

## **Ökobilanzierung von Agri-Photovoltaik-Anlagen**

*Modellhafte Analyse der Ökobilanz von Agri-  
Photovoltaik-Anlagen am Beispiel einer Anlage in  
Thüringen*

**Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen  
Grades**

Master of Science (M.Sc.)

**in der Studienfachrichtung Erneuerbare Energien Management  
der Fachhochschule Erfurt**

Vorgelegt bei:

Erstgutachterin: Prof. Dr. sc. agr. habil. Kerstin Wydra  
(Fachhochschule Erfurt)

Zweitgutachter: Prof. Dr. Thorsten Beckers  
(Bauhaus-Universität Weimar)

von: Christin Busch, geb. am 17.04.1993 in Bassum

Matrikel-Nr.: 120047402

Abgabe: 24.12.2021



### **Danksagung**

Hiermit möchte ich mich herzlich bei meiner Betreuerin Prof. Dr. Kerstin Wydra bedanken, die mich während meiner Bearbeitungszeit freundlich unterstützt und mir mit Literaturvorschlägen sowie Hinweisen und Anregungen zum Inhalt und Aufbau meiner Arbeit geholfen hat.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Thorsten Beckers der Bauhaus-Universität Weimar, der sich freundlicherweise bereit erklärt hat, meine Masterarbeit als Co-Gutachter zu bewerten.

Ferner möchte ich meiner Familie und meinen Freund\*innen danken, die mich sowohl während meiner Masterarbeit als auch während meines gesamten Studiums unterstützten.

**Vielen Dank!**

## Zusammenfassung

Der Klimawandel, der Biodiversitätsverlust sowie die steigende Flächeninanspruchnahme stellen drei der größten Herausforderungen Deutschlands dar. Eine mögliche Lösung dieser Herausforderungen ergibt sich durch die Agri-Photovoltaik (APV), bei der die landwirtschaftliche Produktion mit der Installation einer Photovoltaik-Anlage auf der gleichen Fläche kombiniert wird. Hieraus ergeben sich zahlreiche Synergieeffekte: Im Gegensatz zu Freiflächen-PV-Anlagen stehen APV-Systeme nicht in direkter Flächenkonkurrenz zur Landwirtschaft und tragen bei Auswahl geeigneter Feldfrüchte durch verbesserte mikroklimatische Bedingungen und Schutzfunktionen für die Kulturpflanzen zur Anpassung der Landwirtschaft an sich verändernde Klimaverhältnisse bei. Im globalen Maßstab fehlen jedoch noch Aussagen zu den ökobilanzrelevanten Umweltwirkungen dieser APV-Systeme, die sich im Rahmen des Lebensweges von der Herstellung der Anlagenkomponenten bis zum Lebensende ergeben. In dieser Studie wurde deshalb die Ökobilanz einer APV-Anlage in Thüringen analysiert. Hierfür wurden drei Szenarien entwickelt und hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen gemäß des „Product- and Organisation Environmental Footprint“ (PEF) Frameworks verglichen: Ein APV-System mit kombinierter Kartoffel- und Stromproduktion (Szenario 1), ein System mit räumlich getrennter Kartoffel- und PV-Stromproduktion (Szenario 2) sowie ein Kartoffelszenario, bei dem der Strombezug durch den deutschen Strom-Mix abgedeckt wurde (Szenario 3).

In dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass hochaufgeständerte APV-Anlagen ähnliche Ökobilanzen aufweisen wie die einer räumlich getrennt stattfindenden Produktion von Kartoffeln und PV-Strom. Aufgrund höherer Materialverbräuche durch die erhöhte Unterkonstruktion wurden in 15 von 17 Wirkungskategorien die geringsten Umweltwirkungen zwar durch das Szenario 2 verursacht, beide PV-Szenarien erreichten in 12 von 17 Wirkungskategorien jedoch deutlich bessere Ökobilanzen als die Kartoffelproduktion mit Strombezug aus dem deutschen Strom-Mix (Szenario 3). Besonders bei den klimarelevanten Umweltwirkungen konnten bis zu 94 % weniger Emissionen berechnet werden. Hinsichtlich der Umweltwirkung Klimawandel wurden durch das Szenario 1 nur 30 % der CO<sub>2</sub> eq im Vergleich zu den Umweltwirkungen aus Szenario 3 verursacht. Lediglich bei den Feinstaubemissionen, den humantoxischen Umweltwirkungen sowie dem Ressourcenverbrauch von Mineralen und Metallen wurden höhere Umweltwirkungen durch das APV-System gefunden. In der Wirkungskategorie „Land Use“ konnten bei Szenario 1 jedoch die geringsten Umweltwirkungen festgestellt werden. Während die klima- sowie die ressourcenrelevanten Umweltwirkungen vor allem durch die Herstellung der Anlagenkomponenten der PV-Anlage entstehen, ergeben sich

die gesundheits- und ökosystemrelevanten Umweltwirkungen größtenteils durch die landwirtschaftliche Produktion.

Die Umweltwirkungen von APV-Systemen lassen sich demnach mit denen von Freiflächen-PV-Anlagen vergleichen. Im Vergleich mit der alleinigen Kartoffelproduktion entstehen hinsichtlich der Umweltwirkungen deutliche Einsparmöglichkeiten an Emissionen. Die Umweltbilanz von hochaufgeständerten APV-Systemen wird sich jedoch vermutlich aufgrund weiterentwickelter Anlagendesigns sowie der Verwendung anderer Materialien für die Unterkonstruktion zukünftig vermutlich noch stärker verbessern, sodass auch geringere Umweltwirkungen als durch die getrennte Produktion von Feldfrüchten und PV-Strom erreicht werden können, was bei Systemen mit vertikal aufgerichteten Modulen und bei APV-Systemen mit Tierhaltung bereits aufgezeigt werden konnte. Ein Großteil der positiven Effekte von APV-Anlagen ergibt sich zudem auf Projektebene, beispielsweise durch verminderten Wasser- und Flächenverbrauch. APV-Systeme stellen demnach ein geeignetes Instrument zur Lösung der bestehenden Energie- und Flächenprobleme, der mit der konventionellen Energieerzeugung verbundenen Umweltprobleme, insbesondere als Beitrag zum Klimaschutz und zur Unterstützung der Landwirtschaft in der Anpassung an den Klimawandel dar.

## Abstract

Climate Change, the loss of biodiversity and the increasing use of land represent three of the greatest challenges in Germany. One possible solution to these challenges is through agri-photovoltaics (APV), in which agricultural production is combined with the installation of a photovoltaic system on the same area. This results in numerous synergy effects: In contrast to ground-mounted, open space PV systems, APV systems are not in direct competition for areas with agriculture and, when suitable crops are selected, they help to adapt agriculture to changing climatic conditions. On a global scale, however, there are still no statements on the environmental impact of these APV systems relevant to the life cycle assessment. In this study, therefore, the life cycle assessment of an APV plant in Thuringia was analyzed. For this purpose, three scenarios were developed and compared with regard to their environmental impacts according to the "Product and Organization Environmental Footprint" (PEF) framework: An APV system with combined potato and electricity production (scenario 1), a system with spatially separated potato and PV electricity production (scenario 2) and a potato scenario in which the electricity purchase was covered by the German electricity mix (scenario 3).

In this work it could be shown that high-elevation APV systems have similar impacts as the spatially separated production of potatoes and PV electricity. Due to the higher material consumption of the higher mounting structures, the lowest environmental impacts were caused by scenario 2 in 15 of 17 impact categories, but both PV scenarios achieved significantly better ecological balances in 12 of 17 impact categories than potato production with electricity from the German electricity mix (scenario 3). Up to 94 % fewer emissions could be calculated, especially for the climate-relevant environmental impacts. With regard to the environmental impact of Climate Change, scenario 1 caused only 30 % of the CO<sub>2</sub> eq compared to the environmental impacts from scenario 3. The APV system only found higher environmental effects in the case of Particulate Matter emissions, human-toxic environmental effects and the consumption of minerals and metals. In the "Land Use" impact category the lowest environmental impacts were found in scenario 1. While the climate and resource-relevant environmental impacts arise primarily from the manufacture of the system components of the PV system, the health and ecosystem-relevant environmental impacts largely result from the agricultural production.

The environmental effects of APV systems can therefore be compared with those of open-space PV systems. In comparison with the sole production of potatoes, there are significant savings in

emissions with regard to the environmental impact. However, the life cycle relevant environmental impacts of APV systems will probably improve even more in the future due to further developed system designs and the use of other materials for the mounting structure, so that lower environmental impacts can be achieved than through the separate production of crops and PV electricity. This has already been proven for systems with vertically erected modules and with APV systems with animal husbandry. A large part of the positive effects of APV systems also result at the project level, for example through reduced water and land consumption. APV systems therefore represent a suitable instrument for solving the existing energy and space problems, the environmental problems associated with conventional energy generation, in particular as a contribution to climate protection and to support agriculture in adapting to Climate Change.

## Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund .....	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Vorgehensweise .....	5
<b>2 Theoretische Grundlagen: Agri-Photovoltaik (APV)</b> .....	<b>7</b>
2.1 Definition und historische Entwicklung .....	7
2.2 Technische Grundlagen .....	8
2.3 Rechtlicher Rahmen in Deutschland .....	11
2.3.1 Bisherige Regelungen für FF-PV .....	12
2.3.2 Regelungen für APV.....	13
2.4 Anforderungen und Kriterien gemäß DIN SPEC 91434 .....	16
2.5 APV-Systeme .....	17
2.5.1 Kategorie I: Aufständering mit lichter Höhe .....	17
2.5.2 Kategorie II: Bodennahe Aufständering.....	19
2.6 Auswirkungen auf Feldfrüchte und den Vorhabensstandort.....	21
<b>3 Methodische Grundlagen: Die vier Phasen einer Ökobilanzierung</b> .....	<b>25</b>
3.1 Definition der Ökobilanzierung .....	25
3.2 Aufbau einer Ökobilanzierung .....	26
3.2.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens .....	26
3.2.2 Sachbilanz.....	31
3.2.3 Wirkungsabschätzung .....	34
3.2.4 Auswertung und Interpretation .....	37
<b>4 Material und Methoden</b> .....	<b>38</b>
4.1 Zieldefinition der Ökobilanzierung.....	38
4.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens .....	39
4.2.1 Modellierung der Szenarien .....	39
4.2.2 Funktionelle Einheit.....	49
4.2.3 Produktsystem und Systemgrenze.....	50
4.2.4 Methode für die Wirkungsabschätzung.....	53
4.2.5 Datentypen, Datenquellen und Anforderungen an die Datenqualität .....	55
4.2.6 Vergleichbarkeit der Systeme .....	55
4.2.7 Kritische Überprüfung .....	55
4.3 Sachbilanz.....	56
4.3.1 Ökobilanzsoftware und -datenbank.....	56
4.3.2 Sachbilanz Szenario 1 .....	57
4.3.3 Sachbilanz Szenario 2 .....	61
4.3.4 Sachbilanz Szenario 3 .....	63
<b>5 Wirkungsbilanzergebnisse</b> .....	<b>65</b>
5.1 Wirkungsbilanz Szenario 1 .....	65
5.2 Wirkungsbilanz Szenario 2 .....	67

5.3	Wirkungsbilanz Szenario 3 .....	70
5.4	Vergleich der Ergebnisse zwischen den Szenarien.....	72
5.4.1	Klimarelevante Wirkungskategorien.....	72
5.4.2	Gesundheitsrelevante Wirkungskategorien.....	74
5.4.3	Ökosystemrelevante Wirkungskategorien.....	76
5.4.4	Ressourcenrelevante Wirkungskategorien .....	78
<b>6</b>	<b>Auswertung und Interpretation .....</b>	<b>81</b>
6.1	Schlüsselergebnisse und signifikante Parameter .....	81
6.2	Vollständigkeit und Konsistenz .....	83
6.3	Ökobilanzierungen als Umweltanalyseinstrument für APV-Systeme .....	85
<b>7</b>	<b>Ausblick: Potenziale zur Verbesserung der Ökobilanz .....</b>	<b>86</b>
<b>8</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>92</b>
<b>10</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>106</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>107</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausstoß von Treibhausgasen in der deutschen Landwirtschaft nach Kategorien in den Jahren 1990 bis 2018 (in Mio. t CO <sub>2</sub> eq) (Umweltbundesamt 2020, S. 70).....	2
Abbildung 2: Vorgehensweise zur Durchführung einer Ökobilanzierung für eine APV-Anlage in Thüringen .....	6
Abbildung 3: Funktionsweise des Photoeffekts (Watter 2015, S. 18) .....	9
Abbildung 4: Generationen der Solarzellentechnologie (Behrendt et al. 2010, S. 18) .....	10
Abbildung 5: Hochaufgeständerte APV-Systeme (Scharf et al. 2021, S. 17).....	18
Abbildung 6: APV-System mit vertikal angebrachten bifazialen Modulen (Scharf et al. 2021, S. 20).....	20
Abbildung 7: Nachgeführtes APV-System (Scharf et al. 2021, S. 24) .....	21
Abbildung 8: Aufbau einer Ökobilanzierung nach Frischknecht 2020; DIN EN ISO 14044 .....	26
Abbildung 9: Bestandteile der Zielformulierung in Ökobilanzen nach (JRC European Comission 2010, S. 29) .....	27
Abbildung 10: Bestandteile der Festlegung des Untersuchungsrahmens nach JRC European Comission (2010, S. 51) .....	29
Abbildung 11: Beispiel zur Festlegung der funktionellen Einheit nach Hauschild et al. (2018, S. 84).....	29
Abbildung 12: Arbeitsschritte der Sachbilanz gemäß DIN EN ISO 14044 (DIN EN ISO 14044, S. 25).....	32
Abbildung 13: Prinzip der Systemerweiterung nach Frischknecht (2020, S. 63) .....	33
Abbildung 14: Schema und Beispiele zur Durchführung einer Wirkungsabschätzung nach Hauschild und Huijbregts (2015, S. 5) .....	35
Abbildung 15: Schema zur Auswahl der Wirkungsindikatoren gemäß (DIN EN ISO 14044, S. 36).....	36
Abbildung 16: Biomasseerträge der Pflanzenkategorien +, 0 und – in % in Abhängigkeit vom Modulreihenabstand mit Ausrichtungen gen Süden (links) und Südwesten (rechts) (Trommsdorff et al. 2021).....	42
Abbildung 17: Dimensionierung einer Einheit in Anlehnung an die APV-Anlage Heggelbach, o.M. ....	44
Abbildung 18: Cradle-to-Gate-Produktsystem einer APV-Anlage mit Tomatenproduktion (Leon und Ishihara 2018b) .....	50
Abbildung 19: Systemgrenze des Szenarios 1 .....	53
Abbildung 20: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion samt der Systemkomponenten am Gesamtergebnis der Wirkungsbilanzierung je Wirkungskategorie in Szenario 1 .....	66
Abbildung 21: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion samt der Systemkomponenten am Gesamtergebnis der Wirkungsbilanzierung je Wirkungskategorie in Szenario 2 .....	70
Abbildung 22: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion am Gesamtergebnis der Wirkungsbilanzierung je Wirkungskategorie in Szenario 2.....	72

Abbildung 23: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Climate Change .....	73
Abbildung 24: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Ozone Depletion.....	73
Abbildung 25: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Ionising Radiation .....	74
Abbildung 26: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Photochemical Ozone Formation .....	74
Abbildung 27: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Particulate Matter .....	75
Abbildung 28: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Human Toxicity (non-cancer).....	75
Abbildung 29: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Human Toxicity (cancer) .....	76
Abbildung 30: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Acidification ...	76
Abbildung 31: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Eutrophication (freshwater).....	77
Abbildung 32: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Eutrophication (marine).....	77
Abbildung 33: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Eutrophication (terrestrial) .....	78
Abbildung 34: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Ecotoxicity (freshwater) .....	78
Abbildung 35: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Land Use.....	79
Abbildung 36: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Water Use .....	79
Abbildung 37: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Resource Use (fossils) .....	80
Abbildung 38: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Ressource use (minerals and metals).....	80

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungsgrade verschiedener Solarzellenmateriale (Quaschnig 2018, S. 134).....	11
Tabelle 2: Kategorien zur Eignung von Kulturpflanzen für APV-Systeme basierend auf der Schattentoleranz der einzelnen Arten samt Beispiele nach Beck et al. (2012, S. 2).....	22
Tabelle 3: Parameter für die Anlagendimensionierung nach Vollmer (2021) .....	40
Tabelle 4: Zusammenfassung des Anlagendesign der APV-Anlage Heggelbach nach Trommsdorff et al. (2021, S. 9) .....	43
Tabelle 5: PV-spezifische Annahmen in der Nutzungsphase für die Szenarien 1 und 2 .....	45
Tabelle 6: Anlagendimensionierung Szenario 1 .....	46
Tabelle 7: Anlagendimensionierung Szenario 2 .....	48
Tabelle 8: Anlagendimensionierung Szenario 3 .....	48
Tabelle 9: Ausgewählte Wirkungskategorien und -indikatoren nach Fazio et al. (2018, S. 6 f.) .....	54
Tabelle 10: Werte zur Sachbilanzierung von mono c-Si Solarzellen nach Frischknecht et al. (2015) mit Aktualisierungen nach Hengstler et al. (2021) .....	59
Tabelle 11: Sachbilanzdaten des Szenarios 1 .....	60
Tabelle 12: Sachbilanzdaten des Szenarios 2 .....	62
Tabelle 13: Sachbilanzdaten des Szenarios 3 .....	64
Tabelle 14: Wirkungsbilanzergebnisse Szenario 1 je Wirkungskategorie .....	65
Tabelle 15: Wirkungsbilanzergebnisse Szenario 2 je Wirkungskategorie .....	68
Tabelle 16: Wirkungsbilanzergebnisse Szenario 3 je Wirkungskategorie .....	70

