

Ökologische Parameter und räumliche Indikatoren der Etagenwirtschaft nachhaltiger Energieumwandlungssysteme

Manuela Franz¹⁾, Hartmut Dumke²⁾

¹⁾ TU Wien, Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme, Wien, Österreich.
Email: manuela.franz@tuwien.ac.at

²⁾ TU Wien, Institut für Raumplanung, Forschungsbereich Regionalplanung und Regionalentwicklung, Wien, Österreich. Email: hartmut.dumke@tuwien.ac.at

Kurzfassung:

Der hohe Flächenbedarf für erneuerbare Energiesysteme ist die treibende Kraft für die Entwicklung von raumsparenden innovativen technischen Lösungen und Konzepten für eine Mehrfachnutzung von Energielandschaften. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich einleitend mit einer Literaturanalyse zu Methoden und Definitionen von Landverbrauch und Flächeninanspruchnahme. Dabei wird deutlich, dass die Bilanzierungs- und Erhebungsmethoden in der langjährigen Konsistenz große Schwächen aufweisen und dies für die Langzeitbewertung der Life-Cycle-Aspekte bei Energieumwandlungssystemen Probleme verursacht. Ein kurzer geschichtlicher Abriss zu „Etagenwirtschaften“ sowohl im bebauten als auch im unbebauten Raum beschreibt danach den seit Jahrzehnten andauernden Verlust von (Bio)Diversität und den fortschreitenden Bedeutungsverlust der „Etagenwirtschaften“. Durch Vergleiche von Energieertragswerten pro Fläche bei verschiedenen erneuerbaren Energieträgern und über den steigenden „Druck“ nach zusätzlichen Energieumwandlungsanlagen wird argumentiert, dass die gegenwärtige, zweidimensionale Bewertung große Zusatzpotenziale von vertikalen „Etagenwirtschaften“ noch nahezu vollständig außer Acht lässt. Als Case Study wird deshalb in einem mathematischen Modell eine dreidimensionale Energielandschaft modelliert, die deutlich andere Bilanzergebnisse als die zweidimensionale Flächenbewertung zeigt. Die Schlussfolgerungen beschreiben Etagenwirtschaften als vielversprechendes Analysemodell mit großem Potenzial zur Anwendung in der Bestandstransformation - ohne zusätzliche Flächeninanspruchnahme.

Keywords: Etagenwirtschaft, Photovoltaik, Agri PV, life cycle assessment LCA, Ökobilanz, LCI, erneuerbare Energien, Flächenbedarf, land use, agricultural land occupation ALO

1 Einführung

Die Nutzung der Sonnenenergie zur Umwandlung in elektrische und thermische Energie steht in zunehmender Flächenkonkurrenz mit Landwirtschafts-, Wald- und Biodiversitätsflächen. Insbesondere Photovoltaik-(PV)-Freiflächenanlagen weisen hingegen ein hohes Potenzial für eine Mehrfachnutzung der Betriebsfläche auf, wie beispielsweise Agri-PV Anlagen, die den Flächendruck insgesamt reduzieren kann.

Die ökologische Bewertung von Energieerzeugungssystemen kann nach verschiedenen Methoden und Wirkungsindikatoren erfolgen, deren gemeinsame Grundlage das standardisierte Life Cycle Assessment ist ([Deutsches Institut für Normung, 2006](#)). Als

Rahmennorm bietet sie die Möglichkeit der individuellen Schwerpunktsetzung bei der Eingrenzung von Lebenszyklusphasen, der Auswahl der Bewertungsmethode und der selektiven Berücksichtigung von Wirkungskategorien, die sich je nach Fragestellung, Zieldefinition und Datenlage ergeben. Für die Wirkungsabschätzung von beispielsweise Treibhausgasemissionen, Human- und Ökotoxizität oder Flächennutzung, stehen Datenbanken, wie ecoinvent ([Ecoinvent, 2024](#)), GaBi ([Sphera, 2024](#)), SimaPro ([SimaPro, 2024](#)) oder die EU-EPLC-Datenbank ([European Commission, 2024](#)), zur Verfügung. Aus den Ergebnisse können gegebenenfalls weiterführend gewichtete Endpoint-Parameter berechnet werden, wie der von der EU vorgeschlagene Product Environmental Footprint (PEF) ([European Commission, o.J.](#)).

Aufgrund der geringeren flächenbezogenen Leistungsdichte von erneuerbaren Energie-Systemen gegenüber Kraftwerken auf Basis fossiler Energiequellen ([Smil, 2016](#)) und der zunehmenden Flächenkonkurrenz mit anderen Lebens- und Produktionsbereichen sowie natürlichen Habitaten, gewinnt die spezifische und absolute Landnutzung des Energiesektors an Aufmerksamkeit.

Für die Erstellung von Ökobilanzen stehen einige Wirkungskategorien zum Landbedarf zur Verfügung, wie „Land transformation“, „Agricultural/Urban land occupation“ oder „Land use“, definiert je nach LCA-Datenbank und Software. Allerdings wird zum Teil nur die Herstellungsphase berücksichtigt. In nahezu allen Fällen, seien es Datenbanken oder Einzelfallstudien, wird der Vergleichbarkeit und Einfachheit halber die ermittelte Fläche zur Gänze der untersuchten Anwendung zugeordnet, das entspricht einer Allokation von 100 %.

Insbesondere Photovoltaik-, Wind- und Biomassekraftwerke zeigen jedoch einen signifikanten Flächenbedarf in der Betriebsphase ([Dumke, 2020](#)), der jeweils in unterschiedlicher Ausprägung einer Mehrfachnutzung zugeführt werden und damit den Flächendruck reduzieren oder „aufteilen“ könnte. Weitere Überlegungen führen dazu, dass für die ökologische Bewertung nicht nur die horizontale Fläche, sondern auch die vertikale Aufteilung untersucht werden sollte. Dies könnte einerseits einer differenzierten ökologischen Bewertung und andererseits der Mehrfachnutzung, insbesondere der „Etagenwirtschaft“, einen sinnvolleren Ausdruck geben. Eine daraus resultierende dreidimensionale Segmentierung einer Region ermöglicht eine erweiterte Betrachtung der Aktivitäts- und Wirkungsfelder und neue Erkenntnisse für eine optimale Energieraumplanung.

Ausgehend von einer Zusammenfassung von europäischen und normativen Definitionen und Bewertungen von Flächenversiegelung und Flächeninanspruchnahme ist das Ziel dieser Studie, Produktions- und ökologische Wirkungsebenen einer Mehrfachnutzung von Flächen für Energieerzeugungssysteme zu untersuchen und Vorschläge für eine holistische ökologische Flächenbewertung zu entwickeln.

2 Methode

Es gibt in der Literatur unterschiedliche Begriffe und Definitionen für den Landverbrauch von Aktivitäten. Der erste Teil der Studie fasst Begriffsdefinitionen verschiedener Regelwerke und Wirkungskategorien der Ökobilanzierung zusammen und stellt die unterschiedlichen verwendeten Methodiken dar.

Im zweiten Teil werden Flächenkonkurrenzen zwischen Solarkraftwerken und anderen Landnutzungen diskutiert und Ergebnisse von Flächenbedarfen von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion in [kWh/m²/a] als Zusammenschau zwischen Geothermie, Solarenergie, Windkraft und Biomasse präsentiert.

Das Prinzip der Etagenwirtschaft wird im dritten Teil anhand historischer und urbaner Beispiele erläutert. Konzepte von landwirtschaftlichen Etagenwirtschaften, dem „vertical farming“, bilden den Übergang zu Etagenwirtschaft von Energielandschaften. Zu diesem Zweck wird die mehrfach genutzte Fläche als dreidimensionale Etagenwirtschaft dargestellt und in übereinanderliegenden Ebenen und Schichten sowie nebeneinanderliegenden Zonen eingeteilt, die jeweils Produktions- oder Wirkungsbereiche entsprechen. Mithilfe von definierten Flächensegmenten und dazugehörigen vertikalen Gewichtungsfaktoren wird der Gesamtflächenanteil einer Aktivität ermittelt, der weiterführend als Basis für die Berechnung des spezifischen Landbedarfs für Energiesysteme verwendet werden kann.

3 Ergebnisse

3.1 Definitionen der Flächeninanspruchnahme in der Literatur

Der Begriff der Flächeninanspruchnahme¹ einer Aktivität wird im Allgemeinen zweidimensional auf die betroffene Erdoberfläche bezogen. Obwohl dies in den meisten Fällen nicht explizit definiert ist, ergibt sich diese Annahme aus den verschiedenen Kontexten von gesetzlichen Regelungen, die sich auf Vermessungsgesetze beziehen, oder von auf die Landnutzung bezogenen Wirkungskategorien in der Ökobilanzierung. Diese Feststellung ist deshalb wesentlich, weil mehrere gleichzeitige Aktivitäten in der geografischen Lage derselben Grundfläche in verschiedenen Höhenlagen neue Berechnungs- und Bewertungsmethoden zum Flächenbedarf einer Aktivität erfordern.

