. roof-top photovoltaics) do not lead to additional land occupation. Since water areas have not been included in the method so far, offshore wind turbines and hydropower plants are not considered.

Data

Data on land occupation, land transformation and hemeroby are required for the calculation of the electricity land rucksacks. The data sets for all areas considered here may be found in Final Report Part III.

For modelling of the German electricity mix, the shares of the individual energy sources in the German electricity mix are adopted from the inventories of the Working Group on Renewable Energies Statistics (AGEE-Stat 2020) and the Working Group on Energy Balances (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., AGEB). According to these sources, lignite has the largest share in the German electricity mix with 19.3 %, followed by wind (onshore (17.1 %)) and natural gas

¹³ Diesel fuel with a blending of a maximum of 7% (volume percent) biodiesel to conventional diesel

(15.4 %). Other renewable energy sources considered are biogas (5.4 %), ground-mounted photovoltaic (PV) installations (2.4 %) and solid biofuels (1.8 %).

For the conversion of the temporary land occupation of the individual energy carriers to electricity, the land occupation data of the raw materials various associated infrastructures (power plants, transmission grids, etc.) are aggregated. Land occupation outside Germany, e.g. coal mining or natural gas extraction and transport (pipelines) in the countries from which the raw materials are imported, are also included.

For **solid biomass**, land occupation is only counted in the case of direct timber extraction from the forest or extraction of the by-products of timber processing (sawmill residues and other industrial residues). No land occupation is attributed to waste wood and landscape conservation wood. According to data from (Döring et al. 2018) only 25 % of the solid biomass used for electricity generation is based on directly used forest timber, sawmill residues and other industrial residues. For this fraction, a temporary land occupation of $441 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/MWh}$ electricity is calculated assuming an increment of wood following the third German Forest Inventory (BWI-3) (BMEL 2015)¹⁴ and an average energy conversion efficiency of biomass power plants. A total of 75 % of the electricity from solid biomass is not associated with any land occupation, but the infrastructure for this share is included in the modelling.

For **biogas**, the assessment of land occupation requires a differentiation according to the various biogas substrates. The average shares of the substrates are adopted from (Daniel-Gromke et al. 2017), the biogas yields from (KTBL 2013). Specific yields per area and other relevant data may be found in Final Report Part III. On average, this results in $57.8 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/GJ}$ biogas or $144 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/GJ}$ electricity, or $517 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/MWh}$ electricity after the respective conversion to electricity.

The database for the pre-chain of **lignite** is provided by (Statistik der Kohlenwirtschaft 2019). The extraction of one tonne of lignite results in a total temporary land occupation of approx. $5 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/t}$ of lignite or $5.4 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/MWh}$ of electricity (assuming an average net energy conversion efficiency of 38 % according to (UBA 2021)), which includes both the mining area ($3.2 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/t}$ of lignite) and the area that is unavailable for use after extraction (0.54 m^2).

For the other, mostly imported energy sources such as natural gas, bituminous coal and crude oil, the baseline data are not available at this high degree of resolution. For these energy carriers, land use data from (ecoinvent 2020) are used. However, extraction areas and infrastructures are also fully considered here.

Detailed descriptions of the data for conversion (especially power plants) may be found in Final Report Part III. The land occupation for transmission is based on data from the German Federal Network Agency (Bundesnetzagentur 2021) and analyses by Consentec as part of the long-term scenarios (Pfluger et al. 2018). For this purpose, a land occupation of approximately $0.5 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a/MWh}$ electricity is attributed to all energy carriers.

For most energy sources, reliable data on land transformation were identified or derived over the course of the project. However, this is not the case for all elements of the pre-chain. For instance, no data are available for imported raw materials such as bituminous coal, crude oil and natural gas, even in (ecoinvent 2020). Due to the fact that power plants belonging to the conversion/ transformation sector of the pre-chain are associated with extremely low levels of land transformation and that the construction of thermal power plants in Germany has been rather

¹⁴ German Federal Ministry of Food and Agriculture

limited in the last ten years, it is assumed that these data gaps will not have a significant impact on the result.

The data gaps for raw materials are somewhat more significant, as e.g. bituminous coal accounts for a considerable share of the German gross electricity production and is mined in opencast mines in several producer countries. To generate data sets for these cases, detailed analyses and primary data research on mining in the respective countries are required, which were outside the scope of this project. Nevertheless, the available data are considered sufficient to provide an indicative statement for the case study carried out here.

Based on the data on land transformation in Final Report Part III, energy carriers with high land occupation also have the highest land transformation factors. These are primarily ground-mounted PV (with 2.4 m²/MWh electricity) and biogas (with 1.4 m²/MWh electricity). Lignite, with its relatively continuous increase in area over the years, is at 0.11 m²/MWh of electricity, well ahead of onshore wind energy at 0.049 m²/MWh of electricity. Since there is hardly any net increase in forest area in Germany, the land transformation associated with solid biofuels is also practically zero. Transmission also shows only a slight expansion on average over the last few years, calculated at less than 0.003 m²/MWh of electricity.

The hemeroby classification of the occupied land areas may be found in Final Report Part III. Overall, the hemeroby varies from hemeroby class II (proportionate) for solid biofuels to hemeroby class VII for lignite or infrastructures (e.g. power plants).

Results

Figure 4 illustrates the main results for **temporary land occupation**. The average electricity mix in 2019 falls between electricity from biogas and solid biomass, which have a significantly higher land occupation, and electricity from ground-mounted PV and onshore wind energy, which are less land-intensive. The land occupation factor for the electricity mix reflects a biogas share of over 75 %, with a further 18% attributed to solid biofuels. The other energy sources account for <3.3 %. Due to the contributions of biogas and solid biomass, land occupation of the renewable mix is higher than the average grid mix by a factor of 4. Land occupation associated with biogas electricity is even twelve times higher, although the biogas mix also includes liquid manure and biowaste, which as substrates are not associated with any land occupation.

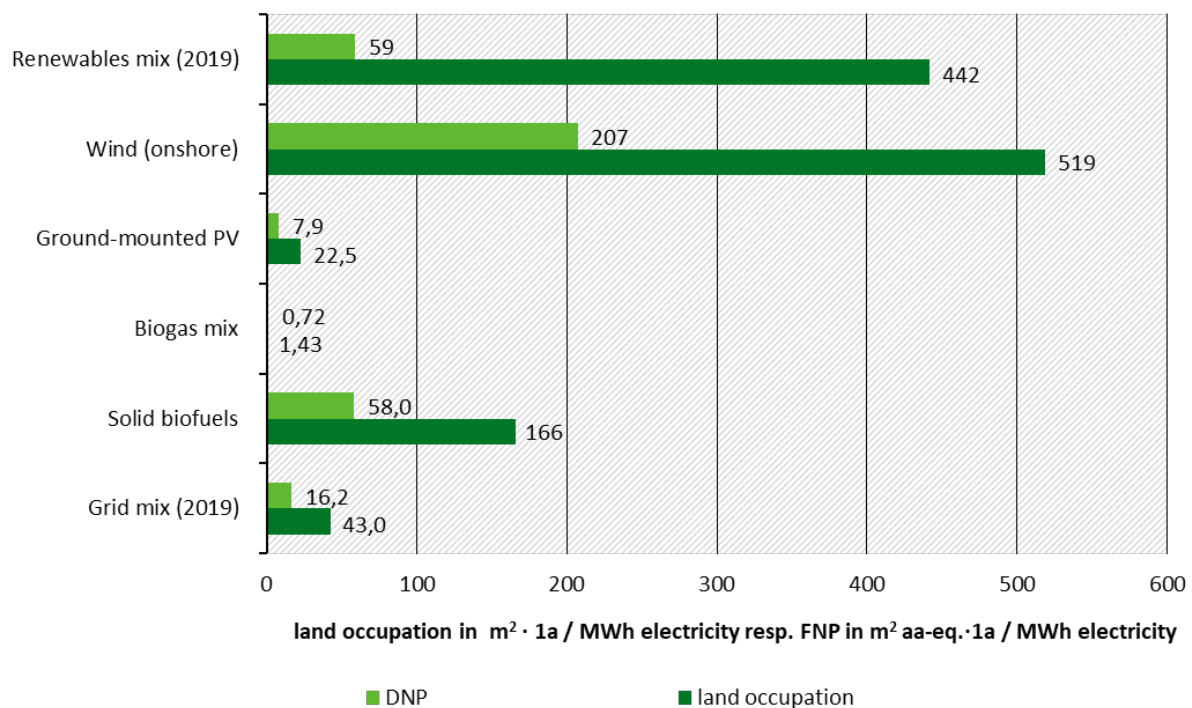
Figure 4 also reveals a clear shift in the ratios of the distance-to-nature potential characterised by hemeroby in the case of solid biomass. The average characterisation factor here is 0.13 (indicated by the ratio between the two respective bars in the figure). For most other energy sources or mixes, the factor is between 0.35 and 0.4. For wind energy, the ratio is lowest at 0.5, which does not change the overall low contribution of this energy source. Noticeable shifts only occur for solid biomass, where the distance-to-nature potential is equal to that of the RE mix. Its unfavourable result compared to the general electricity mix reflects the share of biogas electricity. In the case of ground-mounted PV, however, there is a clear difference between land transformation in square metres and expressed as DNP: ground-mounted PV is associated with the highest land transformation among the energy carriers considered, due to the strong relative increase in square metres. Since the hemeroby on the additional area increases only slightly compared to the previous situation, the DNP is significantly reduced in comparison.

Land transformation is also driven by the contributions of certain renewable energy sources. Biogas with 0.39 m² aa eq./MWh electricity and ground-mounted PV with 0.26 m² aa eq./MWh electricity and contribute considerably to the overall results of the electricity mix (0.047 m² aa eq./MWh electricity) and the renewable mix (0.11 m²/MWh electricity). Solid biomass has no

effect on land transformation. This is also one reason why the ranking of the individual energy sources or mixes does not change significantly in their distance-to-nature potential.

Overall, the case study clearly demonstrates the land rucksack of electricity is governed by the supply of raw materials, especially if these feedstocks include of cultivated biomass. Infrastructure (conversion plants, transmission grids) contributes to a much lesser extent. This is evident for both land occupation and land transformation.

Figure 4: Land occupation factors for 1 MWh of electricity from the average German mix in 2019, in comparison with the renewable mix (including rooftop PV but excluding offshore wind and hydropower), and for 1 MWh each of onshore wind, ground-mounted PV, biogas and solid biofuels; each as occupation only and distance-to-nature potential.



NB: The abbreviation aa-eq. stands for the unit artificial area equivalent

Source: Own illustration 2021, ifeu

Case study 2: Green hydrogen and electricity-based fuels

Scope

A recent study on climate neutrality in Germany by 2050 (Dambeck et al. 2020) argues that hydrogen will play a very important role alongside electricity in a climate-neutral energy system. The countries of the so-called MENA region (Middle East and North Africa) are considered to be favourable locations for solar energy due to the very high direct solar irradiation compared to Germany and could thus cover a significant share of the future demand for renewable energies.

In this case study, the temporary land occupation, land transformation and the distance-to-nature potential for the provision of solar energy in the MENA region and in Germany are explored. Based on these data, the conversion of solar energy into so-called "green" hydrogen and its further processing into electricity-based fuel (e-fuel) is assessed. The results are analysed for

the production of one MWh of hydrogen and one MWh of e-fuel, each based on solar energy produced in the MENA region and in Germany.

For the calculation of the land rucksacks of green hydrogen and synthetic fuel, the land occupation, land transformation and distance-to-nature potentials of the following technologies are determined:

- ▶ Electricity from solar thermal power plants (so-called concentrating solar (CSP) power plants): parabolic trough power plants and solar tower power plants located in the MENA region.
- ▶ Electricity from a ground-mounted photovoltaic plant in Morocco (representing the MENA region) and from a ground-mounted PV in Germany.
- ▶ Conversion of electricity to "green" hydrogen (H₂) via electrolysis
- ▶ Water treatment/desalination.
- ▶ CO₂ capture from the atmosphere (direct air capture, DAC)
- ▶ Power-to-liquid process (PtL) for the production of synthetic fuels from hydrogen and carbon dioxide (CO₂)

Simplifications were made for the case study and the system boundary was narrowly defined. The focus is on the processes listed. Aspects such as the production of the plants and associated infrastructure, auxiliary and operating materials, pre-chains (e.g. for the parabolic mirrors or PV modules), transports, transmission grids, etc. were not considered here. Similar to many LCAs, it is assumed that the impact contributions of infrastructures with high throughputs over their lifetime do not critically influence the result here either.

Data

The **temporary land occupation** of CSP power plants in the MENA region of $11.3 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ electricity differs only slightly from the temporary land occupation of $11.5 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ electricity of ground-mounted PV in the same region. The figures are based on literature data and were further divided into sealed, covered as well as edge and intermediate areas by including satellite image analyses. In the case of PV electricity from Germany, the calculated temporary land occupation of $22 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ electricity is significantly higher than in the MENA region. This is due to the higher radiation intensity in the MENA region over the whole year compared to Germany. The calculation method for the land occupation data is described in detail in Final Report Part III. For the processes electrolysis, power-to-liquid, CO₂ capture and water treatment, the plant areas are estimated in relation to the annual output of the plants for simplification purposes.

During electrolysis, water is split into hydrogen and oxygen with the help of direct electric current. According to (Liebich et al. 2020b), a temporary land occupation of $0.012 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ hydrogen is extrapolated for the electrolysis plant, which is considered a sealed area.

For the power-to-liquid (PtL) process, the production process is simplified to produce an average liquid fuel using Fischer-Tropsch synthesis (FT). The associated land occupation of $1.05 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ fuel was extrapolated applying data from (Liebich et al. 2020b) and ecoinvent 3.6 (Russo 2020). The production of one MWh of fuel requires 1.35 MWh of H₂ and 0.26 t of CO₂. According to (Liebich et al. 2020b), the electricity required for the production of one MWh of synthetic fuel amounts to approx. 0.92 MWh.

Direct capture from air (DAC) was assumed for CO₂ supply. The existing data on temporary land occupation are based on confidential data and are therefore only summarised in the application example. The data from (Liebich et al. 2020b) were applied to determine an energy demand of 0.7 MWh per t CO₂. The thermal energy demand was not considered in this example.

Considerable amounts of water are required for almost all process steps in this case study. This process water is subject to treatment and/ or desalination, depending on the origin. Based on the data presented in the case study, a process water demand of about 1 t per MWh electricity is assumed for the solar plants in the MENA region.

The average **land transformation** resulting from CSP power plants in the MENA region assumed in this case study is 15 %.¹⁵ Land transformation associated with ground-mounted PV in Germany amounts to 13.2 %. The land transformation of the production facilities for the processes electrolysis, DAC, PtL and water treatment are set to zero in this example.

For the application of the **hemeroby method** for the solar plants in the MENA region, the criteria catalogue for derelict land and grassland was used and pragmatically adapted to the site conditions. Specific analyses of the local natural conditions were not carried out in the context of this case study. Nevertheless, the assessment of land occupation may be considered robust. Uncertainties exist for semi-natural land along the edges or the initial condition of the land occupied for solar energy production.

For solar energy in the MENA region, sealed surfaces (fixtures, etc.) were assigned to hemeroby class VII, covered surfaces (covered in heliostats, parabolic troughs and solar panels) to hemeroby class VI, and edges and intermediate surfaces (areas between covered surfaces, boundary areas, unsealed access roads, etc.) to hemeroby class VI. For ground-mounted PV in Germany, sealed areas were assigned to hemeroby class VII, covered areas to hemeroby class VI and edges and intermediate areas to hemeroby class V. Detailed information on the classification may be found in Final Report Part III (Chapter 3.4.6.3 and Chapter 3.4.6.2). The areas associated with production facilities for the processes electrolysis, DAC, PtL and water treatment are considered sealed areas and assigned to hemeroby class VII.

Results

The electricity demand for the downstream processes of electrolysis and Fischer-Tropsch synthesis (PtL) is key for the extent of the associated land occupation. The production of one MWh of hydrogen by electrolysis requires about 1.5 MWh of electricity. If this "green" hydrogen is further processed into electricity-based fuel by means of Fischer-Tropsch synthesis, a total of about 3 MWh electricity is required for one MWh of fuel. Please note that there are significant differences in energy requirements depending on the processes selected. The energy demand for water treatment and CO₂ capture required for further processing into synthetic fuel are comparatively low and hardly contribute to the overall result.

The following conclusions can be drawn from the case study:

- The temporary land occupation associated with production in the MENA region compares favourably with Central European locations including Germany. Higher radiation intensity over the entire year results in temporary land occupation for both hydrogen and synthetic fuel (PtL) amounting to about half of that observed in Germany:
17 versus 33 m² · 1a/MWh H₂ and 36 versus 69 m²a/MWh PtL, respectively.

¹⁵ This means that, on average over the last few years, 0.15 m² of new stock is added annually for every m² of occupied plant area, which consequently goes hand in hand with the conversion of other land.

- It is irrelevant whether the electricity in the MENA region is generated by CSP or ground-mounted PV, as both technologies are associated with an almost equal temporary land occupation.
- Characterised by distance-to-nature potential, the differences decrease: the factor for H₂ produced in the MENA region compared to H₂ produced in Germany is 0.82, whereas the factor of MENA PtL compared to German PtL is 0.8.

This result is explained by the fact that edge and intermediate areas in Germany are assessed with a lower hemeroby class than the corresponding areas in the large-scale facilities in the MENA region, as these areas in the MENA region are subject to considerable interventions (including levelling, compaction) and in some cases must be kept permanently free of vegetation.

The parameters land efficiency and greater intensity of intervention thus offset each other, with a slight advantage favouring production in the MENA region in this example.

- The findings for **land transformation** are similar to those for occupancy. Since dynamic growth is to be expected in the future, only a limited comparison can be made here.
- The hemeroby results for land transformation in fact reverse the outcome in favour of production in Germany. This is explained by the different hemeroby levels of the initial land conditions in the two regions. Whereas the MENA region example is modelled assuming almost completely natural land, the initial condition of the German PV plants was already altered, i.e. the land had been subject to various human interventions before construction. Details on this can be found in Final Report Part III, Chapters 3.4.6.2 and 3.4.6.3. Again, please note that the data on land transformation are only of limited relevance due to the expected dynamic growth.

Case study 3: Construction materials

Scope

This case study explores the land rucksacks associated with structural load-bearing elements (hall beams) made of different construction materials. The required load capacity of all options is defined as follows: 10 m span and a dead load of 11.6 kN/m (not including the dead weight of the beam).

The land rucksacks of two types of glued laminated (glulam) timber hall beams, a steel hall beam and a reinforced concrete hall beam are compared.

To ensure the comparability of the technical and safety aspects for these different representatives of support systems typical for the construction of smaller industrial halls, this case study follows detailed analyses in (Albrecht et al. 2008) to infer the quantities of materials required in each case.

The focus of this case study is on the comparison of construction materials (forest area of harvested timber, ore mining, limestone mining, etc.). In addition, the steps of the manufacturing processes associated with high land use are considered (energy for steel and cement production).

In the context of this case study, the following types of land occupation are considered for the individual hall beams:

- ▶ Timber hall beam: forest area harvested for timber supply; the glulam beam is produced from either spruce or fir.
- ▶ Steel I-beam: area devastated for iron ore mining, as well as the area for the energy required for steel production (German electricity mix; lignite mining simplified for coke).
- ▶ Reinforced concrete beam: area devastated for iron ore mining, as well as the area for the energy needed for steel production (German electricity mix; lignite, simplified for fossil fuels as well as for the coke used); area of aggregates (sand, gravel) needed for concrete, quarry area for quarrying the limestone needed for cement (simplified) and the energy needed for cement production (German electricity mix, lignite mining).

The following aspects were excluded from the model: machinery etc. for the provision of wood as well as for the extraction of rock/provision of aggregates, auxiliary and operating materials, transport and infrastructure, energy costs associated with construction, energy costs for wood processing, hot rolling of steel or casting of concrete, life cycle and end-of-life considerations of the products with regard to the allocation of steel scrap, cascade use of wood, etc.

Data

In the following, the input data are presented separately for each construction material. Detailed information on the data may be found in the case study and in Final Report Part III.

For the production of the **glulam beam**, a volume of 1.5 m^3 of spruce or fir wood is assumed in this case study. The following land occupation values and hemeroby classes are assumed (see also Final Report Part III):

- ▶ Silver fir (*Abies alba*): $1072 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{m}^3$ (hemeroby class II: 10 %, III: 25 %, IV: 64 %; average IV)
- ▶ Spruce (*Picea abies*): $802 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{m}^3$ (hemeroby class II: 3 %, III: 6 %, IV: 27 %, V: 64 %; average V)

As described in Final Report Part III, the land transformation associated with forest products (mainly timber) is almost zero.

For **concrete**, data are required for both cement (simplified: area of limestone quarrying) and aggregates (area for sand and gravel extraction). Since the production of cement is classified as energy-intensive, the area for the required electricity (German electricity mix), as well as the area for the required fossil fuels (here simplified approx. 26 % lignite, remainder: alternative fuels) are also included in the calculations. For this purpose, the data from the first case study and Final Report Part III are used. The land occupation for the required raw materials is $0.196 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{t}$ for construction sand and construction gravel and $0.152 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{t}$ for limestone.

Hemeroby class VI is assumed for all infrastructure types except tailings and waste rock deposits, which are classified as hemeroby class VII. In addition, a land occupation of $0.096 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{t}$ with hemeroby class VII is assumed for construction sand as well as for limestone and dolomite.

The land transformation amounts to $0.037 \text{ m}^2/\text{t}$ for construction sand and gravel and $0.01 \text{ m}^2/\text{t}$ for limestone (Andrulleit et al. 2017).

Steel production in this case study (steel beams and reinforcement steel in reinforced concrete) is modelled with the following values, based in part on the average data for hot-rolled steel products in Germany in 2017 (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2018):

- Reinforced concrete beam (203 kg steel, 1.85 m³ concrete): 228 kg iron ore and 86 kg coke or to simplify, lignite; 1.1 MWh electricity
- Steel beam (1206 kg steel): 1,357 kg iron ore and 514 kg coke or, to simplify, lignite; 6.4 MWh electricity

Iron ore mining is modelled based on data from (ecoinvent 2020).

In this case study, the same amount of lignite is used for coke (coke is produced from coal). The land occupations for lignite have already been described in the case study on electricity above. The same applies to the electricity data.

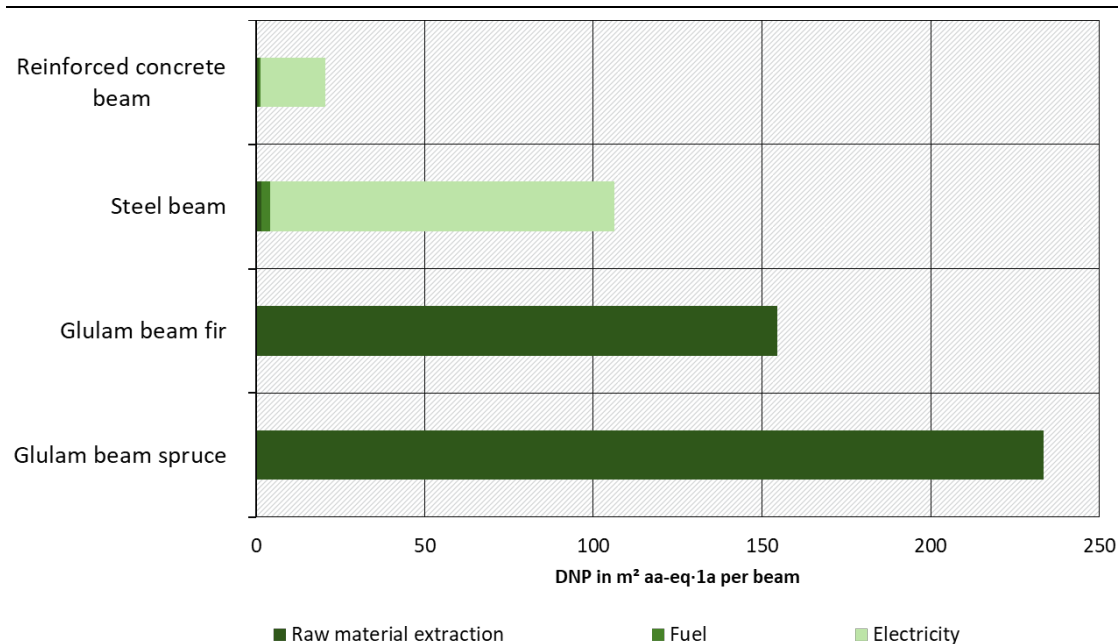
Results

The **temporary land occupation** associated with the two wood-based structural beams is considerably higher than that of the hall beams made of steel and reinforced concrete. The results reveal a temporary land occupation of approx. 1,170 m² a per glulam beam made of spruce and approx. 1,560 m² a per glulam beam made of fir. For the reinforced concrete beam, a temporary land occupation of approx. 280 m² a per steel beam was calculated, whereas the reinforced steel beam was associated with approx. 50 m² a per beam. No fuel or electricity requirements during production are assumed in this simplified illustrative example. The burden is therefore caused solely by raw material extraction. Due to the higher quantity of steel and the associated higher (land-intensive) electricity demand, the temporary land occupation of the steel hall beam is considerably greater than that of the reinforced concrete hall beam. The temporary land occupation for the extraction of the raw materials iron ore, lignite, limestone and construction sand and gravel is very low in comparison. Please note that the results of the two products containing steel can change depending on the choice of production route.

The results for land transformation reveal a very different picture, as the two timber hall beams are associated with virtually no land transformation at all. The land transformation of the reinforced concrete hall beam is approx. 0.35 m²/beam, whereas the steel hall beam amounts to approx. 1.18 m²/beam. Electricity consumption plays the key role for the overall outcome. For this reason, the electricity-intensive products, i.e. those made of steel and thus especially the solid steel hall beam, dominate the results. In this context, electricity consumption is even more relevant than the extraction of mineral raw materials (lime, iron ore).

Figure 5 illustrates the distance-to-nature potential (DNP) which was calculated as 20 m² aa-eq. · 1a per reinforced concrete hall beam, 107 m² aa-eq. · 1a per steel hall beam, 155 m² aa-eq. · 1a per fir hall beam and 234 m² aa-eq. · 1a per spruce hall beam, respectively. Due to the classification of fir wood into hemeroby class III compared to hemeroby class V for spruce wood and the associated lower characterisation factor for fir wood, the result is reversed in the two timber systems.

Figure 5: Distance-to-nature potential (DNP) for temporary land occupation by the analysed different hall beams



NB: The abbreviation aa-eq. stands for the unit artificial area equivalent

Source: own illustration 2021, ifeu

When land transformation is characterised by hemeroby, the overall outcome remains the same.

In sum, the reinforced concrete hall beam has the lowest temporary land occupation and also the lowest distance-to-nature potential. It should be noted here, however, that in the context of a complete life cycle assessment including further impact categories (e.g. climate change, acidification, abiotic resources, etc.), markedly different results are to be expected. With regard to land transformation and the distance-to-nature potential of land transformation, the results for the two timber systems compare very favourably with the alternatives.

Case study 4: Passenger transport energy

Scope

This case study explores the provision of propulsion energy for 100 passenger-kilometres (pkm) for a compact class vehicle considering a range of different drive technologies. The following alternatives are compared:

- ▶ Diesel (B7),
- ▶ pure biodiesel (as a mix, i.e. as blended into diesel in 2019, and separately for the components rapeseed oil methyl ester and palm oil methyl ester),¹⁶
- ▶ battery-electric charge with renewable energy (modelled both as the average RE mix and wind energy and ground-mounted PV supplying 50 % each).

¹⁶ Pure biodiesel is rarely used as a fuel, but it is included here as an option to show the contribution of biofuel in a fuel mix such as B7.

In addition, PtL is included in this case study as an electricity-based fuel derived from solar power in the MENA region (Middle East and North Africa). Please see the “Green hydrogen” case study above.

Fossil diesel is also treated in analogy to the land occupation and land transformation already determined for the “Electricity” case study for fossil energy sources. Vehicle production is excluded from this case study. However, the land occupation for transport infrastructure use is considered.

Data

For the **battery-electric** option, the data on land occupation and land transformation are adopted from case study 1. The land occupation data with and without characterisation and converted to 100 km¹⁷ are detailed below:

- RE electricity mix: $2.32 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$; $0.82 \text{ m}^2 \text{aa-eq} \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$
- Wind (onshore): $0.02 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$; $0.01 \text{ m}^2 \text{aa-eq} \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$
- Ground-mounted PV: $0.032 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$; $0.11 \text{ m}^2 \text{aa-eq} \cdot 1\text{a}/100 \text{ km}$

The modelling of land occupation associated with **biodiesel** requires a differentiation depending on primary biomass feedstocks. According to (BLE 2020), 47 % of the biodiesel marketed in Germany is produced from used vegetable oil, 28 % from rapeseed oil and 21 % from palm oil. Due to the fact that used vegetable oil is a waste material, it is not associated with any burdens.

The data on land occupation for rapeseed oil are provided in Final Report Part III. For the conversion of rapeseed to rapeseed methyl ester (RME, rapeseed oil-based biodiesel), data and calculation method are adopted from the BioEm study (Fehrenbach et al. 2016).

The resulting temporary land occupation for 1 MJ RME is $0.107 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}$, including by-products. Characterised by hemeroby, the distance-to-nature potential (DNP) is $0.051 \text{ m}^2 \text{aa-eq}^{18} \cdot 1\text{a}$ per MJ RME.

The land occupation for palm oil can also be derived from the BioEm study (Fehrenbach et al. 2016). Thus, the temporary land occupation for 1 MJ PME is $0.071 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}$ per MJ PME including by-products. Characterised by hemeroby, the distance-to-nature potential is $0.018 \text{ m}^2 \text{aa-eq} \cdot 1\text{a}$ per MJ PME.

For **diesel fuel**, the land occupation amounts to $0.00024 \text{ m}^2 1\text{a}/\text{MJ}$ - the same value applies after hemeroby characterisation because the associated land occupation falls entirely into class VII.

For a **B7 fuel** with 7% biodiesel by volume, considering the different densities (0.89 kg/l biodiesel, 0.832 kg/l fossil diesel) and the specific calorific values (37.2 MJ/kg biodiesel, 43.1 MJ/kg fossil diesel), the calculation reveals a land occupation of $0.0034 \text{ m}^2 1\text{a}/\text{MJ}$ or a distance-to-nature potential of $0.0015 \text{ m}^2 \text{aa-eq} \cdot 1\text{a}$ per MJ.

For the conversion to a distance of 100 km, the following energy consumption efficiency was adopted from (Meyer et al. 2019):

- Battery-electric consumption: $14 \text{ kWh}/100 \text{ km}$;

¹⁷ According to the ifeu Transport Emission Model (TREMOM) mentioned above, a battery-electric car in compact class requires an average of about 14 kWh per 100 km not including charging losses (Meyer et al. 2019).

¹⁸ Artificial area equivalent

- Diesel consumption: 4.7 l/100 km, i.e. 170 MJ/100 km

The land occupation of transport infrastructure required for a car journey of 100 km is the same for all propulsion technologies and amounts to 0.213 m²/100 km (see Final Report Part III).

The factors for **land transformation** may also be found in the data report and can be converted in proportion or adopted from case study 1. For biodiesel, the following data were reported:

- Rapeseed methyl ester (RME): before characterisation 0.00029 m² per MJ RME
(=0.107 m² · 1a · 0.0027 m²/a · m²); after characterisation (difference) 0.000036 m² aa-eq. per MJ RME
- Palm oil methyl ester (PME): before characterisation: 0.00212 m² per MJ PME
(=0.071 m² · 1a · 0.03 m²/a · m²); after characterisation (difference): 0.00053 m² aa-eq. per MJ PME

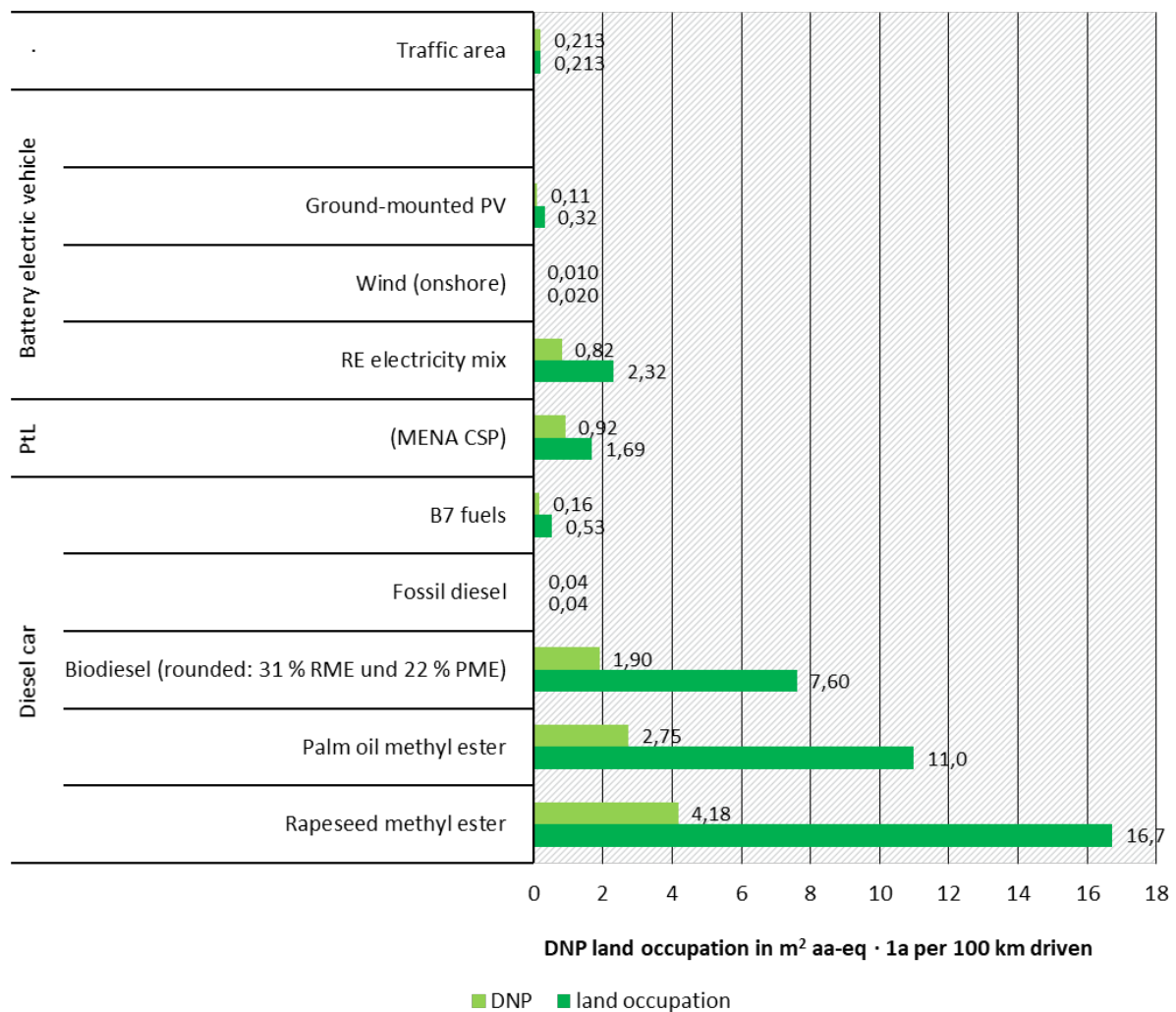
The available databases (including ecoinvent) do not provide any life cycle inventory data on land transformation for petroleum and petroleum products. Since it can be assumed that the factors for land transformation are also very low, they are not included in this case study.