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
μ-Si	Mikromorphes Silizium
a	Jahr
Abs.	Absatz
APV, Agri-PV	Agri-Photovoltaik
a-Si	Amorphes Silizium
BauGB	Baugesetzbuch
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
Bundesrat Wi	Bundesrat, Wirtschaftsausschuss
BVerWG	Bundesverfassungsgericht
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzol
Cd	Cadmium
CdTe	Cadmium-Tellurid
CFC-11	Trichlorfluormethan
CIS/CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CTU <sub>e</sub>	Comparative Toxic Units ecotoxicity
CTU <sub>h</sub>	Comparative toxic unit for Human Toxicity impacts
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung
DirektZahlDurchfV	Direktzahlungen-Durchführungsverordnung
dt	Dezitonnen
ebd.	ebenda
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EN	Europäische Norm
eq	Equivalents, Äquivalente
EU	Europäische Union
FF-PV	Freiflächen-Photovoltaik
FH Erfurt	Fachhochschule Erfurt
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
g	Gramm
GW	Gigawatt
GWP	Global Warming Potential, Treibhausgaspotenzial
H <sup>+</sup>	Wasserstoffion
ha	Hektar
IEA	International Energy Agency
IFES	Integrated Food-Energy System
ISO	International Organization for Standardization
kBq	Kilobecquerel
kg	Kilogramm
kVA	Kilovoltampere

kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt peak
LCA	Life Cycle Assessment, Ökobilanzierung
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MJ	Mega-Joules
mm	Milimeter
Mono c-Si	Monokristalline Siliciumzellen
Multi c-Si	Multikristalline Siliciumzellen
MW	Megawatt
N	Stickstoff
NM VOC	Non Methane Volatile Organic Compounds
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
ODP	Ozonabbaupotenzial
P	Phosphor
PEF	Product- and Organisation Environmental Footprint
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
PM	Particulate Matter
PV	Photovoltaik
PVPS	Photovoltaic Power Systems Programme
S.	Seite, Seiten
Sb	Antimon
SG-Si	Solar grade Silicium, Solarsilizium
Si	Silizium
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SPEC	Specification
Stk.	Stück, Stückzahl
SW	Südwest
t	Tonnen
THG	Treibhausgase
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
V	Volt

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Der anthropogen verursachte Klimawandel und die damit verbundene Aufgabe des Klimaschutzes stellen zwei der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. In den Jahren 1960 bis 2019 stiegen die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen von 9,3 Mrd. t auf 36,4 Mrd. t und damit um das 3,9-fache an (Global Carbon Project 2020). Auch wenn sich der Anstieg in den letzten Jahren verringerte, wird erwartet, dass die Menge der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 auf 43,1 Mrd. t steigen wird (eia 2019). Neue Berechnungen, die alle Emissionen als CO<sub>2</sub> eq einschließen, gehen allerdings schon für 2019 von 59 +/- 6,6 Gt CO<sub>2</sub> eq aus (Minx et al. 2021, S. 5240).

Im Rahmen des Pariser Klimaabkommens hat sich Deutschland deshalb zu einer Reduzierung der relevanten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) um 55 % im Vergleich zu den Werten von 1990 bis 2030 verpflichtet und nach dem Urteil des Bundesverfassungsschutzes vom 24. März 2021 diese Grenze auf 65 % angehoben (Bundesregierung 2021). Als langfristiges Ziel wird die Treibhausgasneutralität bis 2045 angestrebt. Einen wichtigen Beitrag soll hierbei die klimafreundliche Erzeugung von erneuerbarem Strom darstellen, dessen Umsetzung unter anderem im Klimaschutzprogramm 2030 festgelegt wurde (BMU 2019, S. 14).

Mit bis zu 5,8 Mrd. t CO<sub>2</sub> eq trug der Landwirtschaftssektor mit etwa 11,9 % zu den globalen THG-Emissionen bei. Rechnet man die damit einhergehenden Landnutzungsänderungen und die Forstwirtschaft mit ein, erhöht sich diese Zahl auf etwa 7,2 Mrd. t (ClimateWatch 2021). In einer neuen Studie werden die gesamten ernährungssystembezogenen CO<sub>2</sub> eq Emissionen mit 49 Mrd. t pro Jahr global auf 33 % der gesamten Emissionen beziffert (Tubiello et al. 2021, S. 10), darunter die landwirtschaftlichen Emissionen (at farm gate) mit 7,1 Mrd. t CO<sub>2</sub> eq (ebd., S. 6). In Deutschland belief sich der Anteil der durch die Landwirtschaft entstandenen THG-Emissionen in 2018 mit 63,6 Mio. t CO<sub>2</sub> eq auf etwa 7,4 % der gesamten THG-Emissionen (Umweltbundesamt 2020, S. 70). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Düngeproduktion sind hier nicht mit einbezogen. Insbesondere durch Landnutzungsänderungen, die Verdauungsprozesse von Weidetieren, Gärreste von Biogasanlagen sowie die Ausbringung von Dünger entstehen sowohl in Deutschland als auch weltweit Methan- und Lachgasemissionen, die im Vergleich zu den in diesem Sektor zu vernachlässigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen einen Großteil der THG-Emissionen ausmachen (Umweltbundesamt 2020; Hoesly et al. 2018; Tubiello et al. 2014). Abbildung 1 zeigt

den Anteil verschiedener Kategorien an den Gesamtemissionen aus der Landwirtschaft der Jahre 1990 bis 2018.

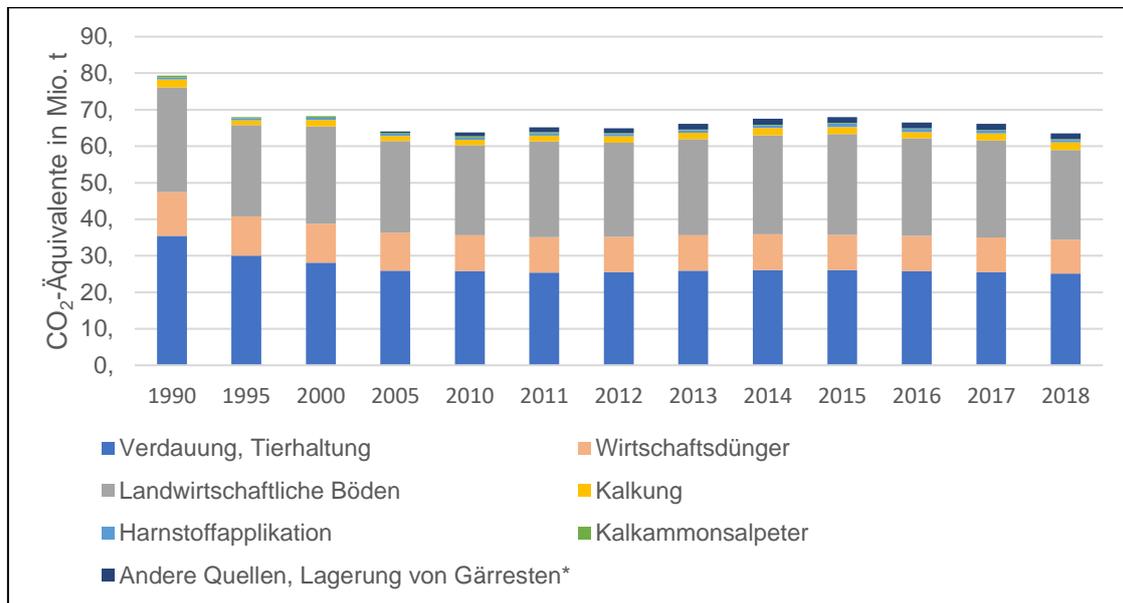


Abbildung 1: Ausstoß von Treibhausgasen in der deutschen Landwirtschaft nach Kategorien in den Jahren 1990 bis 2018 (in Mio. t CO<sub>2</sub> eq) (Umweltbundesamt 2020, S. 70)

Die durch die Landwirtschaft entstehenden Emissionen tragen zum Klimawandel bei, der zu häufigeren und intensiveren Extremwetterereignissen wie bspw. Starkregen oder Hitzeperioden führt (IPCC 2013; Putnam und Broecker 2017; Zhang et al. 2013). Bezüglich der häufiger auftretenden Hitzeperioden konnte nachgewiesen werden, dass die Wahrscheinlichkeit von Extremtemperaturen durch den Klimawandel deutlich ansteigen wird (Sun et al. 2014, S. 1084). Deutschland stellt dabei eines der in Europa am stärksten vom Klimawandel betroffenen Länder dar. Betrachtet man den Climate Risk Index der Jahre 2000 bis 2019, so erreicht Deutschland den 18. Platz der am stärksten von den Folgen des Klimawandels betroffenen Ländern (Eckstein et al. 2021, S. 44). Im Hitzejahr 2018 erreichte Deutschland dabei global sogar den dritten Platz und den sechsten Platz in der Kategorie der monetären Verluste (Eckstein et al. 2019, S. 37). Besonders in den Sommermonaten führten Extremtemperaturen, anhaltende Trockenperioden und der generelle Wechsel der Witterungsbedingungen dazu, dass sich die Bodenwasservorräte in vielen Teilen Deutschlands, darunter im besonderen Maße auch in Thüringen, nach Niederschlägen nicht nachhaltig auffüllen konnten, was zu Trockenheit bis in große Bodentiefen sowie Trockenschäden und damit zu Ernteeinbußen führte (BMEL 2020b, S. 6). Doch auch Extremereignisse wie Stürme, Starkregen oder Hagel werden aufgrund des Klimawandels häufiger, wodurch das Produktionsrisiko für Landwirt\*innen steigt. Im langjährigen Mittel wurden in Deutschland bis 2016 somit Schäden im Wert von 511,02 Mio. Euro erreicht.

Besonders Dürren und Wetterextreme wie starke Hagelfälle sind nur schwer vorhersehbar und können oft nicht durch pflanzenbauliche Maßnahmen abgewendet werden. Im schlimmsten Fall führen sie zu Totalschäden (GDV 2016, S. 25).

Auf diese Weise trägt die Landwirtschaft durch THG-Emissionen nicht nur zum Klimawandel bei, sie wird auch selbst stark vom Klimawandel beeinflusst, da sie von klimatischen Bedingungen abhängt (Agovino et al. 2019; Loladze 2014; Challinor et al. 2014; Mbow et al. 2019; Myers et al. 2014; Schlenker und Lobell 2010). Dies führt zu einem vermehrten Anpassungsbedarf bspw. der Bewässerungsanforderungen (Riediger et al. 2014; Riediger et al. 2016). Langfristig könnte die landwirtschaftliche Produktion somit stark abnehmen, was zu höheren Lebensmittelpreisen führen kann (Calzadilla et al. 2013; Mendelsohn 2014). Vor dem Hintergrund, dass die menschliche Bevölkerung bis 2050 auf rund 9,8 Mrd. Menschen und bis 2100 auf 11,2 Mrd. Menschen anwachsen wird (DESA 2017, S. 2 f.), können die oben beschriebenen Entwicklungen weltweit, aber auch in Deutschland Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit und die Lebensqualität haben (Abiona et al. 2016; Ifeanyi-obi et al. 2016; Arneth et al. 2019; Brandt 2011; Röös et al. 2017). Diese Tatsache wird durch die derzeitige Coronapandemie noch verstärkt (Rasul 2021).

Eine Strategie zur Bewältigung dieser Herausforderungen im Klimaschutz, aber auch der Klimaanpassung ist die Implementierung von Solarenergie durch Photovoltaikanlagen. Im Jahr 2019 betrug die kumulierte installierte Nennleistung von Photovoltaikanlagen weltweit rund 627 GW (REN21 2020, S. 21). Etwa 102.600 MW Leistung wurden neu installiert (SolarPower Europe 2018, S. 5). Insbesondere die Freiflächenphotovoltaikanlagen (FF-PV) dominieren dabei den Solarsektor. Aufgrund sinkender Modulpreise ist hier in den nächsten Jahren mit einer weiteren Zunahme zu rechnen (SolarPower Europe 2020).

Die Einführung von bodenmontierten Freiflächenanlagen führt jedoch zu potenziellen Landnutzungskonflikten. Aufgrund des fortschreitenden Flächenverbrauchs können Konflikte mit der Landwirtschaft und der Stadtentwicklung entstehen (Scharf et al. 2021). Aus diesem Grund ist eine intelligente Lösung erforderlich, die mehrere Nutzungen kombiniert und Synergien zwischen den Bereichen Energie, Landwirtschaft und Landnutzung schaffen kann (Smith et al. 2014). Hierdurch kann den Problemen der Flächenkonkurrenz, des Klimawandels und der sich verschlechternden Ernährungssicherheit entgegengewirkt werden.

Das Konzept der Agri-Photovoltaik (APV) vereint diese Aspekte, indem es die Installation einer PV-Anlage mit einer landwirtschaftlichen Nutzung kombiniert. Dies erhöht nicht nur die Effizienz

der Landnutzung, sondern schafft auch Synergieeffekte, die dazu beitragen können, die Landwirtschaft an den Klimawandel anzupassen. Studien berichten bspw. von einer Verringerung des Bewässerungsbedarfs (Adeh et al. 2019; Elamri et al. 2018) und der Winderosion unter den installierten Modulen (Kostik et al. 2020). Für FF-PV-Anlagen wurde zudem ein positiver Effekt auf die Biodiversität nachgewiesen (bne 2020), der vermutlich auf APV-Systeme übertragen werden kann. Das Konzept wurde bisher jedoch nur in wenigen Ländern erprobt und teilweise, wie in Deutschland, nur zu wissenschaftlichen Untersuchungen umgesetzt (Trommsdorff et al. 2020). Zur Förderung der APV wurde 2021 im Rahmen des Entwurfs zur EEG-Novelle 2021 durch den Bundesrat vorgeschlagen, eigens für die APV Ausschreibungsvolumen festzulegen (Bundesrat Wi et al. 2020). Der Vorschlag wurde durch die Bundesregierung jedoch unter anderem mit der Begründung auf einen späteren Zeitpunkt verschoben, die Folgen durch die APV auf Umwelt und Natur seien noch nicht hinreichend erforscht (Bundesregierung 2020). Tatsächlich wurden besonders im Hinblick auf die Ökobilanz dieser Technologie nur wenige Studien veröffentlicht, die sich entweder auf APV-Systeme mit Nutztierhaltung (Pascaris et al. 2021) oder mit vertikal angebrachten Modulen (Agostini et al. 2021) bezogen. Ökobilanzierungen mit Bezug zu hoch aufgeständerten Systemen, bei denen die Bewirtschaftung direkt unter den Modulen stattfindet, wurden bisher nicht durchgeführt. Diese Forschungslücke soll mit der hier vorliegenden Studie geschlossen werden.

## 1.2 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund war es das Ziel der Arbeit, eine potenziell umsetzbare Agri-Photovoltaikanlage in Thüringen unter den derzeit gültigen Voraussetzungen und Entwicklungen auf ihre Umweltwirkungen hin zu untersuchen und dabei mit bisher konventionell genutzten Systemen zur Produktion von Strom und landwirtschaftlichen Erzeugnissen zu vergleichen. Für diesen Vergleich wurden drei Szenarien entwickelt, die hinsichtlich der beiden Outputs Strom und Kartoffeln in ihren Umweltwirkungen verglichen werden konnten. Dabei stand die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen im Vordergrund:

### **1. Wie muss eine potenzielle APV-Anlage in Thüringen auf dem Grünen Campus der FH Erfurt dimensioniert werden?**

- 1.1. Welche rechtlichen sowie technischen Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Gegebenheiten beeinflussen die Dimensionierung der APV-Anlage?
- 1.2. Welche Feldfrüchte eignen sich für ein APV-System?

2. **Welchen Aufbau hat eine Ökobilanzierung und wie werden die einzelnen Schritte definiert?**
3. **Welche Parameter spielen bei der Ökobilanzierung von APV-Anlagen eine Rolle?**
  - 3.1. Wie werden klassische Photovoltaikanlagen ökobilanziert?
  - 3.2. Wie werden klassische landwirtschaftliche Produkte ökobilanziert?
  - 3.3. Wie müssen die einzelnen Systemkomponenten angelegt werden, um eine vergleichende Ökobilanzierung zu ermöglichen?
  - 3.4. Welche Anlagenkomponenten, Parameter und welche Lebensabschnitte sind zur Ökobilanzierung von APV-Anlagen wichtig?
  - 3.5. Inwieweit lässt sich die Ökobilanzierung klassischer PV- und Landwirtschaftssysteme auf ein APV-System übertragen, wo müssen Daten angepasst werden?
  - 3.6. Welche Daten zur Ökobilanzierung eines APV-Systems sind verfügbar, wo müssen Annahmen getroffen werden?
4. **Welche ökobilanzrelevanten Umweltwirkungen ergeben sich durch ein APV-System in Thüringen?**
  - 4.1. Welche Wirkungskategorien spielen bei der Ökobilanzierung eines APV-Systems eine Rolle?
  - 4.2. Welchen Anteil machen Strom- und Kartoffelproduktion an den gesamten Umweltwirkungen aus?
  - 4.3. Welche Umweltwirkungen ergeben sich durch ein APV-System im Vergleich zu Systemen mit konventionell getrennt stattfindender Produktion von Strom und landwirtschaftlicher Erzeugnisse?