Für die Einordnung der Thematik des Flächenbedarfs werden im Folgenden Begrifflichkeiten und Definitionen zur Flächeninanspruchnahme verschiedener Regelwerke zusammengefasst.

3.1.1 Europäische Verordnungen und Richtlinien

LULUCF-Verordnung

Das Europäische Parlament hat verschiedene Regulierungen zum Thema Flächenbedarf verabschiedet. Eine davon ist die Verordnung zu *Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft* (LULUCF-Regulation: land use, land use change and forestry) ([Europäisches Parlament, 2018](#)), die zum Ziel hat, in den EU-Mitgliedsstaaten natürliche Senken für Treibhausgasemissionen zu erhalten bzw. zu vergrößern, um die Ziele des Übereinkommens von Paris ([United Nations, 2015](#)) erreichen zu können.

Die Verordnung enthält Vorschriften für die EU-Mitgliedsstaaten zur Anrechnung und Verbuchung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen für die einzelnen Sektoren

¹ Der Begriff der „Flächeninanspruchnahme“ wird in Medien und Literatur oftmals durch „Flächenverbrauch“ ersetzt. Nachdem eine Fläche nicht verschwinden kann ist diese Bezeichnung nicht korrekt, auch wenn die jeweilige Inanspruchnahme andere Landnutzungen für einen längeren Zeitraum weitgehend ausschließt. Der Lesbarkeit halber werden dennoch beide Begriffe bedeutungsgleich in dieser Arbeit verwendet.

der Landnutzung, sogenannte Flächenverbuchungskategorien, insbesondere für Wald-, Acker- und Grünlandwirtschaft. Auf nationaler Ebene sind Stufenpläne definiert, die einem vorgegebenen Zielwert folgend eine Vergrößerung der Senken vorschreibt, d.h. die Vergrößerung von Waldflächen oder Biodiversitätsflächen.

Demgegenüber prognostizierte eine Studie von 2021 für das Jahr 2050 einen Flächenbedarf durch PV-Freiflächenanlagen (utility-scale solar energy) je nach Moduleffizienzentwicklung von bis zu 2,8 % der Gesamtfläche in der EU. Die daraus resultierenden Veränderungen der Bodenbedeckung und indirekte Auswirkungen könnten eine Nettofreisetzung bis zu 50 g CO₂/kWh verursachen, je nach Region, Ausbaustufe, Moduleffizienz und Bewirtschaftungspraktiken in den Solarparks (Van de Ven et al., 2021). Allerdings liegen diese Emissionen um den Faktor 8-24 niedriger als bei fossilen Energieträgern (Franz & Narodoslawsky, 2020).

Jedenfalls wird in diesem Zusammenhang zu beobachten sein, wie der Flächenbedarf von Energielandschaften, insbesondere von PV-Freiflächenanlagen oder diverse Arten von Agri-PV-Systemen, zukünftig in die europäischen Bewertungsschemata eingefügt werden können.

Soil Monitoring Law

Neben der geltenden LULUCF-Verordnung ist ein weiteres, ergänzendes EU-Gesetz in Verhandlung, nämlich das *Soil Monitoring Law*, das den Schutz und die Wiederherstellung der Böden und Gewährleistung einer nachhaltigen Bodennutzung sicherstellen soll (Directorate-General for Environment, 2023; Europäische Kommission, 2023). Diese Richtlinie wird im Annex I genauere Bodendescriptoren, Bodengesundheitskriterien und Indikatoren für Flächenverbrauch und Bodenversiegelung beinhalten, die mit Stand Februar 2024 noch nicht veröffentlicht sind.

Es soll ein umfassendes Bodenüberwachungs- und -bewertungssystem eingerichtet werden, der Vorschlag enthält jedoch keine Maßnahmen, die sich auf die Landnutzung auswirken.

Das Soil Monitoring Law definiert u.a. folgende Begriffe:

„Land“ (engl.: land)	die Erdoberfläche, die nicht von Wasser bedeckt ist
„künstlich angelegte Fläche“ (engl.: artificial land)	eine bebaute oder für Infrastruktur genutzte Fläche oder eine Fläche, die als direkte Rohstoffquelle dient oder historisches Erbe beherbergt, sodass die Böden keine anderen Ökosystemleistungen erbringen können
„Flächenverbrauch“ (engl.: land take)	die Umwandlung natürlicher und naturnaher Flächen in künstlich angelegte Flächen
„Natürliche Fläche“ (engl.: natural land)	ein Gebiet, in dem menschliche Aktivitäten die primären ökologischen Funktionen und die Artenzusammensetzung nicht wesentlich verändert haben
„Naturnahe Fläche“ (engl.: semi-natural land)	ein Gebiet, in dem menschliche Tätigkeiten ökologische Gefüge in ihrer Zusammensetzung, ihrem Gleichgewicht oder ihrer Funktion wesentlich verändert haben, diese aber in Bezug auf die biologische Vielfalt und die von ihnen erbrachten Ökosystemleistungen weiterhin einen potenziell hohen Wert haben
„Bewirtschaftete Böden“ (engl.: managed soils)	Böden, für die Bodenbewirtschaftungspraktiken durchgeführt werden
„Bodenbedeckung“ (engl.: land cover)	die physikalische und biologische Bedeckung der Erdoberfläche

Der Flächenverbrauch im Sinne der Richtlinie entspricht also einer einmaligen Landtransformation von natürlichen/naturnahen Flächen in eine künstlich angelegte Fläche. Wie beispielsweise die Umwandlung von Agrarland zu Solar-Infrastruktur zu bewerten ist, geht aus

den Definitionen nicht hervor. Die Mitgliedsstaaten können jedoch auch zusätzliche Indikatoren für den Flächenverbrauch einführen. Die Bewertung von Bodennutzung und Bodenbedeckung soll im Sinne der LUCAS-Flächenstichprobenerhebung erfolgen, die nachfolgend dargestellt wird.

Land Use/Cover Area frame statistical Survey (LUCAS)

Eurostat führt alle drei bis vier Jahre in allen EU-Mitgliedsstaaten eine Flächenstichprobenerhebung zur Landnutzung und Bodenbedeckung (LUCAS) durch. Dabei werden Änderungen in den Bereichen Landnutzung, wie Land- und Forstwirtschaft, Wohnen oder Erholung, und Bodenbedeckung, wie Anbaukulturen, Gras, Laubwald oder bebaute Fläche, ermittelt. (Eurostat, o.J.), (Europäische Union, 2021)

Die Erhebungen sind nach Definitionen und Methodik standardisiert. Die Landbedeckung, d.h. die biophysische Bedeckung der Erdoberfläche, umfasst 74 Unterklassen. Die Landnutzung, d.h. die sozio-ökonomische Nutzung der Erdoberfläche, umfasst 40 Unterklassen. Die detaillierte Klassifizierung ist in den Technischen Dokumenten von Eurostat dokumentiert (E4.LUCAS (ESTAT), 2022).

Flächenverbrauch in der EMAS-Verordnung

Während die obigen EU-Regelungen in direktem Zusammenhang stehen und miteinander verknüpft sind, ist die EMAS-Verordnung ein eigenständiges Regelwerk.

Die EU-Verordnung für das freiwillige betriebliche Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung (EMAS) unterscheidet bezüglich des Flächenverbrauchs folgende Indikatoren für die Umweltleistung im Bereich „Flächenverbrauch in Bezug auf die biologische Vielfalt“ (EMAS-VO, 2023; Annex VI), in m² oder ha:

- gesamter Flächenverbrauch
- gesamte versiegelte Fläche
- gesamte naturnahe Fläche am Standort
- gesamte naturnahe Fläche abseits des Standorts [z.B. Ausgleichsflächen]

In diesem Zusammenhang werden folgende Begriffe definiert (ebd.):

„versiegelte Fläche“ (engl.: sealed area)	Bereich, in dem der ursprüngliche Boden abgedeckt wurde (...), um ihn undurchlässig zu machen
„naturnahe Fläche“ (engl.: nature-oriented area)	Bereich, der in erster Linie der Erhaltung oder Wiederherstellung der Natur dient. Naturnahe Flächen können sich auf dem Gelände des Standorts befinden und Dächer, Fassaden, Wasserableitungssysteme oder andere Elemente umfassen, die zur Förderung der biologischen Vielfalt konzipiert, angepasst oder verwaltet werden.

Die EMAS-Verordnung differenziert sehr genau zwischen der gesamten Betriebsfläche, die in der Regel der Grundstücksfläche entspricht, und den verschiedenen Flächennutzungsarten innerhalb der Grundstücke.