Results

The results for the **temporary land occupation** are illustrated in Figure 6. Evidently, with and without characterisation, land occupation is determined by the share and type of biofuel. Rapeseed methyl ester (RME) is associated with the highest burden due to the comparatively low yields per hectare. Palm oil methyl ester (PME) compares favourably with rapeseed due to the higher yields per hectare. Considering the DNP, palm oil retains its advantage over annual crop rapeseed due to cultivation in permanent plantations with comparatively low interventions. The current average biodiesel mix compares even more favourably, as it includes a high share of waste vegetable oil without any land occupation attributed. Fossil diesel is associated with very low land occupation, so that B7, with approx. 6.5 % biodiesel energy share, also has a very low calculated land occupation.

A journey of 100 km with a battery-electric vehicle, on the other hand, occupies more land than a diesel vehicle with B7 assuming the average mix of renewable electricity. This is based on the shares of electricity from biogas and solid biomass (see also case study 1). However, with electricity from wind power (onshore) or ground-mounted PV, the occupation is lower than with a B7 diesel car. In fact, electricity from wind power is considerably lower.

Figure 6: Temporary land occupation and DNP for the analysed options of different propulsion technologies for a passenger car journey of 100 km



NB: The abbreviation aa-eq. stands for the unit artificial area equivalent.

Source: own illustration 2021, ifeu

The results of the **land transformation** comparison differ from the results of the temporary land occupation in two key aspects:

- **PtL** produced from solar power from the MENA region is associated with the greatest transformation. Both the very dynamic growth assumed for the technology¹⁹ and the strong increase in hemeroby are responsible for this result. The stark change in hemeroby occurs because the relevant areas are mostly natural ecosystems, whereas CSP plants require a considerable level of development of these natural areas. However, due to strong dynamic expected growth across the sector, this comparison may have to be re-evaluated in the near future.

¹⁹ An annual increase in area of 15 % is assumed, with a simultaneous increase in efficiency.

- ▶ **Palm oil methyl ester** (PME) causes the second highest land transformation and is thus clearly ahead of rapeseed methyl ester (RME). This reflects the strong expansion of palm oil production in Indonesia, the main country of origin.

Conclusions

With the four case studies presented here, a practical test of the land rucksack method was carried out. Given the broad range of examples, it is evident that the method can be applied to any type of life cycle assessment of products or services in principle. Certain patterns or consistent trends also emerge from the results, e.g.:

- ▶ Any system that includes biomass as a raw material is usually dominated by the biotic feedstock rather than the abiotic raw materials.

This effect is particularly evident in the case study “Construction materials”. In steel production, electricity (with a share of 6 % biogas) dominates the land rucksack far more than raw materials (iron ore, coal).

- ▶ Among the different types of biomass, the differences can be considerable; these are reflected in the yields per unit area (palm oil better than rapeseed oil), in the respective hemeroby (wood better than agricultural biomass) as well as in the temporary land transformation (rapeseed oil better than palm oil).
- ▶ Geographical factors may be considered and analysed (e.g. green electricity for hydrogen in the MENA region or Germany).

The case studies were carried out assuming several simplifications of the systems under investigation, as they primarily served to verify the methodology and its applicability. Limitations and the need for further development were also identified. Overall, these pilot studies revealed a robust and practical tool for the assessment of land use in LCA.

1 Hintergrund zu diesem Teilbericht

Mit diesem Forschungsvorhaben sollte u. a. folgende Frage beantwortet werden: Wie kann eine praktikable Methodik aussehen, um Fläche als Wirkungskategorie in der Ökobilanz zu verankern? Das übergreifende Ziel war somit die Ausarbeitung eines entsprechenden Vorschlags, der aussagekräftig und anwendungsfähig ist. Damit verbunden sind transparente methodische Anleitungen, nachvollziehbare beispielhafte Anwendungen und die Bereitstellung eines Grundstocks an Daten bzw. Hinweise auf Datenquellen.

Aufbauend auf dem bereits bestehenden Ansatz einer Charakterisierung der Flächenbelegung mittels Hemerobie (Fehrenbach et al. 2015) sollten dessen Lücken für eine umfassende Anwendung auf alle wesentlichen Arten der Flächennutzung identifiziert und geschlossen werden.

Des Weiteren sollte der Ansatz zu einem konsistenten Konzept eines „Flächenrucksack“ weiterentwickelt werden. Dies schließt die temporäre Flächenbelegung (occupation) und die Flächennutzungsänderung (transformation) ein.

In Teilbericht I zu diesem Projekt wird die Methodik umfassend beschrieben und hergeleitet. Der vorliegende Teilbericht II zeigt die Anwendung der Methode anhand von vier Fallbeispielen (Tabelle 1). In Teilbericht III finden sich eine Zusammenstellung von Daten zur temporären Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung einschließlich deren Hemerobie sowie umfassende Darstellungen zur Herleitung dieser Daten.

1.1 Aufgabenstellung

Tabelle 1 stellt die Beispiele zusammen, die in diesem Bericht vorgestellt werden.

Tabelle 1: Fallbeispiele für Flächenrucksäcke im Rahmen des Projekts

Produkte			Dienstleistung
Beispiel 1:	Beispiel 2:	Beispiel 3:	Beispiel 4:
Strom (1 MWh)	„Grüner“ Wasserstoff (H₂) und strombasierte Kraftstoffe auf Basis Solarstrom in der MENA-Region	Bautechnisches Trageelement (10 m Spannweite für Hochbau)	Personen-Transport (100 Personenkilometer, nur Antriebsenergie)
Vergleichsoptionen:			
Strom aus dem Deutschen Stromnetz		Stahlbetonträger	Mittelklasse-Personenkraftwagen (Pkw) mit Diesel (B7) ^{a)}
Erneuerbare Energien Strommix		Stahlträger	Mittelklasse-Pkw mit Biodiesel
			Mittelklasse-Pkw mit strombasiertem Kraftstoff (PtL) auf Basis von Solarstrom in der MENA-Region aus Fallbeispiel 2
		Schichtholzträger	Elektrofahrzeug mit EE-Strom

a) Dielektrikstoff mit einer Beimischung von maximal 7% (Volumenprozent) Biodiesel zu konventionellem Diesel
Quelle: Eigene Zusammenstellung, ifeu 2021

2 Fallbeispiel 1: Strom

2.1 Welche Vergleichsoptionen werden betrachtet?

In diesem Fallbeispiel werden für folgende Optionen die temporäre Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung ermittelt und miteinander verglichen:

- a) Strom aus dem deutschen Stromnetz, als durchschnittlicher Produktionsmix im Jahr 2019
- b) Strom aus einem mittleren Mix an erneuerbaren Energien (EE) (gemäß den prozentualen Anteilen im durchschnittlichen Produktionsmix im Jahr 2019)
- c) Strom jeweils aus den einzelnen technologiespezifischen erneuerbaren Energieträgern

2.2 Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?

Die Auswahl der für die Stromproduktion relevanten Energieträger wie auch die Anteile zum mittleren Strommix werden den von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat 2020) und der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB 2021) aufgestellten Bilanzen für die Strom- und Wärmeerzeugung und für den Verkehr in Deutschland entnommen.²⁰

Die Systemgrenze für die Produktion von Strom ist in Abbildung 7 zusammengefasst. Sie beinhaltet:

1. Rohstoffgewinnung der Energieträger (fossile Rohstoffe, Uranerz, feste Biomasse (Holz) und Biomasse für die Biogasproduktion).
Die Mengen an eingesetzten Primärenergieträgern werden jeweils mit den Flächenbelegungsfaktoren multipliziert. Diese Faktoren stellen ein Ergebnis des Projekts Flächenrucksack dar und sind für alle (relevanten) Energieträger verfügbar
2. Infrastrukturen; diese werden unterschieden in:
 - a. thermische Kraftwerksanlagen (Konversion von fossilen oder biogenen Primärenergieträgern), Abfallverbrennungsanlagen sowie Anlagen zur direkten Konversion von Wind und Sonne, sowie
 - b. Übertragungsnetze

Im Beispiel werden nicht betrachtet:

- Anlagen auf bestehenden Bauwerken, wie z.B. Dachflächen-Photovoltaik, da diese Flächen bereits durch eine andere Nutzung belegt sind und das Prinzip des Flächenrucksacks eine Doppelanrechnung ausschließt.
- Offshore-Windenergieanlagen und Wasserkraftwerke, da Meeres- wie auch Süßwasserflächen bislang nicht im Hemerobiekonzept abgedeckt sind.²¹
- Datensätze wurden im Rahmen des Vorhabens auch für Strom aus Tiefengeothermie, sowie aus Klär- und Deponiegas ermittelt; sie spielen im durchschnittlichen Produktionsmix von Strom in Deutschland jedoch eine sehr untergeordnete Rolle, sodass sie hier nicht eingerechnet wurden.

²⁰ Tabellen „2.1. Primärenergieverbrauch nach Energieträgern“ und „3.1 Primärenergieverbrauch Erneuerbare Energien“.

²¹ Hier besteht Bedarf zur Erweiterung und dazu auch zusätzlicher Forschungsbedarf.

Abbildung 7: Systemraum zur Bestimmung der Flächenbelegung durch die Stromerzeugung



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

2.3 Verfügbare Datenquellen für die Flächenbelegung, die Flächennutzungsänderung und die Hemerobie

Die Datensätze für alle hier betrachteten Flächenbelegungen finden sich im Teilbericht III. Nachfolgend sind die wesentlichen Eckdaten zusammengestellt.

2.3.1 Daten zum deutschen Strommix

Die Anteile der einzelnen Energieträger zum mittleren deutschen Strommix gemäß der Bilanzen der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat 2020) und der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB 2021) finden sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Anteile der Energieträgerarten zur Bruttostromerzeugung in Deutschland 2019

Energieträger	Bruttostromerzeugung in TWh/a	Anteil in Prozent	Für Flächenbelegung berücksichtigt
Braunkohle	113,9	19,3	ja
Steinkohle	57,3	9,7	ja
Erdöl	5,1	0,9	ja
Erdgas	91	15,4	ja
Kernkraft	75,1	12,7	ja
Wind an Land	101,3	17,1	ja
Wind (offshore)	24,7	4,2	nein
Photovoltaik-Freiflächenanlage (PV-FFA)	14,25	2,4	ja
Photovoltaik (PV) (Dach)	33,25	5,6	ja, wird jedoch mit Null angesetzt
Biogas	31,9	5,4	ja
Feste Biobrennstoffe	10,5	1,8	ja
Müllverbrennung	12,4	2,1	ja
Wasserkraft	20,2	3,4	nein

Quelle: (AGEB 2021)

2.3.2 Daten zur temporären Flächenbelegung

Im Teilbericht III sind die Daten zur temporären Flächenbelegung der einzelnen Energieträger ausführlich beschrieben. Für die Umrechnung auf Strom bedarf es der Zusammenführung von Daten zur Flächenbelegung durch Rohstoffe sowie zu den verschiedenen Infrastrukturen (Kraftwerksanlagen, Übertragungsnetze etc.). Das beinhaltet auch Flächenbelegungen außerhalb Deutschlands, z. B. durch Kohleabbau oder Erdgasgewinnung in den Ländern, aus denen die Rohstoffe importiert werden.

2.3.2.1 Feste Biomasse

Eine Flächenbelegung ist lediglich solchen Biomassen zuzurechnen, die direkt dem Wald bzw. Forst entnommen werden bzw. als Nebenprodukte der Holzverarbeitung gelten (Sägerestholz und sonstiges Industrierestholz).

Nicht darunter fallen folglich:

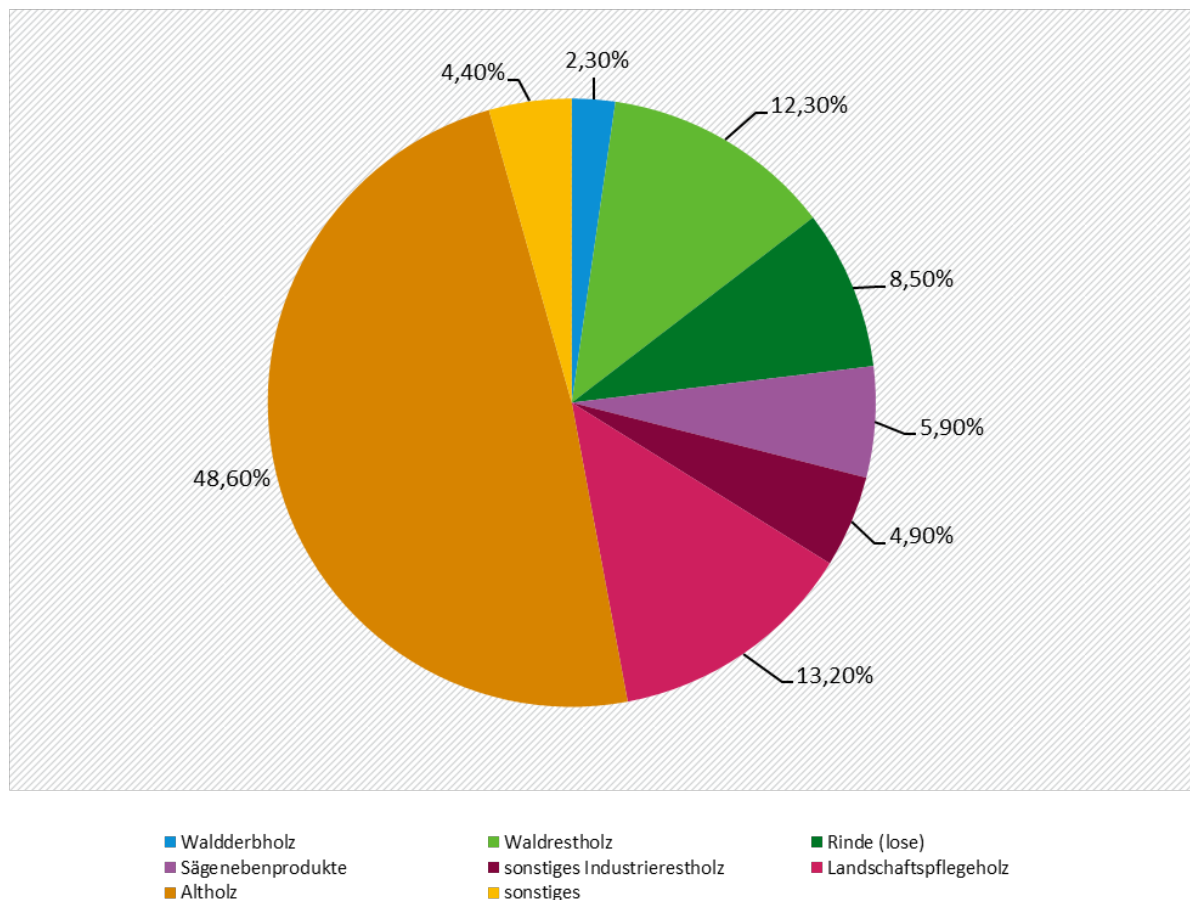
- ▶ Altholz,
- ▶ Landschaftspflegeholz, da dieses aus als Landschaft- und Naturschutzbelangen erforderlichen Maßnahmen anfällt.

Wie in Abbildung 8 dargestellt, bestehen nach (Döring et al. 2018) knapp 50 % der in Großfeuerungsanlagen (>1 MW) verfeuerten festen Biomasse aus Altholz. Lediglich ca. 15 % des Anteils sind direkt Waldholz zuzurechnen (Waldderbholz & Waldrestholz), ca. 11 % zählen zu Sägerestholz und sonstigem Industrierestholz (Sägenebenprodukte & sonstiges Industrieholz). Diesen Stoffströmen ist eine Flächenbelegung im Wald bzw. Forst zuzurechnen.

Der Flächenbelegung mit Forstflächen für feste Biomassen ist beim mittleren deutschen Strommix mit 10,5 TWh pro Jahr daher nur einem Anteil von 25 % anzurechnen (Tabelle 3).

Abbildung 8: Anteile fester Biomasse zur Stromerzeugung in Deutschland

Holzverwendung in Großfeuerungsanlagen (>1MW)



Quellen: Eigene Darstellung 2021, ifeu nach (Döring et al. 2018)

Tabelle 3: Flächenbelegung für feste Biobrennstoffe

Substrat	Anteil Flächenbelegung im Wald (%)	Belegung (m ² ·1a/m ³)	Belegung (m ² ·1a/t _{atro})	Belegung (m ² ·1a/MWh Strom)
Waldholz und Sä- gerestholz	25,40	1.510	2902	441

Quelle: Teilbericht III, Kapitel 3.2.1; Dichte zur Umrechnung von m³ in t_{atro}: 1,929 m³ / t_{atro}

2.3.2.2 Biogas

Für den Strom aus Biogas setzt sich die Vorkette aus verschiedenen Substraten zusammen. In Tabelle 4 sind die mittleren Anteile der Substrate nach dem Monitoring der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland (Daniel-Gromke et al. 2017) dargestellt. Dieses beruht auf Auswertungen der jährlich durchgeführten Betreiberbefragung des Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ), u.a. zielend auf möglichst repräsentative Daten zum Anlagenbetrieb, der Anlagentechnik, Anlagenveränderung und insbesondere zum Substratinput. Die Biogaserträge sind (KTBL 2013) und die Flächenerträge dem Teilbericht III Kapitel 3.2.2 entnommen. Im Mittel ergeben sich daraus 57,8 m²·1a/GJ Biogas.

Tabelle 4: Datengrundlage für die temporäre Flächenbelegung zur Erzeugung der Biogassubstrate

Substrat	Anteil energetisch (%)	Biogasertrag (GJ/t)	Flächenertrag (t/ha)	Belegung (m ² ·1a/t)	Belegung (m ² ·1a/GJ Biogas)
Mais (Silage – 35 % TR)	55	3,81	41,7	240	63,0
GPS Getreide	5	3,69	30	333	90,3
Grassilage	7	3,24	20	500	154,3
sonst. Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo)	7	3,5	50	200	57,1
Gülle	15		-		0
Bioabfall	9		-		0
gewichtetes Mittel					57,8

Quellen: (Daniel-Gromke et al. 2017; KTBL 2013), Flächenerträge: siehe Teilbericht III, Kapitel 3.2.2

Die Umrechnung auf Strom erfolgt über den mittleren elektrischen Wirkungsgrad von 37 % unter Berücksichtigung einer exergetischen Allokation von zusätzlich 18 % genutzter Wärme. Dem Strom werden dadurch 92 % angerechnet. Folgenden Allokationsfaktoren werden dabei angewendet: Faktor 1 für Strom und Faktor 0,22 für Wärme als Fernwärme. Diese Faktoren beziehen sich auf den sogenannten Carnot-Wirkungsgrad²², wobei von 80°C Vorlauftemperatur für die

²² Der Carnot-Wirkungsgrad (η) gibt für einen Prozess der Umwandlung von Wärme in Arbeit (Carnot-Prozess) das Verhältnis von abgegebener Arbeit (Strom) zur zugeführten Wärme an; maßgeblich ist dabei die Differenz der Prozesstemperatur (T_h) zur Umgebungstemperatur (T_0); für Strom ist der Carnot-Wirkungsgrad auf 1 gesetzt, für die Wärme errechnet er sich nach folgender Formel:

$$\eta = \frac{T_h - T_0}{T_h}$$

Fernwärme ausgegangen wird. Für 1 GJ Strom aus Biogas resultieren damit $144 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{GJ}$ Strom, bzw. $0,517 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{kWh}$ Strom.

Hinzuzurechnen sind – wie für alle anderen Energieträger – die Infrastrukturflächen. Dies erfolgt in der Gesamtschau im Kapitel 2.3.2.5.

2.3.2.3 Braunkohle

Datengrundlage der Vorkette Braunkohle bildet die (Statistik der Kohlenwirtschaft 2019). Diese wird jährlich fortgeschrieben, wodurch die Daten für den Flächenrucksack kontinuierlich nachgeführt werden können.

Wie in Teilbericht III Kapitel 3.2.4.2 beschrieben, gehen zwei Komponenten in die Bestimmung der Flächenbelegung von einer Tonne Braunkohle ein:

1. Die **Betriebsfläche**:
5-Jahresmittel (2014-2018) basierend auf der Statistik der Kohlewirtschaft e.V. :
Daraus ergeben sich $3,24 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{t}$ Braunkohle
2. Die Fläche die **nach dem Abbau einer Nichtnutzung** über x Jahre unterliegt:
Eine terrestrische Fläche von $1,19 \text{ m}^2$ und Wasserfläche von $0,54 \text{ m}^2$

Für den Abbau einer Tonne Braunkohle ergibt sich somit eine temporäre Gesamt-Belegung von $4,98 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}/\text{t}$ Braunkohle.

Da die Kraftwerke in Nachbarschaft der Tagebaue liegen, werden die Transportwege (zumeist Förderbänder) hier vernachlässigt.

2.3.2.4 Weitere Komponenten

Zu den meisten weiteren in Abbildung 7 zusammengestellten Vorketten liegen nicht so differenzierte Daten vor, wie es für Braunkohle und Biogas der Fall ist. Auch ist hier die Fortschreibungsfähigkeit eingeschränkt, da zumeist nur ein Datensatz oder Datenpunkt aus einer Ökobilanzdatenbank wie (ecoinvent 2020) Verwendung findet. Dies ist insbesondere bei den importierten Energieträgern wie Steinkohle, Erdgas, Erdöl und Uran der Fall.

Bei diesen Rohstoffen wird auch die Flächenbelegung für die Transporte einbezogen. Bei Erdgas und Erdöl sind dies v. a. die Pipeline-Flächen. Steinkohle wird über weite Strecken per Bahn oder Lkw transportiert; dies betrifft vor allem den Importanteil aus Russland. Damit gehen transportbedingte Flächenbelegungen einher, die in der Größenordnung bei jener für den Kohleabbau liegen.

Umwandlung

Die Umwandlung/Konversion umfasst die Flächenbelegung durch Kraftwerke. Sehr ausführlich wird in Teilbericht III Kapitel 3.2.5.1 und 3.2.5.2 die Belegung durch Onshore-Windenergieanlagen und Freiland-PV-Anlagen hergeleitet. Für die anderen Anlagen (Kohle-, Gas, Öl-, Kernkraftwerke sowie Müllverbrennungs- und Biogasanlagen) wurden Belegungsdaten aus Satellitenbildern in Verbindung mit der Jahresstromproduktionen abgeleitet (siehe ebenfalls in Teilbericht III Kapitel 3.2.5). Die Flächenbelegungsdaten zur Konversion sind in Tabelle 5 integriert.

Übertragung und Verteilung

Hierfür wurden Daten der Bundesnetzagentur sowie Auswertungen durch Consentec im Rahmen der Langfristszenarien (Pfluger et al. 2018) verwendet. Die daraus abgeleitete Flächenbelegung pro kWh Strom wird in Teilbericht III Kapitel 3.2.5.5 ausführlich dargestellt und ist in Tabelle 5 mit aufgenommen.

2.3.2.5 Gesamtschau der temporären Flächenbelegung der Energieträger

In Tabelle 5 sind die spezifischen Faktoren zur temporären Flächenbelegung der einzelnen Energieträger zusammengestellt. Die höchsten Werte liegen bei Biogas (mit 519 m² 1a/MWh Strom), fester Biomasse (mit 442 m² 1a/MWh Strom) und PV-FFA vor (mit 22,5 m² 1a/MWh Strom). Wind (an Land) liegt dagegen mit 1,43 m² 1a/MWh Strom in der Größenordnung der übrigen Energieträger und deutlich unter dem Braunkohlestrom mit 6,26 m² 1a/MWh.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom nach Energieträgern

Energieträger	Flächenbelegungs-Faktoren [m ² 1a/MWh Strom]				Summe
	Rohstoff-vorkette	direkte EE-Stromerzeugung	Konversion	Übertragungs-netz	
Braunkohle	5,36	-	0,353	0,547	6,26
Steinkohle	2,28	-	0,379	0,547	3,20
Erdöl	0,009	-	0,288	0,547	0,84
Erdgas	0,098	-	0,188	0,547	0,83
Kernkraft	0,64	-	0,320	0,547	1,51
Wind (an Land)	-	0,88	-	0,547	1,43
Photovoltaik (PV-FFA)	-	22,0	-	0,547	22,5
Biogas (Mix)	517	-	1,10	0,547	519
Feste Biobrennstoffe	441 ^{a)}	-	0,485	0,547	442
Müllverbrennung	-	-	0,771	0,547	1,32

a) zu 25 % Flächenbelegung Wald bzw. Forst eingerechnet (siehe Kapitel 2.3.2.1)

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu siehe Teilbericht III Kapitel 3.2.5

2.3.3 Daten zur Flächennutzungsänderung

In Teilbericht III sind die Daten zur Flächennutzungsänderung einzelner Energieträger beschrieben. Das Grundprinzip beruht auf dem Ansatz der sogenannten attribuierten Landnutzungsänderung, wonach die mittlere jährliche Flächennutzungsänderung zu Gunsten einer Produktionsart (Ackerbau, Windenergieanlagen, Tagebau etc.) auf deren mittlere jährliche Gesamtflächenbelegung bezogen wird.

Da sich die Waldfläche in Deutschland nur in sehr geringem Maße ausdehnt, wird gemäß den Ausarbeitungen in Teilbericht III Kapitel 3.3.1 die Flächennutzungsänderung für Holz als feste Biomasse mit Null angesetzt.

Für die landwirtschaftlichen Erzeugnisse zur Biogasproduktion (Silomais, Ganzpflanzen, Grünschnitt) wird gemäß Kapitel 3.3.2 im Teilbericht III jeweils der einheitliche Faktor von 27 m² pro belegtem Hektar Ackerfläche zu Grunde gelegt.

Weitergehend sind Flächennutzungsänderungen in folgenden Kapiteln zu finden:

- Zur Windenergie in Kapitel 3.3.5.1 im Teilbericht III

- Zur Photovoltaik in Kapitel 3.3.5.2 im Teilbericht III
- Zur Braunkohle in Kapitel 3.3.4.2 im Teilbericht III
- Zu Übertragungsnetzen in Kapitel 3.3.5.4 im Teilbericht III

In Tabelle 6 sind die Faktoren zur Flächennutzungsänderung der einzelnen Energieträger zusammengestellt. Es wird deutlich, dass im Rahmen des Projektes nicht für alle Energieträger und nicht für alle Bereiche der Vorkette Daten zur Flächennutzungsänderung identifiziert werden konnten. Beispielsweise stehen für die importierten Rohstoffe wie Steinkohle, Erdöl und Erdgas, aber auch für die Umwandlung, das heißt die Konversion des Rohstoffs in Energie, keine Daten zur Verfügung. Aufgrund der Tatsache, dass Kraftwerke, die zu dem Bereich Konversion/Umwandlung der Vorkette gehören, eine äußerst geringe Flächennutzungsänderung aufweisen und zudem keine Daten zur Flächennutzungsänderung von Kraftwerken vorliegen, wird der Bereich Konversion aus der Betrachtung genommen.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Flächennutzungsänderungs-Faktoren für 1 MWh Strom nach Energieträgern

Energieträger	Flächennutzungsänderungs-Faktoren [m ² /MWh Strom]				Summe
	Rohstoff	direkte EE-Stromerzeugung	Konversion	Übertragungsnetz	
Braunkohle	0,11	-	(b)	0,00257	0,113
Steinkohle	(a)	-	(b)	0,00257	0,00257
Erdöl	(a)	-	(b)	0,00257	0,00257
Erdgas	(a)	-	(b)	0,00257	0,00257
Kernkraft	(a)	-	(b)	0,00257	0,00257
Wind (an Land)	-	0,0488	-	0,00257	0,051
Photovoltaik (PV-FFA)	-	2,421	-	0,00257	2,424
Biogas (Mix)	1,4	-	(b)	0,00257	1,4
Feste Biobrennstoffe	0	-	(b)	0,00257	0,00257
Müllverbrennung	-	-	(b)	0,00257	0,00257

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu siehe Teilbericht III Kapitel 4

(a) Daten aus ecoinvent mit sehr niedrigen Faktoren (wurden hier bei der Berechnung vernachlässigt).

(b) Hierzu wurden bislang keine Daten ausgearbeitet, angesichts des geringen Anteils der Konversion bei Belegung und der Annahme, dass ein massiver Ausbau von thermischen Energieanlagen in den letzten Jahren nicht erfolgt ist, kann dieser Bereich für dieses Fallbeispiel vernachlässigt werden.

Anders gestaltet sich die Situation für die importierten Energieträger. Einige der importierten Energieträger, wie beispielsweise Steinkohle, machen einen nicht unerheblichen Anteil an der Bruttostromerzeugung Deutschlands aus. Allerdings können hierzu im Rahmen des Projektes keine Daten zur Verfügung gestellt werden. Zum einen stammen die Rohstoffe aus unterschiedlichen Staaten und es besteht bis dato kein Datensatz zur Flächennutzungsänderung für die in Deutschland verwendete Steinkohle, die aus unterschiedlichen Ländern importiert wurde. Zum

anderen sollten Datensätze zur Flächennutzungsänderung, wie sie beispielsweise in gängigen Ökobilanzdatenbanken wie ecoinvent vorliegen (dort als *transformation* bezeichnet), eingehend auf ihre Kompatibilität mit der hier angewandten Methode zur Bestimmung der Flächennutzungsänderung (der aLUC-Ansatz, siehe Teilbericht I Kapitel 5.2) geprüft werden, bevor sie der Verwendung zur Verfügung gestellt werden. Folglich wird vonseiten der Autorenschaft auf weitergehenden Forschungsbedarf im Kontext Flächennutzungsänderung verwiesen.

2.3.4 Daten zur Hemerobie

In Tabelle 7 sind die Hemerobieklassen aller für die Stromproduktion belegten Flächen wiedergegeben. Im Teilbericht III sind die Daten zur Hemerobie der durch die einzelnen Energieträger belegten Flächen ausführlich beschrieben. Lediglich für den Bereich Konversion sei auf den Methodenbericht verwiesen, demzufolge versiegelten Flächen, wie beispielsweise Kraftwerken, automatisch die Hemerobiekategorie VII zugewiesen wird.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Bandbreite der Hemerobieklassen nach Energieträgern

Energieträger	Hemerobieklassen			
	Rohstoff	direkte EE-Stromerzeugung	Konversion	Übertragungsnetz
Braunkohle	VII	-	VII	V, VII
Steinkohle	VII	-	VII	V, VII
Erdöl	VI, VII	-	VII	V, VII
Erdgas	VII	-	VII	V, VII
Kernkraft	VII	-	VII	V, VII
Wind (onshore)	-	V, VI, VII	-	V, VII
Photovoltaik (PV-FFA)	-	V, VI, VII	-	V, VII
Biogas (Mix)	IV, V, VI	-	VII	V, VII
Feste Biobrennstoffe	II, III, IV, V	-	VII	V, VII
Müllverbrennung	-	-	VII	V, VII

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, siehe Teilbericht III Kapitel 3.2.5

Die Ableitung entsprechender Charakterisierungsfaktoren lehnt sich an die anteiligen Hemerobieklassen an. Während für Braunkohle die Hemerobiekategorie VII und folglich der Charakterisierungsfaktor 1 verwendet wird, gestaltet sich die Ableitung der Charakterisierungsfaktoren für Energieträger, die eine Bandbreite an Hemerobieklassen aufweisen, wie beispielsweise Biogas, durchaus komplexer.