### 1.3 Vorgehensweise

Für die Bearbeitung der zuvor genannten Forschungsfragen fand eine prozesshafte Bearbeitung auf Basis mehrerer Schritte statt, die in Abbildung 2 abgebildet ist. Im **ersten Schritt** fand eine Recherche zur den rechtlichen und technischen Voraussetzungen zur APV statt. Gleichzeitig wurden in **Schritt 2** Informationen zur allgemeinen Durchführung einer Ökobilanzierung recherchiert. Die hierdurch erfassten Rahmenbedingungen ermöglichten die Dimensionierung einer APV-Anlage auf Basis einer bereits bestehenden, groben Planung für eine APV-Anlage in Thüringen sowie einer bereits umgesetzten Anlage in Baden-Württemberg. Im Rahmen dieser Dimensionierung wurden Höhe, Breite, Länge, Modultechnologie sowie die geplanten anzubauenden Feldfrüchte festgelegt. Durch die Informationen aus der Literaturrecherche aus dem zweiten Schritt wurden die Angaben zur Anlagendimensionierung durch Herausarbeitung

wichtiger Parameter und Lebensabschnitte für die Ökobilanzierung vervollständigt. Um eine Vergleichbarkeit zu erzeugen, wurden in **Schritt 3** drei Szenarien entwickelt, anhand derer der Vergleich von ökobilanzrelevanten Umweltwirkungen eines APV-Systems mit konventionell getrennt stattfindender Produktion von Strom und landwirtschaftlichen Erzeugnissen ermöglicht wurde. Für die drei Szenarien wurden wichtige methodische Festlegungen getroffen und die notwendigen Sachbilanzdaten zur Vorbereitung für die Ökobilanzierung zusammengetragen (**Schritt 4**). Nicht vorhandene Informationen und Daten wurden durch Annahmen aus der Literatur ergänzt. Die Ökobilanzierung wurde in **Schritt 5** mithilfe der Ökobilanzierungssoftware SimaPro und der Ökobilanzdatenbank Ecoinvent durchgeführt. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung wurden für jedes Szenario dargestellt und anschließend verglichen (**Schritt 6**). Im letzten Schritt (**Schritt 7**) wurden die Ergebnisse interpretiert sowie diskutiert.

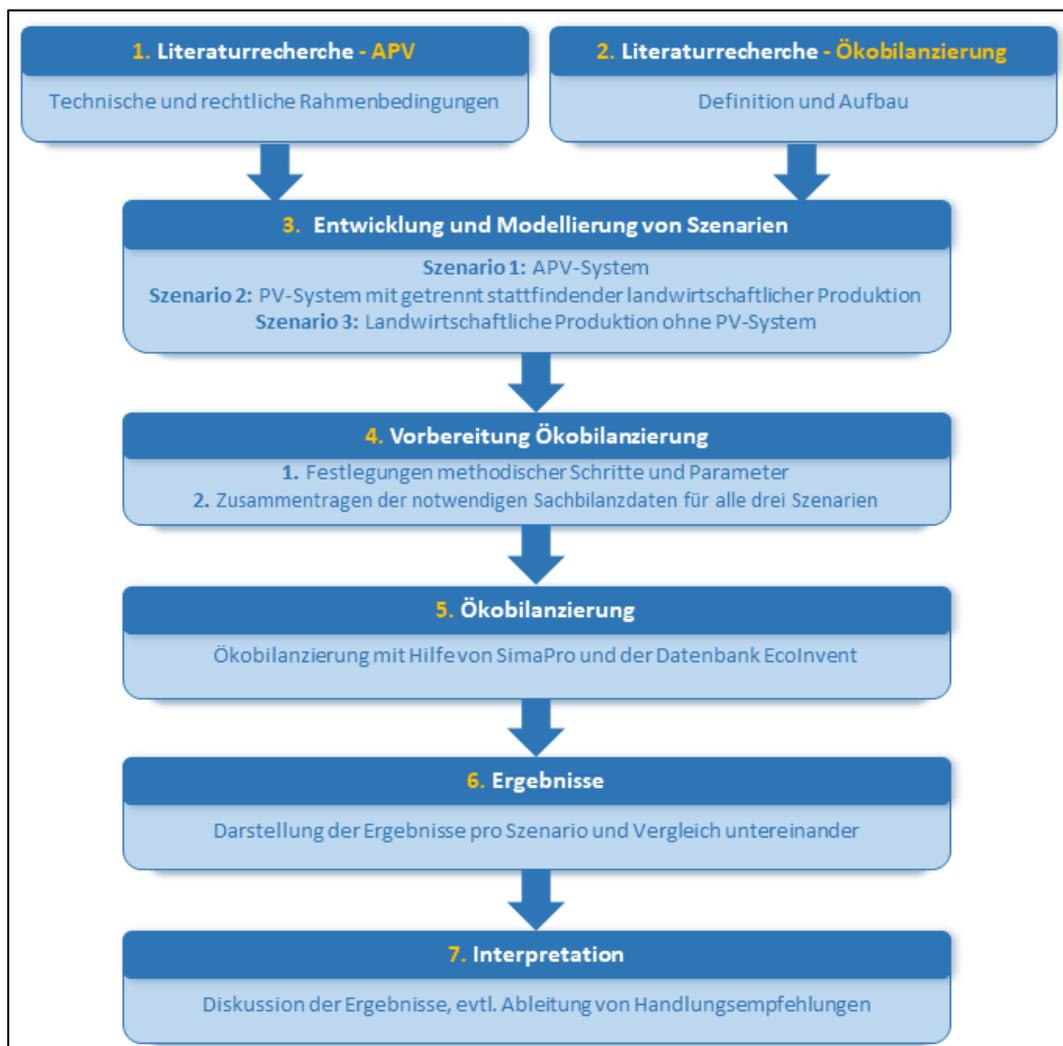


Abbildung 2: Vorgehensweise zur Durchführung einer Ökobilanzierung für eine APV-Anlage in Thüringen

## 2 Theoretische Grundlagen: Agri-Photovoltaik (APV)

### 2.1 Definition und historische Entwicklung

Das Konzept der APV beschreibt die Nutzung einer Fläche mit einer Kombination aus zwei Systemen, einer landwirtschaftlichen Hauptnutzung sowie der Erzeugung von Solarstrom durch PV-Module. Die APV wird als „Integrated Food-Energy System“ (IFES; Deutsch: Integriertes Lebensmittel-Energie-System) bezeichnet, welches die gleichzeitige Produktion von Nahrungsmitteln und Energie auf einer Fläche ermöglicht und somit Synergieeffekte beider Produktionssysteme ausschöpft (Bogdanski et al. 2010, S. 9). Mit Hinblick auf die in Kapitel 1 dargestellten Herausforderungen der zunehmenden Flächenkonkurrenz zwischen Landwirtschaft, Siedlungs- und Straßenbau sowie der Energiewende werden solche Doppelnutzungen zunehmend wichtiger. Bis zum Jahr 2100 wird sich die für die Landwirtschaft nutzbare Fläche global voraussichtlich um 50.000 ha auf 650.000 ha verringern (Schindele et al. 2020, S. 2). Die APV ermöglicht die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen, ohne in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion auf fruchtbaren Böden zu stehen (Trommsdorff et al. 2020, S. 4 ff.).

Erstmalig beschrieben wurde das Konzept im Jahr 1981 durch Goetzberger und Zastrow, die der damaligen Sichtweise entgegenwirken wollten, eine Flächennutzung mit Solaranlagen schließe jede andere Nutzung aus und würde zu einer großflächigen Landschaftszerstörung führen. Sie berechneten den Anteil diffuser und direkter Sonneneinstrahlung, welcher den Boden unter zwei verschiedenen Kollektorkonfigurationen mit Kollektorhöhen von 2 m in Abständen von 3 bzw. 4 m erreicht und damit für das Pflanzenwachstum nutzbar bleibt. Zentrales Ergebnis war, dass bei einer geografischen Breite von 48° etwa 2/3 der Strahlung für die landwirtschaftliche Nutzung verwendbar bleiben (Goetzberger und Zastrow 1981, S. 21).

Obwohl die APV bereits in den 1980ern untersucht wurde, wurde eines der ersten, detaillierten Experimente erst 2013 in Montpellier in Frankreich durchgeführt. Im Gegensatz zu den Annahmen nach Goetzberger und Zastrow (1981), die den Raum zwischen den PV-Reihen für den Anbau nutzten, wurde in dem französischen Projekt ein Aufbau untersucht, bei dem der Raum unter den PV-Modulen für die Landwirtschaft genutzt werden kann. Dieses System bestand aus auf Stelzen montierten PV-Modulen mit einer Breite von 0,8 m, die in einer Höhe von 4 m montiert und in einem Winkel von 25° geneigt waren. Drei verschiedene Feldfrüchte wurden in verschiedenen Anbauzeiträumen getestet: Kopfsalat, Gurken und Hartweizen (Marrou et al. 2013a; Marrou et al. 2013b).

Ein deutscher Name für das System der Doppelnutzung wurde 2011 durch das Fraunhofer ISE in Stuttgart entwickelt. Er setzt sich aus den Bestandteilen „Agrós“, Griechisch für „Acker“ oder „Feld“, „phos“, Griechisch für „Licht“ sowie der Einheit Volt zusammen und wurde in Anlehnung an den Begriff Agroforst, der Doppelnutzung von Forst- und Landwirtschaft, gebildet. Vor dem Hintergrund der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie der Vermarktung der entstehenden Produkte stand der zunächst gewählte Name „Agrophotovoltaik“ jedoch in der Kritik, da eine Assoziation mit dem Begriff „aggro“, abgeleitet von „aggressiv“, nicht ausgeschlossen und der Name demnach negativ betrachtet werden könnte (Lichner 2017). Trotz bisher langjähriger Nutzung des Begriffs „Agrophotovoltaik“ in verschiedenen Forschungsprojekten beschloss das Fraunhofer ISE in Abstimmung mit 31 Expert\*innen aus Landwirtschaft, Wissenschaft und Politik 2020 im Sinne einer einheitlichen Namensgebung und in Anlehnung an den englischen Begriff „agrivoltaics“, zukünftig den Namen „Agri-Photovoltaik“ zu nutzen (Fraunhofer ISE 2020). Aufgrund der Bedeutsamkeit des Fraunhofer ISE hinsichtlich der Forschung in diesem Bereich, wird in dieser Arbeit ebenfalls der Begriff „Agri-Photovoltaik“ (APV) genutzt.

Unter dem Begriff wurden zunächst auch solche Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) miteinbezogen, die an Gebäuden zur landwirtschaftlichen Produktion und Gewächshäusern installiert wurden, sowie solche, die eine Beweidung unter den Solarmodulen ermöglichten (Scharf et al. 2021). Im Mai 2021 fand eine einheitliche Definition durch die DIN SPEC 291434 statt, in der der Begriff „Agri-Photovoltaik“, einschl. der Abkürzungen „Agri-PV“ und „APV“ als „[...] kombinierte Nutzung ein und derselben Landfläche für landwirtschaftliche Produktion als Hauptnutzung und für Stromproduktion mittels einer PV-Anlage als Sekundärnutzung“ (DIN SPEC 91434) definiert wird. Als landwirtschaftliche Fläche gelten neben Ackerland auch Dauergrünland, Dauerweideland oder Flächen, die mit Dauerkulturen genutzt werden. Gewächshäuser sowie „vertical farming“-Anlagen werden ausdrücklich von dieser Definition ausgeschlossen (ebd.).

## 2.2 Technische Grundlagen

### Photoelektrischer Effekt

Die Stromerzeugung einer APV-Anlage funktioniert auf die gleiche Weise wie bei einer konventionellen Photovoltaik-Freiflächenanlage (FF-PV). Hierbei wird ein Teil des Photonenstroms der Sonne mit Hilfe von halbleitenden Materialien wie Silizium in elektrische Energie umgewandelt. Die Halbleiter werden hierbei durch Fremdatome, die eine abweichende Valenzelektronenzahl aufweisen, dotiert. Das hierdurch entstehende, überschüssige Elektron wird durch Zufuhr thermischer Energie frei beweglich. Zugrunde liegt hierbei der Photoeffekt,

bei dem das freie Elektron durch Einstrahlung der Sonnenenergie aus seinem Valenzband herausgelöst wird. Hierdurch entstehen Elektron-Lochpaare. Bei einem Überschuss mit negativen Elektronen spricht man von einer n-Dotierung, bspw. mit Phosphor, bei einem Mangel an Valenzen spricht man von einer p-Dotierung, bspw. mit Aluminium (Abbildung 3). Schichtet man beide Dotierungen wie in einer Solarzelle aufeinander, so entsteht in dem Grenzbereich eine Verarmung der Löcher und Elektronen des Grundmaterials. Durch das entstandene Konzentrationsgefälle diffundieren die freien Elektronen aus der n-dotierten Schicht in die p-dotierte Schicht. Die Löcher diffundieren in die genau entgegengesetzte Richtung. Anhand dieser Diffusionsbewegungen entsteht eine Raumladungszone, die in einen Gleichgewichtszustand mündet, in dem alle freien Elektronen der n-dotierten Schicht mit Phosphor auf die Löcher der p-dotierten Schicht mit Bor verteilt sind (Watter 2015, S. 15 ff.).

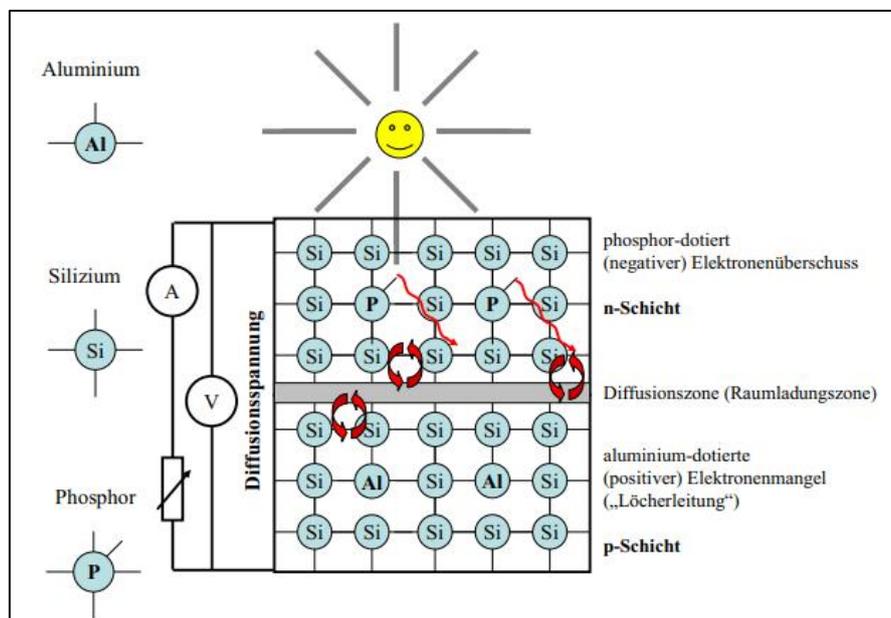


Abbildung 3: Funktionsweise des Photoeffekts (Watter 2015, S. 18)

Bei Bestrahlung des Halbleiters wird ein Teil der Energie durch die freien Valenzen genutzt, um die Elektronen aus dem Valenz- auf das Leitungsband zu heben, wodurch sie frei beweglich werden. Die freigewordenen Elektronen wandern nun in Richtung der n-dotierten Schicht, die freigewordenen Löcher in Richtung der p-dotierten Schicht. Schließt man den Stromkreis durch einen elektrischen Verbraucher, wird die hierbei entstandene Energie nutzbar. Hierbei gilt, dass je mehr Photonen in die Solarzelle eindringen können, desto mehr Elektronen fließen. Die Spannung einer Solarzelle liegt bei etwa 0,5 bis 0,7 V pro Zelle, verringert sich jedoch bei Erwärmung. Um auch kurzwellige Strahlung möglichst optimal ausnutzen zu können, muss die obere Halbleiterschicht möglichst dünn aufgetragen werden (ebd.).

### Wirkungsgrade von Solarzellen

Generell stehen demnach mehrere Materialien zur Herstellung von Solarzellen zur Verfügung. Mit über 90 % Marktanteil stellt Silizium den am häufigsten verwendeten Halbleiter dar (Wirth 2021, S. 100). Die Solarzellentechnologie kann in verschiedene Generationen eingeteilt werden (Abbildung 4). Die erste Generation bilden die kristallinen Solarzellen (c-Si), die in dieser Studie genauer betrachtet werden. Das Zellmaterial kann hierbei in die Typen monokristallines Silizium (mono c-Si) und multikristallines Silizium (multi c-Si) sowie Band-ribbon-Si unterteilt werden (Latnussa et al. 2016, S. 14).

Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Solarzellen ist der Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad einer Solarzelle bestimmt, wie viel der Strahlungsleistung aus der Sonne in elektrische Leistung umgewandelt werden kann und wird mit der folgenden Gleichung beschrieben:

$$\eta = P_{el}/\Phi$$

$\eta$  = Wirkungsgrad

$P_{el}$  = abgegebene elektrische Leistung

$\Phi$  = eintreffende solare Strahlungsleistung

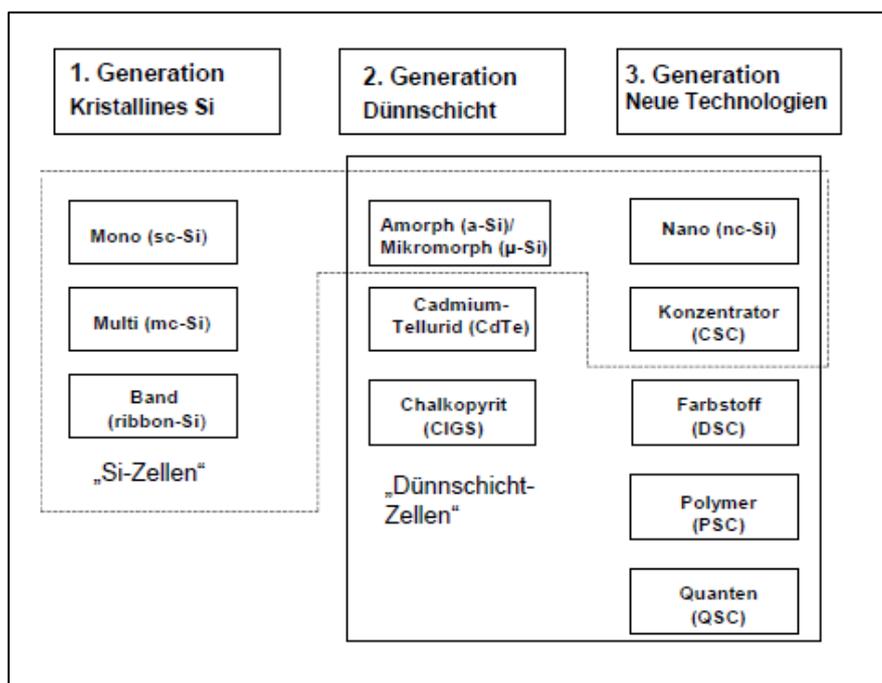


Abbildung 4: Generationen der Solarzellentechnologie (Behrendt et al. 2010, S. 18)

Je nach Material und Qualität der Herstellung der Solarzellen können unterschiedliche Wirkungsgrade erzielt werden. Heute werden Wirkungsgrade von etwa 24 % erreicht

(Quaschnig 2018, S. 133 f.). In Tabelle 1 werden die Wirkungsgrade unterschiedlicher Solarzellen dargestellt. Die Dünnschicht-Solarzellen weisen demnach derzeit in der Regel noch geringere Wirkungsgrade als die kristallinen Solarzellen auf. Tandem-Solarzellen können hingegen Wirkungsgrade von über 30 % erreichen (Jošt et al. 2020).

*Tabelle 1: Wirkungsgrade verschiedener Solarzellenmateriale (Quaschnig 2018, S. 134)*

Zellmaterial	Maximaler Zellwirkungsgrad (Labor)	Maximaler Zellwirkungsgrad (Serie)	Typischer Modulwirkungsgrad	Flächenbedarf pro kW <sub>p</sub>
Monokristallines Silizium	25,8 %	24 %	19 %	5,3 m <sup>2</sup>
Multikristallines Silizium	22,3 %	20 %	17 %	5,9 m <sup>2</sup>
Amorphes Silizium	14,0 %	8 %	6 %	16,7 m <sup>2</sup>
CIS / CIGS	22,6 %	16 %	15 %	6,7 m <sup>2</sup>
CdTe	22,1 %	17 %	16 %	6,3 m <sup>2</sup>

### Performance Ratio

Ein weiterer wichtiger Parameter zur Beurteilung der Effizienz von PV-Systemen ist die Performance Ratio. Sie stellt das Verhältnis eines realen Energieertrages zu einem (idealen) Referenzertrag und damit den energetischen Nutzungsgrad dar (Reise et al. 2012, S. 2). Ähnlich wie der Wirkungsgrad ist auch die Performance Ratio in den letzten Jahren aufgrund technischer Entwicklung stark gestiegen. Sie ergibt sich wie folgt:

$$R_p = Y_f / Y_r$$

R<sub>p</sub> = Performance Ratio

Y<sub>f</sub> = Tatsächlicher Energieertrag

Y<sub>r</sub> = Referenzenergieertrag

### 2.3 Rechtlicher Rahmen in Deutschland

Aufgrund der derzeit in Deutschland relativ neuen rechtlichen Lage, die sich für die APV ergibt, soll nachfolgend die Entwicklung sowie der Hintergrund im Sinne der rechtlichen Lage von klassischen Freiflächen-Anlagen und dementsprechend die daraus entstehenden Konsequenzen

für die APV aufgezeigt werden, da es bis zur EEG-Novelle 2021 keine gesonderte Flächenkulisse für APV-Anlagen gab.

### 2.3.1 Bisherige Regelungen für FF-PV

Eine Freiflächenanlage ist laut § 3 Nr. 22 EEG 2017 „[...] jede Solaranlage, die nicht auf, an oder in einem Gebäude oder einer sonstigen baulichen Anlage angebracht ist, die vorrangig zu anderen Zwecken als der Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie errichtet worden ist“. FF-PV-Anlagen fallen somit unter das Baurecht und erfordern aus bauplanerischer Sicht einen Bebauungsplan der jeweiligen Gemeinde, welcher durch den Vorhabensträger beantragt werden muss. Im Gegensatz zu anderen Anlagen der erneuerbaren Energien wie bspw. der Windenergie werden FF-PV-Anlagen im Außenbereich gemäß § 35 Abs. 1 BauGB nicht als privilegiert betrachtet und können demnach öffentlichen Belangen entgegenstehen. Um ökologisch und landwirtschaftliche Flächen nicht zu beeinträchtigen kann hierfür nach § 12 BauGB ein vorhabensbezogener Bebauungsplan beschlossen werden (Kelm et al. 2019, S. 134; BMJV 2017).

Das EEG 2017 setzte für die Errichtung von FF-PV-Anlagen spezifische Ausbaurkorridore und damit eine bestimmte Flächenkulisse fest. Seit 2010 wurden Acker- und Grünlandflächen aus der förderfähigen Flächenkulisse ausgenommen und können seither nur noch in einem Korridor von 110 m entlang von Bundesautobahnen und Schienenwegen sowie auf versiegelten Flächen oder Konversionsflächen aus wirtschaftlicher, verkehrlicher, wohnungsbaulicher oder militärischer Nutzung errichtet werden (Wirth 2021, S. 40). Der Ausbaurkorridor wurde gemäß § 37 Abs. 1 Nr. 2 EEG 2021 von 110 m auf 200 m erweitert (BMJV 2014a).

Mit dem EEG 2017 wurde zudem ein wettbewerbliches Ausschreibungssystem eingeführt, bei dem die Anlagen in drei Kategorien eingeteilt werden. Diese Kategorien beziehen sich auf die Größen der Anlagen. Anlagen mit bis zu 100 kW erhalten festgesetzte Einspeisetarife. Für Anlagen von 100 kW bis 750 kW gilt die Verpflichtung der Direktvermarktung. Anlagen über 750 kW müssen an Ausschreibungsverfahren teilnehmen.. Für alle drei Kategorien gilt die zuvor genannte Flächenkulisse. Seit dem EEG 2017 gibt es jedoch eine Öffnungsklausel, die die zuvor erwähnte Flächenkulisse erweitert. Sie regelt, dass die Landesregierungen Rechtsverordnungen erlassen können, und dass die Errichtung einer förderfähigen FF-PV-Anlage auch auf Flächen genehmigt werden kann, die als Ackerland oder Grünland in einem landwirtschaftlich benachteiligten Gebiet liegen. Die Öffnungsklausel der Länder gilt jedoch nur für Anlagen, die größer als 750 kW sind. Sie wurde bisher in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg,

Hessen, Saarland und Rheinland-Pfalz umgesetzt. Durch die bis 2012 teilweise sehr großflächigen Anlagen wurde ab dem EEG 2012 zudem eine Begrenzung von Freiflächenanlagen auf 10 MW festgesetzt. Für größere Anlagen kann keine Förderung beansprucht werden (Energieagentur Rheinland-Pfalz 2021).

Der Strom aus Anlagen, die 100 kW überschreiten, muss durch den Anlagenbetreiber an einer Strombörse oder an einen Dritten vermarktet werden. Die Erlöse, die sich hierdurch ergeben sind jedoch oft geringer als die gesetzlich oder wettbewerblich angelegten Werte. Um diese Differenz auszugleichen wurde die sogenannte Marktprämie eingeführt, die dem Anlagenbetreiber durch den Netzbetreiber ausgezahlt wird. Der anzulegende Wert richtet sich dabei nach der Größe der Anlage. Bei Anlagen bis 750 kWp wird der anzulegende Wert gesetzlich nach § 48 EEG bestimmt. Von dem anzulegenden Wert wird die in § 49 EEG genannte Degression abgezogen. Die Förderdauer für den anzulegenden Wert beträgt ebenfalls 20 Jahre (Energieagentur Rheinland-Pfalz 2017). Anlagen über 750 kWp nehmen am Ausschreibungsverfahren teil. Der anzulegende Wert wird hier über den Wettbewerb festgesetzt. Die Betreiber geben einen Gebotswert in Cent pro kWh ab, der schließlich ihrem anzulegenden Wert entspricht und an den der Bieter nach dem Gebotstermin gebunden ist. Durch diesen Wert wird bei Zuschlag die Marktprämie bestimmt. Die niedrigsten Gebotswerte erhalten den Zuschlag. Anschließend werden die Gebote der Größe nach sortiert, bis die ausgeschriebene Menge erreicht wurde (Busse et al. 2016).

### 2.3.2 Regelungen für APV

Um die APV voranzutreiben und damit dem Ziel näherzukommen, den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2025 auf 40 bis 45 % und bis zum Jahr 2050 auf mindestens 80 % auszuweiten, forderte der Bundesrat in seiner Ausschussempfehlung zum Entwurf der EEG-Novelle 2021, eigens für das sogenannte vierte Segment Ausschreibungsvolumen festzulegen. Das vierte Segment beinhaltet Solaranlagen, die zum Zeitpunkt des Beschlusses der Aufstellung eines Bebauungsplans als Ackerland genutzt werden. Für die Jahre 2021 und 2022 wurden 50 MW zu installierender Leistung gefordert, in den Jahren 2023 und 2024 150 MW und im Jahr 2025 500 MW. Die Höchstwerte für Solaranlagen des vierten Segments sollten zudem 8,0 Cent/kWh betragen. Als Begründung wurde die hierdurch entstehende Reduzierung der Flächenkonkurrenz und die damit einhergehende Akzeptanzsteigerung in der Bevölkerung angegeben (Bundesrat Wi et al. 2020). In einer Gegenäußerung der Bundesregierung zur Stellungnahme des Bundesrates wurden die zuvor beschriebenen Vorschläge zur Kenntnis genommen. Trotz der Ansicht, die Nutzung von

Agrarflächen durch APV-Anlagen sei ein vielversprechender Ansatz, wurden weitere Überlegungen mit Hinblick auf nicht ausreichend vorliegende Studien zu Flächenpotenzialen sowie den Folgen für den Naturschutz auf einen späteren Zeitpunkt verschoben (Bundesregierung 2021, S. 86 ff.).

Die ab dem 01.01.2021 geltende EEG-Novelle 2021 übernahm letztendlich gemäß § 28c jedoch eigene Ausschreibungsvolumen und -termine für sogenannte innovative Anlagenkonzepte. Für das Jahr 2022 wurde ein Ausschreibungsvolumen von 600 MW zu installierender Leistung festgelegt, wovon 150 MW für die sogenannten „besonderen Solaranlagen“ ausgeschrieben wurden. Hierzu zählen neben den APV-Anlagen auch Solaranlagen, die auf einem Gewässer („Floating-PV“) oder zur Überdachung von Parkplätzen („Carport-PV“) errichtet werden. Dieses Ausschreibungsvolumen wurde jedoch vorläufig nur für das Jahr 2022 festgelegt, die Ausschreibungsvolumen der nachfolgenden Jahre enthalten hierzu keine Angaben (Bundesrat 2020). Eine Förderung außerhalb des Jahres 2022 ist bisher nicht möglich oder vorgesehen. Demnach ist eine Förderung von APV-Anlagen nur unter den in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Bedingungen für klassische FF-PV-Anlagen möglich. Als Anlagen zur Erzeugung von Strom besteht dennoch der Anspruch auf vorrangigen Anschluss gemäß § 8 Abs. 1 EEG. Die Netzbaukosten werden vom Netzbetreiber übernommen, die Netzanschlusskosten vom Anlagenbetreiber. Des Weiteren besteht gemäß § 11 Abs. 1 EEG der Anspruch, den Strom, der durch eine APV-Anlage entsteht, vorrangig abzunehmen.

Die Einstufung der FF-PV-Systeme als versiegelte Flächen und damit als bauliche Anlage führt dazu, dass APV-Systeme derzeit nur mit Sondergenehmigungen errichtet werden können. Die EU Direktzahlungen der Agrarpolitik gelten bisher für Flächen, die primär landwirtschaftlich genutzt werden. Die zuvor erwähnte Einstufung der konventionellen FF-PV-Anlagen als versiegelte Fläche widersprechen diesem Grundsatz. APV-Anlagen haben daher bisher generell in Deutschland keine Agrarsubvention erhalten. Ein neues, rechtskräftiges Gerichtsurteil bestätigt allerdings, dass die Fläche weiterhin als landwirtschaftliche Fläche anerkannt wird und Agrarsubventionen erhalten kann (vbvh 2021). In diesem Zusammenhang ergaben sich zuvor schon zwei Gerichtsurteile, die eventuell entscheidend für die Einstufung der APV-Nutzung waren. So wurde 2019 einem Landwirt durch das Bundesverwaltungsgericht die Subventionierung auch bei gleichzeitiger Nutzung seines Feldes als Maislabyrinth zugesprochen, da der Zahlungsanspruch davon abhinge, ob die Fläche primär für landwirtschaftliche Tätigkeiten genutzt werde. Im Falle des Maislabyrinths ergab die Doppelnutzung keine erhebliche Einschränkung. Lediglich die Wege, die für Freizeit Zwecke genutzt wurden, seien von

der Förderung ausgenommen (BVerWG 2019). Gemäß § 12 Abs. 1 der Direktzahlungen-Durchführungsverordnung (DirektZahlDurchfV) ist die hauptsächliche Nutzung als landwirtschaftliche Tätigkeit dann gegeben, wenn diese ohne starke Einschränkungen ausgeübt werden kann.

Eine starke Einschränkung der landwirtschaftlichen Nutzung erfolgt gemäß § 12 Abs. 2 DirektZahlDurchfV dann, wenn es zu einer Zerstörung oder wesentlichen Beeinträchtigung der Kulturpflanzen kommt, wenn die Fläche innerhalb der Vegetationsperiode an mehr als 14 aufeinanderfolgenden Tagen oder an insgesamt 21 Tagen im Jahr für nichtlandwirtschaftliche Zwecke genutzt wird, die eine gleichzeitige landwirtschaftliche Tätigkeit verhindert oder erheblich beeinträchtigt oder die nichtlandwirtschaftliche Tätigkeit die üblichen Produktionsverfahren nicht zulässt. Die hier beschriebenen Absätze des § 12 DirektZahlDurchfV könnten einen Zahlungsanspruch für Flächen, auf denen ein APV-System installiert wurde, demnach ermöglichen. In § 12 Abs. 3 Nr. 6 werden jedoch explizit Flächen von dieser Regelung ausgenommen, auf denen sich Anlagen zur Stromproduktion durch solare Strahlungsenergie befinden (BMJV 2014b). Der Paragraph bezog sich bisher jedoch auf konventionelle FF-PV-Anlagen. Da APV-Systeme explizit auf die landwirtschaftliche Weiternutzung einer Fläche ausgelegt sind und sie damit nicht erheblich beeinträchtigen, ist die landwirtschaftliche Primärnutzung gemäß § 12 Abs. 1 DirektZahlDurchfV gegeben (Scharf et al. 2021, S. 54).

Dementsprechend ergab sich ein Urteil vom 15.11.2015, in welchem das Verwaltungsgericht Regensburg einem Landwirt den Zahlungsanspruch für eine Fläche bewährte, auf der der Betreiber neben der Hauptnutzung durch eine Beweidung mit Schafen auch eine Solaranlage aus in gereihter Aufständerung einachsige Solarmodule installierte. Aufgrund der fehlenden Einschränkung, bzw. der Nutzung der Solarmodule als Unterstand und Witterungsschutz für die Tiere, wurde dem Landwirt der Zahlungsanspruch weiterhin gewährt (Bayerische Staatskanzlei 2018).

Für den Zahlungsanspruch spielt demnach das Anlagendesign eines APV-Systems eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund wurden in der DIN SPEC 91434 Anforderungen an das Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzbarkeit definiert, die die primäre landwirtschaftliche Nutzbarkeit und die damit einhergehenden technischen und planerischen Ansprüche beschreiben.

## 2.4 Anforderungen und Kriterien gemäß DIN SPEC 91434

Die im Mai 2021 in Kraft getretene DIN SPEC 91434 dient dem Zweck, allgemeine Anforderungen an APV-Systeme zu definieren. Sie bildet eine Grundlage für die Planung sowie den Betrieb und legt Messkennzahlen für Prüfverfahren fest. Nachfolgend soll ein Überblick über die in der DIN SPEC 91434 definierten Anforderungen erfolgen, da diese Auswirkung auf die Dimensionierung und damit auch auf die Ergebnisse einer Ökobilanzierung von APV-Anlagen haben.