3.1.2 Flächeninanspruchnahme in Österreich – Methodik

Die als „in Anspruch genommenen“ Flächen sind definiert als „Flächen, die durch menschliche Eingriffe für Siedlungs-, Verkehrs-, Freizeit-, Erholungs- und Ver- sowie Entsorgungszwecke verändert und/oder bebaut sind und damit für die land- und/oder forstwirtschaftliche Produktion und als natürlicher Lebensraum nicht mehr zur Verfügung stehen“. Sie kann sowohl

versiegelte, teilweise versiegelte als auch nicht versiegelte Flächen enthalten.“ Versiegelte Flächen sind solche, „die durchgehend mit einer gänzlich wasser- und luftundurchlässigen Schicht abgedeckt sind“. (ÖROK, 2024)

Die Flächendaten werden vom österreichischen Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen erhoben. Ab dem Jahr 2013 wurden die Kategorien der Flächeninanspruchnahme umfassend geändert. Eine Übersicht über die Benützungsarten, die Nutzung und Flächenversiegelung sowie die Änderungen der Klassen veröffentlichte das österreichische Umweltbundesamt (UBA, o.J.a).

Im Jahr 2022 wurde eine neue Berechnungsmethode zur Ermittlung der Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung in Österreich implementiert. In diesem Zusammenhang werden alle relevanten Daten von Bund und Ländern zu Bodenbedeckung, Landnutzung und Landnutzungsänderung einbezogen und grundstücks- und parzellengenau ausgewiesen. Neben vielen anderen Kategorien werden explizit Flächen für die Energieproduktion (Windkraftwerke, PV-Freiflächenanlagen, Strommasten) ausgewiesen. Innerhalb der Grundstücke wird keine Differenzierung vorgenommen bzw. nur indirekt über etwaige Subkategorien und die jeweilige Beschreibung der Flächenwidmung. Weiters wird unterschieden zwischen versiegelt und nicht versiegelt, erstere wird auf 1 m² genau berechnet (UBA, o.J.b). Umspannwerke und (konventionelle) Kraftwerke fallen in die Kategorie Ver- und Entsorgungsflächen (ÖROK, 2023). Genaue Kategorien und dazugehörige Flächenversiegelung sind mit Stand Februar 2024 noch nicht veröffentlicht.

Die zweimalige Änderung der österreichischen Kategorien und Berechnungsmethoden für die Flächeninanspruchnahme innerhalb von zehn Jahren stellen für ein langfristiges Monitoring ein Problem dar und sollte für historische und zukünftige Vergleiche berücksichtigt werden.

3.1.3 Land use in der Ökobilanzierung

Im Zuge einer Ökolbilanz werden Emissionen und Ressourcenentnahmen in Charakterisierungsfaktoren übertragen. In diesem Zusammenhang beschreiben sogenannte Midpoint-Impact-Kategorien einzelne Umweltprobleme, wie Human- und Ökotoxizität, Versauerung des Bodens oder Klimawandel. Eine weitere Kategorie dieser Art ist „land use“, die sich auf den relativen Artenverlust im Vergleich zu den jeweiligen lokalen natürlichen oder anthropogenen Felddaten, der durch eine bestimmte Art der Landnutzung hervorgerufen wird, bezieht. Dies kann durch verschiedene Nutzungstypen, wie einjährige Kulturen, Dauerkulturen, Forstwirtschaft, Weideland oder urbane Flächen, verursacht werden. Der Landverbrauch bezieht sich also auf eine Flächenumwandlung mit einer durchschnittlichen Erholungszeit hin zu einem natürlichen oder halbnatürlichen, alten Lebensraum. Die dazugehörige Einheit ist [m².a], jährliches Anbauflächenäquivalent (crop land equivalent). Der dazugehörige Midpoint-Charakterisierungsfaktor ist Agricultural land occupation potential (LOP). Die Kategorie „land use“ hat den Indikator Landbesetzung und zeitintegrierte Landtransformation. (Huijbregts et al., 2017)

Eine ältere Version der Bewertungsmethode ReCipE unterscheidet beim Landverbrauch drei Impact-Kategorien, nämlich die geläufige Form Agricultural land occupation (ALO) [m².a], Urban land occupation (ULO) [m².a] und Natural land transformation (NLT) [m²]. Es wird also unterschieden zwischen Landbesetzung und Landtransformation. Die Kategorie ALO beschreibt lediglich die Flächengröße des Agrarlandes, die über eine bestimmte Anzahl von

Jahren besetzt ist. Der Schaden durch die Landtransformation kann über die Zeit, die nach dem Ende der Besetzung zur Regenerierung benötigt wird, berechnet werden. (Goedkoop et al., 2009)

Zusammengefasst sind die Bedeutungen von Flächenbelegung und einmalige Flächen-transformation in den verschiedenen Gesetzes- und Literaturstellen inhaltlich und zeitlich zum Teil unterschiedlich definiert und interpretiert, sie beziehen sich jedoch überwiegend auf die ursprüngliche Biodiversität oder anthropogene naturnahe Nutzung. Bei Vergleichsstudien sind jedenfalls diese Unterschiede und etwaige Methodenänderungen zu berücksichtigen.

Für diese Arbeit sind alle Varianten von Flächenbedarfsbezeichnungen im Sinne einer teilweisen oder vollständigen Nutzung und Belegung eines geografischen Landsegments innerhalb eines Jahres zu verstehen. Im Lebenszyklus einer Aktivität entspricht dies der Nutzungsphase, wobei die vorherige Flächennutzung und die Regenerationszeit nach Nutzungsende nicht berücksichtigt wird.

3.2 Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen erneuerbarer Energiesysteme

Im folgenden Kapitel erfolgt eine Ausdifferenzierung verschiedener erneuerbarer Energiesysteme, die den im Einleitungsteil genannten „signifikanten Flächenbedarf“ der Gewinnung von thermischer und elektrischer Energie nach verschiedenen Anlagentypen beschreibt. Basis der Aspekte „Flächenkonkurrenzen“ und „Flächenerträge“ ist ein Eigenschaften-Katalog bestehender Anlagen (Dumke, 2020).

In diesem Katalog werden Beispiele von Jahres-Durchschnittswerten der Energieerträge bestehender Anlagen in Österreich und Europa gezeigt. Diese Durchschnittswerte enthalten keine kurzfristigen, saisonalen oder klimatisch bedingten Energie-Ertragsunterschiede, und auch keine flächigen „footprints“ der Betriebsphase vor- oder nachgelagerten Errichtungs- und Abbauphase. Abbildung 1 visualisiert dazu 5 Lagebeispiele, und auch große Unterschiede im „Versiegelungsgrad“ der gesamten Anlagen, deren Gesamt-Potenzialflächen sowohl die überbauten oder versiegelten Anteile (in der Abbildung als „direkt“ bezeichnet) als auch die Abstände zwischen einzelnen Energie-Modulen (Windrädern, Solarpaneel-Reihen) enthalten.

Motivation des Anlagen-Katalogs war es, die sehr unterschiedlichen Zugänge bei der Flächenberechnung erneuerbarer Energiegewinnung in einem konsistenten Modell nach verschiedenen Anlagentypen systematisch zu vergleichen. Dies sei an zwei Beispielen veranschaulicht:

Eine Möglichkeit wäre es, als Potenzialertragsfläche ausschließlich die überbauten Flächenanteile zu bilanzieren. Im Fall von Windparks ist das die Windrad-Fundamentfläche, und bei Solarparks Flächen, die mit Solarkollektoren bestückt sind. Diese Flächenbilanzierung ignoriert aber die im Praxisbetrieb großer Energie-Anlagen unbedingt notwendigen Abstandsflächen zwischen einzelnen Modulen. Die Einrechnung auch dieser Flächen ist aber für die planerische Mobilisierung notwendig. Die folgenden Energieanlagen-Beispiele beinhalten deshalb beide Flächenarten (direkt überbaut und Abstände) als gesamte Potenzialertragsfläche. Die dabei verwendeten Einheiten sind der jährliche Energieertrag pro Fläche in kWh/m²/a und der jährliche Flächenbedarf pro erzeugter Energiemenge in m²/kWh/a. Ergänzend werden verschiedene Landnutzungs-Konkurrenzgrade zwischen der Energieertrags- und anderen Landnutzungsarten qualitativ bewertet.

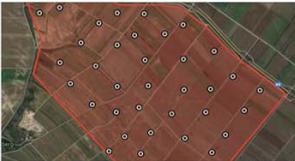
Name der Energieanlage, Art, Lage Flächengrößen	Situation im Raum (Satellitenbild)	Name der Energieanlage, Art, Lage Flächengrößen	Situation im Raum (Satellitenbild)
Windpark Neusiedl Mastfundament u. Wartungsflächen, Zufahrtswege 4,4 ha Windparkfläche 785 ha Direkt: Potenzial=1:178		Solarpark Oberzeiring, Steiermark Kollektorenflächen 2,1 ha Gesamte Solarparkfläche 4,8 ha Direkt: Potenzial=1:2,3	
Biomasse-KW Rankweil, Vorarlberg Kraftwerksgelände inkl. Hackschnitzel- Speicheranlagen 0,74 ha Waldfläche 568 ha Direkt: Potenzial=1:792		Geothermie ATRIO Shopping center Villach, Kärnten Techn. Anlagenbauteile (Speicher, Steuerung) Fläche: k.A. Potenzialertragsfläche d. Erdreiches = Fundamentfläche 2,86 ha	
Solarthermieanlage Messe Wels, Oberösterreich Kollektorenflächen 0,8 ha Gesamtfl. des Flachdaches 1,57 ha Direkt: Potenzial=1:1,96		ZUSÄTZLICHE Flächeninanspruchnahmen: Windkraft, Geothermie, Solarenergie: keine Biomassen: Kraftwerksgelände, Lager, Speicher, Umwandlungsanlagen	

Abbildung 1: Vergleich zwischen direkten (überformten) Flächen und der gesamten Potenzialertragsfläche anhand existierender österreichischer Energieanlagenbeispiele.