Wie in Tabelle 4 aufgeführt, setzt sich Biogas aus mehreren Biomassesubstraten zusammen, welche wiederum eine unterschiedliche Bandbreite an Hemerobieklassen aufweisen. Mais beispielsweise wird zu 100 % der Hemerobiekategorie VI zugerechnet, während Getreide als Ganzpflanzensilage zu 40 % Klasse V und zu 60 % Klasse VI zugewiesen wird. Weitergehend wird Grassilage zu 80 % Hemerobiekategorie IV und zu 20 % Hemerobiekategorie V zugerechnet. Die sonstigen NawaRo weisen ein gleiches Verhältnis wie GPS Getreide mit 40 und 60 % auf. Die Vertei-

lung dieser Hemerobieklassen über alle Biomassesubstrate führt letztendlich zu folgenden Charakterisierungsfaktoren:

- ▶ Mais: 0,5
- ▶ GPS Getreide: 0,4
- ▶ Grassilage: 0,15
- ▶ Sonstige NawaRo: 0,4

In ähnlicher Komplexität gestaltet sich die Ableitung der Charakterisierungsfaktoren der anderen Energieträger, da die Bereitstellung von Strom auf unterschiedlichen Flächen unterschiedlicher Hemerobieklassen erfolgt.

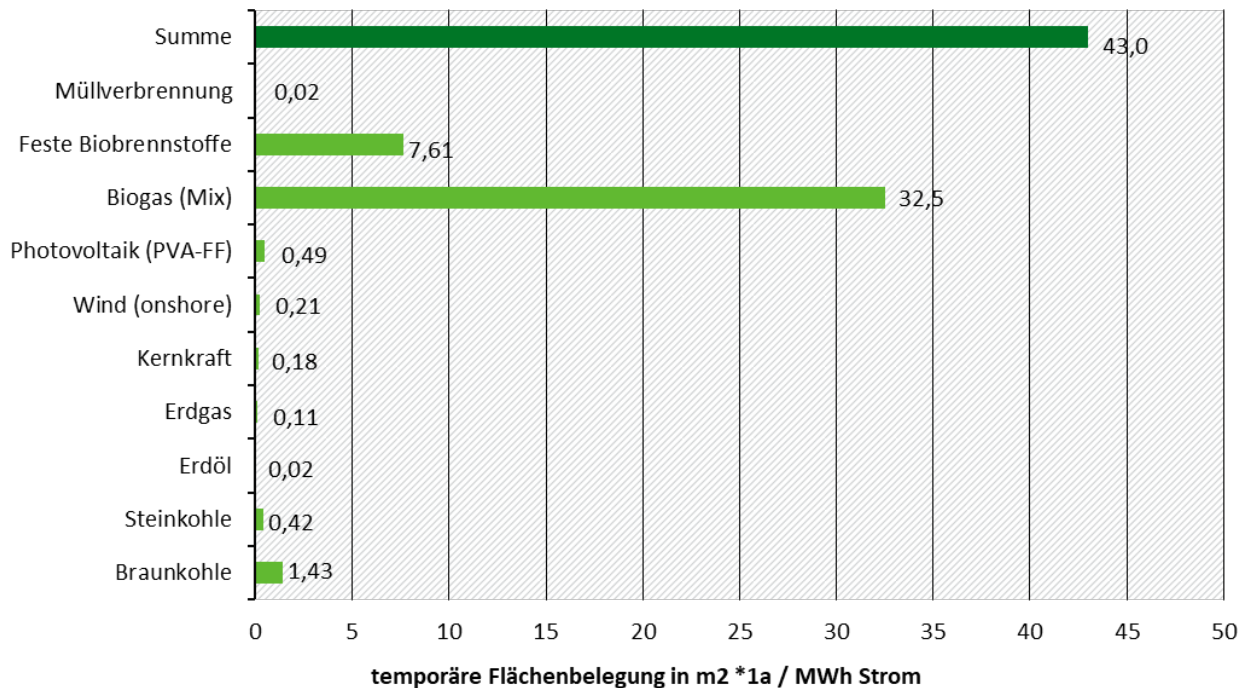
Des Weiteren bedarf es der Daten zur Hemerobie der betroffenen Flächen vor der Flächennutzungsänderung. Zu Wind- und Solarenergie finden sich dazu umfassende Herleitungen im Teilbericht III (Kapitel 3.4.6.1 bis 3.4.6.2) sowie eine Gesamtschau ebenfalls in Teilbericht III (Kapitel 3.4.7).

2.4 Ergebnisse des Vergleichs

2.4.1 Temporäre Flächenbelegung

Unter Berücksichtigung der Anteile der Energieträgerarten im Strommix Deutschland gemäß Tabelle 2 ergibt sich die temporäre Flächenbelegung (ohne Charakterisierung nach Hemerobie) für den mittleren Strommix 2019 wie in Abbildung 9 dargestellt. Die Gesamtsumme liegt bei 43 m² 1a/MWh Strom und wird zu über 75 % durch Biogas dominiert. Knapp 18 % sind den festen Biobrennstoffen zuzurechnen. Auf Braunkohle entfallen 3,3 % und auf die übrigen erneuerbaren Energieträger 1,6 %.

Abbildung 9: Flächenbelegungs-Faktor für 1 MWh Strom mittlerer deutscher Mix in 2019, differenziert nach Anteilen der einzelnen Energieträger



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

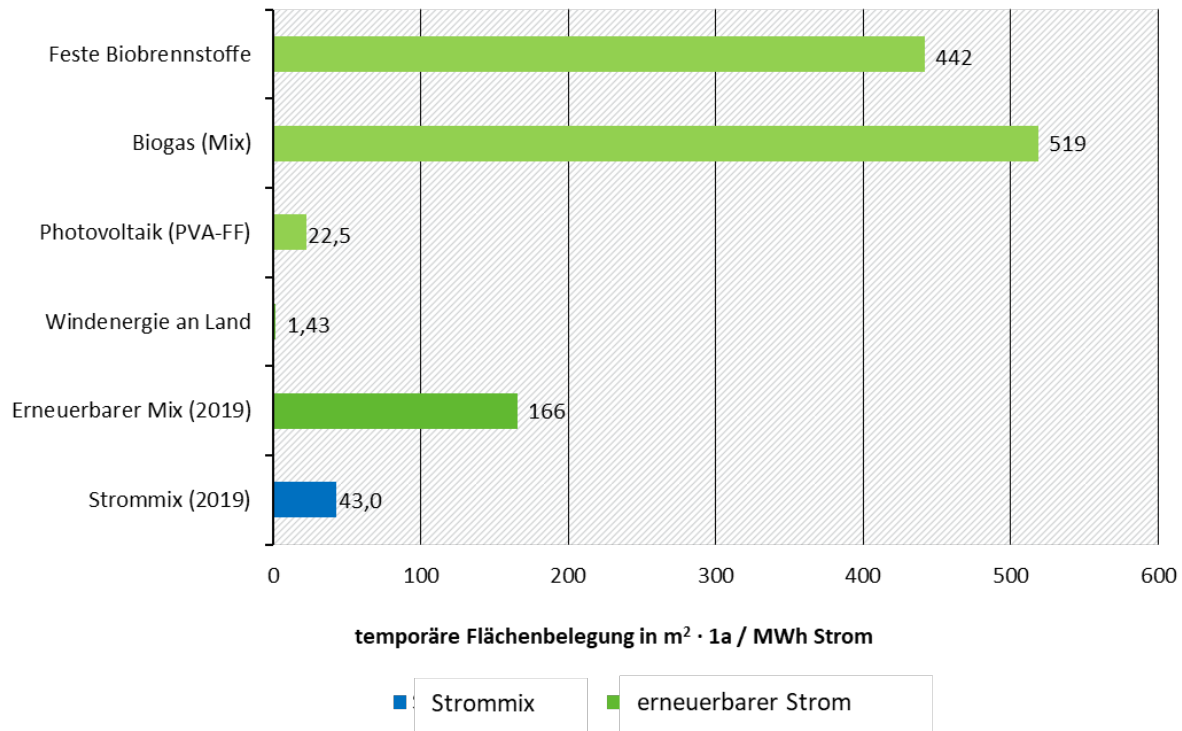
In Abbildung 10 wird die Flächenbelegung für den mittleren Strommix 2019 mit der Flächenbelegung des Erneuerbaren-Mix und der Flächenbelegung einzelner Energieträger verglichen. Folgende Varianten sind berücksichtigt:

- ▶ Der Mix aus erneuerbaren Energieträgern (Erneuerbarer Mix 2019) im Jahr 2019 (setzt sich aus Windenergie an Land, PV-FFA, PV-Dachflächenanlagen, Biogas und festen Biobrennstoffen zusammen; nicht berücksichtigt wurde die Offshore-Windkraft und Wasserkraft).
- ▶ Jeweils im Einzelnen Strom aus:
 - Festen Biobrennstoffen
 - Biogas
 - PV-FFA und
 - Windenergie an Land

Der Stromanteil aus Biogas dominiert bereits die Flächenbelegung des Strommix 2019 und führt auch beim Erneuerbaren Mix 2019 dazu, dass dieser Mix eine knapp viermal höhere Flächenbelegung hat als der mittleren deutschen Strommix. Reiner Biogasstrom liegt ca. bei der zwölffachen Flächenbelegung verglichen mit dem Strommix 2019.

Windenergie an Land dagegen belegt nur ca. 3 % Fläche bezogen auf den Strommix 2019, Strom aus PV-FFA ca. 53 %.

Abbildung 10: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh mittleren deutschen Strommix in 2019, im Vergleich mit dem Erneuerbaren Mix (mit Dachflächen-PV, aber ohne Offshore-Windenergie und Wasserkraft), sowie für je 1 MWh Windenergie an Land, PV-FFA, Biogas und festen Biobrennstoffe



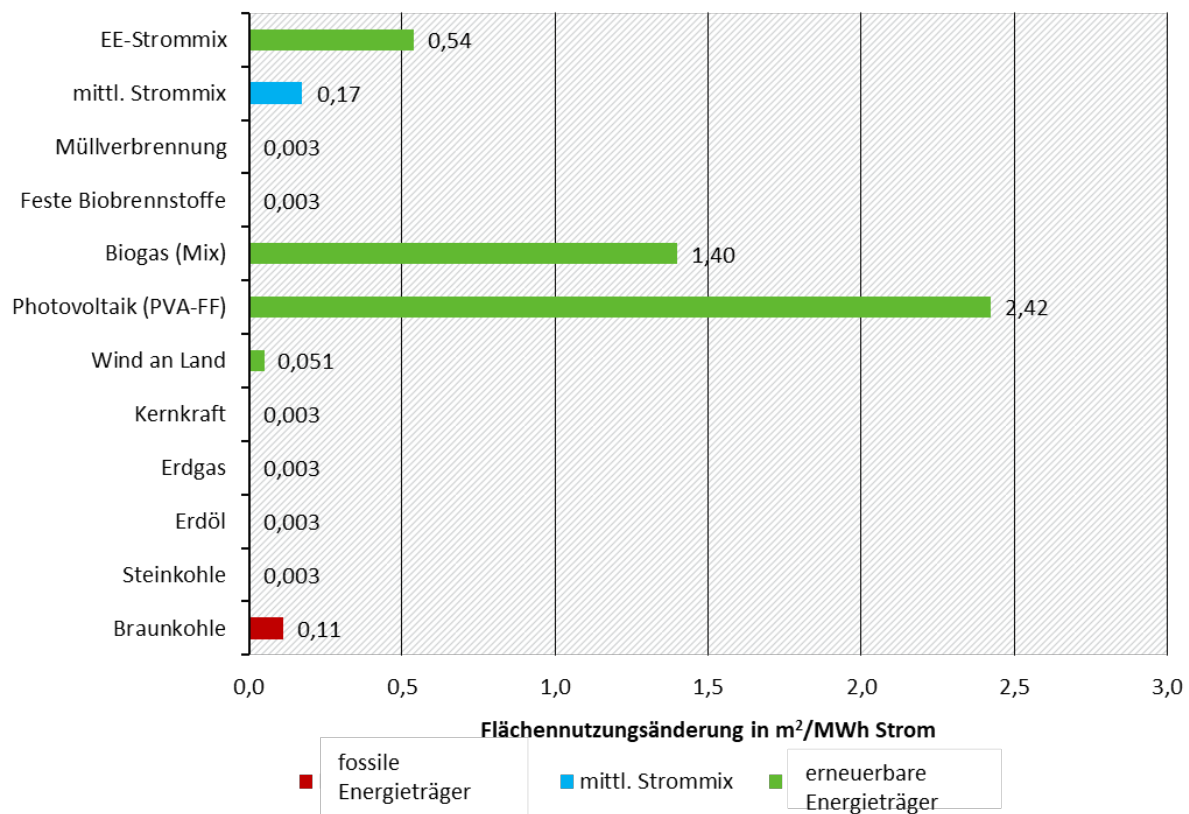
Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

2.4.2 Flächennutzungsänderung

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, ist die Datenlage für die Flächennutzungsänderung für bestimmte Bereiche des Energiesystems nicht vollständig. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass viele dieser Aspekte eher zu vernachlässigbar kleinen Beiträgen im Ergebnis führen werden (z. B. durch thermische Kraftwerksanlagen, für die es in den vergangenen Jahren kaum nennenswerten Zubau gegeben hat).

Abbildung 11 zeigt das Ergebnis für den Strommix, den Mix aus erneuerbaren Energieträgern (ohne Offshore-Windenergie und ohne Wasserkraft) sowie alle wesentlichen Energieträger. Es wird dabei deutlich, dass die Flächennutzungsänderungen bei den erneuerbaren Energieträgern deutlicher in Erscheinung treten. Vor allem für PV-FFA werden jährlich bezogen auf den Bestand vergleichsweise große Flächen ($2,42 \text{ m}^2/\text{MWh}$) der Nutzung zugeführt (siehe Teilbericht III, Kapitel 3.3.5.3). Für Strom aus Biogas werden Flächen im Umfang von $1,4 \text{ m}^2/\text{MWh}$ umgewandelt. Dies sind ehemalige Grünlandflächen (siehe Teilbericht III, Kapitel 3.3.2). Weitaus geringere bis keine Flächennutzungsänderungen sind bei Windenergie (onshore) zu verzeichnen (siehe Teilbericht III, Kapitel 3.3.5.1). Braunkohle rangiert bei $1,4 \text{ m}^2/\text{MWh}$ (siehe Teilbericht III, Kapitel 3.3.4.2).

Abbildung 11: Vergleich der Flächennutzungsänderung unterschiedlicher Energieträger für 1 MWh Strom



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

2.4.3 Hemerobie

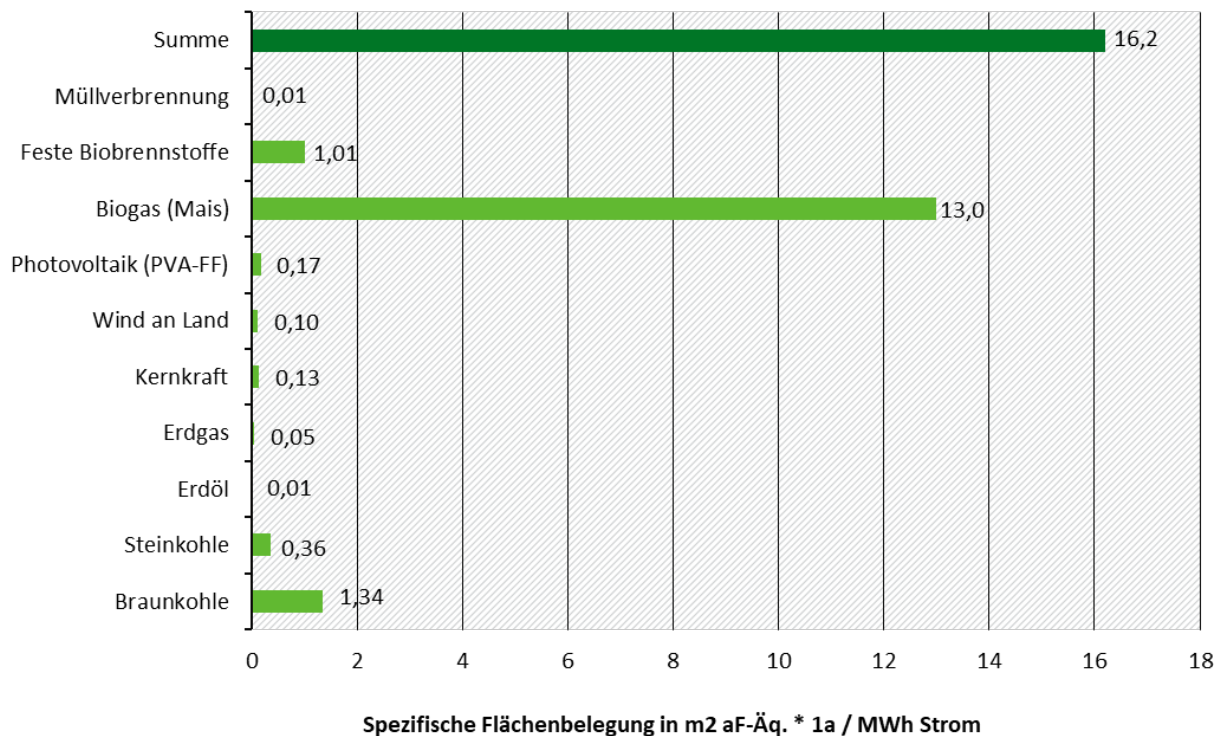
Die **temporäre Flächenbelegung** unter Berücksichtigung der Charakterisierungsfaktoren auf Basis Hemerobie (Daten in Kapitel 3.4 des Teilberichts III), sind in Abbildung 12 – Abbildung 14 dargestellt.

Für die fossilen und nuklearen Energieträger ist im Grunde durchgängig der Faktor 1 anzusetzen, da es sich hier praktisch ausschließlich um versiegelte oder devastierte Flächen handelt. Der Unterschied zwischen den Werten in Abbildung 12 gegenüber Abbildung 9 beruht dort fast ausschließlich auf dem Anteil für das Übertragungsnetz, welches auch die Trassen durch Wälder beinhaltet, die pauschal in die Hemerobieklasse V eingestuft sind (siehe Teilbericht III Kapitel 3.4.6.4) und daher mit dem Charakterisierungsfaktor 0,25 verrechnet werden.

Für den deutschen Strommix resultiert ein mittlerer Charakterisierungsfaktor von 0,377, d. h. aus 43 m² 1a/MWh Strom (siehe Abbildung 9) werden folglich 16,2 m² aF-Äquivalente²³ 1a/MWh Strom (siehe Abbildung 12). In einem ähnlichen Bereich liegen die Charakterisierungsfaktoren für den Mix an erneuerbaren Energieträgern, sowie für Biogas und PV-FFA, wie sich ebenfalls beim Vergleich der beiden genannten Abbildungen zeigt.

²³ Artifiziale-Fläche-Äquivalent

Abbildung 12: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom mittlerer Deutscher Mix in 2019, differenziert nach Anteilen der einzelnen Energieträger und charakterisiert in Naturfernepotenzial

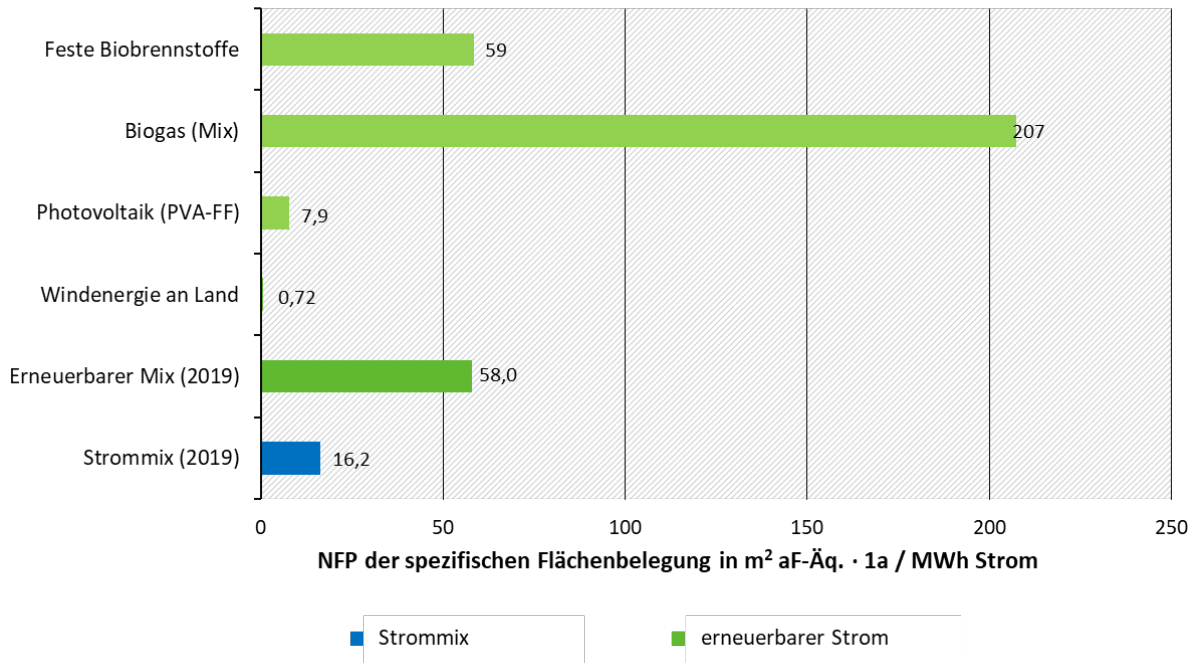


Erläuterung: Die Einheit aF-Äq. steht für artifizielle-Fläche-Äquivalent.

Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Abbildung 13 stellt die auf Naturfernepotenzial (NFP) charakterisierte Flächenbelegung für den mittleren Strommix 2019, den Erneuerbaren-Mix und einzelner erneuerbarer Energieträger gegenüber. Gegenüber Abbildung 10 zeigt sich hier das deutlich günstigere Ergebnis für Strom aus fester Biomasse (Holz), wobei dieser dennoch mehr Naturfernepotenzial aufweist als der mittlere Strommix und v. a. auch PV-FFA-Strom und Windenergie.

Abbildung 13: Flächenbelegungs-Faktoren charakterisiert in Naturfernepotenzial für eine MWh Strom mittlerer Deutscher Mix in 2019, im Vergleich mit dem Erneuerbaren Mix sowie für je 1 MWh Windkraft (an Land), PV-FFA, Biogas und festen Biobrennstoffen

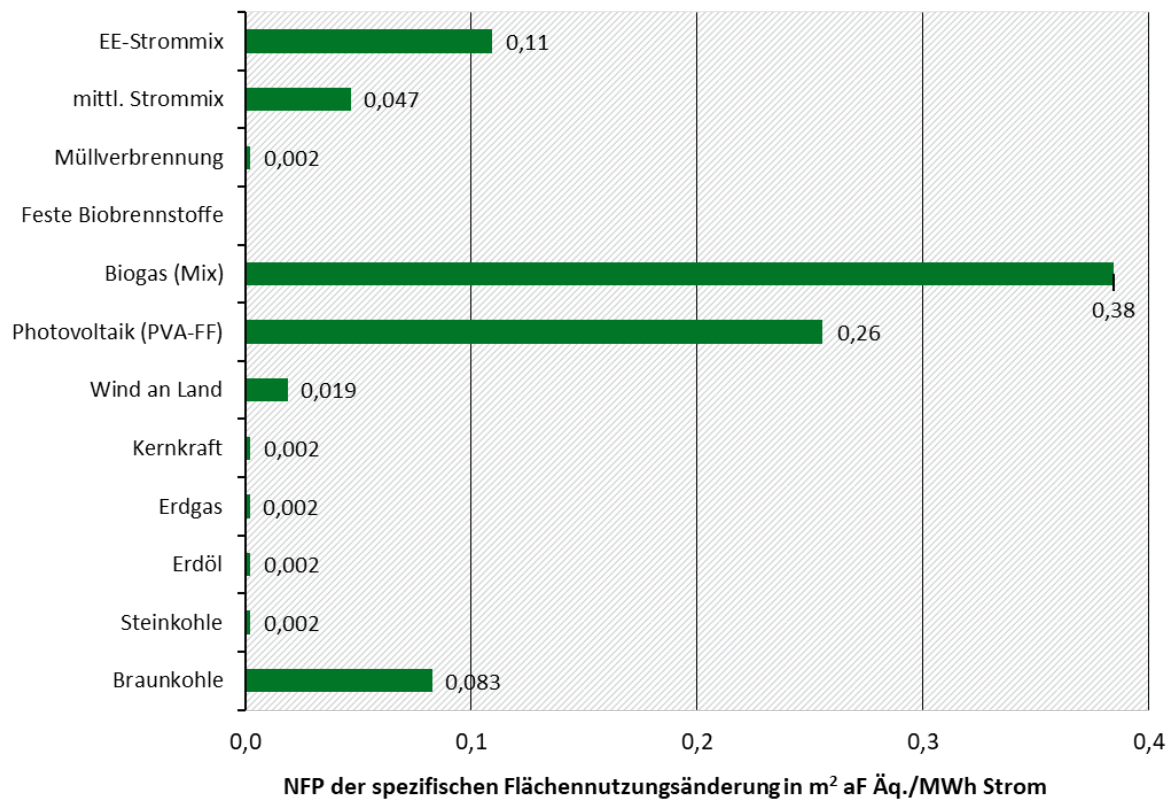


Erneuerbaren Mix mit Dachflächen-PV, aber ohne Offshore-Windkraft und Wasserkraft.

Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Die Höhe der **Flächennutzungsänderungsrate** ohne Charakterisierung nach Hemerobie, wie sie in Abbildung 11 dargestellt ist, gibt keinerlei Information über die Qualität der Veränderung wieder. Sie selbst kann kein Maß für negative Umweltwirkung sein, weil eine Flächennutzungsänderung grundsätzlich auch zu einer Netto-Verringerung der Hemerobie führen kann. In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der Flächennutzungsänderung mit Charakterisierung nach Hemerobie zusammengestellt. Der Unterschied zu den Werten in Abbildung 11 wird bei PV-FFA besonders deutlich: Da sich hier die Hemerobie der belegten Fläche gegenüber ihrem Ausgangszustand nur vergleichsweise wenig erhöht, wird sie bezüglich Flächennutzungsänderung vom Strom aus Biogas überholt. Insgesamt zeigt sich auch hier wie bei der temporären Flächenbelegung, dass sich die relativen Abstände zwischen den mit den höchsten und den geringsten Werten verbundenen Stromquellen deutlich relativieren. Dies ist auch am Ergebnis für die Braunkohle erkennbar, die ohne Charakterisierung nach Hemerobie deutlich unter dem Mittelwert für den Strommix liegt, mit Charakterisierung jedoch im Bereich dieses Mittelwerts.

Abbildung 14: Vergleich der Flächennutzungsänderung charakterisiert nach Naturfernepotenzial durch unterschiedliche Energieträger(mixe) für 1 MWh Strom



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Normierung

Die Normierung dient zur Einschätzung der relativen Signifikanz der Indikatorergebnisse. Mit diesem in der Ökobilanz üblichen Hilfsmittel kann eine Einordnung der fallweise divergierenden Ergebnisse von Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung untereinander sowie im Vergleich mit anderen Wirkungskategorien getroffen werden. Hierzu werden in Abbildung 15 die Ergebnisse aus den vorangehenden Darstellungen wie folgt umgerechnet:

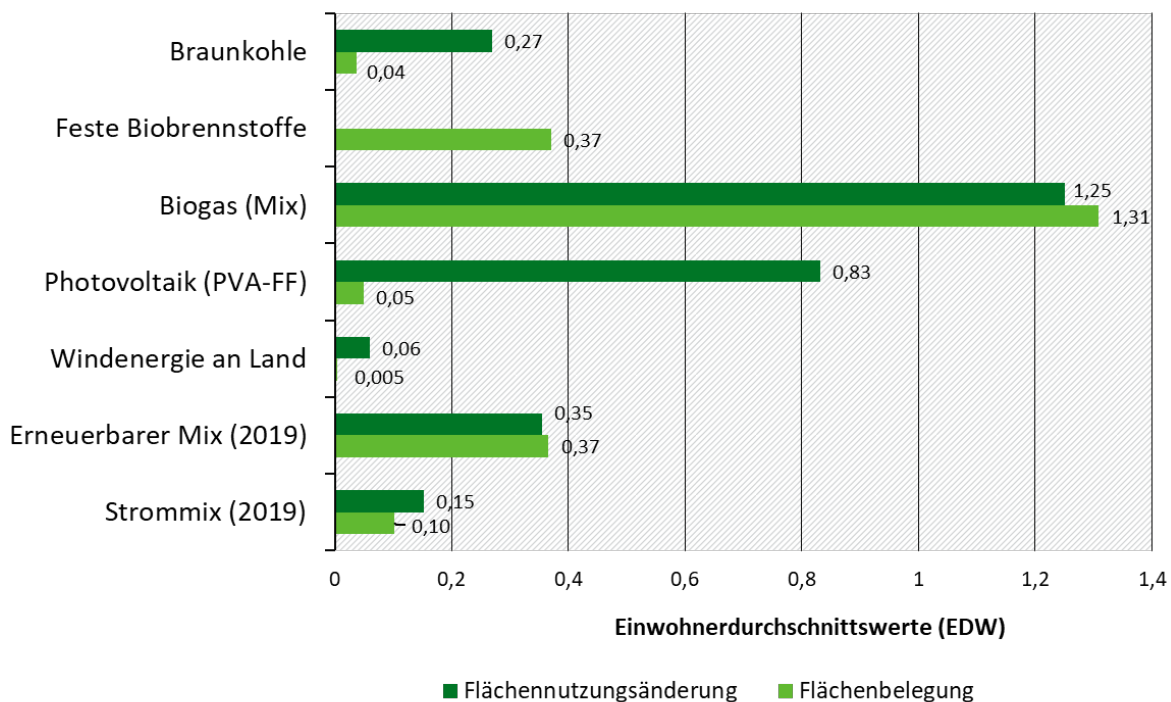
- ▶ Als Bezugsgröße wird anstelle von 1 MWh der pro-Kopf-Verbrauch an Strom in Deutschland angesetzt. Dieser liegt etwa bei 7,1 MWh pro Jahr.²⁴ Konkret bedeutet das, die Werte in Abbildung 13 und Abbildung 14 werden mit 7,1 multipliziert, die resultierenden Werte bedeuten die Flächenbelegung bzw. Flächennutzungsänderung für den Stromverbrauch einer Einwohnerin oder eines Einwohners Deutschlands je nach Wahl der Energieart.
- ▶ Diese Werte werden durch die Einwohnerdurchschnitte (EDW) für Flächenbelegung bzw. Flächennutzungsänderung geteilt; die EDW sind in Teilbericht III Kapitel 5.1 und 5.2 hergeleitet und betragen $1.131 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot 1\text{a}$ für die Flächenbelegung und $2,2 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.}$ für die Flächennutzungsänderung.

²⁴ Siehe dabei auch Tabelle 2 für das Jahr 2019 (2020 liegen die Zahlen niedriger, was jedoch auf die Folgen der Corona-Pandemie zurückzuführen wäre), ausgehend von einer Bevölkerungszahl von etwa 83 Mio.

Das Ergebnis der Umrechnung aus EDW ist in Abbildung 15 dargestellt. Es zeigt sich zunächst, dass der mittlere Strommix 10 % der mittleren Flächenbelegung (als NFP) einer Einwohnerin oder eines Einwohners ausmacht (genau dies bedeutet der 0,1 EDW). Bei der Flächennutzungsänderung liegt der Wert bei 0,15 oder 15 % an der pro-Kopf NFP-Last. Würde sich eine Person ausschließlich mit Strom aus Biogas versorgen, würde sich ihre persönliche Last durch Flächenbelegung wie Flächennutzungsänderung auf ca. 1,3 EDW erhöhen, d. h. auf das 1,3fache ihrer bestehenden Gesamtlast. Mit reiner Windenergie würde sich die Flächenbelegung für den Stromverbrauch einer Person auf 0,005 EDW, d.h. auf 0,5 % ihrer Gesamtbelegung reduzieren. Der Bezug von reinem PV-Strom von Freiflächenanlagen würde die Last gegenüber dem mittleren Strommix immerhin auf 5 % halbieren. Bei der Flächennutzungsänderung würde sie sich dagegen auf über 80 % erhöhen.

Eine grundsätzliche Erkenntnis auf Basis dieser Darstellung ist, dass sich Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung durch die Normierung beide in etwa in den selben Größenordnungen bewegen. Das bedeutet, im Rahmen einer Ökobilanz wären für dieses Fallbeispiel beide Indikatoren auch in etwa gleichrangig zu bewerten.

Abbildung 15: Normierung der NFP-Ergebnisse für Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung anhand des durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauchs von 7,1 MWh pro Jahr; der Wert 1 EDW entspricht dabei dem durch auf 1 Einwohner*in im Durchschnitt verursachten NFP durch Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung.



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Zur Normierung ist nochmals zu betonen, dass sie ein Instrument zur Einordnung der Größenordnung von verschiedenen Umweltwirkungen durch Produkte und Dienstleistungen darstellt. Für die Bewertung von Szenarien ist sie im Falle des Indikators Flächennutzungsänderung jedoch nicht geeignet. Dies lässt sich gerade an einem Fallbeispiel wie Strom gut zeigen. So würde ein Szenario mit beispielsweise einer landesweiten Stromproduktion je zur Hälfte aus Wind- und Sonnenenergie bedeuten, dass in kurzer Zeit sehr viele Flächen dafür umgewandelt werden

müssen. Da die Normierungsgröße EDW aber eine Funktion der Ist-Situation ist, würde sich diese innerhalb der Szenarioannahmen anpassen müssen. Es gäbe eine Rückkopplung zwischen Bilanzergebnissen und Bewertungsmaßstab, was methodisch nicht akzeptabel wäre.

2.5 Zusammenfassung Fallbeispiel Strom

Das Fallbeispiel zeigt, wie sich die Ermittlung des Flächenrucksacks für ein komplexes und hochdifferenziertes System wie die Stromerzeugung darstellt. Erfasst wurden hierbei alle Systemebenen (Rohstoffvorketten, Umwandlung, Übertragung) über alle Energieträger.