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ist das ausschlaggebende Hauptkriterium für eine zukünftig mögliche Förderung von APV-Systemen die landwirtschaftliche Hauptnutzung. Demnach werden in der DIN SPEC 91434 Kriterien definiert, die diese Hauptnutzung gewährleisten. Hierfür muss durch den/die Landnutzer\*in sowie durch die zuständige Person für die PV-Anlage ein gemeinsames Nutzungskonzept vorgelegt werden, aus dem die Art der Nutzung für drei Jahre bzw. für einen Fruchtfolgezyklus hervorgehen muss. Dementsprechend muss die Dimensionierung der Anlage so erfolgen, dass die Abstände der PV-Module die bisherige Nutzung nicht behindert und die Bearbeitung mit landwirtschaftlichen Geräten weiterhin sichergestellt wird. Dies gilt auch für die Nutzung nach Abbau der Anlage. Darauf aufbauend darf der Flächenverlust, der sich durch die PV-Anlage samt Unterkonstruktion ergibt, höchstens 10 bis 15 % der gesamten Fläche betragen. Erfolgt die Bewirtschaftung unterhalb der PV-Module, sollte die Anlage eine lichte Höhe von mindestens 2,1 m aufweisen. Die Dimensionierung der Anlage und die damit einhergehenden Abstände zwischen den Modulreihen sollte so bemessen sein, dass sowohl die Licht- als auch die Wasserverfügbarkeit an die gute landwirtschaftliche Praxis und damit an die jeweiligen Wachstumsbedingungen der angebauten Pflanzen angepasst sind. Hierbei müssen die homogene Verteilung der Lichtverfügbarkeit als auch des Niederschlagswassers sowie mögliche Randeffekte geprüft werden. Mit einbezogen werden können technische Einrichtungen, bspw. zur ausreichenden Bewässerung der gesamten Fläche, sowie kulturbezogene Einzelfallbetrachtungen hinsichtlich der klimatischen Bedingungen am Anlagenstandort. Des Weiteren wird festgelegt, dass Bodenerosion sowie einer Verschlämmung des Oberbodens durch Einrichtungen zum Auffangen oder zur Verteilung von Regenwasser entgegengewirkt werden muss. Hierdurch kann zudem die Eiszapfenbildung im Winter verhindert werden. Wichtig ist zudem die Auslegung der Tragwerke gemäß dem Sicherheitskonzept des Eurocodes. Einer Beschädigung der Tragwerke sollte durch die Anbringung eines Rammschutzes entgegengewirkt werden. Die regelmäßige Wartung sollte in einem Betriebshandbuch festgelegt werden. Zudem sollte die Anlage zur Verminderung von Ertragsverlusten regelmäßig gesäubert werden (DIN SPEC 91434).

Eine weitere auf die landwirtschaftliche Hauptnutzung abzielende Anforderung betrifft die Landnutzungseffizienz. Der Ertrag nach dem Bau der PV-Anlage muss mindestens 66 % des Referenzbetrages betragen. Dieser lässt sich aus dem Mittelwert des Ertrages der letzten drei Jahre, bzw. der letzten drei Fruchtfolgezyklen berechnen, wenn bereits Kulturen auf der Projektfläche angebaut wurden. Wurden bisher noch keine Kulturen angebaut, ergibt sich der Referenzbetrag aus Statistiken zu den Erträgen der letzten drei Jahre. Die Ertragsreduktion darf demnach ein Drittel des Referenzertrages betragen und errechnet sich aus dem Flächenverlust der Baukonstruktion und dem Ertragsverlust. Letzterer ergibt sich durch Beschattungseffekte sowie die Veränderung der Wasserverteilung und des Mikroklimas. Anforderungen an die Modultechnologie, die Bauformen und -techniken der Aufständerungen sowie die jeweiligen Werkstoffe werden nicht getroffen, solange die zuvor beschriebenen Anforderungen eingehalten werden (ebd.).

## 2.5 APV-Systeme

Die simultane Nutzung einer Fläche für Landwirtschaft und PV kann durch verschiedene Systemmodelle erreicht werden, bei denen die PV-Module in unterschiedlicher Weise über bzw. an den landwirtschaftlich genutzten Bereichen angebracht werden. Die DIN SPEC 91434 unterteilt APV-Systeme nach der Höhe der Aufständerung in zwei Kategorien. Die Kategorie I beinhaltet APV-Anlagen mit einer Aufständerung mit lichter Höhe, die Kategorie II hingegen APV-Anlagen mit bodennaher Aufständerung. Aus der Höhe ergibt sich die Bewirtschaftungsweise. Während bei Anlagen der Kategorie I die Bewirtschaftung unter den PV-Modulen stattfindet, erfolgt die Bewirtschaftung bei Anlagen der Kategorie II zwischen den PV-Modulen.

### 2.5.1 Kategorie I: Aufständerung mit lichter Höhe

#### **Hochaufgeständerte Anlagen**

Erfolgt die Bewirtschaftung unterhalb der PV-Module, ist gemäß DIN SPEC 91434 eine lichte Höhe von mindestens 2,1 m zu gewährleisten. Bei den hochaufgeständerten Anlagen werden die PV-Module oberhalb der landwirtschaftlichen Nutzung angebracht. Hierfür schreibt die DIN SPEC 01434 eine lichte Höhe von mindestens 2,1 m vor. Grundsätzlich bestehen keine Festlegungen für die Position oder den Winkel der Module. Die Abstände der Unterbau- und Trägerkonstruktion können frei gewählt werden und richten sich nach der jeweiligen Bewirtschaftungsweise, bzw. nach den für die landwirtschaftliche Nutzung notwendigen Maschinen. Wie bei allen anderen Systemen steht hier eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Bewirtschaftungsweise im Vordergrund (Scharf et al. 2021, S. 64 f.). In den Bereichen der

Trägerkonstruktion ist die Fläche nicht oder nur sehr eingeschränkt nutzbar (DIN SPEC 91434). Abbildung 5 zeigt ein hochaufgeständertes APV-System aus der Front- sowie aus der Seitenansicht.

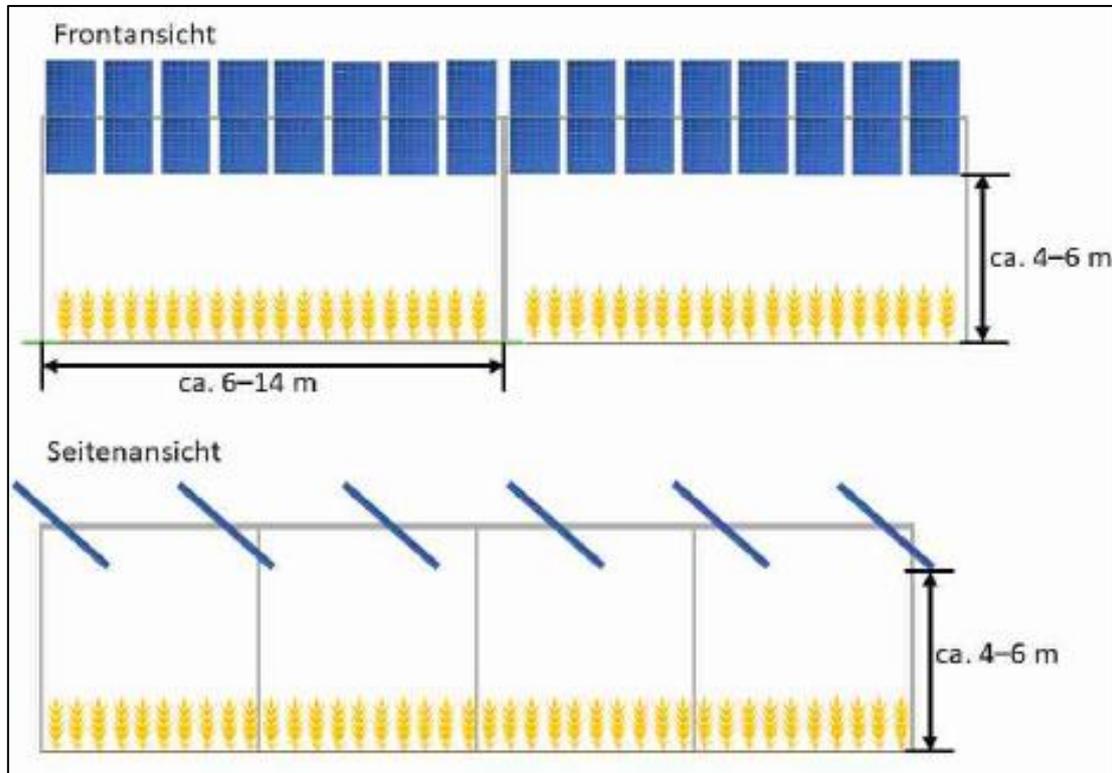


Abbildung 5: Hochaufgeständerte APV-Systeme (Scharf et al. 2021, S. 17)

Durch den Überdachungseffekt hochaufgeständerter APV-Systeme können verschiedene Synergieeffekte entstehen, solange die landwirtschaftliche Nutzung ungestört bleibt. Die Module können dabei als Schutz vor bestimmten Witterungsbedingungen wie Hagel, Regen, aber auch extremen Hitzeperioden wirken (Trommsdorff et al. 2020, S. 8).

### Faltbare Systeme

Eine innovative, bisher nicht für landwirtschaftliche Zwecke genutzte Alternative könnten faltbare Solardächer darstellen. Durch das Unternehmen dhp technology AG wurde ein solches System mit dem Namen HORIZON für die Anbringung über Kläranlagen, Parkplätzen sowie Logistikareale entwickelt und 2021 mit dem Schweizer Zukunftspreis ausgezeichnet. Hierbei wird eine Leichtbauweise mit einer Tragseilstatik verwendet, wodurch weite Abstände zwischen den Stützen und große Höhen entstehen, die Verkehrswege auch für große Fahrzeuge wie Sattelschlepper befahrbar lassen (dhp technology AG 2021). Das Prinzip könnte in dieser Hinsicht demnach gut auf landwirtschaftliche Flächen übertragen werden, da diese für landwirtschaftliche Maschinen befahrbar blieben. Zum Einsatz kommen dabei mono- und

polykristalline Solarzellen mit einer glasfreien Laminatstechnologie, wodurch das System leicht und faltbar bleibt. Die Kosten werden mit 2.400 €/kWp angegeben (pv-magazine 2020).

Das Faltdach lässt sich bei Nutzung mit größeren Fahrzeugen einfahren. Ein Wetter-Algorithmus sorgt dafür, dass sich HORIZON bei extremen Wetterlagen zum Eigenschutz von selbst einfährt (ebd.). Hierdurch könnte jedoch die zuvor beschriebene Schutzfunktion für die angebauten Feldfrüchte wegfallen, die die wichtigen Synergieeffekte der APV darstellt. Zudem sind derzeit keine genauen Angaben zu den Stromerträgen öffentlich zugänglich.

### 2.5.2 Kategorie II: Bodennahe Aufständerung

#### **Vertikal ausgerichtete Anlagen mit bifazialen Modulen**

Bei diesem Anlagentyp werden die PV-Module reihenhaft in vertikaler Ausrichtung über- bzw. nebeneinander angebracht. Die hierdurch entstehenden PV-Reihen werden zwischen den landwirtschaftlich genutzten Flächen installiert. In der Regel bestehen die Systeme aus zwei übereinander angebrachten Modulen, da zu hohe Anlagen die Windlast erhöhen und dadurch die Statik beeinträchtigen. Des Weiteren erhöht sich bei sehr hohen Anlagen der Schattenwurf, sodass die Reihenabstände unverhältnismäßig groß gewählt werden müssten, um eine gegenseitige Verschattung der Module zu verhindern. Die Reihenabstände betragen in der Regel deshalb acht bis vierzehn Meter, wodurch ein guter Ausgleich aus Anlagenleistung und vermiedenen Selbstverschattungseffekten erreicht wird. Zudem verringert ein zu kleiner Reihenabstand die für die Landwirtschaft nutzbare Fläche und erhöht den Bearbeitungsaufwand der landwirtschaftlichen Maschinen (Scharf et al. 2021).

Aufgrund der vertikalen Anbringung der Module werden aus wirtschaftlichen Gründen bifaziale Module mit einer Bifazialität von 80 bis 85 % verwendet, die die Stromerzeugung sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite ermöglichen. Die Bifazialität gibt dabei das Verhältnis der Leistung der Rückseite zur Vorderseite an. Die Module werden für gewöhnlich in abwechselnder Reihenfolge der Vorder- und Rückseite angebracht, da dies zu einem gleichmäßigeren Erzeugungsprofil führt. Im Gegensatz zu konventionellen FF-PV-Anlagen erfolgt die Reihenausrichtung nicht nach Süden, sondern nach Osten und Westen in einem Verlauf von Nord nach Süd. Das hierdurch entstehende Erzeugungsprofil ermöglicht höhere Preise am Strommarkt, da Erzeugungsspitzen am Vor- und Nachmittag entstehen. FF-PV-Anlagen erreichen ihre Erzeugungsspitzen in der Regel zur Mittagszeit (ebd.). Abbildung 6 zeigt den Aufbau eines vertikalen APV-Systems mit bifazialen Modulen.

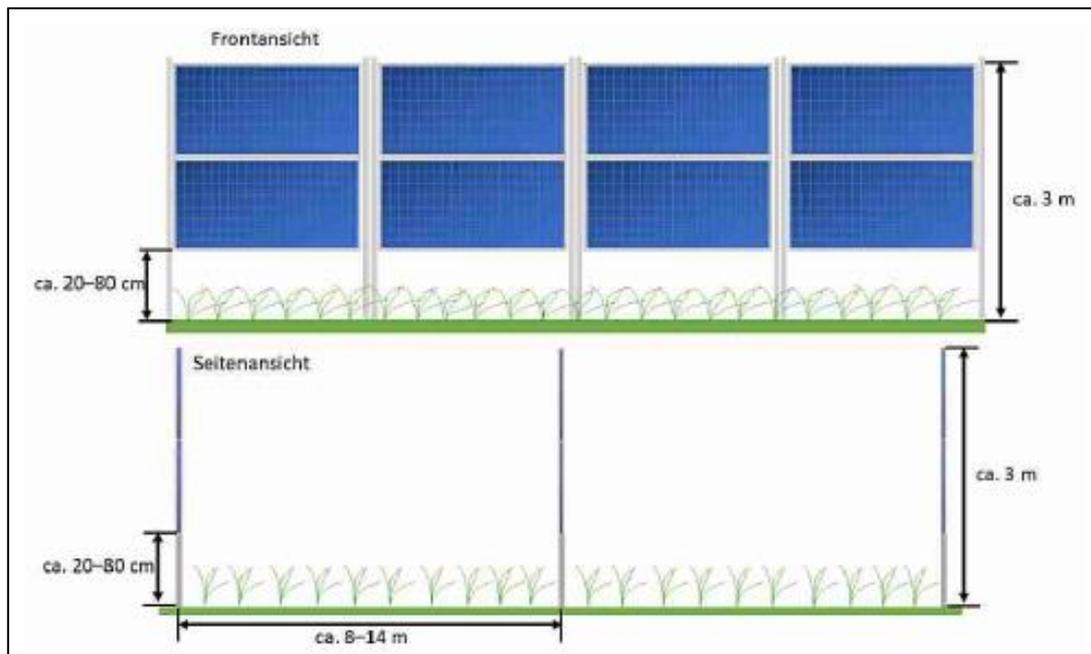


Abbildung 6: APV-System mit vertikal angebrachten bifazialen Modulen (Scharf et al. 2021, S. 20)

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Solarmodule verstellbar zu installieren, sodass sie je nach Sonnenstand nachgeführt werden können (DIN SPEC 91434).

### Vertikal ausgerichtete, nachgeführte Systeme

Ähnlich der nachgeführten FF-PV-Anlagen besteht auch bei APV-Systemen die Möglichkeit, bewegliche Module zu installieren, die durch eine Trackingfunktion mittels Lichtsensoren die Ausrichtung der Module verändert und somit einen optimierten Stromertrag ermöglicht. Die Module werden hierfür auf einachsigen Modultischen installiert, jedoch im Vergleich zu herkömmlichen FF-PV-Systemen in größeren Höhen, um zu starke Verschattungen der Module durch die angepflanzten Kulturen zu vermeiden (Abbildung 7). Aus diesem Grund eignen sich eher kleinwüchsige Kulturen zum Anbau unter nachgeführten Modulen. Dabei ist zu beachten, dass ein zu hohes Anlagendesign den Materialaufwand und damit die Kosten unverhältnismäßig erhöhen würde. Auch die Reihenabstände müssen deutlich größer gewählt werden, um die landwirtschaftliche Bearbeitung zu erhalten. Unter den Modulen entstehen nur noch eingeschränkt nutzbare Flächen, da die Module sonst in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt und die Ackerkulturen nicht ausreichend Licht erhalten würden. Dennoch entstehen Synergieeffekte, da sie als Brachflächen für den Naturschutz genutzt werden könnten. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch die Bepflanzung mit schattentoleranten Beerensträuchern. Zudem ist eine Tröpfchenbewässerung der unter den Modulen befindlichen Flächen möglich, wenn Regenwasser an den Ablaufkanten der Module gesammelt wird (Scharf et al. 2021).

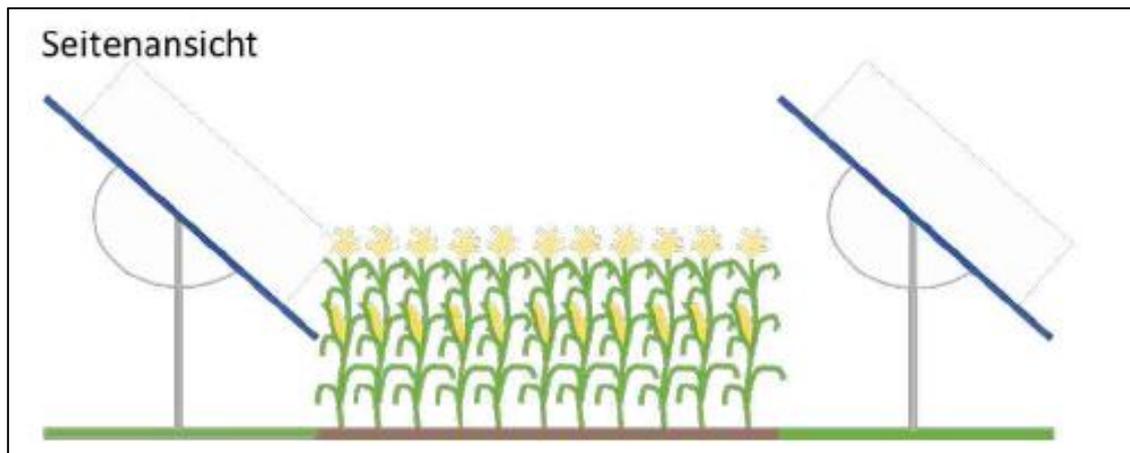


Abbildung 7: Nachgeführtes APV-System (Scharf et al. 2021, S. 24)

Grundsätzlich gilt für alle Systeme, dass sie an die Ansprüche der jeweiligen Feldfrucht angepasst sein müssen, um die landwirtschaftliche Hauptnutzung zu gewährleisten. Im Folgenden soll dargestellt werden, welche Systeme sich für welche Feldfrüchte eignen, und inwieweit der Einsatz bestimmter Kulturen in APV-Systemen bisher bereits erprobt wurde.