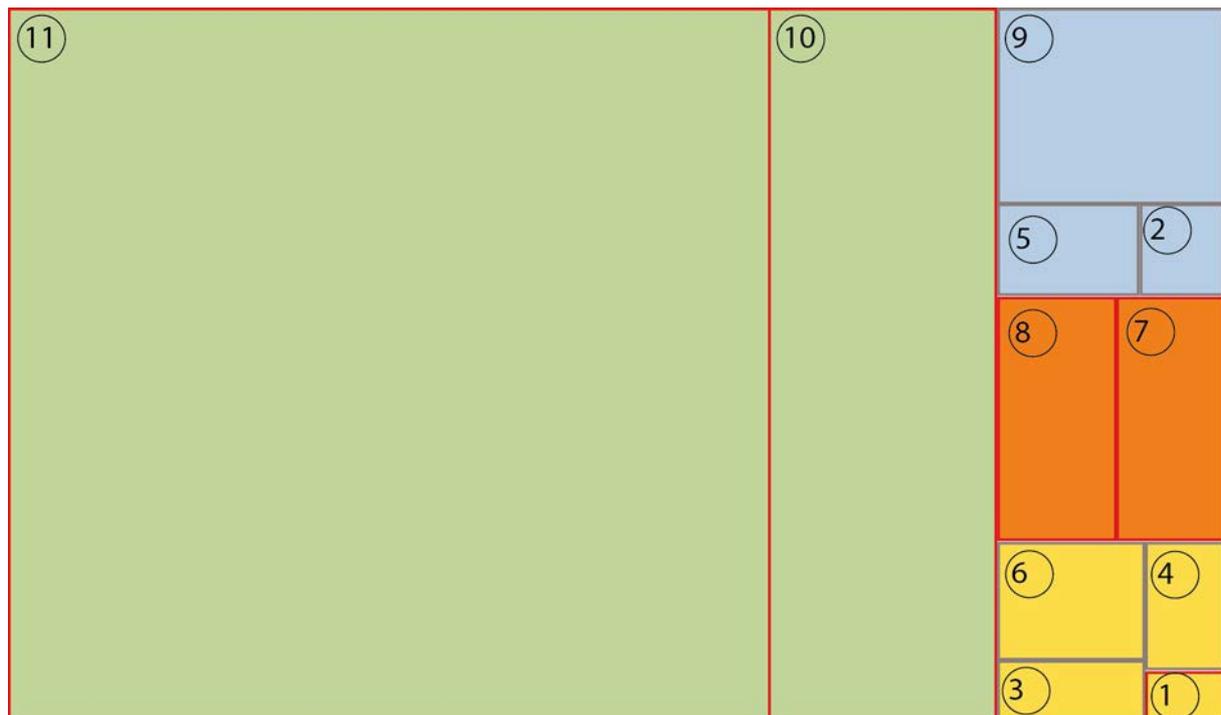
3.2.1 Treemap

Die „Treemap“ zeigt Energieertrags-Durchschnittswerte. Die Auswahl der Beispiele erfolgte nach den folgenden Kriterien:

- Sie stammen aus existierenden österreichischen Energieanlagen oder enthalten Musterflächenertragswerte der Energie pro Quadratmeter und Jahr;
- Sie enthalten sowohl Endenergie-Jahresertragswerte thermischer Energie (in der folgenden Abbildung rot umrahmt) als auch elektrischer Energie (grau umrahmt).

Die Treemap in Abbildung 2 zeigt die Flächenverhältnisse in $m^2/kWh/a$, danach tabellarisch ergänzend den Energieertrag pro Fläche in $kWh/m^2/a$, absteigend nach der Flächenertrags-effizienz sortiert.

Ein Spezialfall ist der besonders geringe Energieertrag der Wald-Hackschnitzel, der sich daraus ergibt, dass bei dieser Stichprobe von einer ausschließlichen Nutzung von Holz-Reststoffen ausgegangen wurde, die sich nicht für „höherwertige“ Funktionen eignen (Holzgewinnung, Zellstoffproduktion). Dies respektiert, dass die Hauptfunktion von Wäldern nicht die Energiegewinnung ist, sondern nach dem Forstgesetz die Schutz-, Nutz- Erholungs- und Wohlfahrtsfunktion (BFW o.J.). Entsprechend höher ist u.a. bereits der Energieertrag aus dem monofunktionalen Maisanbau, und den höchsten Flächenertragswert hat eine vollflächig auf einem Schrägdach installierte Solarthermieanlage. Insgesamt geht die Wertebandbreite über zwei Größenordnungen.



#	Record, Lage	Typ	Untertyp	m ² /kWh/a	kWh/m ² /a
1	Musterrechnung, Kleinanlage Einfamilienhaus	Solarenergie, Wärme	Solarthermie, Schrägdachanlage vollflächig	0,0043	232
2	Großwindräder Potzneusiedl, Burgenland	Windkraft, Elektrizität	Onshore, Einzelanlage, Ebene	0,0083	120
3	Wien	Solarenergie, Elektrizität	PV, mobiles Kleinstpaneel, vollflächig	0,0089	112
4	Wels, Oberösterreich	Solarenergie, Wärme	Solarthermie, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren	0,0105	96
5	Tauernwindpark, Steiermark	Windkraft, Elektrizität	Onshore, Reihe, Bergkamm	0,0135	74
6	Oberzeiring, Steiermark	Solarenergie, Elektrizität	PV, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren	0,0192	52
7	Musterrechnung (Lehmboden)	Geothermie, Wärme	Seichte Geothermie, Flachkollektoren	0,0278	36
8	Nordbahnhofareal, Wien (Projektplanung)	Geothermie, Wärme	Seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	0,0328	30
9	Windpark Neusiedl am See, Burgenland	Windkraft, Elektrizität	Onshore, Cluster, Ebene	0,0472	21
10	Musterrechnung	Biomasse, Wärme	Agrarisch, Mais (Biogas)	0,1695	6
11	Rankweil, Vorarlberg	Biomasse, Wärme	Forst, Hackschnitzel	0,5680	2

Abbildung 2: Treemap [m²/kWh/a] und Flächeneffizienz-Vergleich [kWh/m²/a] erneuerbarer Energiesysteme (eigene Darstellung).

3.2.2 Flächenkonkurrenzen

Die folgende Abbildung 3 zeigt Konkurrenzgrade verschiedener Solarenergie-Typen in Bezug zu anderen, nicht-energetischen lageidenten Landnutzungsfunktionen. Gewählt wurden sieben von der Energiefunktion verschiedene Landnutzungsfunktionen, welche die Daseinsgrundfunktionen Wohnen, Freizeit und Ernährung, aber auch den Orts- und Landschaftsbildeinfluss der Energieanlage qualitativ bewerten. Hierbei haben nicht gebäudeintegrierte Solarenergieanlagen deutlich stärkere Konkurrenzgrade als die gebäudeintegrierten. Die am stärksten „negative“ Landnutzungs Konkurrenz besteht, wenn durch die Errichtung und den Betrieb einer PV-Freiflächenanlage die zuvor auf derselben Fläche aktive Nahrungsmittel-Produktion vollständig verloren wird. Im Gegenteil dazu beeinflussen die gebäudeintegrierten Anlagen die anderen Funktionen nicht negativ.

Flächenkonkurrenz:							
keine gering indifferent mittel hoch							
Art der erneuerbaren Energie und Endenergieform	Wohnfunktion	Orts- und Landschaftsbildfunktion	Naherholungsfunktion	Großräumige Tourismusfunktion	Sachgüter- und Dienstleistungsfunktion	Nahrungsmittelproduktion	Andere erneuerbare Energieproduktion
Gebäudeintegrierte Photovoltaik oder Solarthermie	keine	Ortsbildbeeinflussung abhängig von Sichtbarkeit der Kollektoren	keine	keine	keine	keine (weil nicht auf Lebensmittel-Ertragsböden)	keine
Photovoltaik- oder Solarthermiekraftwerke, Freiland, aufgeständerte Kollektoren	keine (weil nicht auf Bauland)	deutliche visuelle Veränderung des Landschaftsbildes	je nach Größe der Anlage kann Konkurrenz entstehen	je nach Größe der Anlage kann Konkurrenz entstehen	keine (weil nicht auf Betriebsgebieten)	Ertragsminderung bis Verlust der Funktion	abhängig davon, mit was kombiniert wird (zu Windkraft und Biomasse: Konkurrenz; zu Geothermie: keine Konkurrenz)

Abbildung 3: Konkurrenz(grade) zwischen Solarenergie-Kraftwerken und anderen, lageidenten Landnutzungen.