Aus den Analysen wird deutlich, dass die größten Beiträge zu den Flächenrucksackergebnissen grundsätzlich aus der Rohstoffbereitstellung resultieren, und dies in besonderem Maß, wenn der Rohstoff aus Anbaubiomasse besteht, d. h. agrarische Rohstoffe oder Waldholz. In deutlich geringerem Umfang tragen infrastrukturelle Einrichtungen (Konversionsanlagen, Übertragungsnetze) zu den Ergebnissen bei.

Dementsprechend finden sich die größten Beiträge zur **temporären Flächenbelegung** bei Strom aus:

► Biogas:

Der energetische Anteil der Substrate ist hierbei zu 75 % aus Anbaubiomasse angesetzt, was dem aktuellen energetischen Anteil in landwirtschaftlichen Biogasanlagen entspricht; Bei der temporären Flächenbelegung liegt der Strom aus Biogas mit Abstand weit vor allen anderen Energieträgern: gegenüber dem mittleren Strommix liegt er einen Faktor 12 höher, dies relativiert sich auch kaum, wenn man die Flächenbelegung zu **Naturfernepotenzial** charakterisiert – da die Flächenbelegung des Strommix selbst von den 6,3 % Strom aus Biogas dominiert wird, bleibt der Faktor 12 auch beim Naturfernepotenzial bestehen.

► Fester Biomasse:

Der Anteil an Waldholz an der für die Stromproduktion eingesetzten festen Biomasse (in Anlagen > 1 MW) liegt dabei nur bei 25 %, für die weiteren 75 % (v. a. Altholz) wird gemäß den angenommenen Allokationsregeln keine Flächenbelegung angerechnet. Dennoch liegt Strom aus fester Biomasse bei der temporären Flächenbelegung einen Faktor 10 über der des mittleren Strommix.

Dies relativiert sich jedoch deutlich im **Naturfernepotenzial**, dort liegt Energieholz nur noch ein Faktor 3,6 über dem mittleren Strommix; darin spiegelt sich wider, dass Waldflächen deutlich weniger naturfern sind als Agrarflächen.

► PV-Freiflächenanlagen:

Sie liegen mit einem Faktor 0,5 bereits deutlich unter dem (biogasdominierten) Durchschnitt – ähnlich auch unter Berücksichtigung des Naturfernepotenzials.

► Braunkohle:

Auf dem vierten Rang bezüglich spezifischer Flächenbelegung liegt Strom aus Braunkohle bereits mit einem Faktor 0,15 unter dem Durchschnitt. Unter Berücksichtigung des Naturfernepotenzials steigt der Faktor auf 0,37, damit ähnlich hoch, aber noch niedriger als für Strom aus PV-FFA.

Im Methodenbericht (Teilbericht I, Kapitel 4.5) wird diskutiert, ob im Fall von **besonders schwerwiegenden Auswirkungen** auf die Umwelt durch die Nutzung von Fläche der Charakterisierungsfaktor auch höher als 1 (für Klasse VII) einzustufen wäre. Ein schlüssiges Konzept kann dazu bislang nicht vorgelegt werden. An dieser Stelle soll aber dargestellt werden, wie sich eine Erhöhung des Charakterisierungsfaktors zum Beispiel für den Braunkohleabbau im Ergebnis niederschlagen würde. Dies lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Mit einem Faktor 2 anstelle von 1 läge Strom aus Braunkohle im Naturfernepotenzial bereits höher als Strom aus PV-FFA.
- Um in den Bereich von Strom aus fester Biomasse zu gelangen, bedarf es bereits eines Faktors 10, um mit Biogasstrom aufzuschließen bedarf es eines Faktors 35.

Diese Vergleiche dienen dazu, den Effekt einer Erhöhung des Charakterisierungsfaktors für Braunkohleabbauflächen zu verdeutlichen. Beschränkt man sich auf die reinen Flächenbelegungsdaten, so wird für eine Kilowattstunde Strom aus einem Braunkohlekraftwerk nur ein Viertel der für PV-FFA-Strom benötigten Fläche belegt. Das Charakterisierungsmodell weist dagegen der Braunkohlefläche eine dreifach höhere Hemerobiewirkung zu. Bei der Interpretation dieser Sachlage ist zu beachten, dass hier ausschließlich der Aspekt der Fläche und der Hemerobie zugrunde liegt. Auf zwei Punkte ist dabei zu achten: Erstens, mit einem Hemerobiefaktor 1 für versiegelte Fläche wie auch für Tagebaufläche werden weitere schwerwiegende naturräumliche Auswirkungen jenseits der Belegung nicht abgedeckt. Wie solche Auswirkungen einbezogen werden könnten, wäre durch zusätzliche vertiefende Analysen zu erarbeiten und zeigt somit weiteren Forschungsbedarf auf. Zweitens sei an dieser Stelle nochmals betont, dass im Rahmen einer Ökobilanz weitere Wirkungskategorien zu beachten sind. Klimawandel, Versauerung und viele weitere Aspekte geben erst ein Gesamtbild des ökologischen Vergleichs der untersuchten Energieoptionen.

- ▶ Alle weiteren Energieträger:
Sie tragen nur in sehr geringfügigem Maße zum Flächenrucksack bei.

Bei der **Flächennutzungsänderung** stellen sich die Reihenfolgen der Energieträger für das Naturfernepotenzial wie folgt dar:

- ▶ **Strom aus Biogas:**
Er weist den höchsten Wert auf und liegt um etwa einen Faktor 3,6 vor dem durchschnittlichen Strommix.
- ▶ **Strom aus PV-Freiflächenanlagen:**
Er rangiert wegen dem dynamischen Ausbau über die letzten Jahre trotz der vergleichsweise geringen Hemerobieveränderung vor den übrigen Energieträgern: Mit einem Faktor um die 2,2 liegt Strom aus PV-FFA über dem durchschnittlichen Strommix.
- ▶ **Strom aus Braunkohlekraftwerken:**
Er liegt um einen Faktor 0,77 unter dem mittleren Mix.

► **Weitere:**

Trotz der Ausbauaktivitäten liegt Windenergie bei der Flächennutzungsänderung nochmals deutlich darunter und weist nur ein Zehntel der Flächennutzungsänderung durch Braunkohlestrom auf.

Alle übrigen Energieträger sind mit nochmals geringeren Werten verbunden.

Auch hier zeigt sich, wie sich die Charakterisierung nach NFP (in m^2 aF-Äq. anstelle nur als m^2) im Einzelfall deutlich auf die Ergebnisse niederschlägt. Hierbei ist zu beachten, dass für die Beurteilung der Flächennutzungsänderung nur das NFP Aussagekraft aufweist, da die Angabe einer Änderung in m^2 keinerlei Aussagerichtung enthält. Die Änderung muss nicht notwendigerweise nachteilig sein, sondern kann auch von einer höheren Hemerobie zu einer niedrigeren führen.

3 Fallbeispiel 2: „Grüner“ Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe

In diesem Fallbeispiel wird die temporäre Flächenbelegung, Flächennutzungsänderung und das Naturfernepotenzial der Fläche für die Bereitstellung von Solarenergie in der MENA-Region (Middle East and North Africa) und in Deutschland betrachtet und darauf aufbauend die Umwandlung der erzeugten Energie in sogenannten „grünen“ Wasserstoff²⁵ sowie dessen Weiterverarbeitung zu strombasiertem bzw. synthetischem Kraftstoff.

Die Produktion von Energieträgern, basierend auf regenerativen Energien via Power-to-X (PtX)²⁶, wird als einer der Schlüssel angesehen, den wachsenden Bedarf an regenerativen Energien sowie gasförmigen und flüssigen Energieträgern aus regenerativen Energien zu decken (BMWi 2020a).

In einer Studie zum klimaneutralen Deutschland bis 2050 (Dambeck et al. 2020) wird beschrieben, dass für ein klimaneutrales Energiesystem Wasserstoff neben Strom eine sehr große Rolle spielen wird. Die Wasserstoffnachfrage im Jahr 2050 wird darin mit etwa 270 TWh angegeben, wobei 31 % davon in Deutschland hergestellt und der restliche Wasserstoff importiert werden soll.

Die Länder der MENA-Region sind aufgrund der im Vergleich zu Deutschland sehr hohen direkten Sonneneinstrahlung vorteilhafte Standorte für Solarenergie und könnten helfen, den künftigen Bedarf an regenerativen Energien zu decken. Der wachsende Markt in der Region Nahost und Nordafrika machte Ende 2019 mit 15 solarthermischen Kraftwerken (CSP-Kraftwerke; engl. concentrating solar power plants) und einer Gesamtleistung von fast 1,8 GW fast 30 % der weltweit in Betrieb befindlichen Kapazität aus (REN21 2020).

Aufgrund dieser bestehenden Kapazitäten und weiterer Projekte fokussiert dieses Fallbeispiel auf den Produktionsstandort MENA-Region. Aus Vergleichsgründen wird zusätzlich die Option einer Produktion von „grünem“ Wasserstoff und synthetischem Kraftstoff in Deutschland auf Basis von Strom aus Photovoltaik aus Freiflächenanlagen (PV-FFA) mitbetrachtet.

Es sei an dieser Stelle betont, dass die direkte Verknüpfung der Wasserstoffproduktion mit erneuerbarem Strom, konkret solarer Energie, eine Grundannahme für das Fallbeispiel darstellt. Damit wird keinesfalls unterstellt, dass diese Verknüpfung grundsätzlich besteht. Ob eine Anrechenbarkeit z. B. als erneuerbare strombasierte Kraftstoffe nach rechtlichen Vorgaben (RED II und derer Umsetzung in nationales Recht) möglich ist, muss im Einzelfall nachgewiesen werden. Für das Fallbeispiel wird unterstellt, dass dieser Nachweis erbracht ist, da es Ziel des Beispiels ist, den Flächenrucksack speziell für auf Basis solarer Energie erzeugten Wasserstoffs sowie daraus erzeugter Kraftstoffe zu ermitteln.

²⁵ Für die Herstellung von sogenanntem grünen Wasserstoff kommt ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz.

²⁶ Power-to-X: (dt., hier: Konversion von Strom zu flüssigen oder gasförmigen Sekundärenergieträgern) Erzeugung von flüssigen oder gasförmigen Sekundärenergieträgern (engl. Power-to-X) über Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff mittels Strom. Dieser muss regenerativ sein, damit die PtX-Energieträger als regenerativ bzw. „klimaneutral“ gelten können.

3.1 Welche Technologien werden betrachtet?

Solarthermische Kraftwerke (CSP) werden, wie Photovoltaikanlagen (PV-FFA), zur Stromerzeugung eingesetzt. Jedoch erfolgt die Stromerzeugung bei solarthermischen Kraftwerken durch hohe Temperaturen. Hierbei wird das Sonnenlicht mithilfe von Spiegeln (Receiver) so stark konzentriert, dass in einem ersten Schritt heißer Dampf erzeugt wird, der dann anschließend zur Erzeugung von Strom verwendet wird. Parabolrinnen-Kraftwerke und Turmkraftwerke sind die wichtigsten Vertreter von CSP-Kraftwerken im Kraftwerksmaßstab (IWR 2021).

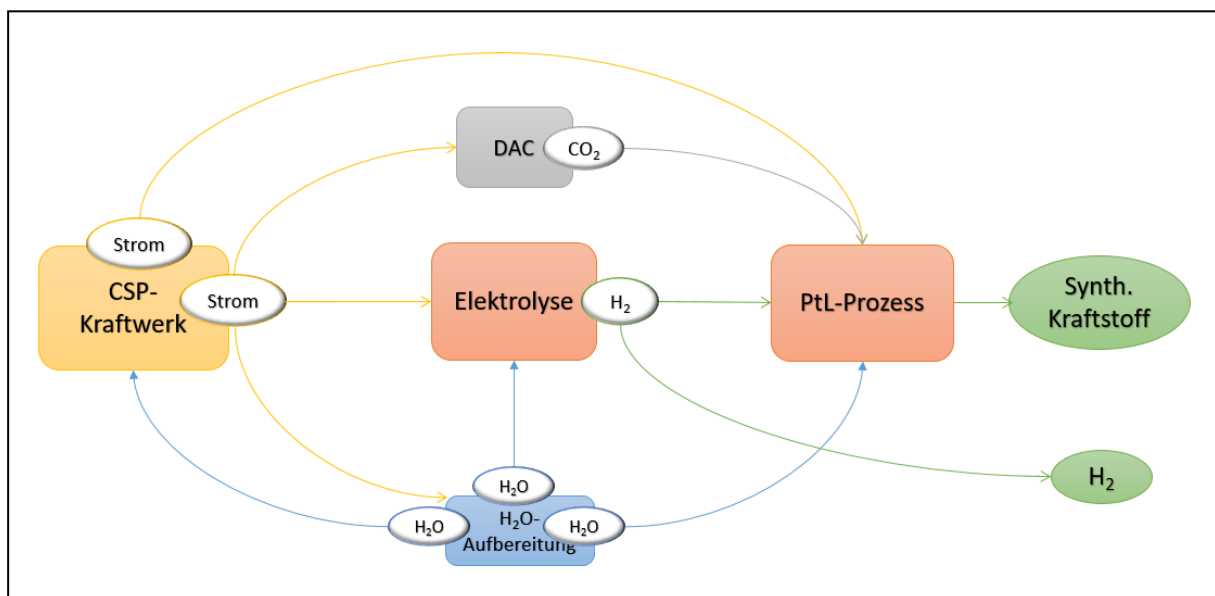
Durch die Integration von thermischen Speichern sowie einer fossilen Hybridisierung wird eine Entkopplung von der fluktuierenden Sonneneinstrahlung und somit bedarfsgerechte Stromerzeugung sowie eine Grundlastfähigkeit des Kraftwerkes ermöglicht (Giuliano et al. 2016).

Für die Bereitstellung des Solarstroms aus solarthermischen Kraftwerken und PV-Anlagen der MENA-Region und dessen Weiterverarbeitung zu Wasserstoff und strombasiertem Kraftstoff werden für folgende Technologien die temporäre Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung ermittelt:

- Strom aus solarthermischen Kraftwerken
- Alternativ dazu: Strom aus einer Photovoltaik-Anlage
- Umwandlung des Stroms zu „grünem“ Wasserstoff per Elektrolyse
- Wasseraufbereitung/-entsalzung
- CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre (direct air capture, kurz DAC)
- Power-to-Liquid-Prozess (PtL) zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Ein stark vereinfachtes Herstellungsschema für „grünen“ Wasserstoff und synthetischen Kraftstoff ist Abbildung 16 zu entnehmen.

Abbildung 16: Schematische stark vereinfachte Herstellung von „grünem“ Wasserstoff bzw. strombasiertem/synthetischem Kraftstoff



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

CSP: Concentrating solar power (Solarthermisches Kraftwerk; hier stellvertretend für Strom aus erneuerbaren Energien);

DAC: Direct air capture (CO₂-Abscheidung aus der Luft); PtL-Prozess: Power-to-Liquid-Prozess

3.2 Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?

Die Systemgrenze für die Produktion von Strom aus CSP-Kraftwerken und PV-Anlagen in der MENA-Region und die weitere Verarbeitung zu strombasiertem Kraftstoff ist in Abbildung 16 schematisch zusammengefasst. Sie beinhaltet:

- ▶ Die Flächenbelegung von CSP-Kraftwerken der MENA-Region (Parabolrinnen-Kraftwerk und Solarturmkraftwerk),
- ▶ Die Flächenbelegung einer Photovoltaik-Anlage in Marokko (stellvertretend für die MENA-Region),
- ▶ Für die Prozesse Elektrolyse, Power-to-Liquid, CO₂-Abscheidung und Wasseraufbereitung werden vereinfachend die Anlagenflächen bezogen auf den jährlichen Output der Anlagen abgeschätzt.
- ▶ Im Falle des PV-Stroms aus Deutschland werden die Daten zur Flächenbelegung, Flächennutzungsänderung und Hemerobie den Ausführungen zu PV-FFA in Deutschland des Teilberichts III (Datenbericht) entnommen.

In diesem Beispiel werden nicht betrachtet:

- ▶ Die Herstellung der Anlagen und damit verbundene Infrastruktur,
- ▶ Transporte,
- ▶ Hilfs- und Betriebsmittel,
- ▶ Übertragungsnetze.

3.3 Verfügbare Datenquellen für die Flächenbelegung, die Flächennutzungsänderung und die Hemerobie

3.3.1 Daten zur temporären Flächenbelegung

Die detaillierten Datensätze sowie deren Herleitungen für die hier betrachteten temporären Flächenbelegungen zur Energiegewinnung finden sich im Teilbericht III. In diesem Berichtsteil werden nur die zum Verständnis des Fallbeispiels wesentlichen Daten dokumentiert. Die weiterverarbeitenden Schritte zur Herstellung von strombasierten Kraftstoffen wie Elektrolyse, CO₂-Abscheidung aus der Luft (DAC, direct air capture) und Power-to-Liquid-Prozess werden nur in diesem Kapitel kurz aufgegriffen.

3.3.1.1 Daten zu solarthermischen Kraftwerken (CSP), Standort MENA-Region

Tabelle 8 zeigt die temporäre Flächenbelegung durch zwei verschiedene Kraftwerkstypen in der MENA-Region, unterteilt in versiegelte Fläche, überschirmte Fläche sowie Zwischenraum- und Randflächen. Ermittelt wurden die Daten anhand der Auswertung von Satellitenbildern sowie durch verschiedene Literaturdaten. Ausführungen hierzu finden sich in Teilbericht III.

Tabelle 8: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom aus CSP-Anlagen, Standort MENA-Region

Solarthermische Kraftwerke	Anteil an Anlagenfläche	Faktoren $\text{m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$
Gesamtfläche Kollektortyp Parabolrinnen		11,3
Versiegelte Fläche	8 %	0,90
Überschirmte Fläche	30 %	3,39
Zwischenraum- und Randflächen	62 %	7,01
Gesamtfläche Solarturm-Kraftwerk		11,3
Versiegelte Fläche	4 %	0,45
Überschirmte Fläche	23 %	2,60
Zwischenraum- und Randflächen	73 %	8,24

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, basierend auf (AFDB 2014; Liebich et al. 2020b; Ristau 2020) sowie der Auswertung von Satellitenbildern

3.3.1.2 Daten zu Photovoltaik, Standort MENA-Region

Tabelle 9 zeigt die Flächenbelegungs-faktoren für eine MWh Strom aus einer Freiland-Photovoltaik-Anlage am Standort Marokko (hier stellvertretend für die MENA-Region), unterteilt in versiegelte Fläche, überschirmte Fläche sowie Zwischenraum- und Randfläche. Ermittelt wurden die Daten anhand von Literaturdaten. Ausführungen hierzu finden sich in Teilbericht III.

Tabelle 9: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom aus PV-FFA, Standort MENA-Region

Photovoltaik	Anteil an Anlagenfläche	Faktoren $\text{m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$
Gesamtfläche Photovoltaik-Kraftwerk		11,5
Versiegelte Fläche	5 %	0,58
Überschirmte Fläche	32 %	3,68
Zwischenraum- und Randflächen	63 %	7,25

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, basierend auf (Herden et al. 2009; KfW 2020; Masen 2019; Ponte / Wade 2016)

3.3.1.3 Daten zu Photovoltaik, Standort Deutschland

Tabelle 10 zeigt die Flächenbelegungs-faktoren für eine MWh Strom aus einer Freiland-Photovoltaik-Anlage am Standort Deutschland, unterteilt in versiegelte Fläche, überschirmte Fläche sowie Zwischenraum- und Randfläche. Ermittelt wurden die Daten anhand von Literaturdaten. Ausführungen hierzu finden sich in Teilbericht III.

Tabelle 10: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh Strom aus PV-FFA, Standort Deutschland

	Anteil an Anla- genfläche	Faktoren $\text{m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$
Gesamtfläche PV-FFA		22
Versiegelte Fläche	3%	0,66
Überschirmte Fläche	32 %	7,04
Zwischenraum- und Randfläche	65 %	14,3

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, Berechnungen basierend auf (BMVI 2015; BMWi 2020b; BNetzA 2016; Günnewig et al. 2007)

3.3.1.4 Daten zur Elektrolyse

Die Umwandlung von Strom in Wasserstoff (H_2) erfolgt anhand einer Elektrolyse. Mit Hilfe von elektrischem Gleichstrom wird hierbei Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. In diesem Beispiel wird eine alkalische Elektrolyse (AEL) mit einem Wirkungsgrad von 67 % bezogen auf den unteren Heizwert betrachtet.

Anhand von Prozessdaten aus (Liebich et al. 2020b) wurde für die Elektrolyseanlage eine temporäre Flächenbelegung von $0,012 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ Wasserstoff extrapoliert. Da hier vereinfachend nur die Betriebsfläche betrachtet wurde, wird die gesamte Fläche als versiegelte Fläche betrachtet. Pro MWh hergestelltem Wasserstoff werden für die alkalische Elektrolyse 1,48 MWh Strom benötigt, dessen Flächenbedarf ebenfalls berücksichtigt werden muss. In (Hank et al. 2020) wird für die Elektrolyse mittels PEM (Proton Exchange Membrane) ein Wert von 2,8 MWh Strom pro MWh Wasserstoff angesetzt, in (Liebich et al. 2020b) für die Elektrolyse mittels PEM ca. 2 MWh Strom pro MWh Wasserstoff. D. h. je nach Elektrolyseur und Datenquelle können die Ergebnisse stark abweichen. Angaben in (Liebich et al. 2020a p. 23) zufolge, sind alkalische Elektrolyseure derzeit „die einzige etablierte, zuverlässige und verfügbare Technik in Megawattgröße“, daher wird für dieses Fallbeispiel die alkalische Elektrolyse gewählt.

3.3.1.5 Daten zur PtL-Produktion

Für die Verarbeitung des Wasserstoffs zu synthetischen Kraftstoffen bedarf es eines sogenannten Power-to-Liquid-Prozesses (PtL).

„Der Power-to-Liquid-Prozess besteht aus einer CO_2 -Abscheidung, gefolgt von einer Synthesegaserzeugung, der Fischer-Tropsch-Synthese (FT), einem Hydrocracker, sowie einer Produktaufbereitung/-raffination. Je nach Art der Synthesegaserzeugung, kommt noch ein Dampfkreislauf hinzu.“ (Albrecht et al. 2017; Liebich et al. 2020a p. 39)

Betrachtet wurde in diesem Beispiel die vereinfachte Herstellung eines durchschnittlichen flüssigen Kraftstoffs anhand der Fischer-Tropsch-Synthese.

Die hier verwendeten temporären Flächendaten von $1,05 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} / \text{MWh}$ Kraftstoff wurden anhand der Daten (Liebich et al. 2020b), ergänzt durch ecoinvent 3.6 (Russo 2020) extrapoliert. Für die Herstellung einer MWh Kraftstoff werden 1,35 MWh H_2 und 0,26 t CO_2 benötigt. Der Strombedarf für die Herstellung liegt nach (Liebich et al. 2020b) bei etwa 0,92 MWh Strom für die Herstellung von einer MWh synthetischen Kraftstoff. In (Hank et al. 2020) wird für den Prozess der Verflüssigung in einem Basisszenario mit $0,7 \text{ MWh}_{\text{el}} / \text{MWh}$ flüssiger Wasserstoff (LH_2) gerechnet. In diesem Beispiel wird konservativ mit 0,92 MWh Strom gerechnet.

3.3.1.6 Daten zur CO₂-Bereitstellung

Für die CO₂-Bereitstellung wurde eine Abscheidung aus der Luft angenommen (DAC-Direct Air Capture), da andere CO₂-Quellen, wie CO₂ als Abfallprodukt (bspw. aus der Zementindustrie) zwar flächenneutral sein können, jedoch zukünftig vermutlich nicht in ausreichenden Mengen und in Anlagennähe vorhanden sein werden. Die vorhandenen Daten zur temporären Flächenbelegung basieren auf im Rahmen des Vorhabens SYSEET (Liebich et al. 2020b) zur Verfügung gestellten internen vertraulichen Daten. Diese werden daher nur im zusammenfassenden Anwendungsbeispiel aufgegriffen. Der Strombedarf liegt bei 0,7 MWh pro Tonne CO₂ (Liebich et al. 2020b). Der Bedarf an thermischer Energie wurde in diesem Beispiel vernachlässigt.

3.3.1.7 Daten zur Meerwasserentsalzung und Deionisierung

Für fast alle Verfahrensschritte dieses Beispiels werden größere Mengen Wasser benötigt, die einer Aufbereitung, je nach Herkunft einer Entsalzung, unterliegen.

Basierend auf (Liebich et al. 2020b) wird für die Wasseraufbereitung per Umkehrosmose eine Flächenbelegung von ca. 0,001 m²·1a/m³ Wasser angenommen. Der Energiebedarf für die Aufbereitung wird mit einer Spannweite von 3,5-4,5 kWh/m³ Wasser angegeben. Laut Einschätzung von (Hank et al. 2020) wird für eine kleine bis mittelgroße Anlage (1.200 m³/Tag) ein konservativer Gesamtenergiebedarf von 3,75 kWh_{el}/m³ angegeben. In ecoinvent 3.7 (Dussault 2020) wird die Wasseraufbereitung mit 3,35 kWh/m³ Wasser angegeben. Unter Betrachtung der oben erwähnten Daten, wird in diesem Beispiel 3,75 kWh_{el}/m³ für die Aufbereitung von Wasser per Umkehrosmose angesetzt.

Basierend auf (Liebich et al. 2020b) wurde für die Herstellung von einer MWh Fischer-Tropsch-Kraftstoff ein Prozesswasser-Bedarf von 0,31 Tonnen abgeschätzt. Für den Elektrolyseprozess wurden 0,27 t/MWh H₂ angesetzt.

Der Wasserbedarf für CSP wurde im Rahmen des SOLWARIS Projekt des (DLR 2020) folgendermaßen angegeben: Nasskühlung ~3,5 m³/MWh_{el}, Spiegelreinigung ~0,3 m³/MWh_{el}, Dampfkreislauf ~0,5 m³/MWh_{el}. Laut (Jokadar / Ponte 2012) wird mit ca. 1.750.000 m³ Wasser pro Jahr gerechnet. Die Gesamtkapazität der Anlage Quarzazate beträgt in etwa 1.620 GWh, damit wäre der Wasserbedarf in etwa 1,1 m³/MWh. Ableitend aus den o. e. Daten, wird in diesem Beispiel ein Prozesswasserbedarf für die Solar-Anlagen von 1 t pro MWh angenommen.

Es wird angenommen, dass das Wasser nach der Entsalzung deionisiert wird. In ecoinvent 3.7 (Rubio 2020) wird die Deionisierung mit 0,000026 MWh Strom/m³ Wasser angegeben. Eine Deionisierung würde für beide Regionen (D und MENA) gleichermaßen stattfinden, wird aber aufgrund des geringen Energiebedarfs im nachfolgenden Rechenbeispiel vernachlässigt.

3.3.2 Daten zur Flächennutzungsänderung

Ausführliche Informationen zur Flächennutzungsänderung für Solarkraftwerke in der MENA-Region sind dem zugehörigen Datenbericht (Teilbericht III, Kapitel 3.3.5.3) zu entnehmen. In diesem Anschauungsbeispiel wird mit einer durchschnittlichen Flächennutzungsänderung für CSP-Kraftwerke in der MENA-Region von 15 % und einer Effizienzsteigerung auf 83 % gerechnet. Bedingt durch das stark dynamische Wachstum in dieser Region und die technischen Entwicklungen ist diese Einschätzung bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten. Ausführungen zur Flächennutzungsänderung für PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in Deutschland sind ebenfalls dem Teilbericht III (Kapitel 3.3.5.2) zu entnehmen und werden in diesem Fallbeispiel mit 13,2 % berücksichtigt.

Die Flächennutzungsänderung der Betriebsflächen für die Prozesse Elektrolyse, DAC, PtL und Wasseraufbereitung werden in diesem Beispiel gleich Null gesetzt, da bereits die Summe der

Beiträge dieser Prozesse zu Gesamtbelegung vergleichsweise niedrig ist ($0,01 \text{ m}^2\text{a/MWh}$ Wasserstoff; ca. $1 \text{ m}^2 \cdot \text{a/MWh}$ PtL, siehe Kapitel 3.4.1).

3.3.3 Daten zur Hemerobie

Wie in Kapitel 3.2.5.3 und 3.4.6.3 in Teilbericht III ausgeführt, setzt sich die Flächenbelegung für Solarenergie aus der MENA-Region folgendermaßen zusammen, nachfolgend ergänzt um die Hemerobiekategorie:

- ▶ **Versiegelte Fläche** (Verankerungen, Gebäude, Solarturm, direkte Zugangsstraßen, u. Ä.):
→ **Hemerobiekategorie VII** (Charakterisierungsfaktor = 1)
- ▶ **Überschirmte (beschattete) Fläche** (Überschirmung durch Heliostaten, Parabolrinnen und Solarpanels):
→ **Hemerobiekategorie VI** (Charakterisierungsfaktor = 0,5)
- ▶ **Rand- und Zwischenflächen** (Flächen zwischen den überschirmten Flächen, Randbereiche, unbetonierte Zuwegungen, u. Ä.):
→ **Hemerobiekategorie VI** (Charakterisierungsfaktor = 0,5)

Ausführliche Informationen zur Herleitung sind dem zugehörigen Datenbericht (Teilbericht III, Kapitel 3.4.6.2 und 2.4.6.3) zu entnehmen.

Die Betriebsflächen für die Prozesse Elektrolyse, DAC, PtL und Wasseraufbereitung werden vereinfachend als versiegelte Flächen betrachtet und der Hemerobiekategorie VII zugewiesen.

Zur Berechnung des Naturfernepotenzials der Flächennutzungsänderung muss die Hemerobie der Ausgangsfläche bestimmt werden. Wie in Kapitel 3.4.6.3 des dritten Teilberichtes ausführlicher beschrieben, wird für die Fläche in der MENA-Region vor Bebauung die Hemerobiekategorie II angesetzt, da es sich um fast gänzlich unberührte Natur handelte.

Wie in den Kapiteln 3.3.5.2 und 3.4.6.2 des dritten Teilberichtes beschrieben, liegen die PV-FFA in Deutschland v. a. auf ehemaligen Konversions-, Acker- und Grünlandflächen. Dies führt zu einem aggregierten Charakterisierungsfaktor von 0,247 für die Ausgangsfläche vor Bebauung.

3.4 Ergebnisse des Vergleichs

In diesem zusammenfassenden Beispiel wird die Flächenbelegung, Flächennutzungsänderung und Hemerobie von einer MWh Wasserstoff und einer MWh strombasierten Kraftstoffes, jeweils basierend auf Solarenergie hergestellt in der MENA-Region (CSP) und in Deutschland (PV-FFA), betrachtet.

In Tabelle 11 wird der zu erwartende Strombedarf für die Herstellung von einer MWh „grünem“ Wasserstoff sowie für die Herstellung von einer MWh strombasierten Kraftstoffes unter Annahme der Herstellung und Bereitstellung in der MENA-Region aufgeführt. Für eine Produktion in Deutschland würde die Wasserentsalzung entfallen. In der MENA-Region wird auch auf Wasser aus Stauseen zurückgegriffen und nicht zwangsweise auf Meerwasser, jedoch wird Letzteres in Anbetracht des zu erwartenden Wachstums wahrscheinlicher und ist hier aus Gründen der Vollständigkeit mit aufgeführt.

Tabelle 11: Stromverbrauch für die Herstellung von „grünem Wasserstoff“ und strombasiertem Kraftstoff

Stromverbrauch durch	„grüner“ Wasserstoff MWh/MWh H ₂	Strombasierter Kraftstoff (PtL) MWh/MWh PtL
Elektrolyse	1,48	1,99
Wasserentsalzung	0,007	0,015
CO ₂ -Abscheidung (DAC)	-	0,18
Fischer-Tropsch-Synthese	-	0,92
Summe	1,49	3,11

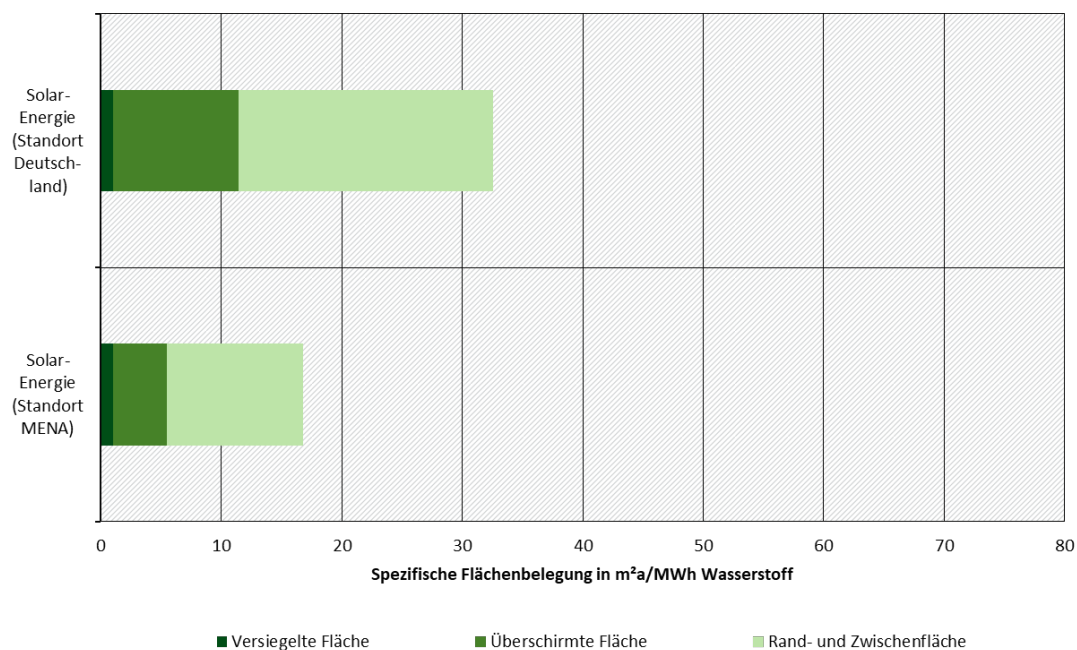
Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, basierend auf (Hank et al. 2020; Liebich et al. 2020b)

3.4.1 Temporäre Flächenbelegung

In Abbildung 17 und Abbildung 18 wird die temporäre Flächenbelegung (zunächst **ohne Charakterisierung nach Hemerobie**) für die Herstellung von einer MWh Wasserstoff und einer MWh synthetischen Kraftstoffs jeweils für eine Herstellung in Deutschland (PV-FFA) und für eine Herstellung in der MENA-Region (CSP) betrachtet. Die temporäre Flächenbelegung ist unterteilt in versiegelte Flächen, überschirmte Flächen sowie in Rand- und Zwischenflächen. Diese Flächen sind unterschiedlichen Hemerobieklassen zugeordnet (s. o.) und werden demnach mit verschiedenen Charakterisierungs-Faktoren multipliziert.