## 2.6 Auswirkungen auf Feldfrüchte und den Vorhabensstandort

Grundsätzlich sind Pflanzen dazu in der Lage, sich an verändernde Umweltbedingungen, die durch Faktoren wie die Licht- und Wasserverfügbarkeit, die Temperatur oder Wind charakterisiert werden, anzupassen. Das Pflanzenwachstum hängt davon ab, inwieweit die gegebenen Umweltbedingungen vom Optimum der jeweiligen Pflanzen abweichen. Landwirtschaftliche Kulturpflanzen werden jedoch in der Regel so gezüchtet, dass sie unter bestimmten Bedingungen optimale Erträge liefern, sodass sie sich verändernde Umweltbedingungen weniger tolerieren als Wildpflanzen (Begon et al. 2017). Die Einflüsse der sich verändernden Umweltbedingungen in APV-Systemen stellen daher eines der Kernprobleme dar, auch hinsichtlich der Bedenken von Landwirt\*innen. Auch wenn die DIN SPEC 91434 angibt, dass mindestens 66 % des Referenzertrages erreicht werden sollen, äußerten die Landwirt\*Innen in einer Studie von Weselek et al. (2019), dass sie eine Ertragsminderung von höchstens 20 % tolerieren würden. Auch wenn diese Toleranzgrenze von subjektiven Wahrnehmungen und Meinungen abhängt, spielt die Ertragsminderung eine wichtige Rolle für die Akzeptanz und demnach für den Ausbau der APV-Systeme.

Um die Ertragsminderungen in APV-Systemen zu reduzieren und an die Toleranzwerte der Landwirt\*Innen anzupassen ist es notwendig, die Umweltbedingungen unter den PV-Modulen und die jeweiligen Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum verschiedener Kulturpflanzen zu

erforschen. Beck et al. (2012) haben für Mitteleuropa deswegen verschiedene Kulturpflanzen hinsichtlich ihrer Schattentoleranz in drei verschiedene Kategorien eingeteilt (Tabelle 2).

*Tabelle 2: Kategorien zur Eignung von Kulturpflanzen für APV-Systeme basierend auf der Schattentoleranz der einzelnen Arten samt Beispiele nach Beck et al. (2012, S. 2)*

Nr.	Kategorie	Erklärung	Beispiele
1	+	Positive Effekte überwiegen: Höhere Erträge erwartbar	Kartoffeln Salat Spinat
2	0	Keine signifikanten Veränderungen: Ähnliche Erträge erwartbar	Raps Roggen Hafer
3	-	Negative Effekte überwiegen: Geringere Erträge erwartbar	Mais Weizen Gartenbau

Schattentolerante Pflanzen wie Kartoffeln, Salat und Spinat wurden demnach als besonders für die Nutzung in APV-Systemen geeignet eingestuft, wohingegen Arten, die einen hohen Lichtbedarf aufweisen, bspw. C<sub>4</sub>-Arten wie Mais, als weniger geeignet betrachtet wurden. Für Pflanzen der ersten Kategorie sind höhere Erträge unter PV-Modulen zu erwarten, während für Pflanzen der dritten Kategorie geringere Erträge im Vergleich zu traditionellen Anbaumethoden wahrscheinlich sind (Beck et al. 2012, S. 2 ff.). Während die Lichtverteilung den vermutlich größten Einfluss auf das Pflanzenwachstum in APV-Anlagen hat, entstehen zudem veränderte Bedingungen hinsichtlich der Wasserverteilung, der Bodentemperatur und des Schutzes vor Witterungseinflüssen eine Rolle. Hinsichtlich der einfallenden Strahlung in APV-Systemen wurden bspw. bisher Werte zwischen 37 und 46 % erfasst (Marrou et al. 2013a, S. 122). wobei die Dichte der Module eine größere Rolle spielte als die Nachführung der Module (Amaducci et al. 2018, S. 553). Sowohl Amaducci et al. (2018) als auch Marrou et al. (2013a) konnten signifikante Unterschiede auf die Bodentemperatur ermitteln, die bei Amaducci et al. (2018) im Falle vom Maisanbau in Kombination mit verbesserten Bedingungen hinsichtlich der Luftfeuchtigkeit und Wasserspeicherfähigkeit sogar zu erhöhten Ernteerträgen führen können. Marrou et al. (2013a) untersuchten dabei in einem experimentellen Prototypen in Montpellier, Frankreich von Juli 2010 bis September 2011 die Lufttemperatur im Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit, der einfallenden Strahlung sowie die Bodentemperatur und die Temperatur der Feldfrüchte Salat, Hartweizen und Gurke. Wie zuvor erwähnt erreichte die einfallende Strahlung unter den Solarmodulen im Durchschnitt etwa 37 bis 46 % der Einstrahlung einer Referenzfläche ohne installierte Solarmodule. Hinsichtlich der Lufttemperatur wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den beschatteten APV-Flächen und der nicht beschatteten

Fläche gefunden. Dementsprechend konnten auch keine signifikanten Effekte der Beschattung auf die Luftfeuchtigkeit getroffen werden. Die Bodentemperatur in einer Tiefe von 0,05 m erreichte beim Hartweizen signifikante Unterschiede von 1,8 und 1,9°C. Bei einer Tiefe von 25 cm konnten Temperaturabsenkungen von bis zu 2,3°C für den Hartweizen und 0,6°C für die bewässerten Gurken gemessen werden. Die Temperatur der Feldfrüchte selbst war in dem APV-System bei allen Kulturen am Tag reduziert und in der Nacht erhöht. Die Beschattung der PV-Module führte beim Salat zu einer verminderten Blatterscheinungsrate in den ersten drei Wochen nach der Pflanzung im Vergleich zu der nicht beschatteten Fläche. Nach den ersten drei Wochen glich sich die Rate jedoch in allen untersuchten System an. Für Gurken wurde festgestellt, dass die Blatterscheinungsrate lediglich in der Phase der maximalen vegetativen Entwicklung (stationäre Phase) signifikant reduziert wurde. Die Erntereife beim Hartweizen wurde unter in den untersuchten APV-Systemen zwei Tage später erreicht, als auf der Referenzfläche. Besonders die Unterschiede zu Beginn der Wachstumsphase werden hinsichtlich der verringerten Bodentemperatur erklärt (Marrou et al. 2013a).

Auch AL-agele et al. (2021) konnten positive Effekte auf Feldfrüchte nachweisen. Während Tomaten zwar schattenintolerante Pflanzen darstellen, konnten positive Effekte auf die Bewässerungsproduktivität festgestellt werden. Die Tomatenpflanzen wurden in drei verschiedenen Weisen angepflanzt: Sowohl unter den 2,2 m hohen Modulen, parallel zu den Modulen sowie ohne Module auf einer Referenzfläche. Die Module hatten einen entscheidenden Einfluss auf das Mikroklima, d.h. auf die Luft- und Bodentemperatur sowie auf den Wasserhaushalt und die Luftfeuchtigkeit. Während bei den Reihen mit Modulen weniger Wasser gebraucht wurde, erreichten die Kontrollflächen jedoch höhere Erträge, die sich auf die Schattenintoleranz der Pflanzen zurückführen lassen (AL-agele et al. 2021, S. 6 ff.). Bezüglich der veränderten und teils verbesserten mikroklimatischen Bedingungen kamen auch Adeg et al. (2018), die besonders in späten Stadien der Biomasseproduktion sowie in der Bewässerungseffizienz positive Effekte nachwies, zu ähnlichen Ergebnissen. Elamri et al. (2018, S. 451) konnten eine Reduzierung der benötigten Wassermengen um 20 % feststellen. Neben positiven Auswirkungen der Module auf die Wasserverfügbarkeit haben Barron-Gafford et al. (2019, S. 852) zudem einen positiven Kühlungseffekt der Pflanzen auf die Module nachgewiesen, was sich positiv auf die Moduleffizienz auswirken kann.

Sekiyama und Nagashima (2019) zeigten, dass eine Anlage mit relativ geringer Moduldichte sogar positive Auswirkungen auf die Biomasseproduktion schattenintoleranter Pflanzen haben kann. Auf einer 100 m<sup>2</sup> großen Fläche mit hochaufgestellten Modulen in einer Höhe von 2,7 m

wurde Weizen angebaut, wobei das Anlagendesign mit einer geringen Moduldicke eine vermehrte Weizenstroh-Produktion von etwa 5 % gegenüber einer Referenzfläche ohne Module erreichte (Sekiyama und Nagashima 2019, S. 5 ff.).

Bei naturverträglicher Gestaltung können PV-Systemen im Allgemeinen zudem einen positiven Effekt auf bestimmte Artengruppen wie Insekten, Reptilien sowie Brutvögeln und damit auf die Biodiversität haben (bne 2020, S. 16 ff.).

## 3 Methodische Grundlagen: Die vier Phasen einer Ökobilanzierung

### 3.1 Definition der Ökobilanzierung

Eine Ökobilanzierung, engl. Life Cycle Assessment (LCA), wird definiert als die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (DIN EN ISO 14044). Die Umweltwirkungen einer Ökobilanz werden auf den gesamten Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung bezogen und umfassen damit im Gegensatz zu den in anderen Umweltanalysen (wie bspw. der Umweltverträglichkeitsprüfung) einen erweiterten Maßstab und nicht nur die Umweltwirkungen am Projektstandort. Ökobilanzierungen haben demnach den Zweck, Verbesserungsmöglichkeiten im gesamten Lebensweg eines Produktsystems, d.h. von der Rohstoffgewinnung bis zur Beseitigung („cradle to grave“), zu untersuchen und aufzuzeigen. Sie stellen keine Ver- oder Gebote dar, sondern dienen der Information von Entscheidungsträger\*innen, bspw. aus der Industrie oder Politik, hinsichtlich einer möglichen Optimierung in Bezug auf bestimmte, vorher festgelegte Umweltaspekte. Im Vergleich zu anderen Umweltanalyseinstrumenten betrachtet sie dabei lediglich potenzielle Umweltauswirkungen. Die Ergebnisse einer Ökobilanzierung können des Weiteren zu Marketingzwecken, bspw. durch eine Umweltkennzeichnung oder einer Umweltdeklaration für ein Produkt, genutzt werden (DIN EN ISO 14044).

Umwelleistungen, wie die Bereitstellung von Ressourcen, werden in der Regel als kostenlos angesehen und deswegen im heutigen Preissystem oft nicht berücksichtigt. Durch den Abbau und die Weiterverarbeitung von Rohstoffen kann jedoch eine Beschädigung der Umwelleistungen, bspw. durch Schadstoffemissionen oder den Abbau selbst, stattfinden, die zu einer Verknappung eben dieser Leistungen führen kann. Erste Ansätze von Ökobilanzierungen entstanden aus der Verknappung der Kohle im 19. Jahrhundert und auch die Ölkrise in den 1970er Jahren mit der Verknappung des Hauptenergieträgers Erdöl führte der Bevölkerung die Begrenzung der Ressourcen vor Augen. Die zuvor vernachlässigten ökologischen limitierenden Faktoren wie die Erderwärmung durch den Klimawandel oder eine schlechte Luftqualität rückten wieder mehr in den Fokus. In Anlehnung an die Energiebilanzierung sollen Ökobilanzierungen ökonomische Analysen ergänzen und dabei helfen, die Ineffizienz von Produkten und Prozessen abzuleiten sowie die mit dem Produktionssystem bestimmter Produkte und Leistungen verbundenen Umweltauswirkungen aufzuzeigen (Frischknecht 2020, S. 22 ff.).

### 3.2 Aufbau einer Ökobilanzierung

Um international einheitliche Standards bei der Beurteilung der Umweltwirkungen von Produktionssystemen einzuführen, wurde die Vorgehensweise von Ökobilanzierungen durch die Internationale Organisation für Normung in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 festgelegt. Diese Standardisierung soll dabei helfen, die Ergebnisse von Ökobilanzierungen vergleichbar zu machen. Einen Großteil der Standardisierung macht die in den erwähnten Normen festgelegte Vorgehensweise aus. Die DIN EN ISO 14044 definiert hierfür vier Phasen, die in einer Ökobilanzierung untersucht und dargestellt werden sollen: Die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz (Inventory Analysis), die Wirkungsabschätzung (Impact Assessment) sowie die Auswertung und Interpretation (Abbildung 8).



Abbildung 8: Aufbau einer Ökobilanzierung nach Frischknecht 2020; DIN EN ISO 14044

#### 3.2.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

##### **Festlegung des Ziels**

Zu Beginn einer jeden Ökobilanzierung steht die Beschreibung und Konkretisierung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Die Zielsetzung beinhaltet wichtige Angaben zum Untersuchungsgegenstand. Sie hat demnach einen entscheidenden Einfluss auf die folgenden Schritte sowie letztendlich auf die Ergebnisse und sollte im Sinne der Transparenz deswegen



Abbildung 9: Bestandteile der Zielformulierung in Ökobilanzen nach (JRC European Commission 2010, S. 29)

ausführlich beschrieben werden. Die Europäische Kommission hat 2010 ein Handbuch zur Durchführung und Qualitäts- und Konsistenzsicherung von Ökobilanzierungen herausgegeben, in dem sechs Bestandteile der Zielsetzung festgelegt wurden, die in Abbildung 9 dargestellt werden (JRC European Commission 2010). In der Zielformulierung sollte demnach herausgearbeitet werden, welcher Gebrauch bzw. welche **Anwendung** beabsichtigt wird, da dies einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität und Genauigkeit der zu verwendenden Daten hat. Während für die Evaluation firmeninterner Produktionsketten spezifische und genaue Informationen für das zu untersuchende Produkt sowie möglicher Lieferanten benötigt werden, werden für den Gebrauch für allgemein ableitbare Folgerungen, wie sie bspw. durch Bundesämter und sonstige politische Entscheidungsträger getroffen werden müssen, eher Durchschnittswerte sowie Best-Practice-Daten genutzt. Letzteres kann bspw. zur Abschätzung neuer Technologien oder Systeme bzw. zur Konzeptentwicklung genutzt werden (Frischknecht 2020, S. 27 ff.).

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Zielsetzung sind **Limitierungen und Einschränkungen**, die sich aus der gewählten Methodik ergeben. So können bspw. Studien, die lediglich die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Produktes betrachten, keine Aussagen zur allgemeinen Umweltfreundlichkeit geben. Des Weiteren muss kommuniziert werden, ob bestimmte Bereiche des Lebenszyklus nicht abgedeckt werden können. Die Optionen, die für eine Ökobilanzierung getroffen werden, ergeben sich aus der vorherigen Planung und aus der beabsichtigten Nutzung der Ergebnisse und sollten kritisch reflektiert werden (Hauschild et al. 2018, S. 69). Punkt III „**Gründe für die Studie**“ trägt zur Verständlichkeit und Transparenz bei, indem die Gründe zur Durchführung der Studie explizit formuliert werden. Die genannten Gründe sollten sich klar auf die in Punkt I aufgeführte

Anwendung beziehen und die treibende Kraft bzw. Motivation verdeutlichen. Im Gegensatz zu Punkt I wird hier nicht das „Was?“ der Studie, sondern das „Wieso?“ beschrieben. Die Motivationsgründe können in der Regel in drei Typen eingeteilt werden: Typ A, Typ B und Typ C. Typ A beschreibt dabei entscheidungsunterstützende Studien auf der Mikroebene, d.h. in einem kleinen Maßstab, der keine größeren strukturellen Änderungen nach sich zieht. Typ B beschreibt Studien auf der Meso- oder Makroebene. Das bedeutet, dass die Ergebnisse der Ökobilanzierung eine Entscheidung unterstützen sollen, die zu größeren strukturellen Änderungen, bspw. im Rahmen politischer Konzepte oder Strategien, führen. Typ C beschreibt eine Situation, in der die Ökobilanzierungsstudie zu keiner Entscheidung führt und demnach eher beschreibender Art ist. In der Regel wurden die Entscheidungen für diesen Typ schon getroffen und die Studie dokumentiert lediglich die Konsequenzen aus der Entscheidung (ebd. S. 69 ff.).

Die **Nennung der Zielgruppe** hat Auswirkungen auf den Detaillierungsgrad der Dokumentation und auf die Art und Weise wie die Ergebnisse präsentiert und kommuniziert werden sollten. Es ist deshalb wichtig, die Zielgruppe bereits zu Beginn der Studie festzulegen (JRC European Commission 2010, S. 34).

Es sollte klar aus der Zielformulierung hervorgehen, ob es sich bei der Ökobilanzierung um eine **vergleichende Ökobilanzierung** handelt, d.h., ob in der Studie zwei Systeme oder Produkte miteinander verglichen werden. Werden die Ergebnisse einer solchen Studie der Öffentlichkeit zugänglich gemacht, entstehen weitere Anforderungen gemäß DIN EN ISO 14044.