Nach den bisherigen Einebenen-Analysen der Flächenmessung, -ertragseffizienz und -konkurrenz folgt nun eine Einleitung zu Etagenwirtschaften allgemein und als empirische case study ein mathematisches Modell einer dreidimensionalen Etagenwirtschaft.

3.3 Etagenwirtschaft von Energielandschaften

Die Umweltbewertung mittels Ökobilanzierung in der Wirkungskategorie-Gruppe „land use“ erfordert in der Nutzungsphase eine eindeutige Zuordnung der Fläche zu einer Aktivität, die bei konventionellen PV-Freiflächenanlagen bei 100 % Allokation in der Regel der umzäunten Fläche entspricht. Der Flächenanteil bei einer Mehrfachnutzung von Energielandschaften ist jedoch nicht mehr unmittelbar ersichtlich. Nachfolgend wird auf Basis von traditionellen Etagenwirtschaften ein neues, holistisches Visualisierungs- und Berechnungsmodell vorgestellt.

3.3.1 Prinzip von Etagenwirtschaften: urban und landwirtschaftlich

Der Begriff "Etagenwirtschaft" beschreibt zwar einerseits jahrtausendealte Landnutzungsmodelle, ist aber andererseits bei aktuellen Bilanzierungen von "Energielandschaften" noch nicht sehr gebräuchlich. Eine „Etagenwirtschaft“ liegt vor, wenn funktional diverse

Nutzungsarten vertikal übereinanderliegen. Diese Ebenen können unterirdisch, auf der Erdoberfläche und darüber gestapelt sein.

Ein besonders altes Beispiel von Etagenwirtschaften sind die Permakulturen und „Agroforstwirtschaften“ mit mehreren, in symbiontischen Layern vertikal harmonisierenden Pflanzenarten. Etagenwirtschaften im bebauten Raum sind funktional gemischte, mehrstöckige Gebäude - etwa mit Nicht-Wohnnutzungen wie Läden, Dienstleistungen oder Gastronomie im Erdgeschoß, darüber meist mehrere Etagen an Wohnungen und in der obersten Etage mit Dachterrasse. Die folgende Abbildung 4 zeigt diese beiden Beispiele.



Abbildung 4: Permakultur-Garten in Australien (Eliades, 2024) und ein Gründerzeit-Wohnhausblock in Wien (3Si, 2023) als Beispiele bestehender Etagenwirtschaften.

Geschichtlich gesehen nahm die Menge der Etagenwirtschaften sowohl im bebauten Raum (Siedlungen) aber auch im unbebauten Raum (Grünland, Ackerland, Wälder, Brachen) signifikant ab. Dieser Prozess beschleunigte sich mit dem starken globalen Bevölkerungswachstum seit 1850. Im bebauten Raum hat sich diese funktionale Trennung in der Raum- und Stadtplanungswelt insbesondere durch die Charta von Athen (CIAM, 1933) durchgesetzt. Aber auch in der Landwirtschaft gab es, getrieben vom Wunsch nach Ertragsoptimierungen, seit dem Beginn der Industrialisierung immer größere monokulturell bewirtschaftete Ackerlandflächen. Bereits seit den 1960er Jahren wurde erkannt, dass die zuvor praktizierten, räumlich funktionstrennende Strategien sowohl im bebauten als auch im unbebauten Raum zu einem starken (Bio)Diversitäts- und Lebensqualitätsverlust geführt haben, und deshalb wurden die entsprechenden Raum- und Landschaftsplanungsinstrumente geändert².

Im Status quo noch eher seltene Etagenwirtschaften sind Anlagen des „vertical farmings“ ebenso wie funktional gemischte Wohnblocks, die zusätzlich zu den oben bestehenden Funktionen (Wohnen, Freizeit, Nicht-Wohnfunktionen) auch noch die autonome

² Diese Bestandstransformation, sowohl für wenig biodiverse landwirtschaftliche Äcker und Wälder, aber ebenso für monofunktionale Wohnsiedlungen mit wenig Lebensqualität ohne eigene oder nahegelegene andere Infrastrukturen des täglichen Bedarfes, wird noch lange andauern und dies wird große Forschungs- und Förderungsressourcen benötigen.

Energieversorgung mit thermischer und elektrischer Energie (Heiz-, Warmwasser-, Kühl- und Strombedarfe) ohne zusätzlichen Flächenbedarf außerhalb der eigenen Parzelle sicherstellen. Solche bisher noch seltenen good practise-Beispiele haben künftig ein sehr großes Wiederholungspotenzial. Die folgende Abbildung zeigt dazu eine bestehende „vertical farming“ Anlage in Singapur und den nicht nur technisch, sondern auch gestalterisch überzeugenden „Smart Block Geblergasse“ im 17. Wiener Gemeindebezirk.



Abbildung 5: „Vertical Farming“ in Singapur (Doucleff, 2012) und Energieautonomer „Smart Block Geblergasse“ in Wien (GTÖ, o.J).

3.3.2 Etagenwirtschaft von Energielandschaften – 3D-Modell

Nach dem Vorbild der urbanen und landwirtschaftlichen Etagenwirtschaft wird in diesem Abschnitt ein neues Modell einer Etagenwirtschaft für Energielandschaften vorgestellt. Ein wesentliches Merkmal ist der Übergang von einer zweidimensionalen zu einer dreidimensionalen Darstellung und Betrachtungsweise. Dies ermöglicht, im Gegensatz zur gängigen „Vogelperspektive“ der Flächenbelegung, eine Ebenen- und Schichtendarstellung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Damit können Aktivitäten und Wirkungen von sich überlagerten Räumen oberhalb und unterhalb der Erdoberfläche sichtbar gemacht und Potentiale zur Mehrfachnutzung, aber auch Veränderungen des Mikroklimas ermittelt und bewertet werden.

Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung einer Etagenwirtschaft im Freiland mit drei übereinanderliegenden Ebenen für die energetische Nutzung und dazwischenliegenden Schichten für Biodiversitätsverbesserung und den Anbau von Feldfrüchten.

Die unterste Ebene in 1,6 m Tiefe ist mit einem Geothermie-Flächenkollektor mit einem Rohrleitungsabstand von 80 cm belegt.

Ausgenommen sind die Flächen direkt unter den PV-Modulen, die im Sinne einer Überbauung bzw. Überdachung nicht zulässig über den Flächenkollektoren sind (VDI 4640, 2019; S. 22). Die darüber liegende Erdschicht ist – in der Abbildung dementsprechend schraffiert – eine Mischung aus natürlich gewachsenem Boden unter den PV-Modulen und einem aufgeschütteten Boden, der durch den Aushub für die Kollektoren entstanden ist und somit eine Bodentransformation durchlaufen hat. In der Bodenschicht befinden sich weiters die Fundamente der PV-Modul-Aufständerung und vergrabene Erdkabel der PV-Anlage.

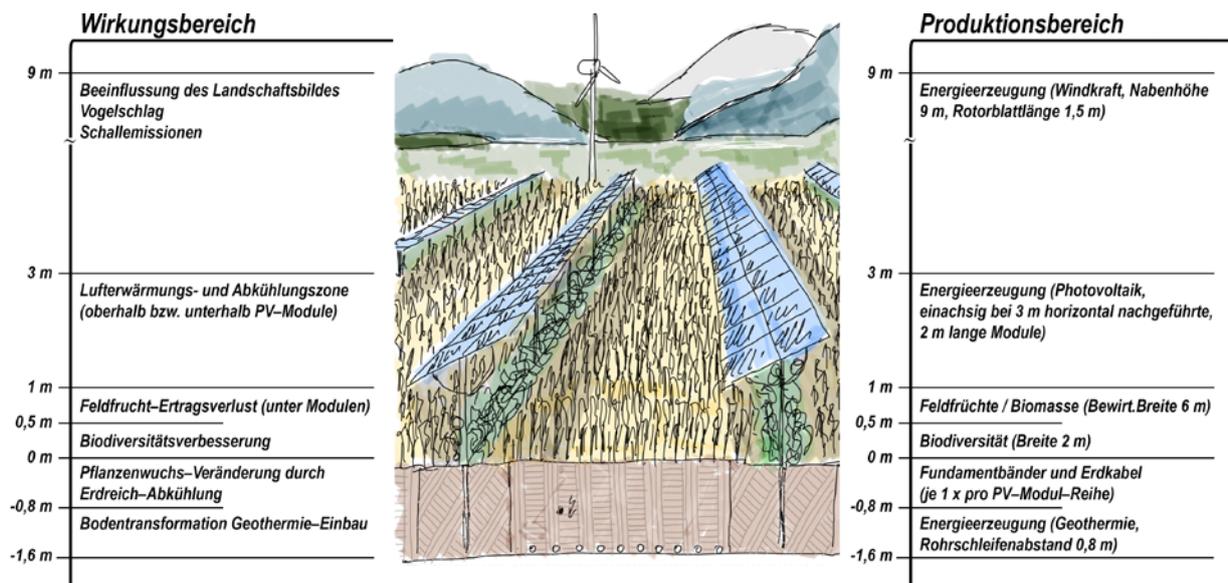


Abbildung 6: Szenario einer vertikalen „Etagenwirtschaft“ einer Energielandschaft als Kombination mit landwirtschaftlichen, ökologischen und energetischen Funktionen (eigene Darstellung).