Die gesamte temporäre Flächenbelegung für die Herstellung von einer MWh Wasserstoff beträgt für die Herstellung und Bereitstellung in Deutschland $33 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{MWh}$ und für die Herstellung und Bereitstellung in der MENA-Region $17 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{MWh}$.

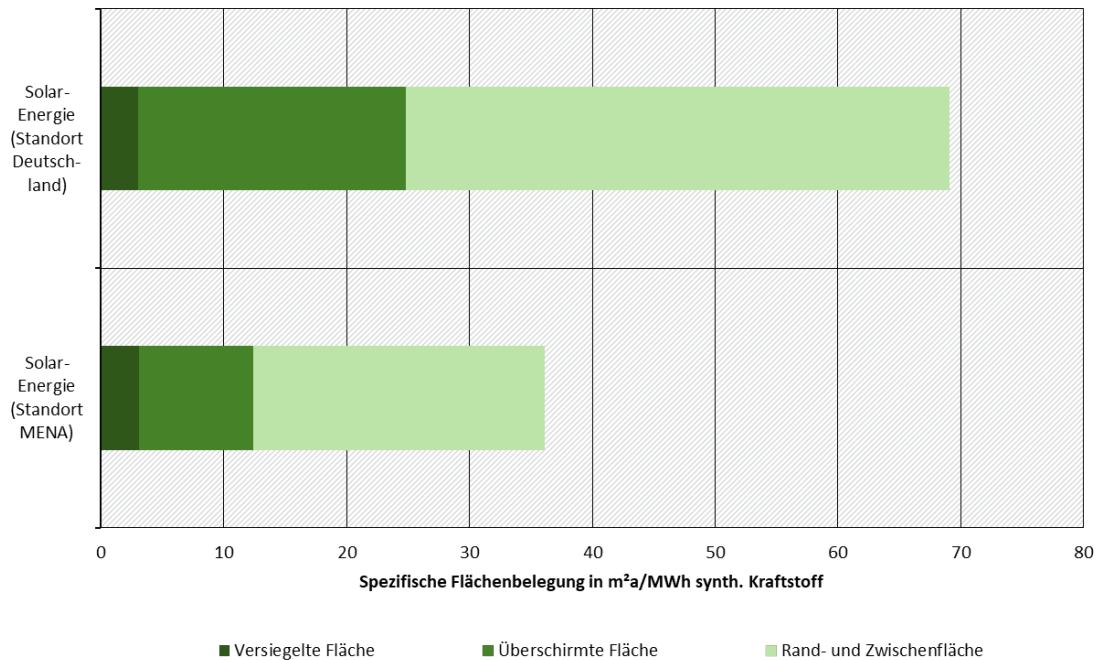
Abbildung 17: Flächenbelegungs-Faktoren für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff an den Standorten Deutschland mittels PV-FFA und MENA-Region mittels CSP



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Die gesamte temporäre Flächenbelegung für die Herstellung von einer MWh synthetischen Kraftstoffs beträgt für die Herstellung und Bereitstellung in Deutschland ca. $69 \text{ m}^2 \cdot \text{a} / \text{MWh}$ und für die Herstellung und Bereitstellung in der MENA-Region ca. $36 \text{ m}^2 \cdot \text{a} / \text{MWh}$.

Abbildung 18: Flächenbelegungs-Faktoren für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoffs an den Standorten Deutschland mittels PV-FFA und MENA-Region mittels CSP



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Die temporäre Flächenbelegung liegt für die Erzeugung von Solarenergie in der MENA-Region deutlich unter der temporären Flächenbelegung für die Erzeugung von Solarenergie in Deutschland. Dies ist bedingt durch die im Vergleich zu Deutschland hohe Strahlungsintensität und der damit verbundenen effizienteren Flächennutzung in der MENA-Region.

Da die temporäre Flächennutzung weitestgehend an den Energiebedarf für die Herstellung der betrachteten Produkte (grüner Wasserstoff und synth. Kraftstoff) gekoppelt ist, ist entsprechend den Ausführungen zum Energiebedarf in Tabelle 11 die Flächenbelegung für synthetischen Kraftstoff deutlich höher als für die Herstellung von grünem Wasserstoff.

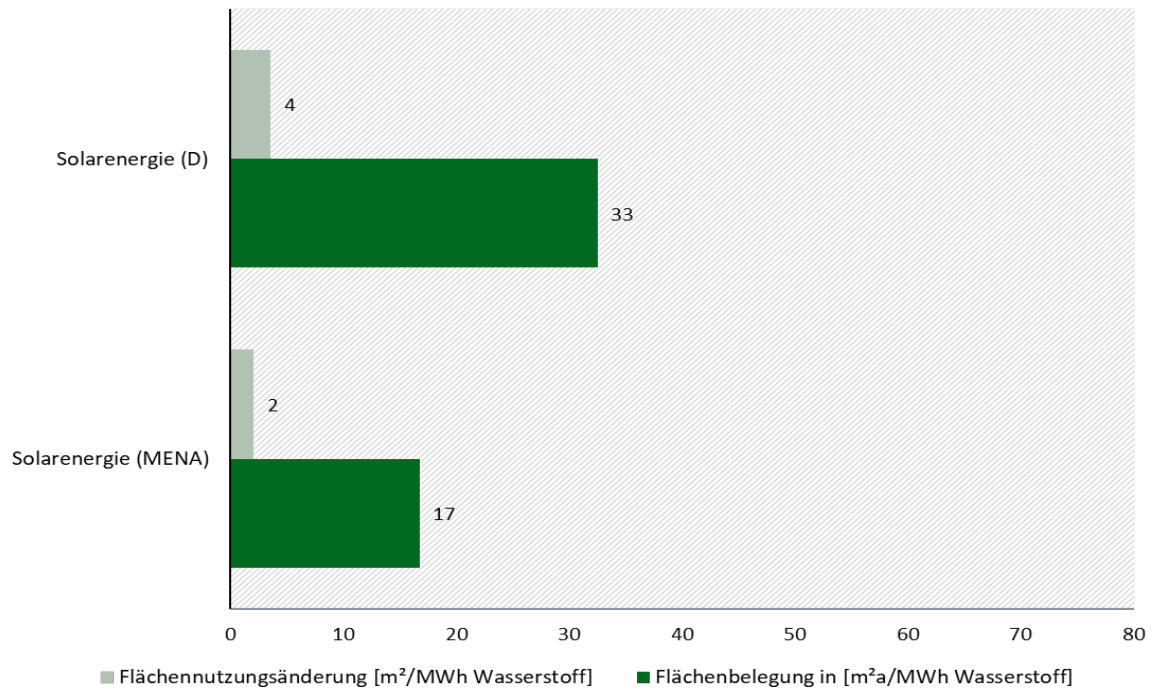
Die temporäre Flächenbelegungen für die Betriebsflächen der Prozesse Elektrolyse, DAC, PtL und Wasseraufbereitung summieren sich für die Herstellung des grünen Wasserstoffs auf ca. $0,01 \text{ m}^2 \text{a} / \text{MWh}$ und für die Herstellung des synthetischen Kraftstoffs auf ca. $1 \text{ m}^2 \cdot \text{a} / \text{MWh}$.

3.4.2 Flächennutzungsänderung

Wie bereits oben erwähnt, wird die Flächennutzungsänderung der Betriebsflächen für die Prozesse Elektrolyse, DAC, PtL und Wasseraufbereitung in diesem Beispiel gleich Null gesetzt. Die Flächennutzungsänderung für Solarkraftwerke in der MENA-Region wird mit 15 % sowie einer Effizienzsteigerung auf 83 %, abgeschätzt, was $1,4 \text{ m}^2 / \text{MWh}$ entspricht. Die Flächennutzungsänderung für PV-Anlagen in Deutschland wird mit 13,2 % bzw. $2,42 \text{ m}^2 / \text{MWh}$ abgeschätzt (siehe hierzu Teilbericht III, Kapitel 3.3.5.2 und 3.3.5.3). Vor allem bezüglich des potenziellen Wachstums von PV-Anlagenflächen in der MENA-Region ist hier künftig auch eine deutlich höhere Flächennutzungsänderung wahrscheinlich.

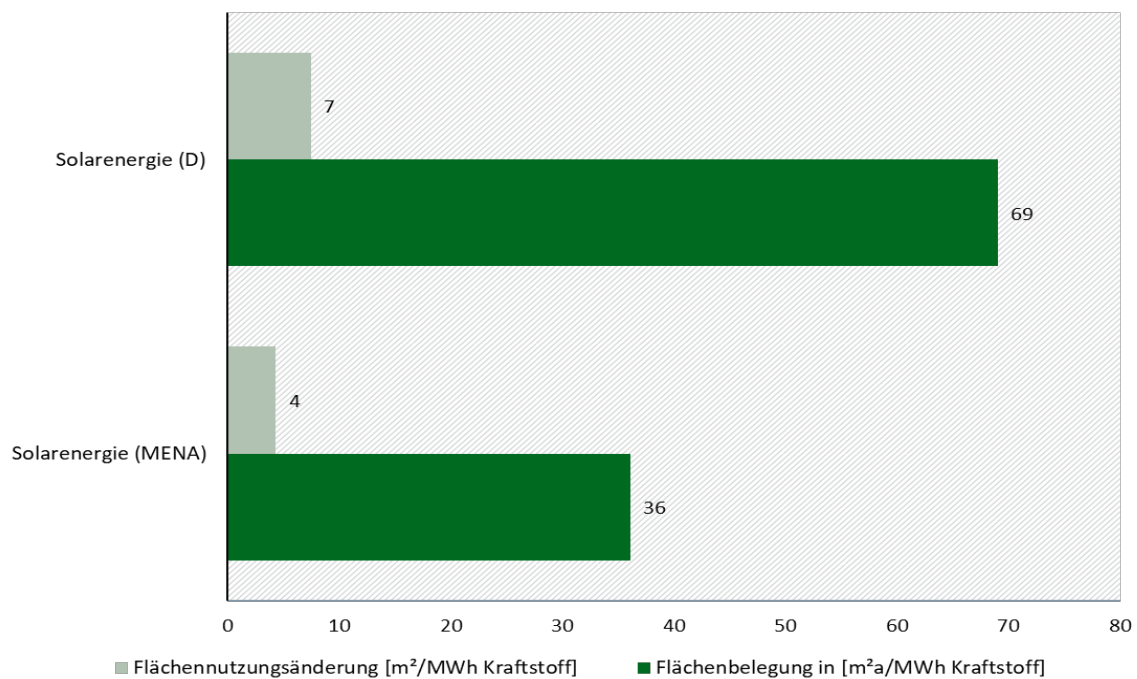
In Abbildung 19 und Abbildung 20 werden die temporäre Flächenbelegung und die Flächennutzungsänderung für alle Varianten dieses Fallbeispiels dargestellt.

Abbildung 19: Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff, Standort Deutschland (PV-FFA) und Standort MENA-Region (CSP)



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Abbildung 20: Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoff, Standort Deutschland (PV-FFA) und Standort MENA-Region (CSP)

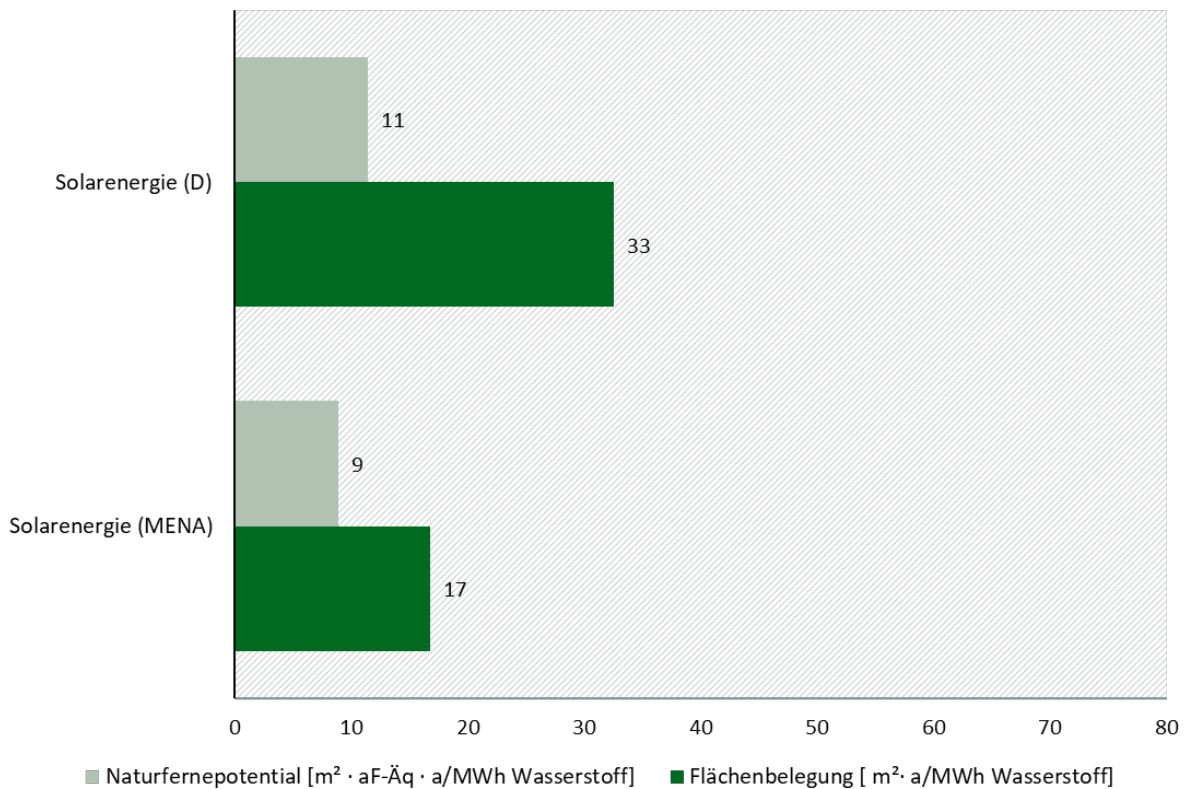


Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

3.4.3 Hemerobie

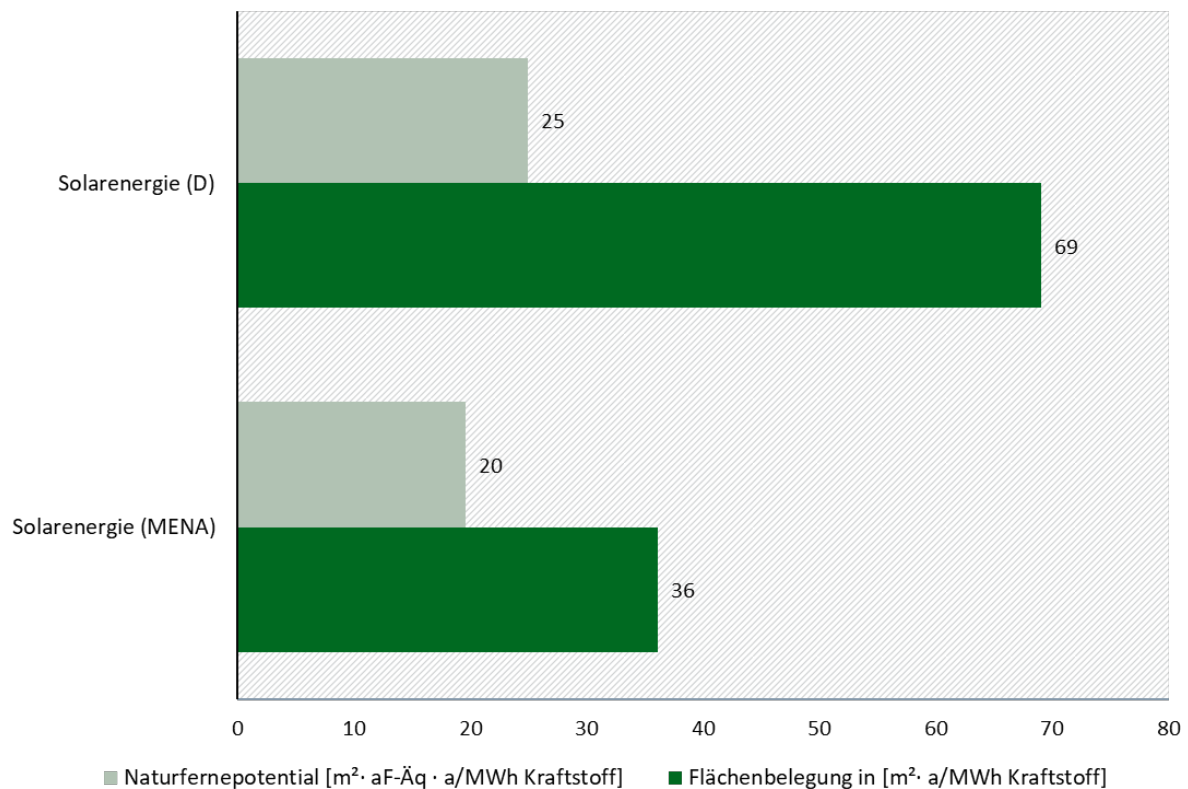
Für die Berechnung des Naturfernepotenzials werden die spezifischen Flächen mit den ihrer Hemerobiekategorie entsprechenden Charakterisierungsfaktoren multipliziert, was zu den in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellten Ergebnissen für die betrachteten Varianten führt.

Abbildung 21: Flächenbelegung, charakterisiert nach Hemerobieklassen, für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Abbildung 22: Flächenbelegung, charakterisiert nach Hemerobieklassen, für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)

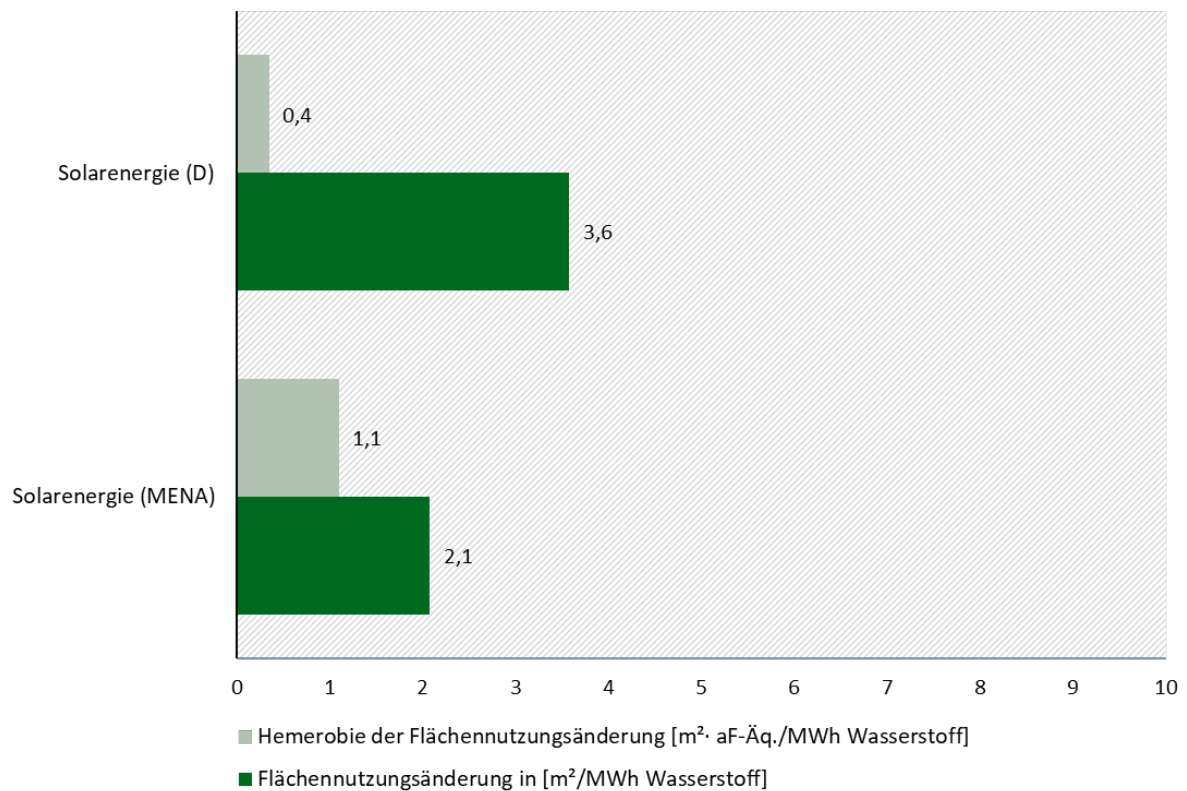


Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Im Vergleich zur temporären Flächenbelegung, ist bei Betrachtung der hemerobiebewerteten Ergebnisse eine deutliche Annäherung zwischen Solarenergie in der MENA-Region (CSP) und Solarenergie in Deutschland (PV-FFA) zu erkennen. Dies ist vor allem bedingt durch den jeweils hohen prozentualen Anteil an Rand- und Zwischenflächen, die für die MENA-Region in die Hemerobiekategorie VI, für PV-FFA in Deutschland jedoch in Hemerobiekategorie V fallen.

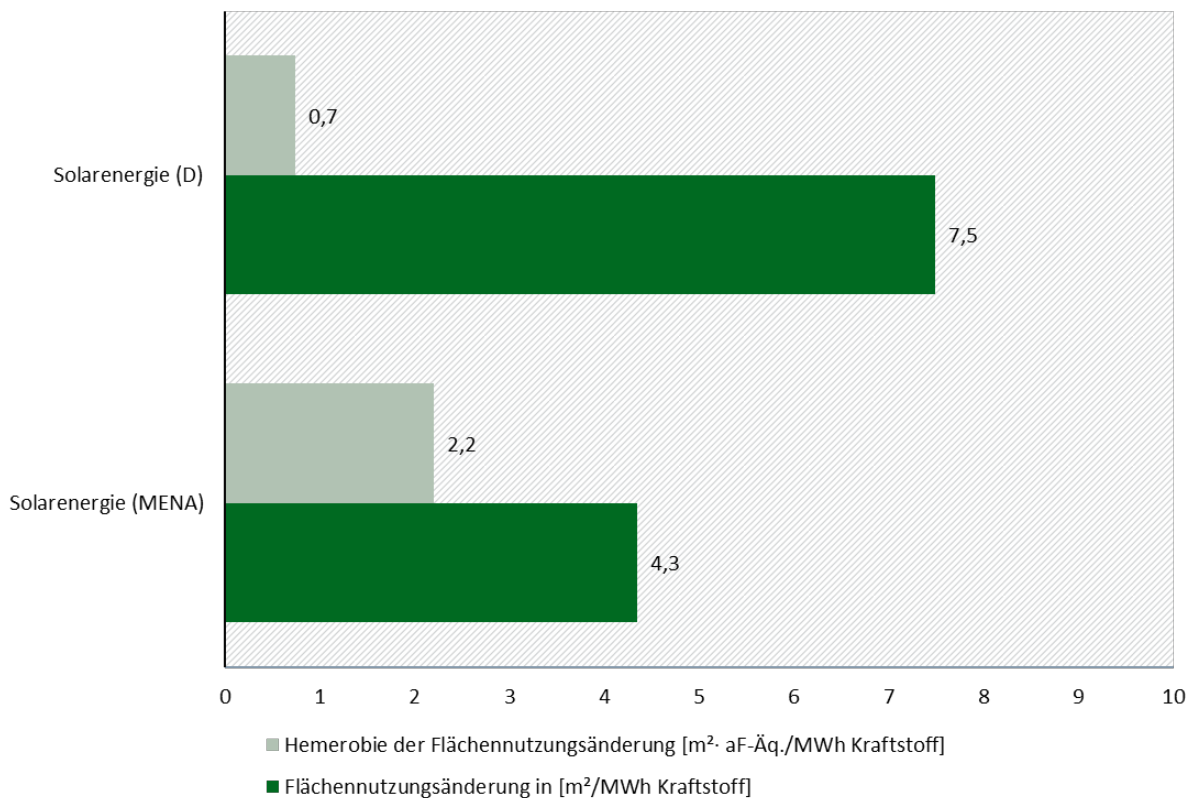
Bei Betrachtung der folgenden Ergebnisse zur Hemerobie der Flächennutzungsänderung wird der Effekt der Hemerobie besonders deutlich (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Da die Ausgangsfläche in der MENA-Region, im Vergleich zur in Deutschland für PV-Anlagen verbauten Fläche, nahezu unberührt war, hat die Veränderung hier einen deutlich größeren negativen Effekt. Es erfolgt sogar eine Ergebnisumkehr zugunsten der Herstellung in Deutschland.

Abbildung 23: Hemerobie der Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh Wasserstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Abbildung 24: Hemerobie der Flächennutzungsänderung für die Herstellung von 1 MWh synth. Kraftstoff an den Standorten Deutschland (PV-FFA) und MENA-Region (CSP)



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Bezüglich der **Normierung** sei auf das Kapitel 5.4 im Fallbeispiel Antriebsenergie verwiesen. Dort wird PtL als Kraftstoff in den Vergleich verschiedener Antriebsenergien einbezogen und durch Normierung alle Optionen miteinander verglichen. Es sei an dieser Stelle jedoch vorweggenommen, dass sich diese Kraftstoffoption bezüglich der Flächenbelegung in einem ähnlichen Bereich bewegt wie ein E-Mobil, welches mit von Biogas-Strom dominiertem EE-Strom geladen wird und weniger Flächenbelegung verursacht als rein mit Biodiesel gefahrene PKW. Bezüglich der Flächennutzungsänderung dagegen führt die Normierung für PtL zu Werten, die sogar über denen für Palmölbiodiesel liegen. Daraus lässt sich schließen, dass die Flächennutzungsänderung für grünen Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe eine Schlüsselfrage sein dürfte.

3.5 Zusammenfassung Fallbeispiel „grüner“ Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe

In diesem Fallbeispiel wurden die Flächenrucksäcke für die Erzeugung von sogenanntem „grünem“ Wasserstoff (d. h. durch Elektrolyse von Wasser mit erneuerbarem Strom) und daraus dargestelltem Flüssigkraftstoff (PtL) bilanziert. Verglichen wurde dabei die Produktion an unterschiedlichen Standorten, nämlich in der MENA-Region und in Deutschland. Zusätzlich dazu erfolgte ein Vergleich der Technologie der solaren Stromproduktion: CSP (nur in der MENA-Region) und PV (MENA und Deutschland). Als Kohlenstoffquelle für den PtL-Prozess wurde die direkte Entnahme aus der Luft angenommen.

Die bilanzierten Systeme sollten ein möglichst realistisches Bild einer künftigen Produktion im großen Stil darstellen, da in der Mehrzahl der Zukunftsszenarien zur Erreichung von Klima-

schutzziele „grüner“ Wasserstoff und daraus erzeugten Energieträgern oder Chemikalien eine Schlüsselrolle zukommt (BMWi 2020a).

Folgende Schlüsse können aus dem Fallbeispiel gezogen werden:

- ▶ Die Produktion in der MENA-Region ist gegenüber mitteleuropäischen Standorten wie Deutschland im Hinblick auf die temporäre Flächenbelegung im Vorteil. Dank der höheren Strahlungsintensität über den Ganzjahresverlauf liegt die temporäre Flächenbelegung sowohl für Wasserstoff wie auch PtL bei etwa der Hälfte der in Deutschland erforderlichen Fläche: 17 gegenüber 33 m² · a/MWh H₂ bzw. 36 gegenüber 69 m² · a /MWh PtL.
- ▶ Dabei ist die Frage, ob der Strom in der MENA-Region per CSP oder PV-FFA erzeugt wird nachrangig, da beide Technologien eine nahezu gleich hohe temporäre Flächenbelegung aufweisen.
- ▶ Charakterisiert nach Naturfernepotenzial, verringern sich die Unterschiede: Die H₂-Produktion in der MENA-Region liegt dann noch beim 0,82-Fachen derer in Deutschland, für PtL beim 0,8-Fachen.

Grund: Für Deutschland werden die Rand- und Zwischenflächen mit einer geringeren Hemerobie bewertet als die entsprechenden Flächen in den Großanlagen der MENA-Region, da diese Flächen in der MENA-Region erhebliche Eingriffe erleiden (u. a. einebnen, verdichten) und teilweise dauerhaft von Vegetation freigehalten werden müssen. Der Faktor Flächeneffizienz und der Faktor größere Eingriffsintensität gleichen sich hier somit in etwa aus, wobei in diesem Beispiel ein leichter Vorteil bei der Produktion in der MENA-Region verbleibt.

- ▶ Bezüglich der Flächennutzungsänderung liegen die Verhältnisse ähnlich wie bei der Belegung. Da ein dynamischer Zuwachs in der Zukunft zu erwarten ist, ist dieser Vergleich hier nur begrenzt aussagekräftig.
- ▶ Die Ergebnisse zur Hemerobie der Flächennutzungsänderung zeigen sogar eine Ergebnisumkehr zugunsten der Produktion in Deutschland. Grund hierfür ist die unterschiedliche Hemerobie der Ausgangsflächen für die beiden Regionen. Während im Beispiel der MENA-Region die Ausgangsfläche nahezu unberührte Natur war, unterlag die Ausgangsfläche für die deutschen PV-Anlagen bereits vor Bebauung vielfältigen menschlichen Eingriffen. Ausführungen hierzu finden sich im Teilbericht III, Kapitel 3.4.6.2 und 3.4.6.3. Auch hier bleibt zu beachten, dass die Daten zur Flächennutzungsänderung, bedingt durch den zu erwartenden dynamischen Zuwachs, nur bedingt aussagekräftig sind.
- ▶ Ausschlaggebend für den Flächenrucksack dieser Produkte ist der Energiebedarf der Produktion, v. a. der Elektrolyse und der Fischer-Tropsch-Synthese, der durch die jeweiligen Solar-Anlagen vor Ort gedeckt wird. Dagegen erweist sich die CO₂-Gewinnung aus der Luft (DAC) und die Wasseraufbereitung als nahezu vernachlässigbar.

Es sei betont, dass in diesem Fallbeispiel keine vollständige Systemanalyse durchgeführt wurde, wie sie für eine vollständige Ökobilanz erforderlich wäre. Das heißt, viele Komponenten wie z. B. Hilfs- und Betriebsstoffe, Vorketten, Transporte usw. wurden hier nicht berücksichtigt, bzw.

abgeschnitten. Es wird davon ausgegangen, dass die Wirkungsbeiträge von Infrastrukturen mit hohen Durchsätzen über die Lebensdauer, ähnlich wie in vielen Ökobilanzen, auch hier das Ergebnis nicht entscheidend beeinflussen.

Zur Anwendung der Hemerobiemethode auf die betroffenen Flächen der MENA-Region wurde der Kriterienkatalog für Brachflächen und Grünland (siehe Teilbericht I Kapitel 4.2.4 und 4.4.2) vom Prinzip her übernommen. Prinzip bedeutet hier: Das Maß an Hemerobie ist weniger abhängig von den Standortverhältnissen, sondern von der Intensität des menschlichen Eingriffs. Dieser konnte anhand der Projektunterlagen der Anlagen (Verdichtung der Böden, weitestgehende bis vollkommene Unterdrückung von Vegetation im direkten Anlagenbereich) gut eingeschätzt werden, ohne konkrete Analysen der naturräumlichen Gegebenheiten vor Ort. Bezüglich der überschirmten und versiegelten Flächen ist diese Einschätzung somit als robust zu werten. Was den Bereich der halbnatürlichen Flächen im Zwischen- und Randbereich oder auch im Ausgangszustand der Flächen angeht, sind die getroffenen Einschätzung mit höheren Unsicherheiten verbunden. Um dies besser abzusichern, wären vor Ort Analysen notwendig.

4 Fallbeispiel 3: Baustoffe

4.1 Welche Vergleichsoptionen werden betrachtet?

In diesem Fallbeispiel werden die temporäre Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung für die Bereitstellung eines bautechnischen Tragelements (Hallenträger) mit 10 m Spannweite betrachtet. Die hier betrachtete funktionelle Einheit ist das Tragen einer (gleichen) Deckenlast und die Überspannung eines definierten Raumes.

Verglichen werden folgende Optionen:

- ▶ Holzhallenträger,
- ▶ Stahlhallenträger,
- ▶ Stahlbetonhallenträger.

Damit für diese verschiedenen, für den Bau von kleineren Industriehallen typischen Trägersysteme, die (sicherheits-)technischen Aspekte in der Vergleichbarkeit gewährleistet sind, wird in diesem Fallbeispiel auf die ausführlichen Ausarbeitungen hierzu in (Albrecht et al. 2008) zurückgegriffen. Detaillierte Informationen zu den technischen Eigenschaften der Trägersysteme können demnach (Albrecht et al. 2008) entnommen werden.