Der letzte Punkt der Zielformulierung betrifft aus Gründen der Transparenz die **Nennung des Auftraggebers**, inklusive evtl. Geldgeber und sonstigen Organisationen, die Einfluss auf die Studie hatten (Hauschild et al. 2018, S. 73).

### **Festlegung des Untersuchungsrahmens**

Der Untersuchungsrahmen, engl. „Scope“, legt fest, welches Produktsystem analysiert und wie diese Analyse durchgeführt werden soll. Im Zusammenspiel mit der Zielformulierung ergibt sich das Gerüst für die Durchführung der nachfolgenden Schritte. Im Sinne der Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Studienergebnisse soll somit die Zusammensetzung der Methoden, Annahmen und Daten dokumentiert werden. Für die Festlegung des Untersuchungsrahmens legt die DIN EN ISO 14044 die in Abbildung 10 dargestellten Punkte fest, die behandelt werden sollten.

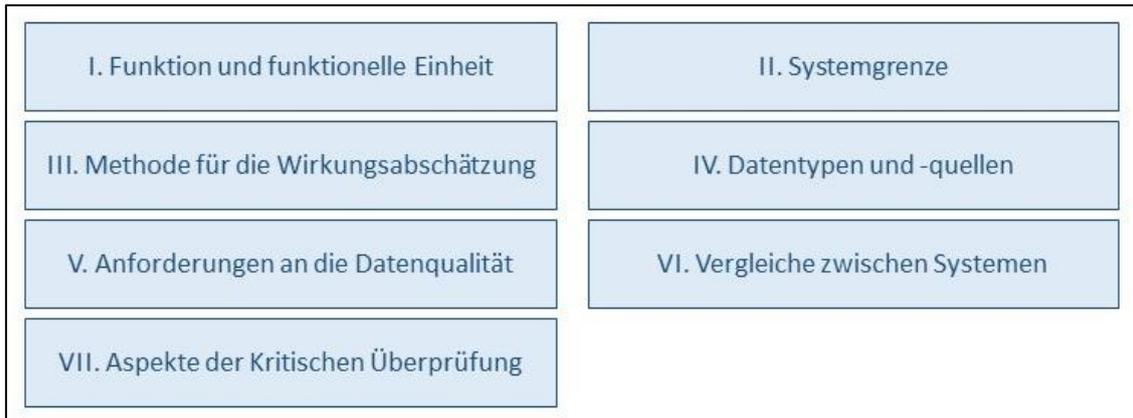


Abbildung 10: Bestandteile der Festlegung des Untersuchungsrahmens nach JRC European Commission (2010, S. 51)

Einen wichtigen Bestandteil des Untersuchungsrahmens macht die **funktionelle Einheit** aus. Sie wird beschrieben als „quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ (DIN EN ISO 14044, S. 11) und stellt damit die Bezugsgröße dar, auf die die Umweltbelastungen entlang des gesamten Lebensweges eines Produktes oder einer Leistung bezogen werden. Sie sollte daher eine Aussagekraft über die Qualität des Produkts oder der Dienstleistung besitzen. Hierbei ist es ratsam, eine Größe zu wählen, die Erfahrungen aus dem Alltag widerspiegeln. Ein Beispiel für eine funktionelle Einheit in einer Studie, die den Nutzen verschiedener Personentransportmittel wäre der Personenkilometer (Frischknecht 2020, S. 30). Die Beantwortung der folgenden Fragen kann als Leitfaden zur Definition der funktionellen Einheit dienen: „Was?“, „Wie viel?“, „Für wie lange?“, „Wo?“ und „Wie gut?“. Abbildung 11 zeigt die Beantwortung dieser Fragen am Beispiel einer vergleichenden Ökobilanz verschiedener Wandfarben zur Festlegung einer funktionellen Einheit (Hauschild et al. 2018, S. 84).



Abbildung 11: Beispiel zur Festlegung der funktionellen Einheit nach Hauschild et al. (2018, S. 84)

Ein weiterer Aspekt des Untersuchungsgegenstandes ist die **Beschreibung, bzw. der Aufbau des gesamten Produktsystems samt der Systemgrenzen**. Das Produktsystem beschreibt die Aneinanderreihung einzelner Prozesseinheiten (Module) samt der jeweiligen In- und Outputs.

Das Produktsystem lässt sich in der Regel in die Phasen Bereitstellung der Materialien/Rohstoffgewinnung, Herstellung, Nutzung und Entsorgung einteilen. Es stellt damit den Ausgangspunkt für die im zweiten Teil einer Ökobilanzierung durchzuführende Sachbilanz dar. Um die Komplexität solcher Systemen greifbar zu machen, wird das Produktsystem mit Hilfe eines Fließdiagramms dargestellt (Frischknecht 2020, S. 32 ff.). Mit der **Systemgrenze** wird für das Produktsystem festgelegt, welche Module in der Studie berücksichtigt werden und welche nicht. Hierfür werden in der DIN EN ISO 14044 Abschneidekriterien festgelegt, die darüber entscheiden, welche Inputs einbezogen werden (DIN EN ISO 14044; Frischknecht 2020).

Die Auswahl, **welche Wirkungskategorien und -indikatoren in der Wirkungsabschätzung ausgewählt werden**, sollte in Abstimmung mit dem zuvor formulierten Ziel sowie der beschriebenen Anwendung beschrieben werden (DIN EN ISO 14044). Ein Beispiel für eine Wirkungskategorie ist der Klimawandel mit dem dazugehörigen Indikator des Treibhausgaspotenzials (GWP100) (Fazio et al. 2018). Eine genauere Beschreibung folgt in Kapitel 4.2.4.

Hinsichtlich der **Datentypen und -quellen** können sowohl gemessene, errechnete oder geschätzte Daten sowie eine Mischung aller verwendet werden. Bei der **qualitativen Betrachtung** der Daten ergeben sich verschiedene Anforderungen, die zu Beginn einer Studie festgelegt werden sollten. So sind bspw. die zeitlichen Aspekte wie das Alter oder die Zeitspanne festzulegen, über die die Daten gesammelt werden sollen. Das gleiche betrifft geografische und technologische Aspekte, also bspw. die Orte oder Regionen, an denen die Produkte hergestellt werden oder ob die durchschnittliche, derzeit üblicherweise eingesetzte Technologie oder aber Prototypen aus dem Labor, die standartmäßig noch nicht eingesetzt werden, untersucht werden. Hinzu kommen Aspekte wie die Präzision, die Vollständigkeit, die Repräsentativität, die Konsistenz der Methodik, die Datenquellen sowie die Unsicherheiten, die sich bspw. aus Annahmen ergeben (DIN EN ISO 14044, S. 20 ff.).

Werden zwei Systeme miteinander verglichen, müssen die zwei **Alternativen** hinsichtlich ihrer Produktsysteme vergleichbar, d.h. dieselbe funktionelle Einheit muss anwendbar sein. Auch Aspekte bezüglich der Systemgrenze oder der Datenqualität sollten äquivalent sein. Liegen Unterschiede vor, müssen diese explizit dokumentiert und geäußert werden (DIN EN ISO 14044, S. 22 ff.).

Im letzten Punkt zur Festlegung des Untersuchungsrahmens wird festgelegt, ob eine **kritische Prüfung** durchgeführt wird. Dies wird notwendig, wenn die Ökobilanzierung als ISO-konform gelten soll (Frischknecht 2020, S. 39 f.).

### 3.2.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz stellt den zweiten Schritt der Ökobilanz dar und wird als „Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“ (DIN EN ISO 14044, S. 8) definiert. Am Ende steht das Ergebnis der Sachbilanz, „(...) das die Flüsse katalogisiert, die die Systemgrenze überschreiten und das den Ausgangspunkt für die Wirkungsabschätzung darstellt“ (DIN EN ISO 14044, S. 11) Die DIN EN ISO 14044 legt hierfür die in Abbildung 12 dargestellten Schritte fest.

Nachdem Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz festgelegt wurden, und die Datenerhebung vorbereitet wurde, erfolgt die **Datenerhebung**. Hierfür werden die Prozesse, die für das jeweilige Produktsystem nötig sind, identifiziert und die für die Prozesse notwendigen Daten werden zusammengetragen. Für Daten, die sich nicht erfassen lassen, bspw. weil sie nicht öffentlich zugänglich sind, werden allgemeine Werte gebildet und Annahmen getroffen. Die Daten werden in einem grafischen Fließdiagramm dargestellt, in welchem alle berücksichtigten Prozessmodule samt der relevanten Flüsse abgebildet werden. In der Regel werden Daten vor allem für die Vordergrundprozesse gesammelt. Die Hintergrundprozesse (Energiebereitstellung, Transport etc.) werden durch die verwendeten Datenbanken bereitgestellt. Insgesamt lassen sich die Daten in die folgenden Kategorien einteilen (DIN EN ISO 14044, S. 24).

- Energieinputs, Rohstoffinputs, Betriebsstoff-Inputs, andere physikalische Inputs;
- Produkte, Koppelprodukte und Abfall;
- Emissionen in Luft, Wasser und Boden;
- Weitere Umweltaspekte

Da die gleichen Prozesse und Produkte je nach Quelle unterschiedliche Daten aufweisen, sollte die Auswahl der Daten dokumentiert und begründet werden.

Die in der Datenerhebung gesammelten Daten werden anschließend in der **Datenvvalidierung** gemäß der im Untersuchungsrahmen definierten Qualitätsanforderungen geprüft (Frischknecht 2020, S. 92). Die Daten werden auf signifikante Probleme, die Vollständigkeit und Konsistenz überprüft. Zudem kann bereits eine Sensitivitätsanalyse Aussagen über zu vernachlässigende Prozesse erlauben (JRC European Commission 2010, S. 205). Die Daten, die in der Sachbilanzphase für die Ökobilanz berücksichtigt werden, werden dabei **auf jedes Prozessmodul bezogen** und

genau beschrieben. Am Ende des Produktsystems steht die **funktionelle Einheit**. Die Daten werden anschließend in Tabellenform **zusammengefasst**. Ergeben sich aus der Sensitivitätsanalyse Bereiche, die vernachlässigbar sind, da sie nur sehr geringe oder keine Auswirkungen auf das Ergebnis haben, muss die **Systemgrenze angepasst** werden (DIN EN ISO 14044, S. 17 ff.). Die gesamte Datenerfassung erfolgt schrittweise und iterativ.

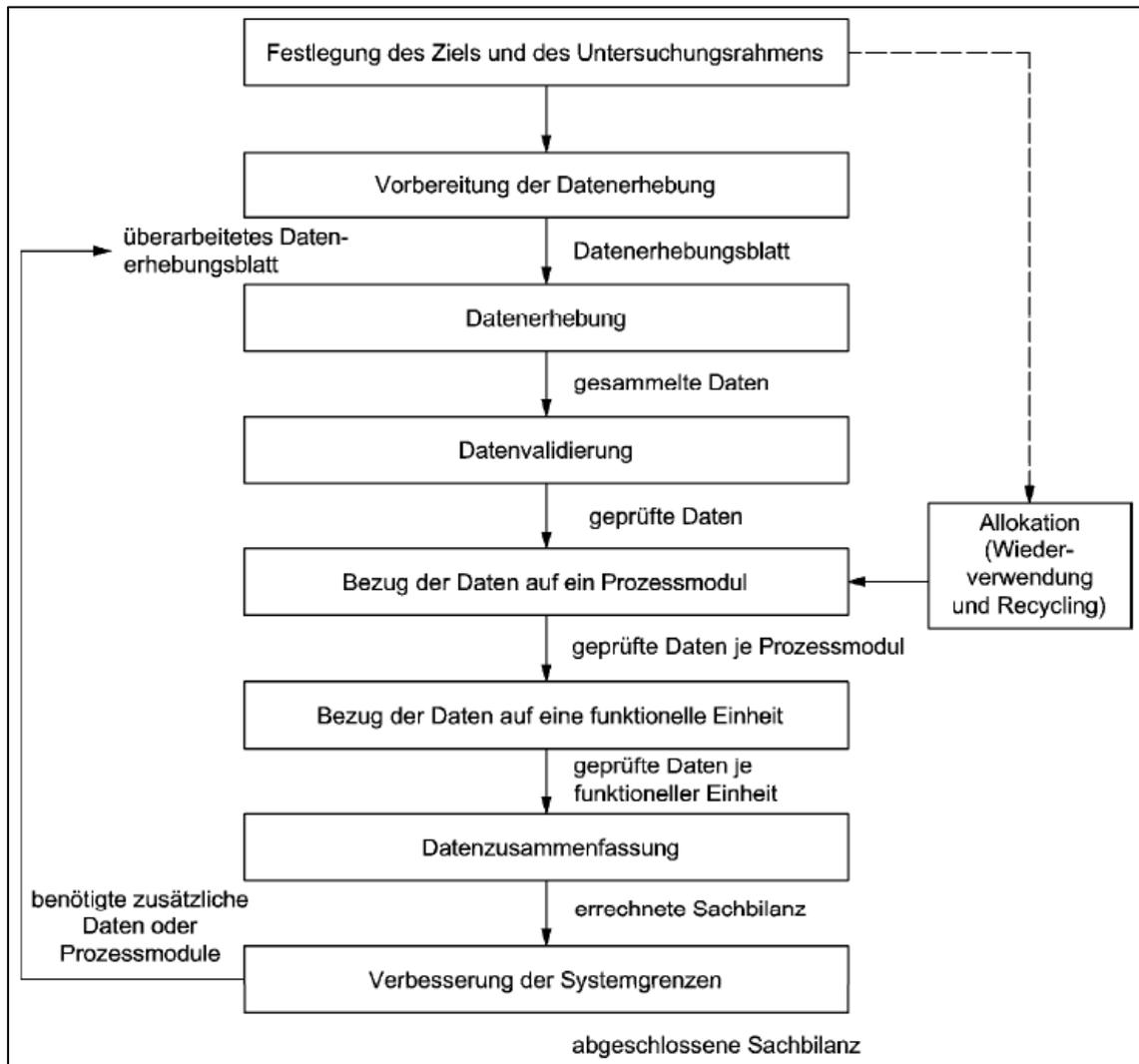


Abbildung 12: Arbeitsschritte der Sachbilanz gemäß DIN EN ISO 14044 (DIN EN ISO 14044, S. 25)

Im Falle von Prozessen, die mehrere Produkte erzeugen, erfolgt die sogenannte Allokation. Hierbei stellt sich die Frage, welche Ressourcen für welches Produkt genutzt werden. Die Produkte werden dabei in Haupt-, Koppel-, Nebenprodukte und Abfall eingeteilt. Das Problem ergibt sich zudem beim Recycling, da eine Ressource Teil mehrerer Produktzyklen sein kann (Frischknecht 2020, S. 61 ff.)

In der DIN EN ISO 14044 werden verschiedene Herangehensweisen für das Allokationsverfahren beschrieben. Die erste Herangehensweise besagt, dass Allokationen immer vermieden werden sollten, solange dies möglich ist. Dies kann durch die Teilung der Prozessmodule in mehrere Teilprozesse geschehen. Eine weitere Möglichkeit bietet die Erweiterung des Systems, indem zusätzliche Funktionen betrachtet werden. Hierbei wird besonders bei vergleichenden Analysen das System so erweitert, dass die gleichen funktionellen Einheiten verglichen werden können. So werden entweder beide Outputs durch das sogenannte Warenkorb-Prinzip addiert, oder aber der nicht zu betrachtende Part wird subtrahiert (Frischknecht 2020, S. 61 ff.). Die Vorgehensweise wird in Abbildung 13 verdeutlicht. Soll Produkt  $A_I$  mit Produkt  $A_{III}$  verglichen werden, obwohl es sich bei Prozess I um einen Mehrproduktprozess handelt und bei Prozess III nicht, so kann entweder der Prozess III um den Prozess II erweitert werden, sodass in beiden Fällen die Produkte A und B betrachtet werden, oder der Prozess II wird vom Prozess I subtrahiert (ebd.).

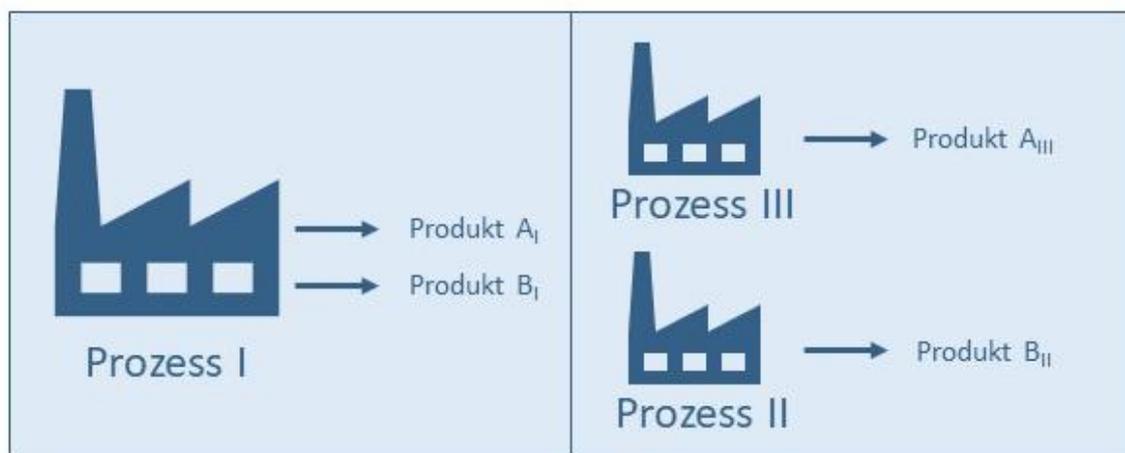


Abbildung 13: Prinzip der Systemerweiterung nach Frischknecht (2020, S. 63)

Ist die Vermeidung nicht möglich, so werden die In- und Outputs hinsichtlich der verschiedenen Produkte über die zugrundeliegenden physikalischen Beziehungen zugeordnet. Das bedeutet, dass physikalische Gesetzmäßigkeiten untersucht werden, indem bspw. „(...) der Ausstoß eines Koppelprodukts verändert (beispielsweise erhöht), während der Ausstoß der anderen Koppelprodukte konstant belassen wird“ (Frischknecht 2020, S. 66). Die sich hierdurch ergebenden Veränderungen können eindeutig gemessen und zugeordnet werden (ebd., S. 66 ff.). Ist eine physikalische Zuordnung ebenfalls nicht möglich, erfolgt die Allokation auf Basis anderer Beziehungen, bspw. in Bezug zum ökonomischen Wert der verschiedenen Produkte. Beim Recycling kommen die gleichen Schritte zum Tragen. Die Mehrfachnutzung kann dabei als eine aufeinanderfolgende Koppelproduktion betrachtet werden (DIN EN ISO 14044, S. 29 f.).