Die Erdbodenoberfläche ist in diesem Modell lediglich eine Grenzschicht ohne direkte Wirkungs- und Produktionsfunktion. Erst die darüber liegenden Schichten beinhalten einen 2 m breiten Biodiversitätskorridor unter den PV-Modulen und Feldfrüchte oder Biomasse mit einer Bewirtschaftungsbreite von etwa 6-12 m, je nach Auslegung. Diese Produktionsschicht überschneidet sich mit der beschatteten Schicht durch die in 3 m Höhe darüber montierten PV-Module. Die PV-Anlage ist als nachgeführtes System konzipiert. Am oberen Ende der Etagenwirtschaft befindet sich auf Nabenhöhe die Ebene eines Windparks.

Die energetische Nutzung findet zweidimensional in Ebenen statt. Bei Windkraftanlagen könnte man zwei aufeinander normal stehende Ebenen darstellen, vertikal die Ebene der Rotorblätter eines Einzelwindrades und horizontal in der Höhe der Generatoren des Windparks. Demgegenüber stehen im Wechselspiel dazu die dreidimensionalen Schichten der positiven und negativen Wirkungsbereiche sowie die Produktionsbereiche von Biomasse.

3.3.3 Neue Methode zur Ermittlung des Flächenbedarfs von Etagenwirtschaften

Auf Grundlage des 3D-Modells einer Etagenwirtschaft können verschiedene Parameter und Indikatoren der jeweiligen Ebenen und Schichten berechnet werden. Dazu wird ein repräsentativer Ausschnitt aus dem Szenario von Abbildung 6 gewählt, wie er in Abbildung 7 dargestellt ist.

Die weitere Vorgangsweise hängt von der Fragestellung ab, welche Parameter untersucht und welche Wechselwirkungen zwischen den Aktivitäten auf den Ebenen und in den Schichten berücksichtigt werden. Für diese Studie soll der jeweils anteilige Flächenbedarf der Technologien für die energetische Nutzung und der Biomasseerzeugung ermittelt werden. Alle diese Aktivitäten sind dem Produktionsbereich aus Abbildung 6 zugeordnet.

Hierzu wird die Ebene der Bodenoberfläche E_0 in Teilflächen A_i eingeteilt. In einer Etagenwirtschaft sind jeder Teilfläche in der Regel mehrere Aktivitäten zugeordnet. Innerhalb eines Flächensegments A_i bestehen in allen Vertikalschnitten identische Verhältnisse an Aktivitäten und Wirkungen.

Durch die Einführung eines Gewichtungsfaktors G kann weiterführend die anteilige Fläche zur jeweiligen Aktivität ermittelt werden. Der Gewichtungsfaktor liegt zwischen 0 und 1, dessen Wert vom untersuchten Indikator abhängt. Die Summe der Gewichtungsfaktoren bezogen auf ein Flächensegment A_i ist immer 1. Der anteilige Gesamtflächenbedarf einer Aktivität A_{Akt} errechnet sich somit folgendermaßen:

$$A_{Akt} = \sum (A_i \cdot G_{Akt,i}) \quad (1)$$

Bei einer konventionellen PV-Freiflächenanlage ohne Mehrfachnutzung wären alle Flächensegmente der Aktivität PV-Energie mit $G_{PV,i} = 1$ zugeordnet. Dies entspricht den angenommenen Flächen in Abschnitt 3.2.1.

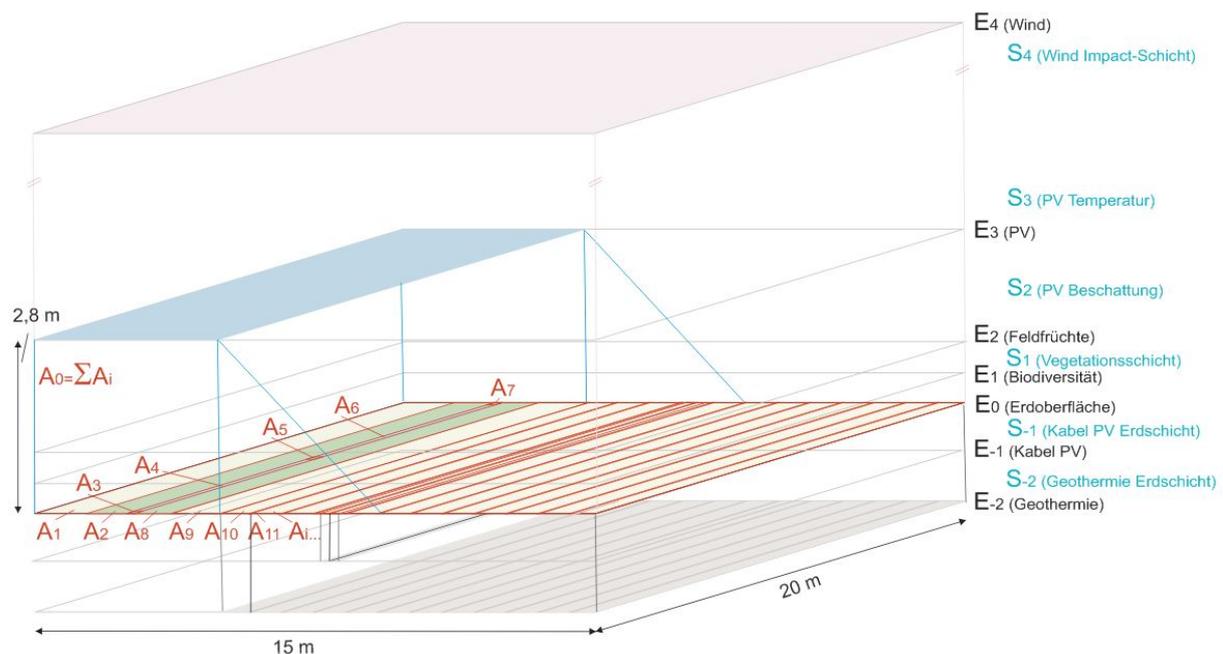


Abbildung 7: Geometrisch vereinfachter Ausschnitt aus dem Modell der Etagenwirtschaft von Abbildung 6 mit Einteilung der Flächensegmente A_i (eigene Darstellung).

Zur Veranschaulichung, wie sich die Wahl des Gewichtungsfaktors einer Etagenwirtschaft auf die Ergebnisse auswirkt, werden folgende zwei Szenarien für den anteiligen Flächenbedarf berechnet. In beiden Fällen spielt die Windenergie keine Rolle und wird nicht weiter berücksichtigt, das heißt $G_{Wind} = 0$.

Flächenbedarf bezogen auf die Belegung der Bodenoberfläche E_0

Dieses Szenario berücksichtigt ausschließlich die Aneinanderreihung der direkten Bodenbedeckung, ohne andere Einflüsse einzubeziehen. Das bedeutet, dass alle Aktivitäten und Wirkungen oberhalb und unterhalb der Bodenoberfläche nicht beachtet werden, wie beispielsweise die PV-Modultische, deren Abschattungsbereiche oder die Geothermie-Flächenkollektoren.

Der Gewichtungsfaktor einer Aktivität, welche die jeweiligen Flächensegmente bedeckt, ist 1, für alle anderen Aktivitäten ist er 0. Für die PV-Freiflächenanlage bedeutet dies nur die Berücksichtigung der Bodenverankerung (hier als schmaler Streifen A_3 - A_7 angenommen). Links und rechts davon befindet sich ein Biodiversitätsstreifen. Die übrige Fläche wird dem Anbau von Feldfrüchten zugeordnet. Daraus ergibt sich folgende Flächenaufteilung:

Tabelle 1: Anteiliger Flächenbedarf der Etagenwirtschaft der Bodenfläche E_0 bezogen auf die Gesamtfläche A_0 .

PV	Geothermie	Acker	Biodiversität
1 %	0 %	87 %	12 %

In diesem Szenario beträgt der Flächenbedarf der PV-Freiflächenanlage, oder anders ausgedrückt, der Flächenverlust für die Ackerfläche und Biodiversität, nur 1 % der Gesamtfläche. Dementsprechend verringert sich die Fläche pro erzeugter kWh gegenüber einer konventionellen PV-Freiflächenanlage um den Faktor 100. Der ermittelte anteilige Flächenbedarf für die PV-Anlage korrespondiert mit den Werten, die von einigen Agri-PV Entwicklern angegeben werden.