Abmessungen und Auflast sind bei allen drei Systemen gleich: Sie betragen 10 m Spannweite und eine Auflast von 11,60 kN/m (ohne Trägereigengewicht).

Der Fokus in diesem Anschauungsbeispiel liegt auf dem Vergleich der Baumaterialien (Waldfläche des geernteten Holzes, Erzabbau, Kalksteinabbau, etc.). Aus Gründen der Vergleichbarkeit zwischen den Fallbeispielen werden auch die besonders flächenintensiven Anteile der Herstellungsprozesse berücksichtigt (Energie für Stahl- und Zementherstellung). Es wurde jedoch keine vollständige Ökobilanz gerechnet, da dies das Fallbeispiel überfrachten würde.

In diesem Beispiel werden nicht betrachtet:

- ▶ Maschinenpark u. ä. bei der Holzbereitstellung, dem Abbau der Gesteine/Bereitstellung der Gesteinskörnungen, etc.,
- ▶ Hilfs- und Betriebsmittel,
- ▶ Transport der Baustoffe und Infrastruktur für die Baumaßnahme,
- ▶ Mit dem Bau verbundene Energieaufwendungen, Energieaufwendungen für die Bearbeitung des Holzes, das Warmwalzen des Stahls oder das Gießen des Betons,
- ▶ Betrachtungen zum Lebenswegende der Baustoffe²⁷.

²⁷ Wobei hier nicht von wesentlichen direkten Flächenbelegungen auszugehen ist, da z. B. Optionen wie Deponie entfallen (Ausnahme ist vielleicht Beton als Bauschutt, wobei auch hier Verwertungswege beschritten werden). Die Frage, inwieweit Recycling oder Kaskadennutzung zu Gutschriften führen kann, wäre Gegenstand einer komplexen Marktanalyse (was wird durch was substituiert?) und kann hier nicht geleistet werden; anders bei Stahl, bei welchem der Anteil an Stahlschrott im Rohstoff einen entscheidenden Faktor darstellt, der daher in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 erläutert wird.

4.2 Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?

Folgende Flächenbelegungen werden für die verschiedenen Hallenträger betrachtet:

- ▶ Holzhallenträger:
 - Für den Holzbedarf abgeerntete Waldfläche.
- ▶ Stahlhallenträger:
 - Für den Eisenerzbedarf devastierte Fläche und Fläche für die benötigte Energie zur Stahlerzeugung (deutscher Strommix; Braunkohleabbau vereinfachend für Koks)
- ▶ Stahlbetonhallenträger:
 - Für den Eisenerzbedarf devastierte Fläche und Fläche für die benötigte Energie zur Stahlerzeugung (deutscher Strommix; Braunkohle, vereinfachend für fossile Brennstoffe sowie für den eingesetzten Koks),
 - Für den Beton benötigte Fläche der Zuschlagsstoffe (Sand, Kies), Steinbruchfläche für den Abbau des für den Zement benötigten Kalksteins (vereinfachend) und Energiebedarf für die Zementherstellung (deutscher Strommix, Braunkohleabbau).

Nachfolgend einige Details zu den verschiedenen Trägersystemen, die für die weiteren Berechnungen benötigt werden sowie eine Übersicht über den Aufbau der drei Systeme in der Seitenansicht (Abbildung 25):

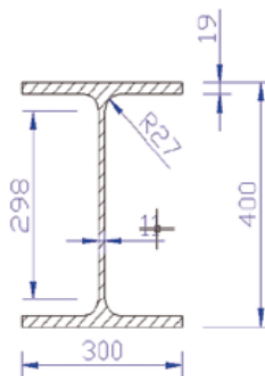
Abbildung 25: Aufbau der drei Trägersysteme (Seitenansicht)

Holz: BSH-Träger



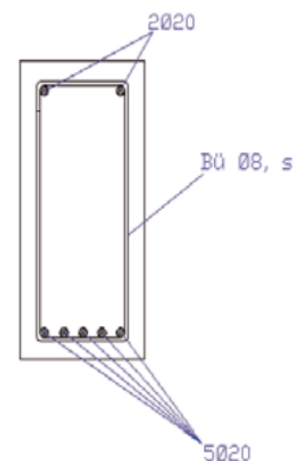
nach DIN 1052 und EC 5

Stahlträger



nach DIN 1025-3

Stahl-Betonträger



nach DIN 1045

Quelle: (Albrecht et al. 2008)

4.2.1 Brettschichtholzträger (nach DIN 1052 /24/ und EC5)

Anhand der für das Brettschichtholz nach (Albrecht et al. 2008) erforderlichen Abmessungen ($b = 200 \text{ mm}$; $h = 700 \text{ mm}$; $l = 10,40 \text{ m}$) wurde ein benötigtes Volumen von **$1,5 \text{ m}^3$ Holz** berechnet.

Der aus lagenweise verleimten Brettschichtholzlamellen (Einzelbrettdicken i.d.R. 33 mm, Lamellenbreite max. 220 mm) hergestellte Träger enthält weniger als ein Prozent Polykondensationsklebstoff, welcher in diesem Beispiel nicht berücksichtigt wird.

Standardmäßig wird nach (Albrecht et al. 2008) Fichtenholz für die Brettschichtherstellung verwendet, jedoch können auch andere Nadelhölzer wie Tanne, Kiefer, Lärche oder Douglasie eingesetzt werden. In diesem Fallbeispiel wird eine Herstellung des Brettschichtholzträgers aus **Fichtenholz** und aus **Tannenholz** betrachtet.

4.2.2 Stahlträger (nach DIN 1025-3)

Basierend auf den Angaben zu den Abmessungen des warmgewalzten I-Stahlträgers (HEA-Profil; $b = 300 \text{ mm}$; $h = 400 \text{ mm}$; $l = 10,40 \text{ m}$) in (Albrecht et al. 2008) wurde eine benötigte **Stahlmenge von ca. 1.206 kg** berechnet.

Die Herstellung von Stahl erfolgt über das Elektrostahlverfahren oder das Oxygenstahlverfahren über die Hochofenroute. Dies in diesem Beispiel kurz aufzugreifen ist wichtig, da das Elektrostahlverfahren ausschließlich mit Stahlschrott betrieben wird, bei der Hochofenroute jedoch durchschnittlich nur etwa 20 % Stahlschrott eingesetzt werden und für die restlichen 80 % der Einsatz von Eisenerz notwendig ist. Auch der Energiebedarf der beiden Verfahren unterscheidet sich stark. Das Verhältnis von Elektro-Stahl zu Oxygenstahl liegt in Deutschland derzeit bei 30 : 70 (BDSV 2018). Deutschlandweit lag 2019 laut (Szombathy 2020) der Schrottanteil in der Rohstahlproduktion über beide Verfahren im Durchschnitt bei 44,6 %.

Gemäß (Haidar et al. 2018) werden Baustahlprofile aus Deutschland zu 100 % aus Schrott hergestellt. Die Sammelraten für Bewehrungsstahl sind nicht ganz so hoch. Je nach Datenbank wird Baustahl ganz über die Hochofenroute oder ganz über die Elektrostahlroute hergestellt. Die Herstellung der Vorblöcke für das Warmwalzen ist über beide Routen möglich. Der Energiebedarf für das nachfolgende und üblicherweise eingesetzte Verfahren des Warmwalzens des Trägers wird in diesem vereinfachten Beispiel nicht berücksichtigt.

In 2017 wurden in Deutschland nach Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2018) 81,5 Mio. t an Rohstoffen zu 37,5 Mio. t warmgewalzten Stahlerzeugnissen verarbeitet. Pro Tonne Stahlprodukt wurden neben weiteren, mengenmäßig nicht relevanten Rohstoffen 1,1 t Eisenerz, 0,5 t Stahlschrott und 0,4 t Kokseingesetzt. Mit diesen durchschnittlichen Zahlen wird in diesem Beispiel gerechnet.

4.2.3 Stahlbetonbalken (nach DIN 1045)

Beim dritten vorgestellten Trägertyp handelt es sich um einen Träger aus Stahlbeton ($b = 300 \text{ mm}$, $h = 600 \text{ mm}$, $l = 10,40 \text{ m}$), der aus zwei Baumaterialien besteht: Beton und Stahl für einen eingearbeiteten Bewehrungskorb. Basierend auf den Angaben in (Albrecht et al. 2008) kann für den betrachteten Stahlbetonbalken eine **Betonmenge von $1,85 \text{ m}^3$** und eine **Stahlmenge von 203 kg** für das Armierungsgitter (Bewehrungskorb) abgeschätzt werden.

Für den Beton wurde in diesem Beispiel gemäß den Angaben in (Albrecht et al. 2008) ebenfalls ein Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 gewählt.

Abgeleitet nach (BET 2009; Biscopig / Kampen 2017) enthält ein normaler Beton der Festigkeitsklasse C25/30 pro Kubikmeter in etwa die folgenden Mengenanteile: 285 kg Zement, 200 l Wasser sowie 1.900 kg Zuschläge. **In unserem Beispiel führt dies zu ca. 526 kg Zement und 3.508 kg Zuschlägen.** Wasser wird in unserem Fallbeispiel nicht betrachtet. Für die Zuschläge wird ein Gemisch aus Sand und Kies angenommen.

Als Zementsorte wird ein CEM I (Portlandzement) gewählt. Es kämen auch andere Zementsorten mit beispielsweise Anteilen an Flugasche für die Herstellung in Frage, jedoch wird hier aus konservativen Gründen mit der Annahme eines reinen Portlandzementklinkers gerechnet. Für die Herstellung von Portlandzementklinker werden Kalkstein und Ton oder ihr natürliches Gemisch, der Kalksteinmergel, benötigt. In diesem Beispiel wird vereinfachend der Abbau von Kalkstein für die gesamte Zementmenge betrachtet.

Laut Umweltdatenbericht der deutschen Zementindustrie (Verein Deutscher Zementwerke 2010) wurden zur Herstellung einer Tonne Zement in Deutschland 2019 durchschnittlich 2.772 MJ Brennstoffenergie und 112 kWh elektrische Energie eingesetzt. Heutzutage werden in hohem Maße alternative Brennstoffe beim Klinkerprozess eingesetzt. In 2019 waren dies 68,9 % am gesamten Brennstoffeneinsatz der deutschen Zementindustrie. Der Einsatz fossiler Brennstoffe, wie vor allem Stein- und Braunkohle, macht heute nur noch etwa 26 % des Brennstoffeneinsatzes aus.

Da die alternativen Brennstoffe (bspw. Autoreifen, Klärschlamm, etc.) Abfallprodukte anderer Systeme sind, die diese Last bereits tragen, bekommen sie in diesem Fall keine Last zugeschrieben.

Bei den fossilen Brennstoffen überwiegt der Anteil an Braunkohle deutlich gegenüber den anderen fossilen Brennstoffen und wird in diesem Beispiel vereinfachend für die gesamte benötigte Menge an fossilen Brennstoffen für die Herstellung des Zements angesetzt.

Für die Herstellung des in diesem Fallbeispiel betrachteten Zements im Stahlbetonbalken führt dies zu **0,06 MWh Strom** aus dt. Strommix und **25 kg Braunkohle** (Heizwert 15 GJ/Tonne Braunkohle) (Drosihn et al. 2017).

Bezüglich der Herstellung des Stahls im Stahlbetonbalken gelten die gleichen Überlegungen wie für den Stahl im Stahlträger.

4.3 Verfügbare Datenquellen für die Flächenbelegung, die Flächennutzungsänderung und die Hemerobie

Die detaillierten Datensätze sowie deren Herleitungen für die hier betrachteten temporären Flächenbelegungen, Flächennutzungsänderungen und Hemerobieklassen finden sich im Teilbericht III. In diesem Berichtsteil werden nur die zum Verständnis des Fallbeispiels wesentlichen Daten dokumentiert.

4.3.1 Daten zu Holz

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, wird in diesem Fallbeispiel die Herstellung des Brett-schichtholzträgers aus Fichtenholz und aus Tannenholz betrachtet.

In folgender Tabelle 12 werden die Daten zur Flächenbelegung und Hemerobie von Fichtenholz und Tannenholz aufgeführt. Ausführliche Informationen zu den Angaben in der Tabelle sowie anderen Holzarten finden sich in Teilbericht III (Datenbericht).

Tabelle 12: Spezifische Flächenbelegung, Hemerobiekategorie und Naturfernepotenzial für Weißtannen und Fichten

Holzart	spez. Flächenbelegung in $\text{m}^2 \cdot \text{a}/\text{m}^3$	Mittelwert Hemerobiekategorie	Anteile Klasse II III IV V	Charakterisierungsfaktor	NFP in $\text{m}^2 \text{aF-Äq.} \cdot \text{a} / \text{m}^3$
Weißtanne	1.072	Klasse IV	10% - 25% - 64% - 0%	0,125 (MW) 0,099 (Mix)	134 (MW) 106 (Mix)
Fichte	802	Klasse V	3% - 6% - 27% - 64%	0,25 (MW) 0,2 (mix)	201 (MW) 159 (Mix)

MW: bezogen auf den Mittelwert der Hemerobiekategorie; Mix: gewichtetes Mittel aus der Verteilung der Hemerobiekategorien
Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu; siehe hierzu Teilbericht III Tabelle 1 und Tabelle 30

Wie oben beschrieben, wird die durch Verarbeitung des Holzes verursachte Flächenbelegung hier nicht einbezogen. Zur Prüfung der möglichen Relevanz des Stromverbrauchs von Sägerei und Zuschnitt (nach Daten von ecoinvent in Summe etwa 150 kWh pro m^3 Holz) sei dessen Beitrag unter Anwendung des Flächenbelegungsfaktors von mittlerem Strom in Deutschland grob durchkalkuliert. Es resultieren hieraus ca. $2,4 \text{ m}^2 \text{aF-Äq.} \cdot \text{a}$ pro m^3 Holz für Bauträger. Die Vernachlässigung dieser Aufwendungen ist für das Gesamtergebnis tatsächlich vertretbar.

In Teilbericht III, Kapitel 3.3.1 wird beschrieben, dass die Flächennutzungsänderung für Produkte von Waldflächen (v.a. Holz) mit annähernd Null angesetzt werden kann, da sich die Waldfläche in Deutschland im Mittel über die letzten Jahre kaum verändert hat. Auch hier zeigt eine kurze Prüfung der Relevanz vom Stromverbrauch der Holzverarbeitung, dass diese in der vergleichenden Bewertung keine entscheidende Bedeutung hat: Der Betrag von ca. $0,001 \text{ m}^2 \text{aF-Äq.}$ pro Holzträger ist mit Blick auf die Ergebnisse in Kapitel 4.4.3, Abbildung 29 vernachlässigbar.

4.3.2 Daten zu Beton

Der für dieses Beispiel benötigte Beton setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Zement: vereinfachend Fläche des Kalksteinabbaus,
- Zuschläge: Fläche für Sand- und Kiesgewinnung.

Da die Herstellung von Zement als energieintensiv eingestuft wird, wird auch die Fläche für den benötigten Strom (deutscher Strommix) sowie die Fläche für die benötigten fossilen Brennstoffe (hier vereinfachend ca. 26 % Braunkohle, Rest alternative Brennstoffe) in den Berechnungen berücksichtigt. Hierfür wird auf die Daten aus dem ersten Fallbeispiel und Teilbericht III zurückgegriffen.

Tabelle 13 sind die Daten zu Bausand und Baukies sowie Kalksteinabbau für dieses Beispiel zu entnehmen.

Basierend auf Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Andruleit et al. 2017) beträgt die Flächennutzungsänderung für Bausand und Baukies $0,037 \text{ m}^2/\text{t}$. Die Flächennutzungsänderung für Kalkstein liegt bei $0,01 \text{ m}^2/\text{t}$.²⁸

In den Teilberichten I und III befinden sich ausführliche Informationen zu Abbau und Gewinnung der für das Beispiel benötigten und weiteren Gesteinsarten.

²⁸ Die zu Grunde gelegten Daten sind auch in neueren Berichten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) unverändert.

Tabelle 13: Spezifische Flächenbelegung und Hemerobieklassen

Spezifische Flächenbelegung/ Nutzungskategorie	Fläche unter Abbau [m ² *1a/t]	Abraum- und Schutthalden [m ² *1a/t]	Lagerhalden [m ² *1a/t]	Fahrwege [m ² *1a/t]	Betriebsgebäude, Aufbereitungsanlagen, Förderungstechnik [m ² *1a/t]
Hemerobiekategorie	VI	VI	VII	VI	VII
Bausand, Baukies etc.	0,037	0,003	0,019	0,041	0,096
Kalk- und Dolomitsteine	0,015	0,003	0,008	0,017	

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu; siehe hierzu Teilbericht III Tabelle 9

Braunkohle

Wie bereits im zweiten Fallbeispiel dargelegt und im Teilbericht III (Kapitel 3.2.4.3) ausführlicher beschrieben, wird für den Abbau einer Tonne Braunkohle eine temporäre Gesamt-Belegung von 4,98 m²*1a/t Braunkohle angesetzt.

Die Flächennutzungsänderung wird in Tabelle 23 von Teilbericht III mit 0,04 m²/t angegeben.

Die durch den Braunkohletagebau belegten Flächen sind durchgängig hochgradig devastiert und somit vollständig artifizuell. Die Anwendung des Bewertungsrasters auf Braunkohle, führt auf die Hemerobiekategorie VII.

4.3.3 Daten zu Baustahl

In Anbetracht dessen, dass Stahl sowohl über den Elektrolichtbogenofen (100 % Schrott, kein Eisenerzeinsatz) als auch über die Hochofenroute (ca. 20 % Schrott und ca. 80 % Eisenerz, sowie zusätzlich Koks) hergestellt werden kann und auch der Energiebedarf für die Hochofenroute deutlich höher liegt als für die Herstellung im Elektrolichtbogenofen, kann die Wahl des Herstellungsverfahrens zu großen Schwankungsbreiten in den Ergebnissen führen.

Für die Stahlherstellung in diesem Fallbeispiel (Stahlträger und Armierungsstahl im Stahlbeton), werden, basierend auf den durchschnittlichen Daten für warmgewalzte Stahlerzeugnisse für Deutschland in 2017 (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2018), folgende Werte berechnet:

- Stahlbetonträger (203 kg Stahl, 1,85 m³ Beton)
 - 228 kg Eisenerz und 86 kg Koks bzw. vereinfachend Braunkohle
 - 1,1 MWh Strom
- Stahlträger (1.206 kg Stahl)
 - 1.357 kg Eisenerz und 514 kg Koks bzw. vereinfachend Braunkohle
 - 6,4 MWh Strom

Da der Energiebedarf des Elektrolichtbogenofens der Datenbank ecoinvent zufolge bei 0,55 MWh pro t Stahl liegt (Müller 2020), wäre bei einer Herstellung des Stahls rein über diese Route der Wert entsprechend niedriger als bei dem in diesem Beispiel angesetzten, über beide Herstellungsrouten aggregierten Durchschnittswert von 5,2 MWh pro t Stahl (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020).

Für Eisenerzabbau liegen in ecoinvent zwei Datensätze vor: Für 46-prozentiges Eisenerz bezogen auf eine Mine von 1999 (spez. Flächenbelegung $0,00012 \text{ m}^2\text{a/kg}$; Flächennutzungsänderung $2,13\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Althaus 2020)) und für 63-prozentiges Eisenerz für eine Mine in Indien für den Erhebungszeitraum 2016/2017 (spez. Flächenbelegung $0,00119 \text{ m}^2\text{a/kg}$; Flächennutzungsänderung $3,1\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Soni 2020)). Da die Daten für die Mine in Indien aktueller sind und die spezifische Flächenbelegung deutlich höher als für das 46-prozentige Eisenerz, wird in diesem Beispiel mit diesen Werten gerechnet.

In der Datenbank Probas (Probas 2020) sind ebenfalls Daten zum Eisenerzabbau aufgeführt, die jedoch stark von den oben erwähnten Zahlen abweichen und begrifflich nicht klar zuzuordnen sind.

Wie beim Braunkohletagebau sind auch die für Eisenerzabbau belegten Flächen durchgängig hochgradig devastiert und somit vollständig artifiziell. Sie werden in die Hemerobiekategorie VII eingestuft.

Bezüglich des bei der Herstellung eingesetzten Stahlschrottes könnte durch Allokation über die verschiedenen Lebenszyklen eine Last entstehen. Dies wird in diesem Beispiel jedoch aus Vereinfachungsgründen nicht berücksichtigt und dem Stahlschrott dementsprechend keine Last angerechnet.

Koks wird unter Wärmeeinwirkung und Sauerstoffentzug aus Kohle hergestellt. In diesem Beispiel wird für Koks vereinfachend die gleiche Menge an Braunkohle angesetzt. Die Flächenbelegungen für Braunkohle wurden bereits im vorherigen Kapitel aufgeführt.

Für den Deutschen Strommix wurden eine temporäre Flächenbelegung von $43 \text{ m}^2\text{a/MWh}$ Strom und ein Naturfernepotenzial von $16,2 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot \text{a} / \text{MWh}$ Strom dem ersten Fallbeispiel entnommen.

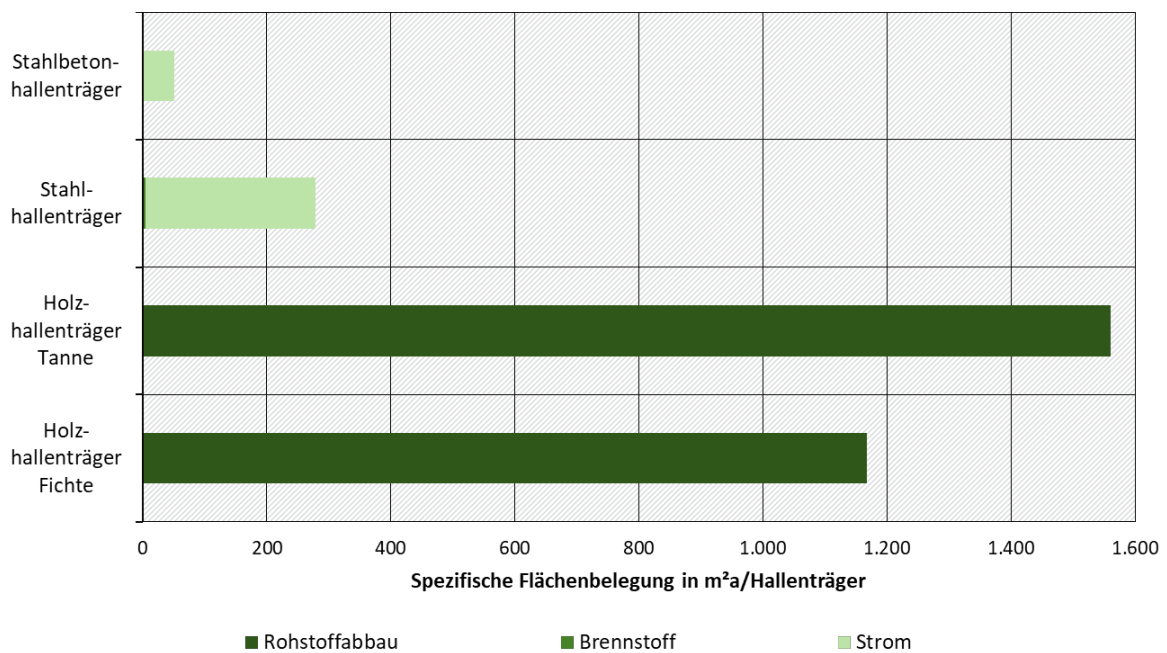
4.4 Ergebnisse des Vergleichs

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse für die drei Trägersysteme bzw. vier Beispielsysteme findet sich in der nachfolgenden Grafik.

4.4.1 Temporäre Flächenbelegung

In Abbildung 26 ist die temporäre Flächenbelegung der vier Beispielsysteme dargestellt, jeweils untergliedert in Rohstoffabbau, Energieträger und Strom.

Abbildung 26: Temporäre Flächenbelegung der betrachteten Hallenträger



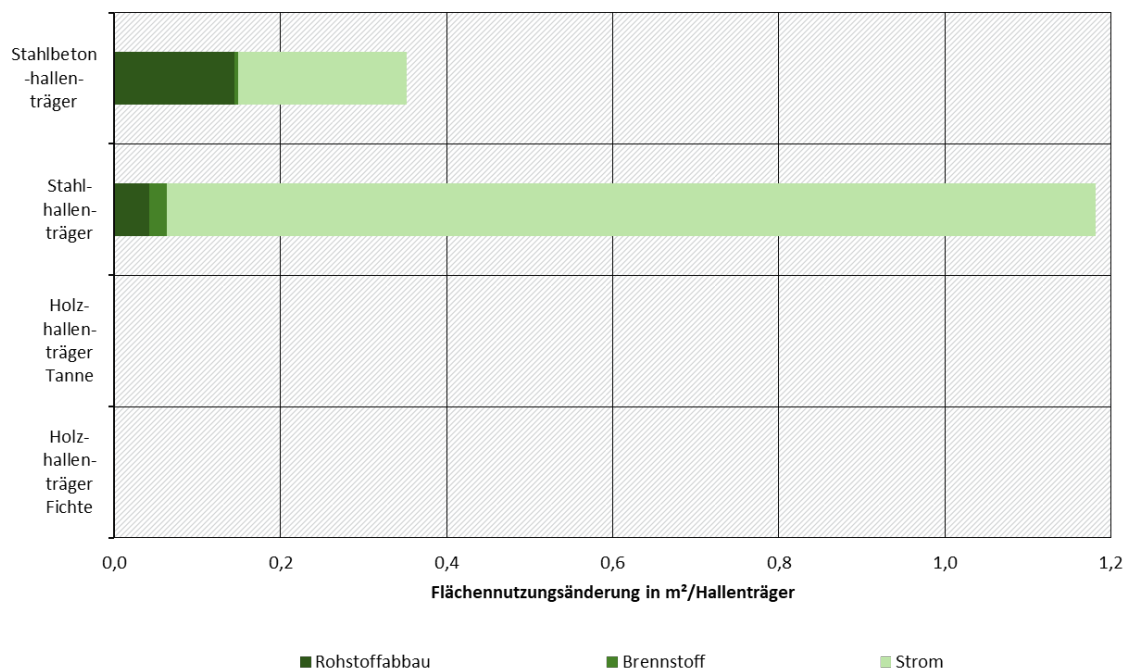
Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Die beiden holzbasierten Systeme zeigen eine deutlich höhere temporäre Flächenbelegung als die Hallenträger aus Stahl und Stahlbeton. Für die Bereitstellung der holzbasierten Systeme werden in diesem vereinfachten Anschauungsbeispiel keine Energieträger und kein Strom benötigt. Hier ist die Last einzig durch den Rohstoffabbau verursacht. Durch die höhere Stahlmenge und den damit verbundenen höheren (flächenintensiven) Strombedarf ist die temporäre Flächenbelegung des Stahlhallenträgers deutlich größer als die des Stahlbetonhallenträgers. Der temporäre Flächenbedarf für den Abbau von Eisenerz, Braunkohle, Kalkstein sowie Bausand- und -kies ist mit $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{Stahlhallenträger}$ und $1 \text{ m}^2 \cdot \text{a}/\text{Stahlbetonhallenträger}$ vergleichsweise so gering, dass er in der Grafik nicht mehr wahrnehmbar ist.

4.4.2 Flächennutzungsänderung

Bezüglich der Flächennutzungsänderung zeigt sich, wie in Abbildung 27 zu sehen, ein umgekehrtes Bild. Da Holz nicht zu Flächennutzungsänderung führt, liegen hier die Holzhallenträger bei annähernd Null. Im Ergebnis spielt hier der Stromverbrauch die entscheidende Rolle (die entsprechenden Faktoren sind dem Fallbeispiel „Strom“ in Kapitel 2.3.3 zu entnehmen), weswegen die stromintensiven Produkte, d.h. die aus Stahl und somit v.a. der Stahlhallenträger, im Ergebnis herausragen. Der Stromverbrauch ist damit sogar deutlich relevanter als der Abbau der mineralischen Rohstoffe (Kalk, Eisenerz).

Abbildung 27: Flächennutzungsänderung der betrachteten Hallenträger



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

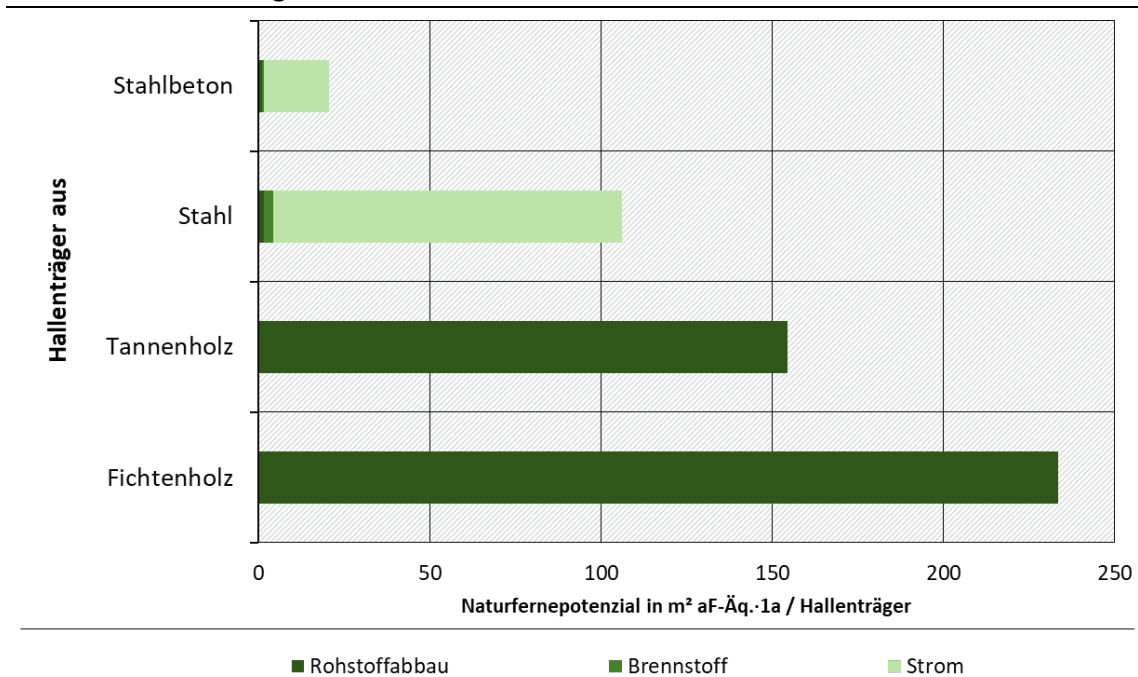
4.4.3 Hemerobie

Für das Hemerobie-gewichtete Naturfernepotenzial (Abbildung 28) zeigt sich ein deutlich anderes Bild als für die temporäre Flächenbelegung. Für die beiden Holzsysteme ergibt sich eine Ergebnisumkehr, bedingt durch die Einstufung von Tannenholz in die Hemerobiekategorie IV im Vergleich zur Hemerobiekategorie V für Fichtenholz und dem damit einhergehenden geringeren Charakterisierungsfaktor für Tannenholz (siehe hierzu Tabelle 12).

Beim Ergebnis für den Stahlhallen-träger gilt es, die obigen Ausführungen zur Wahl der Herstellungsrouten bei der Stahlherstellung sowie zur Allokation des Stahlschrottes zu beachten und die damit möglicherweise einhergehenden Änderungen in den Ergebnissen im Blick zu behalten. Würde der Stahlhallen-träger beispielsweise rein über den Elektrolichtbogenofen hergestellt und keine Last für den Stahlschrott tragen, würde sich der Strombedarf um ca. 90 % verringern.

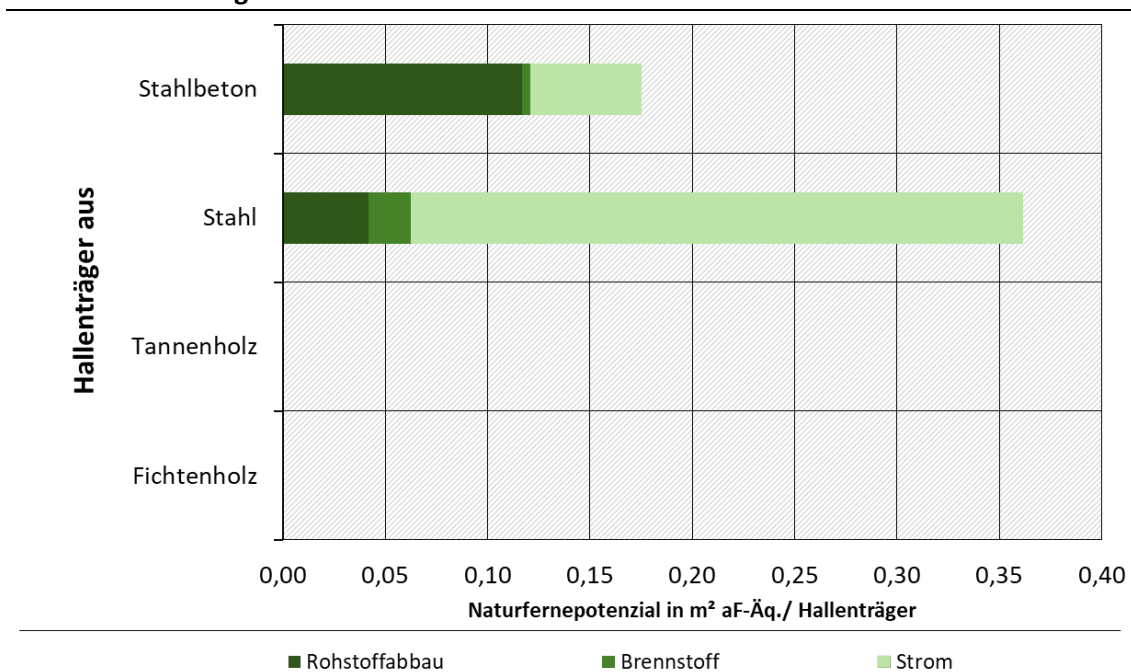
Bezüglich der Flächennutzungsänderung zeigt sich wie bereits oben ausgeführt ein umgekehrtes Bild (siehe Abbildung 29): Der Stahlhallen-träger hat somit auch im Naturfernepotenzial den höchsten Wert an Flächennutzungsänderung.