Flächenbedarf bezogen auf die Sonneneinstrahlung

Die Globalstrahlung der Sonne, die jährlich einer Fläche zur Verfügung steht, wird in diesem Szenario als Referenzwert und Indikator herangezogen. Die Sonne ist die einzige universelle Energiequelle, deren Strahlungsenergie für alle Lebensaktivitäten in eine jeweils andere Form umgewandelt wird. PV-Module wandeln die Sonnenenergie in elektrische Energie und thermische Energie um, ein Teil wird reflektiert. Eine indirekte Nutzung der Solarenergie erfolgt durch Geothermie-Flächenkollektoren, die dem Boden thermische Energie entziehen und die über die Sonne wieder zugeführt wird. Den Flächenabschnitten im Schatten der PV-Module und der Vegetation stehen dementsprechend weniger Anteile der Globalstrahlung zur Verfügung.

Die Berechnung der Flächenanteile erfolgt ebenfalls mittels Gleichung (1). Die Gewichtungsfaktoren werden in diesem Fall jedoch über die Energiebilanz der Sonneneinstrahlung ermittelt. Die Gesamtfläche einer Aktivität A_{Akt} entspricht damit dem Anteil der Bodenfläche, für die uneingeschränkt die lokale Globalstrahlung zur Verfügung stehen würde.

Die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren ist wesentlich komplexer als im ersten Szenario und erfordert eine Vereinfachung des Modells, wie es in Abbildung 7 dargestellt ist. Die PV-Module sind in horizontaler Lage angenommen mit einem konstanten Schatten auf die darunterliegende Fläche. Um den Tagesgang der Sonne und die Nachführung der Module zu berücksichtigen, wurde angenommen, dass der Schatten linear abnehmend auf die halbe Ackerfläche fällt (angedeutet durch die diagonale blaue Linie in Abbildung 7).

Für die Ermittlung eines Wertes für die diffuse Strahlung im Schatten wurden Literaturdaten gesucht, wobei keine systematischen (Schatten)Messungen zu PV-Freiflächenanlagen gefunden wurden. Durch die Kompensation des menschlichen Auges ist es kaum möglich durch Erfahrung abzuschätzen, wieviel "Licht im Schatten" tatsächlich vorhanden ist. Ein erster Hinweis auf einen unerwartet hohen Lichtverlust durch lediglich Teilabschattung findet sich in einer Studie zu Apfelplantagen, in der unter gängigen schwarzen Hagelnetzen mithilfe eines Pyranometers ein Strahlungsverlust am Boden von 26-47 % gemessen wurde (Faltis, 2008).

In einer Studie zu PV-Modulen finden sich kontinuierliche Messdaten zur Sonneneinstrahlung neben einem Solarmodul. Beim Hervortreten der Sonne aus einem Gebäudeschatten zeigte sich bereits am frühen Vormittag ein sprunghafter Anstieg der Sonneneinstrahlung auf den 7-fachen Wert (Rudel, 2017; S. 14), der diffuse Strahlungsanteil betrug somit etwa 14 %. In einer weiteren Studie wurden die Anteile der Globalstrahlung über den Tagesverlauf berechnet. Der Diffusstrahlungsanteil betrug im April an einem sonnigen Tag zu Mittag etwa 7 % der Globalstrahlung (Heinze, 2011; S. 5). Bei Bewölkung ist der Unterschied zwischen der Gesamtstrahlung im Schatten und außerhalb des Schattens weitaus geringer. Die diffuse Strahlung bei Bewölkung (ohne Abschattung) beträgt im Sommer etwa die Hälfte der Direktstrahlung, im Winter etwa zwei Drittel (Reich & Reppich, 2018; S. 68).

Auf Basis dieser Daten wurde als erste Näherung angenommen, dass über das Jahr gemittelt unter den PV-Modulen ein Globalstrahlungsanteil von 15 % vorliegt. Damit verbleibt für die PV-Module ein Globalstrahlungsanteil von 85 %. Der Schattenanteil auf der Ackerfläche verringert sich, d.h. der Globalstrahlungsanteil erhöht sich hinter den Modulen, je weiter die Flächensegmente von den PV-Modulen entfernt sind. Diese Annahmen sind sehr grob geschätzt und sollten mit systematischen Messungen korrigiert werden, um die Einflüsse der Beschattung in Agri-PV-Anlagen besser analysieren zu können.

Der Geothermie-Flächenkollektor wird mit einer jährlichen spezifischen Wärmeentzugsarbeit aus dem Boden von 60 kWh/(m².a) angenommen (StMUGV, 2021). Bei einer Sonneneinstrahlung von 1200 kWh/(m².a) in Ost-Österreich (Solargis, 2024) entfallen somit 5 % auf die Regenerierung des Bodens. Hierbei wird angenommen, dass diese Energie der Ackerfläche fehlt und dieser nur 95 % der Globalstrahlung zur Verfügung steht. Wobei die beschatteten Teile des Ackers weitere Strahlungsenergie an die PV-Module verliert.

Die Gewichtungsfaktoren der Aktivitäten ergeben sie daraus folgendermaßen:

$G_{PV,A1-A9}$	0,85	Annahme, dass der restliche Strahlungsanteil über Reflexion und Streuung in einer Gesamtbilanz unter die Module gelangt
$G_{PV,A10-A28}$	0,76-0,01	linear abfallend
$G_{Biodiv,A2-A8}$	0,15	Gesamtstrahlung minus Anteil PV
$G_{Geotherm,A10-A38}$	0,05	
$G_{Acker,A1,A9}$	0,15	Gesamtstrahlung minus Anteil PV
$G_{Acker,A10-A29}$	0,19-0,94	linear ansteigend; Gesamtstrahlung minus Anteile PV und Geothermie
$G_{Acker,A30-A38}$	0,95	Gesamtstrahlung minus Anteil Geothermie

Diese Gewichtungsfaktoren beziehen sich auf die Flächensegmente A_i in jeweils unterschiedlichen vertikalen Ebenen, je nachdem wo sich die Aktivitäten befinden. Tabelle 2 zeigt das Gesamtergebnis der anteiligen Flächeninanspruchnahme der Aktivitäten projiziert auf die Gesamtfläche A_0 .

Tabelle 2: Anteiliger Flächenbedarf in einer Etagenwirtschaft bezogen auf die Globalstrahlungsbilanz.

PV	Geothermie	Acker	Biodiversität
41,5 %	3,5 %	53 %	2 %

In diesem Szenario beträgt der Flächenbedarf der PV-Freiflächenanlage über 40 % der Gesamtfläche. Das bedeutet, dass sich der bodenflächenbezogene energetische Wirkungsgrad einer PV-Anlage innerhalb einer Etagenwirtschaft etwa verdoppelt im Vergleich zu einer konventionellen PV-Freiflächenanlage. Der Wärmeentzug durch die Geothermienutzung scheint wenig ökologische Auswirkung zu haben, dies müsste über andere Indikatoren und den dazugehörigen Gewichtungsfaktoren überprüft werden.

Vergleicht man die Resultate der beiden Szenarien, erkennt man, dass die Auswahl des Indikators für die Gewichtung eine wesentliche Rolle spielt. Die zweidimensionale Betrachtung der Bodenfläche alleine ist nicht ausreichend, um ganzheitliche ökologische Zusammenhänge zu erkennen und abzubilden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurde ein neues dreidimensionales Etagenmodell zur Visualisierung und Berechnung des Flächenbedarfs von mehrfach genutzten Energielandschaften vorgestellt. Das Schlüsselement ist die Einführung von Gewichtungsfaktoren mithilfe derer in hoher räumlicher Auflösung ökologische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen energetischen und landwirtschaftlichen Aktivitäten untersucht und Potenziale für Biodiversitätsflächen ermittelt werden können.

Die Ergebnisse zweier Szenarien zeigen, dass die Auswahl des Indikators für die Gewichtung eine wesentliche Rolle spielt. Insbesondere zeigt der Flächenbedarf von PV-Anlagen große Unterschiede im Bereich von 1 % bis über 40 % der Gesamtfläche, je nachdem, welches Gewichtungsmodell der Berechnung zugrunde gelegt wurde. In diesem Zusammenhang besteht Forschungsbedarf über die genauen Licht- und Strahlungsverhältnisse im Schatten der PV-Module im Tages- und Jahresverlauf sowie deren quantitative und qualitative Auswirkungen auf den Boden und die Vegetation.

Insgesamt macht ein dreidimensionales Etagenmodell mit Ebenen- und Schichteneinteilung ökologische Zusammenhänge besser sichtbar und visualisiert Zusatzpotenziale, die bisher zu selten wahrgenommen und vermessen wurden. Eine besondere Stärke dieser „Etagenpotenziale“ ist der Mehrfachertrag und die ausgeprägte Eignung zur Umsetzung in bestehenden urbanen und ruralen Strukturen. Das Etagenmodell ist eine ganzheitliche Methode, die sich als Strategie gegen weitere massenhafte Flächenversiegelung eignet.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in einer systematischen Untersuchung bestehender Energielandschaften nach dem Etagenwirtschaftsansatz und der Untersuchung verschiedenster Umweltindikatoren als Referenz für die Flächeninanspruchnahme. Beispiele sind Verschattungen, Temperaturveränderungen oder Regenwasserverteilung, die je nach Region nach positiven oder negativen Auswirkungen untersucht werden können. Für die Praxis können generische 3D-Etagenwirtschaftstypen entwickelt und bei Potenzialmodellierungen eingesetzt werden.