Abbildung 28: Naturfernepotenzial der temporären Flächenbelegung durch die betrachteten Hallenträger



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Abbildung 29: Naturfernepotenzial der Flächennutzungsänderung durch die betrachteten Hallenträger



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Normierung

Das Prinzip der Normierung wurde bereits unter dem Fallspiel Strom in Kapitel 2.4.3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben. Als Referenzgröße wird, anders als bei den anderen Beispielen, nicht das Gesamtvolumen der Bauindustrie zugrunde gelegt, sondern das Tragwerk eines beispielhaften Hallenbauwerks mit 100 Trägern à 10 m Spannweite. Im Ergebnis entspricht die Flächenbelegung für das Tragwerk aus Fichtenholz 26 EDW. Die Tragwerke aus Tannenholz und Stahl liegen jeweils bei 9 EDW und das aus Stahlbeton bei 2 EDW. Die normierten Ergebnisse für die Flächennutzungsänderung betragen für Stahlbeton 8 EDW und für Stahl bei 17 EDW. Mit der Flächennutzungsänderung von Null für Holz sind mit diesem Baustoff auch 0 EDW verbunden. Es zeigt sich, dass die beiden gegenläufigen Indikatoren vom spezifischen Beitrag her in ähnlichen Größenordnungen liegen. Gleichzeitig unterstreicht die Normierung, dass das Tragwerk aus Tannenholz nicht nur gegenüber der Fichte, sondern auch dem Stahlträger im Vorteil ist. Da sich zwischen Stahlträger und Stahlbetonträger angesichts der EDW-Verteilung kein klarer Vorteil abzeichnet, stellt sich auf dieser Bewertungsgrundlage das Tragwerk aus Tannenholz als das beste hinsichtlich des Flächenrucksacks heraus.

4.5 Zusammenfassung Fallbeispiel Hallenträger aus verschiedenen Baustoffen

Der Effekt der Einstufung in unterschiedliche Hemerobieklassen wird an diesem Beispiel besonders deutlich.

Für die temporäre Flächenbelegung schneiden die beiden auf Holz basierenden Hallenträger deutlich schlechter ab als die Hallenträger aus Stahl und Stahlbeton. Der Hallenträger aus Tannenholz trägt die höchste spezifische Flächenlast, der Stahlbetonhallenträger die geringste.

Die Ergebnisse der beiden Stahl enthaltenden Produkte können sich, je nach Wahl der Stahl-Herstellungsrouten, deutlich verringern. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse wird die Bedeutung des Stromverbrauchs und der damit verbundenen Festlegungen sehr deutlich.

Unter Anwendung der hemerobieklassenspezifischen Charakterisierungsfaktoren ändert sich das Ergebnis deutlich. Das Naturfernepotenzial für den Tannenholzträger ist geringer als das für den Fichtenholzträger.

Der Stahlbetonhallenträger hat den geringsten temporären Flächenbedarf und auch das geringste Naturfernepotenzial. Es sei hier jedoch angemerkt, dass gesamtbilanziell, also unter Einbeziehung weiterer Wirkungskategorien, andere Ergebnisse zu erwarten sind und Stahlbeton demnach Holz nicht prinzipiell vorzuziehen ist (Wolf et al. 2020).

Betrachtet man die Flächennutzungsänderung, ändert sich das Ergebnis deutlich: Für die beiden Systeme aus Holz wird die Flächennutzungsänderung mit Null angesetzt. Dagegen ist hier der Strombedarf entscheidend, weswegen die Produkte aus Stahl v.a. der Stahllhallenträger hier die höchsten Lasten zeigen.

5 Fallbeispiel 4: Antriebsenergie für Personen-Transport

5.1 Welche Vergleichsoptionen werden betrachtet?

In diesem Fallbeispiel wird die Bereitstellung der Antriebsenergie für 100 Personenkilometer (Pkm) für ein Kompaktklassefahrzeug mit verschiedenen Antriebsarten betrachtet. Verglichen wird hierbei der Antrieb jeweils mit

- ▶ Diesel (B7),
- ▶ Reinem Biodiesel
- ▶ Strombasiertem Kraftstoff (PtL) auf Basis von Solarstrom in der MENA-Region aus Fallbeispiel 2
- ▶ Batterieelektrisch mit EE-Strom
 - Einmal als mittlerer EE-Strommix,
 - Einmal mit Windenergie und PV-FFA zu je 50 %

Fossiler Diesel wird ebenfalls analog zu den bereits für das Strom-Fallbeispiel ermittelten Flächenbelegungen und Flächennutzungsänderungen für fossile Energieträger behandelt. Die Fahrzeugherstellung ist nicht Gegenstand dieses Fallbeispiels. Es wird jedoch die Flächenbelegung für die Verkehrswegebenutzung mit einbezogen.

Als Fahrzyklus wird von der für Deutschland typischen Verteilung der Fahrsituationen nach dem Transport Emission Model (TREMOT) (Allekotte et al. 2020) ausgegangen.

5.2 Welche Flächenbelegungen werden betrachtet?

Im Falle des Stromantriebs wird die Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung aus dem entsprechenden Fallbeispiel (Kapitel 2) entnommen.

Die Biodieselproduktion wird analog zur Biogasproduktion gemäß dem Mix an Biomasserohstoffen für Biodiesel und den Erarbeitungsschritten bilanziert.

Fossiler Diesel wird ebenfalls analog zu den bereits für das Strom-Fallbeispiel ermittelten Flächenbelegungen und Flächennutzungsänderungen für fossile Energieträger behandelt.

Die Herstellung der Fahrzeuge wird in diesem Beispiel nicht betrachtet. Die Belegung der Verkehrsfläche ist für alle Optionen vom Prinzip her identisch. Um die Relation zwischen der Fläche für den Antrieb und der befahrenen Fläche abzubilden, wird diese mit in die Betrachtung einbezogen. Nicht in der Bilanz beinhaltet sind Ladestationen bzw. Tankstellen, weil deren Flächenbeiträge als gering eingeschätzt werden.

5.3 Welche Datenquellen stehen für die Flächenbelegung und die Flächennutzungsänderung zur Verfügung?

Die Datensätze für alle hier betrachteten Flächenbelegungen finden sich im Teilbericht III zu diesem Projekt. Hier werden die wesentlichen Komponenten zusammengestellt.

5.3.1 Daten zur temporären Flächenbelegung und Hemerobie

5.3.1.1 Daten zum Stromantrieb

Wie bereits ausgeführt werden die in Tabelle 14 dargestellten Daten zu Flächenbelegung mit Referenzjahr 2019 (bzgl. Mix und Wirkungsgrade) aus dem entsprechenden Fallbeispiel (Kapitel 2) entnommen.

Tabelle 14: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MWh EE-Strommix, Windenergie (an Land) und PV-FFA

	Flächenbelegungs-Faktoren [m ² · 1a/MWh Strom]	NFP [m ² aF-Äq · 1a/MWh Strom]
EE-Strommix	166	58
Wind (auf Land)	1,45	0,72
Photovoltaik (PV-FFA)	22,5	7,9

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, basierend auf Fallbeispiel Strom, Kapitel 2

Nach dem oben erwähnten Transport-Emission-Model (TREMODO) benötigt ein Elektroauto der Kompaktklasse im Mittel ohne Ladeverluste etwa 14 kWh pro 100 km (Agora Verkehrswende 2019). Damit ergeben sich für 100 km folgende in Tabelle 15 zusammengestellten Belegungen.

Tabelle 15: Flächenbelegungs-Faktoren für gefahrene 100 km durch ein mit EE-Strom angetriebenes Elektrofahrzeug

	Flächenbelegungs-Faktoren [m ² · 1a/100 km]	NFP [m ² aF-Äq · 1a/100 km]
EE-Strommix	2,32	0,82
Wind (auf Land)	0,02	0,01
Photovoltaik (PV-FFA)	0,32	0,11

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, basierend auf Fallbeispiel Strom, Kapitel 2

5.3.1.2 Daten zur Biodiesel-Produktion

In Deutschland in Verkehr gebrachter Biodiesel wird nach aktuellen Zahlen der (BLE 2020) zu

- 47 % auf Grundlage von gebrauchtem Altpflanzenöl,
- 28 % aus Rapsöl und
- 21 % aus Palmöl produziert.

Sonnenblumen und Soja spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Für Altpflanzenöl als Abfallstoff wird folgende Systemallokation vorgenommen: Den aus solchen Abfallstoffen erzeugten Kraftstoffen werden keine Lasten zurück über den Punkt der Sammlung hinaus angerechnet. Daher ist hier auch keine Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung aus der Rohstoffgewinnung anzurechnen. Dieser Ansatz beruht allerdings auf der Annahme, dass die Lieferkette des Altpflanzenöls komplett ordnungsgemäß verläuft. Ob dies der Realität entspricht, muss zumindest für die aus Ost- und Südostasien importierten Anteile (ca. 25 %) angezweifelt werden, wie aus den Untersuchungen von (Abdalla / Fehrenbach 2020) hervorgeht.

Biodiesel aus Rapsöl

Die Flächenbelegung für **Rapsöl** kann auf Basis der Daten in Teil III (Kapitel 3.2.2, Tabelle 4) entnommen werden. Sie liegt nach Daten der Statistiken des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) im Mittel Deutschlands über die letzten Jahre bei 37 dt/ha.

Für die Umrechnung von Rapssaat auf Rapsmethylester (RME, Biodiesel auf Rapsölbasis) werden Daten und Berechnungsweise der BioEm-Studie (Fehrenbach et al. 2015) verwendet. Danach werden aus:

- ▶ 3,7 t Rapssaat 1,55 t Rapsöl.
- ▶ Daraus werden nach Raffination und Umesterung 1,51 t RME; bei einem Heizwert von 37,2 MJ/kg entspricht dies 56,1 GJ.
- ▶ Die temporäre Flächenbelegung für 1 MJ RME beträgt somit $0,178 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}$.
- ▶ Unter Anrechnung der Nebenprodukte (Rapsschrot und Glycerin) reduziert sich der Wert über das Allokationsverfahren (hier über den unteren Heizwert der Koppelprodukte) um den Faktor 0,603 auf einen Wert von **$0,107 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a pro MJ RME}$** .

In Teil III (Kapitel 3.4.2) ergibt sich auf Basis generischer Daten für Deutschland für Winterraps die Hemerobiekategorie V.²⁹

Auf dieser Basis ergibt sich ein NFP von **$0,027 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot 1\text{a pro MJ RME}$** . Die deutlich ungünstigere Einschätzung in der BioEm-Studie führte zu einem NFP von $0,051 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot 1\text{a pro MJ RME}$.

Biodiesel aus Palmöl

Die Flächenbelegung für **Palmöl** kann auf Datenbasis der BioEm-Studie (Fehrenbach et al. 2015) bestimmt werden. Danach gestaltet sich die Situation wie folgt:

- ▶ Pro Hektar werden 3,8 t Rohpalmöl (CPO) gewonnen.
- ▶ Daraus werden nach Raffination und Umesterung 3,68 t Palmölmethylester (PME); bei einem Heizwert von 37,2 MJ/kg entspricht dies 136 GJ.
- ▶ Die temporäre Flächenbelegung für 1 MJ PME beträgt somit $0,074 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}$.

²⁹ In der BioEm-Studie wurde die Hemerobie von Rapsanbauflächen auf damals noch ungenauerer Datengrundlage in eine Aufteilung von 10 % Hemerobiekategorie V und 90 % Hemerobiekategorie VI angenommen.

- Unter Anrechnung der Nebenprodukte (Palmkernschrot, Glycerin) reduziert sich der Wert über das Allokationsverfahren (hier über den unteren Heizwert der Koppelprodukte) um den Faktor 0,603 auf einen Wert von **0,071 m² · 1a pro MJ PME**.

In der BioEm-Studie wurde die Hemerobie von Palmölplantagen der Klasse V zugeordnet. Damit ergibt sich ein NFP von **0,018 m² aF-Äq. · 1a pro MJ PME**. Aktuellere Daten liegen hierzu nicht vor. Eine exemplarische Anwendung der Kriterien für den Fall einer Palmölplantage findet sich in Teilbericht III Kapitel 3.4.2.1. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass mit der Umsetzung der RED II in deutsches Recht für Palmöl ab dem Jahr 2023 die Anrechenbarkeit auf die Erfüllung der Treibhausgasquote entfällt. Es ist daher davon auszugehen, dass dann Palmöl auch im Rohstoffmix für Biodiesel in Deutschland keine Bedeutung mehr hat.

5.3.1.3 Daten zur Produktion von PtL

Daten zu strombasiertem Kraftstoff (PtL) werden Fallbeispiel 2 (Kapitel 3) entnommen. Für die Betrachtung hier wird auf PtL auf Basis von Solarstrom in der MENA-Region Bezug genommen.

5.3.1.4 Daten zur Produktion von fossilem Diesel

Wie bereits ausgeführt können auch die Daten zu Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung aus dem Fallbeispiel Strom entnommen werden. In Kapitel 2.3.2.5, Tabelle 5 sind die spezifischen Belegungsfaktoren für verschiedene Energieträger abgebildet. Bei Strom auf Basis von Heizöl (das hier zur Vereinfachung mit Dieselmotorkraftstoff gleichgesetzt wird) liegt dieser bei 0,84 m² 1a/MWh Strom. Darin enthalten und abzuziehen ist der Anteil des Übertragungsnetzes (0,55 m² 1a/MWh). Des Weiteren ist der Stromwirkungsgrad (0,35 liegen hier zu Grunde) herauszurechnen. Damit ergibt sich:

- 0,3 m² 1a/MWh Strom (ohne Übertragungsnetz)
- 0,85 m² 1a/MWh Heizöl bzw. Diesel
- 0,00024 m² 1a/MJ Heizöl bzw. Diesel

Anhand dieser Daten wird bereits deutlich, wieviel höher die Belegung durch einen Biokraftstoff gegenüber einem fossilen Kraftstoff liegt. Die Fläche wird hier vollständig der Hemerobiekategorie VII zugerechnet.

5.3.1.5 Umrechnung auf Emission pro 100 km

In Tabelle 16 sind die einzelnen Faktoren für die diversen Kraftstoffe zusammengefasst, darunter auch für einen **B7-Kraftstoff** mit 7 % Vol. Biodiesel unter Berücksichtigung der Dichten (0,89 kg/Liter Biodiesel, 0,832 kg/Liter fossiler Diesel) und der spezifischen Heizwerte (37,2 MJ/kg Biodiesel, 43,1 MJ/kg fossiler Diesel).

Der oben angenommene Pkw der Kompaktklasse mit einem Dieselmotor verbraucht 4,7 Liter pro 100 km (Meyer et al. 2019). Damit ergeben sich für 100 km die ebenfalls in Tabelle 16 zusammengestellten Belegungen. Der spezifische Verbrauch von PtL wird dem von Diesel gleichgesetzt.

Tabelle 16: Flächenbelegungs-Faktoren für 1 MJ diverser Kraftstoffe sowie für gefahrene 100 km durch einen Diesel-Pkw

	Flächenbelegungs-faktoren		Naturfernepotenzial (NFP)	
	[m ² · 1a/MJ]	[m ² · 1a/100 km]	[m ² aF-Äq · 1a/MJ]	[m ² aF-Äq · 1a/100 km]
Rapsmethylester (RME)	0,107	16,7	0,0269	4,18
Palmölmethylester (PME)	0,071	11,0	0,0176	2,75
Biodiesel (gerundet: 31 % RME und 22 % PME)	0,049	7,6	0,020	3,07
PtL (Strom aus CSP in der MENA-Region)	0,01	1,69	0,0054	0,92
Fossiler Dieselmkraftstoff	0,00024	0,040	0,00024	0,040
B7-Kraftstoff	0,0034	0,53	0,0015	0,24

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu

Wie eingangs des Kapitels erwähnt, soll auch die Belegung der Verkehrsfläche für die Dienstleistung einer Pkw-Fahrt über 100 km mitbetrachtet werden. Diese Belegung ist für alle Antriebsoptionen gleich. Ziel ist es, die Verhältnisse zwischen Antriebsenergie und der eigentlichen Fahrt sichtbar zu machen. In Tabelle 17 sind die aus Teilbericht III Kapitel 3.4.6.5 entnommenen Daten für Belegung und NFP zusammengestellt.

Tabelle 17: Flächenbelegungs-Faktoren für die Verkehrsfläche eines Pkw für 1 Personenkilometer (Pkm)

Verkehrsmittel	Flächenbelegung Verkehrsfläche (Klasse VII) [m ² · a/Pkm]	Flächenbelegung Böschung, Mittelstreifen (Klasse V) [m ² · a/Pkm]	Naturfernepotenzial (NFP) [m ² aF-Äq. · 1a/Pkm]
Pkw	0,00213	0,0000337	0,00214

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu

5.3.2 Daten zur Flächennutzungsänderung

5.3.2.1 Daten zum Stromantrieb

Die Daten zur Flächennutzungsänderung für den Stromantrieb sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Faktoren für die Flächennutzungsänderung für gefahrene 100 km durch einen batterieelektrischen Pkw

	Flächennutzungs- nutzungsände- rung [m ² · 1a/ MWh Strom]	NFP [m ² aF- Äq · 1a/MWh Strom]	Flächennutzungs- nutzungsände- rung [m ² · 1a/ 100 km]	NFP [m ² aF-Äq · 1a/100 km]
EE-Strommix	0,54	0,11	0,0076	0,0015
Wind (an Land)	0,051	0,018	0,00071	0,00026
Photovoltaik (PV- FFA)	2,42	0,24	0,034	0,0033

Quelle: Eigene Tabelle 2021, ifeu, basierend auf Fallbeispiel Strom, Kapitel 2

5.3.2.2 Daten zur Biodiesel-Produktion

Analog zu den Faktoren für Belegung in Kapitel 5.3.1.2 werden die Faktoren zur Flächennutzungsänderung durch Biodiesel abgeleitet. Relevant sind hierbei Rapsmethylester (RME) mit 28 % Anteil am Biodiesel und Palmölmethylester (PME) mit 21 % Anteil am Biodiesel.

► Rapsmethylester (RME):

Als genereller Faktor zur Flächennutzungsänderung für Raps in Deutschland gilt, dass pro Hektar Anbaufläche jährlich 0,0027 Hektar Grünland zu Anbaufläche umgewandelt werden. Dies bedeutet im Mittel eine Veränderung der Hemerobie von Klasse IV (Grünland, siehe Kapitel 4 in Teilbericht III) zu Raps (Klasse V siehe Kapitel 4 in Teilbericht III), d.h. die geänderte Fläche wird mit dem Faktor 2 (Wechsel von Klasse IV zu Klasse V) versehen.

Somit ergeben sich auf Basis der in Kapitel 5.3.1.2 ausgewiesenen temporären Belegungsfaktoren ($0,107 \text{ m}^2 \cdot 1a$ pro MJ RME und $0,027 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq} \cdot 1a$ pro MJ RME) folgende Flächennutzungsänderungsfaktoren:

- Ohne Charakterisierung nach Naturfernepotenzial: $0,00029 \text{ m}^2$ pro MJ RME
($= 0,107 \text{ m}^2 \cdot 1a \times 0,0027 \text{ m}^2/a \cdot \text{m}^2$).
- Mit Charakterisierung nach Naturfernepotenzial:
 - Fläche nach Nutzungsänderung:
 $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. pro MJ RME}$ ($= 0,027 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq} \cdot 1a \cdot 0,0027 \text{ m}^2/(a \cdot \text{m}^2)$)
 - Fläche vor Nutzungsänderung (Grünland Klasse IV mit CF 0,125):
 $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ aF-Äq pro MJ RME}$ ($0,00029 \text{ m}^2 \text{ pro MJ RME} \cdot 0,125$)
 - Die Differenz aus beiden beträgt: **$3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. pro MJ RME}$**

► Palmölmethylester (PME):

In Teilbericht III (Kapitel 3.4.2.1) wird als Rate der Nutzungsänderung der Palmölproduktion in den Hauptimportländern Indonesien und Malaysia eine mittlere Umwandlungsrate von 3 % angesetzt. Da der Rückgang des Waldes in absoluter Höhe in etwa mit der Zunahme der Agrarfläche korrespondiert (und die Zunahme der Agrarfläche hauptsächlich aus der Ausweitung von Dauerkulturen resultiert), wird diese Flächennutzungsänderung vollständig zu Lasten des Waldes angerechnet.

Somit ergeben sich auf Basis der in Kapitel 5.3.1.2 ausgewiesenen temporären Belegungsfaktoren ($0,071 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a}$ bzw. $0,018 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot 1\text{a}$ pro MJ PME) folgende Flächennutzungsänderungsfaktoren:

► Ohne Charakterisierung nach Naturfernepotenzial: $0,00212 \text{ m}^2$ pro MJ PME

($= 0,071 \text{ m}^2 \cdot 1\text{a} \cdot 0,03 \text{ m}^2/(\text{a} \cdot \text{m}^2)$).

► Mit Charakterisierung nach Naturfernepotenzial:

- Fläche nach Nutzungsänderung:
 $0,000529 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. pro MJ PME}$ ($= 0,018 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot 1\text{a} \cdot 0,03 \text{ m}^2/\text{a} \cdot \text{m}^2$)
- Für die Fläche vor Nutzungsänderung wird Primärwald (Klasse I mit CF 0) angenommen (siehe Teilbericht III Kapitel 3.4.2.2), die Differenz aus *nachher* minus *vorher* ist daher identisch mit dem Wert für *nachher*.

- Die Differenz beträgt daher: **$0,000529 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq. pro MJ PME}$**

Würde man für die Ausgangsfläche anstelle von Primärwald einen naturnahen Sekundärwald unterstellen (hier als Klasse II), läge die Differenz um ca. 12 % niedriger. Der Einfluss der Annahme von Primärwaldrodung ist daher von begrenztem Einfluss auf das Ergebnis.

5.3.2.3 Daten zur Produktion von fossilem Diesel

Zur Flächennutzungsänderung für Erdöl und Erdölprodukte weisen die verfügbaren Datenbanken (darunter auch ecoinvent) keine Sachbilanzdaten aus. Es ist für dieses Fallbeispiel davon auszugehen, dass angesichts der niedrigen Faktoren zur temporären Flächenbelegung die Faktoren zur Flächennutzungsänderung ebenfalls sehr niedrig ausfallen und daher für das Fallbeispiel an dieser Stelle vernachlässigt werden können.

5.3.2.4 PtL-Kraftstoff aus der MENA-Region

Die Daten werden aus Kapitel 3 übernommen. Für 1 MJ Kraftstoff werden somit folgende Daten zu Grunde gelegt:

- Flächenbelegung: $0,01 \text{ m}^2 \cdot \text{a/MJ}$
- NFP der Flächenbelegung: $0,054 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq.} \cdot \text{a/MJ}$
- NFP der Flächennutzungsänderung: $0,00061 \text{ m}^2 \text{ aF-Äq./MJ}$

Die Umrechnung auf 100 km Pkw-Fahrt erfolgt anhand der Verbrauchswerte für Diesel (4,7 Liter/100 km bei 35,9 MJ/Liter).

5.4 Ergebnisse des Vergleichs

5.4.1 Temporäre Flächenbelegung

In Abbildung 30 werden die Ergebnisse des Vergleichs dargestellt. Es wird ersichtlich, wie deutlich die Flächenbelegung vom Anteil und der Art des Biokraftstoffs dominiert wird.

Rapsmethylester (RME) ist dabei aufgrund der vergleichsweise geringen Flächenerträge mit den höchsten Beiträgen verbunden.

Palmölmethylester (PME) liegt aufgrund der höheren Flächenerträge gegenüber Raps im Vorteil. Auch was das NFP betrifft, ist Palmöl aufgrund der dauerhaften Anbausysteme günstiger bewertet als der annuelle Rapsanbau.

Der aktuelle mittlere Biodieselmix insgesamt liegt dadurch günstiger, da er einen hohen Anteil Altpflanzenöle beinhaltet, denen keine Flächenbelegung zugerechnet wird.

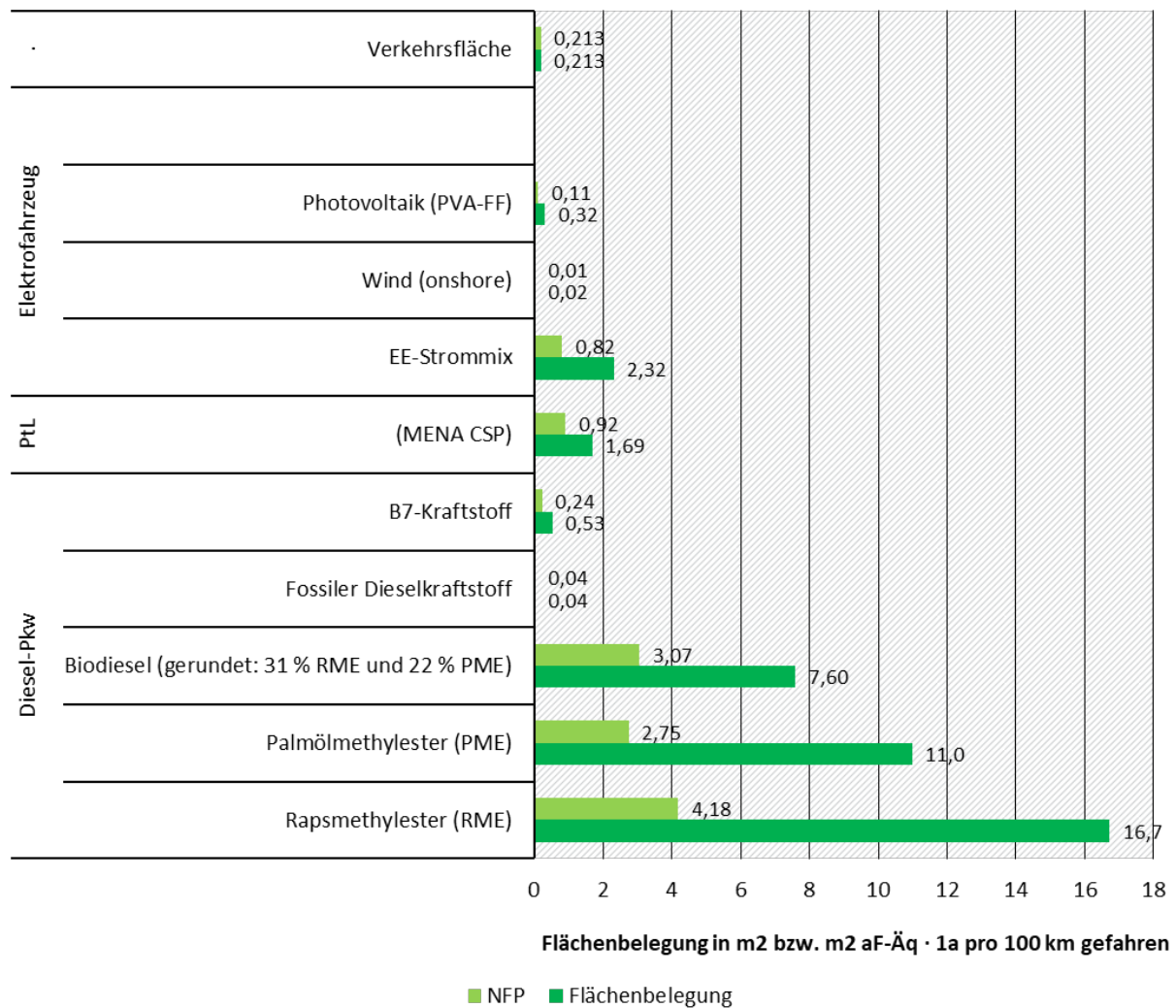
Fossiler Diesel ist mit sehr niedrigen Belegungen verbunden, sodass auch B7 mit ca. 6,5 % energetischem Anteil an Biodiesel rechnerisch auf eine sehr geringe Flächenbelegung kommt.

Eine Fahrt über 100 km mit einem batteriebetriebenen Elektro-Pkw belegt dagegen mehr Fläche als ein Diesel-Pkw mit B7, wenn man den mittleren Mix erneuerbaren Strom ansetzt (Bezugsjahr 2019). Dies beruht auf den Anteilen an Strom von Biogas und fester Biomasse. Mit Strom aus Onshore-Windenergieanlagen oder PV-Freiflächenanlagen ist die Belegung jedoch geringer als mit einem B7-Diesel-Pkw. Strom aus Windkraft liegt sogar deutlich niedriger. Bei weiterer Zunahme von Wind- und Sonnenenergie im EE-Strommix und vermutlicher Stagnation der Biomasse verringert sich der Flächenrucksack des EE-Strommixes entsprechend.

Auf Basis von Solarstrom in der MENA-Region produzierter, strombasierter Kraftstoff (PtL) liegt dagegen um etwa das Achtfache höher in Flächenbelegung und NFP als direkt mit PVA-FF-Strom angetriebene E-Mobilität. Im NFP liegt er sogar höher als das E-Fahrzeug mit EE-Strommix. Hier kommt vor allem der deutliche Effizienzvorteil des Direktantriebs gegenüber dem mit hohen Wirkungsgradverlusten verbundenen Weg vom Strom über Wasserstoff, Kraftstoffsynthese und Verbrennungsmotor zum Tragen.

Die Belegung der Verkehrsfläche selbst liegt im Übrigen in einem ähnlich hohen Bereich wie für die Produktion des B7-Kraftstoffs oder auch für Strom aus PV-Freiflächenanlagen.

Abbildung 30: Temporäre Flächenbelegung und NFP für die betrachteten Optionen verschiedener Antriebsenergien für einen Pkw über 100 km Fahrt



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

5.4.2 Flächennutzungsänderung

In Abbildung 31 werden die Ergebnisse des Vergleichs für die Flächennutzungsänderung auf Basis des NFP dargestellt. Das Ergebnis weicht gegenüber der temporären Flächenbelegung (vgl. Abbildung 30) in zwei wesentlichen Punkten ab:

1. Den höchsten Wert erzielt **PtL** auf Basis von Solarstrom aus der MENA-Region. Die Gründe dafür liegen darin, dass
 - Hier für die Technologie ein sehr dynamischer Zuwachs unterstellt wird³⁰,

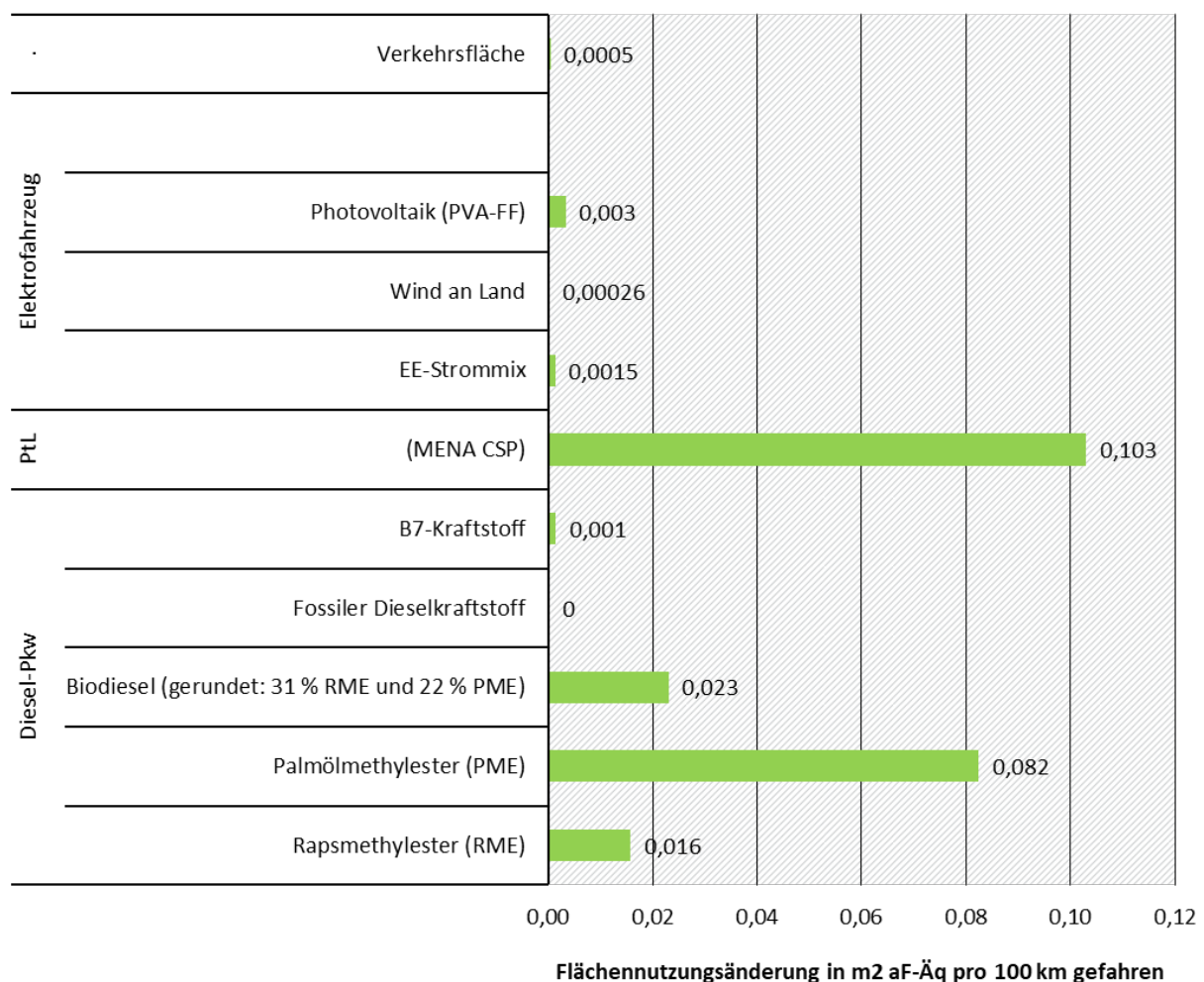
³⁰ Angesetzt wird ein jährlicher Zuwachs an Flächen von 15 % bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung.

- Das Maß an Hemerobie stark zunimmt, da die Ausgangsflächen überwiegend natürliche Ökosysteme (Klasse II) darstellen, während die CSP-Anlagen eine erhebliche Überprägung dieser Naturräume bedingen (Klasse VI, wo nicht versiegelt).

2. Den zweithöchsten Wert erzielt **Palmölmethylester (PME)**, welcher auch deutlich vor Rapsmethylester (RME) liegt. Hierin spiegelt sich die starke Ausweitung der Palmölproduktion im Hauptherkunftsland Indonesien wider.

Eine kleinere Umstellung der Rangfolge zeigt sich auch bei der mit Strom aus **PV-FFA** betriebenen Elektromobilität: Sie führt zu mehr Flächennutzungsänderung als ein mit B7 gefahrener Diesel-Pkw. Wenn man ausschließlich Rapsmethylester (RME) oder den durchschnittlichen Biodiesel-Mix einsetzt, ist Elektromobilität jedoch deutlich günstiger.

Abbildung 31: Flächennutzungsänderung und NFP für die betrachteten Optionen verschiedener Antriebsenergien für einen Pkw über 100 km Fahrt



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

Wie mehrfach vermerkt ist die Frage, ob mit einer Technologie ein vergleichsweise starker Zuwachs herrscht bzw. zu erwarten ist, ein entscheidender Faktor für das Ergebnis der Flächennutzungsänderung (neben der Differenz in der Hemerobie von vorher zu nachher). Dies mag auf den ersten Blick als eine Schieflage zu Ungunsten von Technologien mit derzeit noch geringem Bestand, aber hoher Ausbaudynamik (z. B. PV) gegenüber im großen Umfang etablierten Produktionsweisen (z. B. Palmölplantagen) sein. Dieser Punkt ist jedoch bei der Erstellung von öko-

bilanziellen Basisdaten nicht maßgebend. Hier steht zunächst allein die faktische Sachlage im Vordergrund mit der Frage: welche Effekte sind mit der funktionalen Einheit verbunden, wie in diesem Fall mit 100 km Pkw-Fahrt. Der Rahmen einer Ökobilanz begrenzt sich auf diesen Bereich. Wie die Flächennutzungsänderung im Gesamtkontext der Wirkung z. B. einer Politikstrategie zu interpretieren ist, ist eine darüber hinaus führende Frage, für die die Ökobilanz eine Grundlage liefern kann, nicht die Antwort.

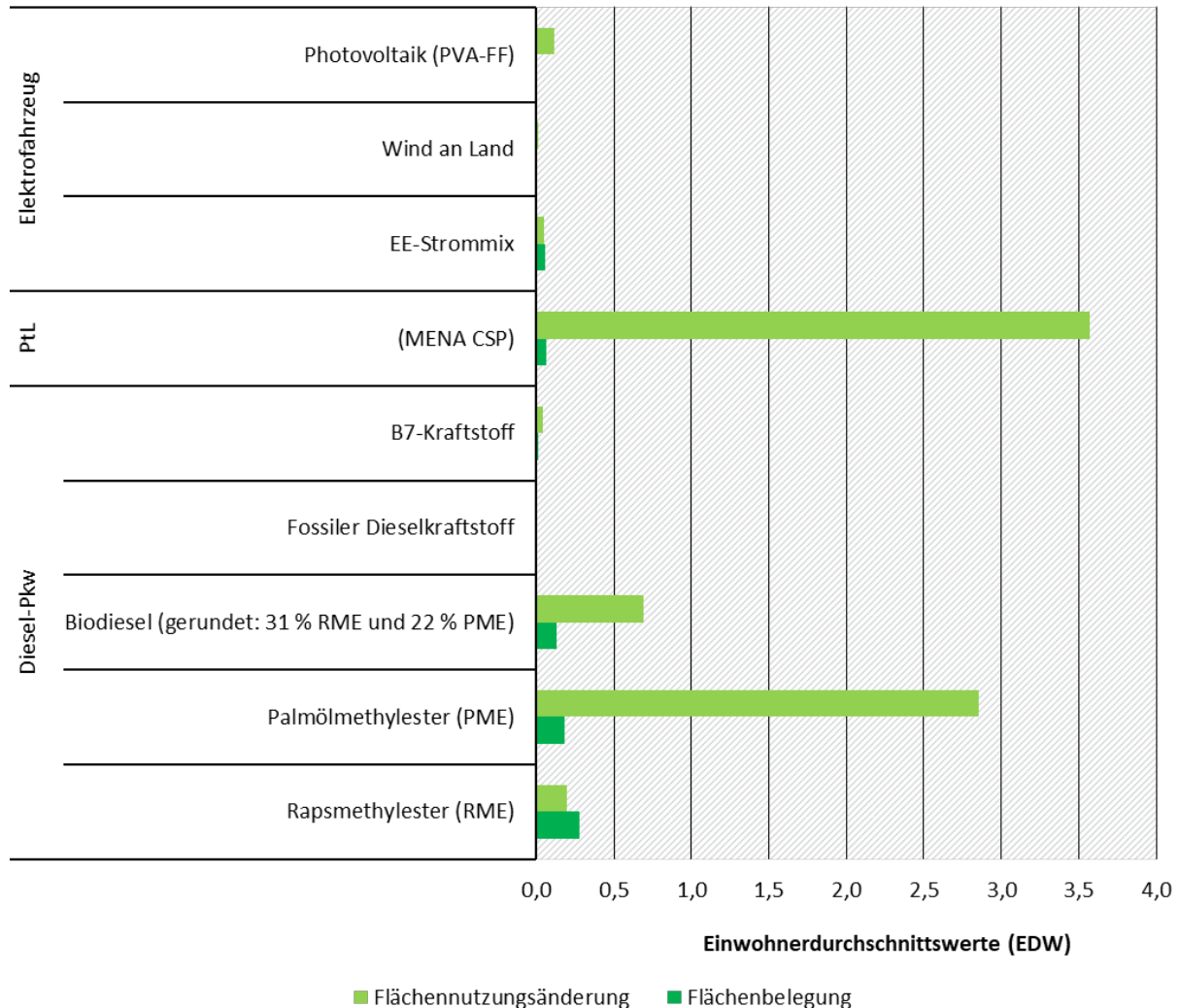
Normierung

Das Prinzip der Normierung wurde bereits im Fallspiel Strom in Kapitel 2.4.3 beschrieben. Zunächst wird wie beim Strombeispiel die aktuelle Gesamtfahrleistung einer Einwohnerin bzw. eines Einwohners als Bezugsgröße zu Grunde gelegt. Dies sind 7.590 km pro Jahr, errechnet aus ca. 630 Milliarden Kilometern (Kraftfahrtbundesamt 2021), zurückgelegt durch Pkw in Deutschland geteilt durch die Bevölkerungszahl von ca. 83 Millionen. Die oben dargestellten Ergebnisse für 100 km werden daher mit dem Faktor 75,9 multipliziert und jeweils durch die EDW für Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung geteilt.

Nimmt man Diesel B7 als derzeitigen Standardfall an, errechnet sich für die Gesamtfahrleistung eine Belegung als NFP von 100.000 Mio. Hektar aF-Äq.. Das sind 1,1 % vom Gesamt-NFP durch Flächenbelegung in Deutschland bzw. 1,1 % der Gesamtflächenbelegung durch eine Person. Bei der Flächennutzungsänderung liegt der Anteil bei 4 %. Die Anteile des derzeit noch von fossilem Kraftstoff dominierten Personenverkehrs an der Belegung und der Flächennutzungsänderung sind somit vergleichsweise gering. Mit Zunahme der alternativen Optionen werden diese Anteile jedoch zunehmen und damit auch die Normierungsfaktoren, wie folgende Erläuterungen zeigen:

- ▶ Würde die Person ihren PKW komplett mit Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse fahren, so würde das NFP dafür von 0,011 auf 0,29 ansteigen, geht man von Rapsdiesel aus. Palmöldiesel läge wegen der höheren Ertragssituation mit einem NFP von 0,18 etwas niedriger, würde aber die durch PKW-Fahrten bedingte Flächenbelegung um den Faktor 16 erhöhen. Diese Beobachtung kehrt sich bei der Flächennutzungsänderung um: Ein reiner Rapsdiseleinsatz würde das Gesamt-NFP um durchschnittlich 20 % erhöhen. Würde die Person nur mit Palmöldiesel fahren, käme zum Gesamt-NFP nochmals das 2,9-Fache hinzu.
- ▶ Steigt die Person auf E-Mobilität um, würde sie beim Betrieb mit dem EE-Strommix etwa 5 % zusätzliche Belegung verursachen. Bei reinem Photovoltaik-Strom oder reiner Windkraft sinken diese Werte auf unter 1 %. Bei der Flächennutzungsänderung liegt der EE-Strommix ebenfalls bei 5 %, Windkraft wiederum würde bei nur 1 % verursachen, Photovoltaik-Strom dagegen würde das NFP um 12 % erhöhen.
- ▶ Im Beispiel für strombasierte Kraftstoffe (PtL) aus Solarstrom in der MENA-Region würde für die zusätzliche Belegung 6 % ausmachen, was im Vergleich nicht besonders hoch erscheint, aber immerhin rund achtfach höher läge als ein Direktantrieb mit PV-Strom. Sehr hoch ist die Flächennutzungsänderung mit dem 3,5-Fachen des aktuellen Gesamt-NFP. Daran lässt sich erkennen, dass diese Technologie nicht nur flächenintensiv ist, sondern auch in besonderem Maße neue, bisher ungenutzte oder anderweitig genutzte Flächen in Anspruch nehmen wird.

Abbildung 32: Normierung der NFP-Ergebnisse für Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung anhand der durchschnittlichen Pro-Kopf-Fahrleistung von 7.590 gefahrene PKW-km pro Jahr; der Wert 1 EDW entspricht dabei dem durch auf 1 Einwohner*in im Durchschnitt verursachten NFP durch Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung.



Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu

An den Extremwerten der Flächennutzungsänderungen in diesem Fallbeispiel wird deutlich, dass hier die Interpretation immer mit Bedacht erfolgen muss. Die Erzeugung von Palmöldiesel wie auch des Stroms für PtL erfolgt außerhalb Deutschlands. Der vergleichsweise niedrige aktuelle Inlandsfaktor zur Landnutzungsänderung ist eine Ursache für die sehr hohen Werte von z.T. weit über 100 %.

Auch hier gilt wie im Fallbeispiel Strom der Hinweis, die Normierung für Szenarien mit Vorsicht zu verwenden. Würde man tatsächlich den ganzen Kraftstoffbereich auf inländischen Biokraftstoff umstellen, ist zu erwarten, dass damit auch die Landnutzungsänderung in Deutschland massiv zunimmt. Das Fallbeispiel hätte somit direkten Einfluss auf die Normierungsfaktoren, was letztlich einen Zirkelschluss bedeutet. Es sei daher betont, dass die Ergebnisse der Normierung immer nur als Orientierungsgröße zu verstehen sind, nicht als *reale* Größen.

5.5 Zusammenfassung Fallbeispiel Antriebssysteme

In diesem Fallbeispiel wurden die Flächenrucksäcke für unterschiedliche Antriebssysteme eines Pkw mit der funktionalen Einheit 100 km Fahrt ermittelt und verglichen: E-Mobilität mit auf verschiedenen Wegen erzeugtem erneuerbarem Strom und Diesel-Pkw mit verschiedenen Arten und Anteilen an Biodiesel.

Folgende Schlüsse können aus dem Fallbeispiel gezogen werden:

- ▶ Bei der **temporären Flächenbelegung** sind der **Anteil und die Art der Biomasse** an der Antriebsenergie entscheidend. Unter den im Einzelnen betrachteten Energieträgern ist dabei **Rapsmethylester** (RME) mit der größten spezifischen Flächenbelegung verbunden. Der entsprechende Biodiesel aus Palmöl schneidet nur dank des höheren Flächenertrags günstiger ab.
- ▶ Mit der Produktion von fossilem Diesel gehen nur sehr geringe Flächenbelegungen einher, somit „verdünnt“ sich die Last bei einem B7-Diesel deutlich und fällt sogar geringer aus als bei einem mit EE-Strommix gefahrenem Elektrofahrzeug – wobei für Letzteren der Anteil Strom aus Biogas (d.h. ebenfalls Anbaubiomasse) wiederum den entscheidenden Beitrag zum Ergebnis leistet.
- ▶ Wird der Strom für das Elektrofahrzeug aus PV-Freiflächenanlagen oder Windenergie an Land erzeugt, ist die temporäre Flächenbelegung hier geringer als beim B7-Diesel.
- ▶ Bei der **Flächennutzungsänderung** weist der im Fallbeispiel 2 genauer analysierte **PtL-Kraftstoff** (Solarstrom in der MENA-Region) die größte Wirkung auf, was sich mit dem dynamischen Zuwachs dieser Anlagen begründet.
Unter den im Einzelnen betrachteten Energieträgern ist aber hier, anders als bei der Belegung, **Palmölmethylester** (PME) mit der größten Last verbunden. Darin spiegeln sich die hohen Entwaldungsraten in den Herkunftsländern wider.

Während in zahlreichen Fällen die **temporäre Flächenbelegung** und die **Flächennutzungsänderung** parallel verlaufen, zeigt gerade dieses letzte Beispiel die Wichtigkeit beider Komponenten des Flächenrucksacks. Die spezifische Flächenproblematik von Produkten, die zwar vergleichsweise „ertragsgünstig“ sind, aber – vielleicht gerade deswegen – in erheblichem Maße zu Landnutzungsänderung führen, würde ansonsten außer Acht gelassen.

Auch bei diesem Fallbeispiel sei abschließend betont, dass der Flächenrucksack sich auf den Aspekt der Flächenbelegung, der Flächennutzungsänderung sowie der Hemerobie der jeweiligen Flächen begrenzt. Er kann damit einen Teil zur Ökobilanz insgesamt beitragen, ersetzt aber nicht eine ökologische Gesamtbetrachtung mit vielen anderen Wirkungskategorien wie z.B. Klimawandel, Versauerung oder abiotischem Ressourcenverbrauch.

6 Schlussfolgerungen aus den Fallbeispielen

Die vier Fallbeispiele dienen einem Test der Methodik, mit dem Anwendungsfähigkeit demonstriert und die Aussagekraft der Ergebnisse geprüft werden soll. Es sei zunächst vorausgeschickt, dass der Flächenrucksack im eigentlichen Anwendungsfall (d. h. im Rahmen einer Ökobilanz) nicht allein steht, sondern stets in Zusammenhang mit anderen Wirkungskategorien der Ökobilanz auszuwerten ist, d.h. mit Ergebnissen beispielsweise zum Klimawandel, Ressourcenverbrauch, Eutrophierung etc. Die Ergebnisse dieser beispielhaften Anwendung dürfen daher nicht als alleinstehendes und umfassendes Umweltverhalten interpretiert werden. Sie decken lediglich die Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung mit dem Naturfernepotenzial ab. Im Rahmen einer vollständigen Ökobilanz sind deren Ergebnisse mit den Ergebnissen der anderen, oben teilweise genannten, Wirkungskategorien in einer verbal-argumentativen Auswertung gegeneinander abzuwägen.

Der Anwendungstest hier bestätigt, dass für die Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können, die den Themenbereich Fläche in einer Ökobilanz adäquat abdecken können.

Dabei ist zu beachten, dass die in den Fallbeispielen betrachteten Systeme teilweise vereinfacht wurden. So wurde z. B. beim Fallbeispiel „grüner“ Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe der Flächenverbrauch durch die Rohstoffbereitstellung für die verbauten Materialien außer Acht gelassen. Auch für das Beispiel der Baustoffe wurde ein stark eingegrenztes System definiert. Zum einen beschränkt sich die Betrachtung auf ein einzelnes Bauelement, einen Hallenträger (Holz, Stahl und Stahlbeton), zum anderen wurden z. B. die mit den Energieaufwendungen für die Endfertigung der Hallenträger beanspruchten Flächen ausgegrenzt. Es ist nicht auszuschließen, dass eine Bilanz mit deutlich erweiterter Systemgrenze zu Modifikationen der hier dargestellten Ergebnisse führen kann. Eine solche Bilanz wäre angesichts der bereits verfügbaren Daten durchführbar, war jedoch im Rahmen dieses Vorhabens nicht vorgesehen. Für die hier vorliegende Aufgabe sind die Ergebnisse jedenfalls als ausreichend richtungssicher zu erachten. So zeigt das Fallbeispiel für den Strommix, dass die Anteile von dauerhaften Investitionsgütern an der Flächenbelegung (wie z. B. durch Kraftwerke) gegenüber den Flächenanteilen für die primär verwendeten Rohstoffe (z. B. Braunkohle) sowie direkt für die Stromerzeugung belegten Flächen (z. B. PV-Freiflächenanlagen) von untergeordneter Bedeutung sind.

Darüber hinaus sei auf noch bestehende methodische oder datentechnische Lücken hingewiesen.³¹ Dies betrifft u. a. das Fallbeispiel Strommix, in welchem der Strom von Offshore-Windenergieanlagen sowie von Wasserkraftwerken keine Berücksichtigung findet, weil der Stand der Methodik bislang noch nicht für Wasserflächen ausentwickelt ist. Hier besteht vorrangiger Forschungsbedarf. Da beide Energiequellen derzeit nur eine geringe Rolle spielen (bei Offshore-Windenergie ist allerdings eine starke Zunahme zu erwarten), schlägt sich dieses Defizit im aktuellen Fallbeispiel nur unwesentlich nieder.

Die derzeitigen Grenzen der Methoden mindern jedoch keinesfalls das positive Ergebnis des Methodentests. Die eingangs des Kapitels gestellte Forschungsfrage – funktioniert die Methode in der Anwendung? – ist zu bejahen. Die Anwendung liefert plausible Ergebnisse, die Datenerhebung ist ohne zu hohen Aufwand möglich, sie ist integrierbar bzw. kompatibel mit anderen Wirkungskategorien der Ökobilanz und die Ergebnisse sind normierungsfähig. Die beschriebenen methodischen und datenbezogenen Lücken können im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten geschlossen werden, wodurch sich die Anwendung in Ökobilanzen weiter erleichtern wird.

³¹ Siehe hierzu auch die im Teilbericht I (Kapitel 6) beschriebenen Grenzen der Methodik.

7 Quellenverzeichnis

- Abdalla, N.; Fehrenbach, H. (2020): Verfügbarkeit und nachhaltige Bereitstellung von Biokraftstoffen nach Anhang IX Teil B (Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl und Tierfett). Heidelberg. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/UCO_ifeu-Studie_final_28-10-20.pdf (03.06.2021).
- AFDB (2014): Ouarzazate Solar Complex Project - Phase II. *Project appraisal report*, African Development Bank (AFDB); ONEC. https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Project-and-Operations/MOROCCO-AR_-_Ouarzazate_Solar_Complex_Project-Phase_II_-_12_2014.pdf (abgerufen am 12.11.2020).
- AGEB (2021): Daten und Fakten. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB)*, <https://ag-energiebilanzen.de/2-0-Daten-und-Fakten.html> (abgerufen am 26.04.2021).
- AGEE-Stat (2020): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2019. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Albrecht, F. G.; König, D. H.; Baucks, N.; Dietrich, R.-U. (2017): A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – A case study. In: *Fuel*. Vol. 194, S. 511–526.
- Albrecht, S.; Rüter, S.; Welling, S.; Knauf, J.; Mantau, M.; Braune, A.; Baitz, A.; Weimar, M.; Sörgel, H.; Kreissig, S.; Deimling, J.; Hellwig, J. (2008): Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern. 2008/5. *Arbeitsbericht*, Stuttgart / Hamburg. S. 299. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dk041313.pdf (abgerufen am 23.12.2020).
- Allekotte, M.; Biemann, K.; Heidt, C.; Colson, M.; Knörr, W. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018). ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Umweltbundesamt, Heidelberg, Dessau-Roßlau. S. 205. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf (abgerufen am 15.12.2020).
- Althaus, H.-J. (2020): iron ore mine operation, 46% Fe, GLO, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.7.
- Andrleit, H.; Elsner, H.; Homberg-Heumann, D.; Huy, D.; Meßner, J.; Pein, M.; Schauer, M.; Schmidt, S.; Schmitz, M.; Szurlies, M.; Wehenpohl, B.; Wilken, H. (2017): Deutschland – Rohstoffsituation 2016. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- de Baan, L.; Alkemade, R.; Koellner, T. (2013): Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 18, No.6, S. 1216–1230.
- BDSV (2018): Zukunft Stahlschrott. Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott. Ergebnisse der Fraunhofer Umsicht-Studie zur Zukunft des Stahlschrotts. BDSV Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V., Berlin. S. 24. https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/030-Bro-ZuSt-RZ-20.1.pdf (abgerufen am 23.12.2020).
- BET (2009): Betonarten. <http://www.beton.de/betonarten-in-deutschland/> (abgerufen am 23.12.2020).
- Biscopig, M.; Kampen, R. (2017): Zusammensetzung von Normalbeton - Mischungsberechnung. B20. *Zement-Merkblatt Betontechnik*, InformationsZentrum Beton GmbH, Erkrath. S. 20. <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/B20.pdf> (abgerufen am 23.12.2020).
- BLE (2020): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2019: Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. Bundesanstalt für

- Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bonn.
https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 15.12.2020).
- BMEL (2015): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2015. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ErgebnisseWaldzustands-erhebung2015.pdf;jsessionid=BE5F02C29E95F1945DD5D2BFF8782833.internet2842?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 20.12.2020).
- BMVI (Ed.) (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. In: *BMVI-Online-Publikation*. Vol. 08/2015.
- BMWi (2020a): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20 (abgerufen am 15.12.2020).
- BMWi (2020b): Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2019. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin. S. 88.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (abgerufen am 29.12.2020).
- BNetzA (2016): Bericht über die Flächeninanspruchnahme für Freiflächenanlagen nach § 36 Freiflächenausschreibungsverordnung (FFAV). Stand: Dezember 2016. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn. S. 19.
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/PV-Freiflaechenanlagen/Bericht_Flaecheninanspruchnahme_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am 30.12.2020).
- Brandão, M.; Milà i Canals, L. (2013): Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 18, No.6, S. 1243–1252.
- Bundesnetzagentur (2021): Zu- und Rückbau konventioneller Kraftwerke. *Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen*,
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Veroeff_ZuUndRueckbau_2021_1.xlsx?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am 18.05.2021).
- Chaudhary, A.; Brooks, T. M. (2018): Land Use Intensity-Specific Global Characterization Factors to Assess Product Biodiversity Footprints. In: *Environmental Science and Technology*. Vol. 52, No.9, S. 5094–5104.
- Curran, M.; Maia de Souza, D.; Antón, A.; Teixeira, R. F. M.; Michelsen, O.; Vidal-Legaz, B.; Sala, S.; Milà i Canals, L. (2016): How Well Does LCA Model Land Use Impacts on Biodiversity?—A Comparison with Approaches from Ecology and Conservation. In: *Environmental Science & Technology*. Vol. 50, No.6, S. 2782–2795.
- Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Kreidelmeyer, S.; Lübbers, S.; Piégsa, A.; Scheffer, ina; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wünsch, A.; Wünsch, M.; Ziegenhagen, I.; Zimmer, W.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Matthes, F.; Scheffler, M.; Wiegmann, K.; Schneider, C.; Holtz, G.; Saurat, M.; Tönjes, A.; Lechtenböhrmer, S. (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Berlin, Wuppertal. S. 180.

- https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB_V111.pdf (abgerufen am 23.12.2020).
- Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Trommler, M.; Reinholz, T.; Völler, K.; Beil, M.; Beyrich, W. (2017): Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. 30. *DBFZ Report*, Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Deutsche Energie-Agentur (dena), Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES), Leipzig, Germany.
https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_30.pdf (abgerufen am 12.11.2020).
- DLR (2020): Solarthermische Kraftwerke. https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-9315/22254_read-53491/ (abgerufen am 23.12.2020).
- Döring, P.; Weimar, H.; Mantau, U. (2018): Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2016. S. 23.
- Drosihn, D.; Icha, P.; Kuhs, G.; Sandau, F.; Pabst, J. (2017): Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Dussault, M. (2020): tap water production, seawater reverse osmosis, conventional pretreatment, enhance module, single stage, GLO, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.7.
- ecoinvent (2020): Ecoinvent3: Ökobilanz-Datenbanken.
<https://www.ecoinvent.org/database/database.html> (abgerufen am 15.12.2020).
- Fehrenbach, H.; Grahl, B.; Giegrich, J.; Busch, M. (2015): Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 20, No.11, S. 1511–1527.
- Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Markwardt, S.; Vogt, R. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). TEXTE. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Giuliano, S.; Puppe, M.; Schenk, H.; Hirsch, T.; Moser, M.; Fichter, T.; Kern, J.; Engelhard, M.; Hurler, S.; Weigand, A.; Brakemeier, D.; Kretschmann, J.; Haller, U.; Klingler, R.; Afanasyeva, S. (2016): THERMVOLT - Systemvergleich von solarthermischen und photovoltaischen Kraftwerken für die Versorgungssicherheit.
- Günnewig, D.; Sieben, A.; Püschel, M.; Bohl, J.; Mack, M. (2007): Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin. S. 126.
https://www.boschpartner.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Erneuerbare_Energien/PV_leitfaden_Bericht.pdf (abgerufen am 30.12.2020).
- Haidar, L.; Pankow, G.; Gerigk, M. (2018): Das sind die größten Stahlproduzenten in Deutschland. In: *Produktion Online. Ranking und Branchenreport*,
<https://www.produktion.de/wirtschaft/das-sind-die-groessten-stahlproduzenten-in-deutschland-104.html> (abgerufen am 23.12.2020).
- Hank, C.; Sternberg, A.; Köppel, N.; Holst, M.; Smolinka, T.; Schaadt, A.; Hebling, C.; Henning, H.-M. (2020): Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable electricity. In: *Sustainable Energy & Fuels*. The Royal Society of Chemistry. Vol. 4, No.5, S. 2256–2273.
- Herden, C.; Rassmus, J.; Gharadjedaghi, B. (2009): Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. Im Auftrag des Bundesamts für Naturschutz; Endbericht. BfN Skripten, 247. S. 195.
https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/erneuerbareenergien/Dokumente/skript_247_pv_freiland_apr2009.pdf (abgerufen am 30.12.2020).

- IWR (2021): Solarthermische Kraftwerke (CSP). In: *Branchenportal für die Solarenergie. Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) / IWR.de GmbH*, <https://www.solarbranche.de/branche/csp> (abgerufen am 20.12.2020).
- Jokadar, Z.; Ponte, C. (2012): Ouarzazate Solar Power Complex, Phase 1 Morocco: Specific Environmental and Social Impact Assessment (SESIA) VOLUME 1. *Specific Environmental and Social Impact Assessment*, 5 Capitals. S. 222. [https://www.masen.ma/sites/default/files/documents_rapport/Masen_NOORoI_SESIA_Volume1_aDfethF%20\(1\).pdf](https://www.masen.ma/sites/default/files/documents_rapport/Masen_NOORoI_SESIA_Volume1_aDfethF%20(1).pdf) (abgerufen am 15.12.2020).
- KfW (2020): Photovoltaikkraftwerk Noor IV. *Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)*, <https://www.kfw-entwicklungsbank.de/header.kfw.tpl> (abgerufen am 12.11.2020).
- Koellner, T.; de Baan, L.; Beck, T.; Brandão, M.; Civit, B.; Margni, M.; i Canals, L. M.; Saad, R.; de Souza, D. M.; Müller-Wenk, R. (2013): UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 18, No.6, S. 1188–1202.
- Kraftfahrtbundesamt (2021): Entwicklungen der Fahrleistungen nach Fahrzeugarten seit 2016. In: *Entwicklungen der Fahrleistungen nach Fahrzeugarten seit 2016*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_inhalt.html. (12.08.2021).
- KTBL (2013): Faustzahlen Biogas. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münter, D.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Dünnebeil, F.; Knörr, W.; Biemann, K.; Simon, S.; Maier, S.; Albrecht, F.; Pregger, T.; Schillings, C.; Moser, M.; Reißner, R.; Hosseiny, S.; Jungmeier, G.; Beermann, M.; Frieden, D.; Bird, N. (2020a): Detailanalysen zum Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. UBA Texte 68/2020. *Anhang zu Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien*, Dessau-Roßlau.
- Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münter, D.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Dünnebeil, F.; Knörr, W.; Biemann, K.; Simon, S.; Maier, S.; Albrecht, F.; Pregger, T.; Schillings, C.; Moser, M.; Reißner, R.; Hosseiny, S.; Jungmeier, G.; Beermann, M.; Frieden, D.; Bird, N. (2020b): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Eingangsdaten für die Ökobilanzrechnungen (Exceldatei). UBA Texte 68/2020. *Excel Anhang*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemvergleich-speicherbarer-energie-traeger-aus> (abgerufen am 20.04.2020).
- Lindner, J. P.; Eberle, U.; Schmincke, E.; Luick, R.; Niblick, B.; Brethauer, L.; Knüpfner, E.; Beck, T.; Schwendt, P.; Schestak, I.; Arana, D. (2019): Biodiversität in Ökobilanzen. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- Masen (2019): NOOR OUARZAZATE IV. In: *Masen*. <http://www.masen.ma/index.php/en/projects/noor-ouarzazate-iv> (abgerufen am 12.11.2020).
- Meyer, K.; Helms, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J. (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Agora Verkehrswende, Berlin. S. 72. https://static.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf (abgerufen am 23.12.2020).
- Müller, J. (2020): steel production, electric, low-alloyed, Europe without Switzerland and Austria, , Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.7.
- Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B. (2018): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul U.a: Ökologische Evaluierung der Szenarien Referenzszenario, Basisszenario, Szenario Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze, Szenario Alternative regionale EE-Verteilung und Restriktionsarmes Szenario. Studie im Auf-

- trag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Karlsruhe / Aachen / Heidelberg. S. 131.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-u-a-oekologische-evaluierung-der-szenarien.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 30.12.2020).
- Ponte, C.; Wade, K. (2016): NOORo IV Ouarzazate 70 MW Photovoltaic Power Project Kingdom of Morocco. *Specific Environmental and Social Impact Assessment Vol.1 Non-Technical Summary*, Dubai, UAE. S. 75. https://drive.google.com/file/d/0B1pEeh_Myj-2RnQtM25DT3j2OTg/view?usp=embed_facebook (abgerufen am 12.11.2020).
- Probas (2020): Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id=%7B167C34FC-9548-470A-BAE3-B7FF31D9A2A2%7D> (abgerufen am 23.12.2020).
- REN21 (2020): Renewables 2020 Global Status Report. REN21 Secretariat, Paris, France.
https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf (abgerufen am 12.11.2020).
- Ristau, O. (2020): Der weltgrößte Solarkomplex in Ouarzazate, Marokko. In: *KfW Stories*.
<https://www.kfw.de/stories/umwelt/erneuerbare-energien/solarstrom-aus-der-wueste/> (abgerufen am 12.11.2020).
- Rubio, L. (2020): water production, deionised, Europe without Switzerland, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.7.
- Russo (2020): synthetic fuel production, from coal, high temperature Fischer-Tropsch operations, ZA, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.6.
- Schmitz, S.; Paulini, I. (1999): Bewertung in Ökobilanzen: Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. TEXTE 92/99. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3619.pdf> (abgerufen am 15.04.2020).
- Soni, H. (2020): iron ore mine operation, 63% Fe, GLO, , Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.7.
- Statistik der Kohlenwirtschaft (2019): Statistik der Kohlenwirtschaft e. V.
<https://kohlenstatistik.de/> (abgerufen am 26.04.2021).
- Szombathy, M. (2020): Stahlschrottbilanz 2019: Die Industrie befindet sich in einer Rezession.
<https://recyclingportal.eu/Archive/55790> (abgerufen am 23.12.2020).
- UBA (2021): Durchschnittlicher Brutto-Wirkungsgrad des fossilen Kraftwerksparks. In: *Durchschnittlicher Brutto-Wirkungsgrad des fossilen Kraftwerksparks*.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/7_abb_durchn-bruttowirkungsgrad-foss-kraftwerkspark_2021-05-10.png. (21.07.2021).
- Verein Deutscher Zementwerke (2010): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019. Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg., Düsseldorf. S. 42. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2019> (abgerufen am 23.12.2020).
- Vidal-Legaz, B.; Sala, S.; Antón, A.; Maia de Souza, D.; Nocita, M.; Putman, B.; Teixeira, R. F. M. (2016): Land-use related environmental indicators for life cycle assessment: Analysis of key aspects in land use modelling. In: *JRC Technical Reports*.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2018): Stahlindustrie in Deutschland 2017. <https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2020/05/Stahlindustrie-in-Deutschland-2017.png> (abgerufen am 23.12.2020).

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. Berlin. S. 48.
https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2020/11/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web.pdf (abgerufen am 23.12.2020).

Wolf, T.; Kubowitz, P.; Untergutsch, A. (2020): Potenziale von Bauen mit Holz. Texte, 192/2020. Umweltbundesamt. S. 248.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_10_29_texte_192_2020_potenziale_von_bauen_mit_holz_aktualisiert.pdf (22.07.2021).