Literatur

- 3SI (2023) Altbau-Projekt „Two Souls“ Meissnergasse, <https://www.3si.at/de/bautraeger-projekte/1220-wien-meissnergasse-two-souls/> (abgerufen 24.02.2024)
- BFW - Bundesforschungszentrum für Wald (o.J) Waldfunktionen. Wien, Österreich. <http://www.wald-in-oesterreich.at/waldfunktionen-nach-dem-forstgesetz/?context=C%235%23AC%2331> (abgerufen 24.02.2024)
- CIAM - Congrès Internationaux d'Architecture Moderne (1933) La charte d'Athènes (Charta von Athen). [https://de.wikipedia.org/wiki/Charta_von_Athen_\(CIAM\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Charta_von_Athen_(CIAM)) (abgerufen 24.02.2024)
- Deutsches Institut für Normung (2006) DIN EN ISO 14040/14044. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework – Requirements and guidelines.
- Directorate-General for Environment (2023) Proposal for a Directive on Soil Monitoring and Resilience. European Commission, 5 July 2023. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directive-soil-monitoring-and-resilience_en (Abgerufen: 23.01.2024)
- Doucleff, Michaeleen (2012, November 9) Sky-High Vegetables: Vertical Farming Sprouts In Singapore. NPR, Washington, DC, USA. <https://www.npr.org/sections/thesalt/2012/11/06/164428031/sky-high-vegetables-vertical-farming-sprouts-in-singapore> (Abgerufen: 23.01.2024).
- Dumke, Hartmut (2020) Erneuerbare Energien für Regionen. Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen. Wien: TU Wien Academic Press. ISBN: 978-3-85448-040-2. (E-Book: Open Access) <https://www.tuwien.at/academicpress/produkt/erneuerbare-energien-fuer-regionen/#>
- E4.LUCAS (ESTAT) (2022) LUCAS 2022 (Land Use / Cover Area Frame Survey) Technical reference document C3 Classification (Land cover & Land use). Eurostat Technical Documents, 2022. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/205002/13686460/C3-LUCAS-2022.pdf> (Abgerufen: 26.2.2024)
- Ecoinvent (2024) ecoinvent database. Zurich, Switzerland. <https://ecoinvent.org/>
- Eliades, Angelo (2024) Welcome to Deep Green Permaculture! Deep Green Permaculture. Melbourne, Australien. <https://deepgreenpermaculture.com/> (Abgerufen: 26.2.2024).
- EMAS-VO – Europäisches Parlament (2023) Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001, sowie der Beschlüsse der Kommission 2001/681/EG und 2006/193/EG. I.d.F. 21.07.2023.
- European Commission, DG for Environment (o.J.) Environmental Footprint methods. European Union, 1995-2024. https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en (Abgerufen 23.1.2024).
- Europäische Kommission (2023) Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Bodenüberwachung und -resilienz (Bodenüberwachungsgesetz) EN: Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). Brüssel, den 5.7.2023, COM(2023) 416 final, 2023/0232 (COD); COM/2023/416 final.
- European Commission (2024) European Platform on LCA | EPLCA. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>
- Europäisches Parlament (2018) Verordnung (EU) 2018/841 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. (i.d.F. 11.5.2023)

18. Symposium Energieinnovation, 14.-16.02.2024, Graz/Austria

- Eurostat (o.J.) Bodenbedeckungs- und Bodennutzung. Europäische Union, 2024. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas/> (Abgerufen am 26.2.2024)
- Europäische Union (2021) LUCAS — EU land use and cover area survey — 2021 edition. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/4031688/14296414/KS-09-21-309-DE-N.pdf/911a31ed-cbf7-5275-2e2c-1dec68fcbac7?t=1644247145673> (Abgerufen: 23.01.2024)
- Faltis, Cecylia (2008) Einfluss von schwarzen Hagelnetzen auf das Mikroklima in einer Südtiroler Apfelanlage. Diplomarbeit. Universität Wien, 2008. <https://phaidra.univie.ac.at/o:1251864>
- Franz, Manuela; Narodoslawsky, Michael (2020) Carbon Footprint, SPI und Flächenverbrauch von PV-Anlagen und anderen erneuerbaren/fossilen Energieerzeugungssystemen. 16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/Austria. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/77696>
- Goedkoop, Mark; Heijungs, Reinout; Huijbregts, Mark; De Schryver, An; Struijs, Jaap; van Zelm, Rosalie (2009) ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method, which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report I: Characterisation. Ministerie van VROM Rijnstraat 8 | 2515 XP Den Haag, 6 January 2009.
- GTÖ – Geothermie Österreich (o.J.) Oberflächennahe Geothermie in Österreich. Innenhof „Smart Block Geblergasse“ nach Fertigstellung der Erdsondenbohrungen; Foto: Lisi Zeininger. Verein Geothermie Österreich, Wien, Österreich. <https://www.geothermie-oesterreich.at/was-ist-geothermie/oberfl%C3%A4chennahe-geothermie/> (abgerufen 24.02.2024)
- Heinze, Florian (2011) Messung von Direkt- und Diffusstrahlung bei Photovoltaikanlagen. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2011. <https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-45938>
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F. et al. (2017) ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess*, vol. 22, 138-147 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- ÖROK (2023) Flächeninanspruchnahme und Versiegelung in Österreich; Kontextinformationen und Beschreibung der Daten für das Referenzjahr 2022. Österreichische Raumordnungskonferenz, Materialien Heft 12, Dezember 2023. Wien, Österreich. https://www.oerok.gv.at/fileadmin/user_upload/publikationen/Broschueren/OEROK_Flaecheninanspruchnahme_und_Versiegelung_2022.pdf (Abgerufen: 23.01.2024)
- ÖROK (2024) Begriffsbestimmungen zum Monitoring. Österreichische Raumordnungskonferenz, Wien, Österreich. <https://www.oerok.gv.at/raum/daten-und-grundlagen/begriffsbestimmungen> (Abgerufen: 20.03.2024)
- ÖROK – Österreichische Raumordnungskonferenz (o.J.) ÖROK-Monitoring von Flächeninanspruchnahme und Versiegelung. Was ist Flächeninanspruchnahme? Geschäftsstelle der Österreichischen Raumordnungskonferenz, Wien, Österreich. <https://www.oerok.gv.at/monitoring-flaecheninanspruchnahme> (Abgerufen: 23.01.2024)
- Reich, Gerhard; Reppich, Marcus (2018) Nutzung der Solarstrahlung. In: *Regenerative Energietechnik Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung*. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-20608-6_3
- Rudel, Tobias (2017) Studie zum Einsatz von Photovoltaik auf Metrofahrzeugen. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2017. <https://doi.org/10.34726/hss.2017.43568>
- SimaPro (2024) LCA software for informed changemakers. PRé Sustainability B.V., Amersfoort, The Netherlands. <https://simapro.com/> (Abgerufen: 23.01.2024)
- Smil, Vaclav (2016) *Power density*. The MIT Press, Cambridge, MA, ISBN 9780262529730.

- Solargis (2024) Global Horizontal Irradiation - Austria. Erstpublikation: 2020 The World Bank. Solargis s.r.o., Bratislava, Slovakia. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/austria> (Abgerufen: 23.01.2024)
- Sphera (2024) Managed LCA Content (GaBi Databases). Sphera Solutions, Inc., portfolio company of Blackstone, Chicago, USA. <https://sphaera.com/> (Abgerufen: 23.01.2024)
- StMUGV - Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, (Hg.) (2005) Oberflächennahe Geothermie. Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund. Ein Überblick für Bauherren, Planer und Fachhandwerker in Bayern. München, Deutschland.
- UBA – Umweltbundesamt (o.J.a) Definitionen zur Flächeninanspruchnahme. Umweltbundesamt Gmbh, Wien, Österreich. <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/flaecheninanspruchnahme/definition-flaechen> (Abgerufen: 26.02.2024)
- UBA – Umweltbundesamt (o.J.b) Flächeninanspruchnahme, Methodik ab 2022. Umweltbundesamt Gmbh, Wien, Österreich. Im Auftrag der österreichischen Raumordnungskonferenz ÖROK. <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/flaecheninanspruchnahme/datengrundlage> (Abgerufen: 23.01.2024)
- United Nations (2015) Paris Agreement. Adopted on 12 December 2015 at the twenty-first session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change held in Paris from 30 November to 13 December 2015. https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf (EN: S. 27 ff.). (Abgerufen: 23.01.2024)
- Van de Ven, Dirk-Jan; Capellan-Peréz, Iñigo; Arto, Iñaki; Cazcarro, Ignacio; De Castro, Carlos; Patel, Pralit; Gonzalez-Eguino, Mikel (2021) The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Sci Rep* 11, 2907 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>.
- VDI 4640 Blatt 2:2019-06: Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2019.