### 3.2.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung stellt den dritten Teil der Ökobilanzierung dar und ist damit der Bestandteil, „der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient“ (DIN EN ISO 14044, S. 8). Die DIN EN ISO 14044 gibt dabei drei Bestandteile an, die bei der Wirkungsabschätzung betrachtet werden müssen: 1. Die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen; 2. Die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien (Klassifizierung); 3. Die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (DIN EN ISO 14044, 33 f.).

Im ersten Schritt werden die Wirkungen in Abstimmung mit der Zielsetzung samt der jeweiligen Methode ausgewählt, bspw. die Auswirkungen auf den Klimawandel. Für jede Wirkungskategorie wird ein Indikator festgelegt (bspw. kg CO<sub>2</sub> eq) gewählt. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Zuteilung der Elementarflüsse aus der Sachbilanz hinsichtlich ihres möglichen Beitrages zur jeweiligen Wirkungskategorie. Schließlich werden die Mengen der Elementarflüsse mit dem sogenannten Charakterisierungsfaktor multipliziert, sodass eine quantitative Aussage über den zuvor angesprochenen Beitrag zu einer Wirkungskategorie möglich wird. Am Ende werden die Werte aller Elementarflüsse je Wirkungskategorie addiert und stellen den Gesamtwert einer Wirkungskategorie dar. Optional kann zudem eine Normalisierung und eine Gewichtung stattfinden, um die verschiedenen Werte der Wirkungskategorien vergleichbar zu machen (Hauschild und Huijbregts 2015, 4 ff.). Abbildung 14 zeigt das Schema und Beispiele zur Durchführung einer Wirkungsabschätzung.

Die Auswahl der Wirkungskategorien erfolgt in der Regel bereits bei der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen. Hierbei sollte die Quelle der Kategorie dokumentiert und die Auswahl begründet sowie akkurat benannt werden. Wichtig ist, dass die Wirkungskategorien die mit dem Produktsystem zusammenhängenden Umweltwirkungen wiedergeben (DIN EN ISO 14044, S. 33 ff.). Die Umweltwirkungen werden dabei durch die Wirkungsindikatoren abgebildet, die „(...) frei zwischen den Sachbilanzergebnissen und Wirkungsendpunkten entlang des gesamten Umweltwirkungsmechanismus gewählt werden“ können (DIN EN ISO 14044, S. 37).

Dabei kann zwischen mehreren Indikatoren unterschieden werden. Die Midpoint-Indikatoren setzen inmitten des Wirkungspfades an. Des Weiteren gibt es Endpoint-Indikatoren, die die endgültigen Schäden am Ende des Produktsystems abbilden. Die Wirkungskategorien können dabei in übergreifende Kategorien eingeteilt werden, den Schutzgütern (Hauschild und

Huijbregts 2015, S. 8 f.). Das konzeptuelle Schema zur Auswahl der Wirkungsindikatoren wird in Abbildung 15 abgebildet.



Abbildung 14: Schema und Beispiele zur Durchführung einer Wirkungsabschätzung nach Hauschild und Huijbregts (2015, S. 5)

Um zwischen Mid- und Endpoint-Indikatoren und -kategorien zu unterscheiden, gibt es vorgefertigte Listen, die sich oft bereits auf bestimmte Themenfelder beziehen. Die Ergebnisse aus der Sachbilanz können diesen Listen dann zugeordnet werden. Während die Listen sich hinsichtlich der allgemein anerkannten bzw. genau definierten Wirkungskategorien auch themenübergreifend sehr ähneln (bspw. in der Klimawandel-Kategorie), ist eine einheitliche Definierung und Zuordnung bei anderen Kategorien nicht einfach (bspw. Kategorien, die sich auf die menschliche Gesundheit beziehen). Für Sachbilanzergebnisse, für die es noch keine Einträge in den Listen gibt, muss eine eigene Klassifizierung stattfinden (Guinée 2015, S. 30).

Nachdem die Charakterisierung (vgl. Abbildung 14) durchgeführt wurde, bestehen eine große Anzahl an Indikatorwerten, die einen direkten Vergleich zwischen den Wirkungskategorien nicht ermöglichen und damit die Interpretation erschweren können. Um dieses Problem zu lösen, bestehen zwei optionale Schritte in der Wirkungsabschätzung: Die Normierung und die Gewichtung. Laut DIN EN ISO 14044 (S. 41) wird die Normierung definiert als „(...) Berechnung der Größenordnung der Wirkungsindikatorwerte in Bezug auf Referenzdaten. Ziel der

Normierung ist, ein besseres Verständnis der relativen Größenordnung jedes Indikatorwertes des zu untersuchenden Produktsystems zu erreichen“. Dabei wird jeder Indikatorwert auf einen Referenzwert bezogen, der in Abstimmung mit Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie festgelegt werden sollte (Laurent und Hauschild 2015, S. 272). Beispiele für diese Referenzsysteme sind die gesamten Umweltwirkungen eines Landes oder die Umweltwirkungen pro Kopf in einem bestimmten Gebiet (Frischknecht 2020, S. 106).



Abbildung 15: Schema zur Auswahl der Wirkungsindikatoren gemäß (DIN EN ISO 14044, S. 36)

Die Gewichtung stellt „(...) ein Verfahren zur Umwandlung der Indikatorwerte verschiedener Wirkungskategorien unter Verwendung numerischer Faktoren, die auf Werthaltungen beruhen“ dar (DIN EN ISO 14044, S. 43). Durch die Gewichtung werden die unterschiedlichen Werte zu einem Wert zusammengefasst (Itsubo 2015, S. 304).

Für die Wirkungsabschätzung existieren bereits allgemein anwendbare Bewertungsmethoden, die entweder Gewichtungen, bspw. in Bezug auf bestimmte Ziele eines Landes, miteinbeziehen oder nicht. Der spezifische Gewichtungsschritt kann dabei auf monetären Ansätzen, Expertenpanels oder sogenannten distance to target-Methoden beruhen. Während monetäre Ansätze bspw. die Zahlungsbereitschaft oder Schadenskosten betrachten (vgl. Pizzol et al. 2015), werden bei Expertenpanels die Präferenzen verschiedener Stakeholder einbezogen (Huppel et al. 2012, S. 878). Beispiele für Bewertungsmethoden mit monetärem Ansatz wären LIME 1-3 oder ECOTAX2002. Bewertungsmethoden, die mit Expertenpanels arbeiten sind der Eco-indicator 99 und ReCiPe. Die Gewichtung der distance to target-Methode erfolgt auf der Grundlage, Umweltauswirkungen nach ihrer Entfernung von der aktuellen (Umwelt-)situation zu einem bspw. politisch festgelegten Umweltziel zu gewichten. Beispiele hierfür sind Methoden der ökologischen Knappheit, so z.B. die Ökofaktoren 2013 für die Schweiz oder die Ökofaktoren 2015 für Deutschland (Muhl et al. 2021, S. 115). Da die Gewichtungen jedoch nicht auf

wissenschaftlichen Kriterien sondern auf Wertehaltungen der Durchführenden der Studie basieren, können Problemen entstehen, wenn ein externer Vergleich stattfinden soll (bspw. mit dem Produkt einer konkurrierenden Firma), da die zugrunde liegenden Gewichtungsfaktoren unterschiedlich gewesen sein können. Die Gewichtung in einer extern vergleichenden Studie wird demnach nicht als ISO-konform angesehen (Itsubo 2015, S. 306 f.).

#### 3.2.4 Auswertung und Interpretation

Die Auswertung bzw. Interpretation stellt den vierten Schritt der Ökobilanzierung dar und besteht gemäß DIN EN ISO 14044 (S. 45) aus den folgenden Bestandteilen:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungs-Phasen der Ökobilanz;
- eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt;
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

Die Auswertung stellt damit den Part der Ökobilanzierung dar, welcher systematisch Informationen aus Sachbilanz und Wirkungsabschätzung hinsichtlich der Angaben aus der Formulierung von Ziel und Untersuchungsrahmen identifizieren, prüfen und evaluieren soll. Gleichzeitig soll der Prozess der Kommunikation abgedeckt werden, indem die Ergebnisse verständlich und nutzbar gemacht werden. Werden hier Ungenauigkeiten in den zuvor durchgeführten Schritten der Ökobilanzierung erfasst bzw. verdeutlicht, werden diese Schritte in einem iterativen Prozess ergänzt, verbessert und vervollständigt, bis die Vorgaben aus Ziel und Untersuchungsrahmen erfüllt wurden. Die Aussagen werden zudem auf die Schlüsselergebnisse reduziert, um evtl. Entscheidungsträger\*innen bei der Entscheidung zu helfen. Hierbei werden vor allem die signifikanten Umweltwirkungen identifiziert, da diese die wichtigsten Ergebnisse der Ökobilanzierung darstellen. Des Weiteren werden die methodischen Entscheidungen, u.a. die ausgewählten Daten und Prozesse, Annahmen, Unsicherheiten oder fehlende Informationen, evaluiert. Dies geschieht durch die Überprüfung der Vollständigkeit, der Konsistenz sowie durch Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen (z.B. durch eine Monte-Carlo-Simulation). Hierdurch werden die Parameter bestimmt, die die Ergebnisse der Studie am stärksten beeinflusst haben. Am Ende stehen Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Diese sollten sich nur auf das betrachtete und zuvor festgelegte Produktsystem beziehen. Sie bilden damit die Antworten auf die Zielsetzung ab. Die Empfehlungen gestalten sich dabei jedoch nur als Entscheidungshilfe und greifen einer Entscheidung durch die Entscheidungstragenden nicht vor (Jensen et al., S. 70 ff.).

## 4 Material und Methoden

Laut DIN EN ISO 14044 beinhalten die ersten drei Schritte einer Ökobilanzierung „Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“, „Sachbilanz“ und „Wirkungsabschätzung“ wichtige Angaben zu den verwendeten Materialien und Methoden. Im Folgenden werden diese Schritte demnach ausführlich behandelt und die in Kapitel 4 beschriebenen methodischen Grundlagen angewandt. Hierbei werden die Methoden zur Auswahl wichtiger Parameter, Einheiten und Daten sowie die Umsetzung mit Hilfe einer Ökobilanzierungssoftware und einer Datenbank beschrieben.

### 4.1 Zieldefinition der Ökobilanzierung

Das Ziel und damit die **Anwendung** dieser Ökobilanzierung ist es, die Umweltwirkungen der Produkte einer APV-Anlage zu erfassen und mit denen zweier Systeme zu **vergleichen**, bei denen die Produktion konventionell, d.h. auf separaten Flächen, stattfindet. Als Produkte werden die Erzeugung von Strom sowie die landwirtschaftliche Produktion von Kartoffeln gewählt. Hierfür werden drei verschiedene Szenarien entwickelt, die auf potenziellen Anlagensystemen basieren und bisher nicht umgesetzt wurden.

Aus den hierfür getroffenen Annahmen ergeben sich verschiedene **Limitierungen und Einschränkungen**. Da die in dieser Arbeit betrachtete APV-Anlage bisher nicht vollumfänglich geplant wurde, stützt sich die Entwicklung der Sachbilanz auf Annahmen und Durchschnittswerte für PV-Anlagen und die landwirtschaftliche Produktion aus der Literatur, die mit Hilfe bereits umgesetzter APV-Anlagen sowie Studien zur Ökobilanzierung eben dieser ergänzt werden. Die Durchführung der Ökobilanzierung findet zudem im Rahmen der Erlangung des akademischen Grades „Master of Science“ im Studiengang „Erneuerbare Energien Management“ statt, sodass sich Einschränkungen in der Nutzung kostenpflichtiger Datenbanken und Programme ergeben. Kostenpflichtige Angebote weisen in der Regel aktuellere Daten auf.

Der **Grund für die hier vorliegende Studie** ist demnach die Unterstützung der Entscheidung zur späteren Umsetzung von APV-Anlagen in Thüringen sowie das Aufzeigen von Handlungsschritten und wichtiger Parameter einer konkreten Ökobilanzierung. **Zielgruppe** der Ökobilanzierung sind damit die in dem Netzwerk APV des Solarinput e.V. wirkenden Akteure (Wissenschaftler\*innen, Landwirt\*innen, Projektierer\*innen, Energieunternehmen, Verbände, etc.). Als Auftraggeber kann Solarinput e.V. angesehen werden.

## 4.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Um das in Kapitel 5.1 festgelegte Ziel zu erreichen, wurden drei separate Systeme entwickelt, die vergleichbare Service-Niveaus und damit dieselben Hauptsystem-Outputs abbilden, jedoch auf unterschiedliche Weise. Sie wurden so konzipiert, dass eine Anlagenleistung von 500,13 kWp und eine Kartoffelproduktion von 307,87 dt pro Jahr bzw. 923.610 kg über den Zeitraum von 30 Jahren erreicht werden.

Das erste Szenario beschreibt dabei den Ausgangspunkt für die Entwicklung der weiteren Szenarien und umfasst eine APV-Anlage mit integrierter Produktion der beiden genannten Outputs. Im zweiten Szenario wird auf Basis der Annahmen und Festlegungen in Szenario 1 eine separate Produktion von PV-Strom und Kartoffeln betrachtet, d.h. die Produktion beider Outputs findet auf voneinander getrennten Flächen statt. Im dritten Szenario wird die Erzeugung von PV-Strom ausgeklammert und durch den durchschnittlichen deutschen Strommix ersetzt. Das Szenario 3 umfasst demnach nur die landwirtschaftliche Produktion und keine eigens angelegte Fläche für die Stromerzeugung. Hierdurch wird eine Vergleichbarkeit erreicht, da alle Systeme dieselben Outputs umfassen und das erste Szenario, welches ein relativ neues, innovatives System betrachtet, kann in ein Verhältnis zu den bisher üblichen, konventionellen Bewirtschaftungsmethoden gesetzt werden.

Die folgenden Beschreibungen der drei Szenarien bilden die Basis für den Untersuchungsrahmen und damit für die Festlegungen wichtiger Parameter für die Ökobilanzierung, wie bspw. für die funktionelle Einheit und die Systemgrenze.

### 4.2.1 Modellierung der Szenarien

#### 4.2.1.1 Szenario 1: Integrierte Produktion in einer APV-Anlage

Gemäß der bisherigen Aktivitäten des Netzwerks APV in Thüringen wurden bereits Annahmen im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung getroffen, vorrangig hinsichtlich der Anlagendimensionierung, der Investitionskosten, der Vergütung sowie der möglichen Ernteerträge. Hierbei wurden bisher sechs verschiedene Anlagenvarianten untersucht: Eine hochaufgeständerte Variante mit Ackerkultur, eine hochaufgeständerte Variante mit Sonderkultur, eine Variante mit faltbarem PV-Dach mit Ackerkultur, ein nachgeführtes System mit Ackerkultur, eine vertikale Variante mit Heuproduktion sowie eine Variante, bei der die Aufständigung durch eine Seilaufhängung ersetzt wird (Vollmer 2021). Um bei der Ökobilanzierung eine Vergleichbarkeit mit regulären FF-PV-Anlagen zu gewährleisten und die

Suche nach geeigneten Sachbilanzdaten nicht zu erschweren, wird in dieser Arbeit die erste hochaufgeständerte Variante mit Ackerkultur untersucht.

Die geplante APV-Anlage soll auf einer Fläche der Fakultät für Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst der Fachhochschule Erfurt (FH Erfurt) mit einer Flächengröße von 1 ha erfolgen (ebd.). Gemäß Trommsdorff et al. (2020, S. 34) verfügen APV-Systeme derzeit über Leistungen zwischen 500 und 800 kWp pro Hektar, weswegen bei den bisherigen Berechnungen für die hochaufgeständerte Variante ein Durchschnittswert von 600 kWp angesetzt wurde. In Anlehnung an Scharf et al. (2021, S. 31) wurde zudem ein Mindestwert der Stromproduktion mit 1.100 kWh/kWp festgelegt, sodass mit einem Ertrag von 660 MWh pro Jahr gerechnet wurde. Der gesamte erzeugte Strom soll für den Eigenverbrauch genutzt werden. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in Vollmer (2021) getroffenen Annahmen.

*Tabelle 3: Parameter für die Anlagendimensionierung nach Vollmer (2021)*

Parameter	Wert	Einheit
Anlagenleistung	600	kWp
Ertrag nach Scharf et al. (2021)	660.000	kWh/a
Ertrag	660.000	kWh/a
Spezifische Stromerzeugung	1.100	kWh/kWp
Prozentualer Anteil Netzeinspeisung	0	%
Prozentualer Anteil Eigenverbrauch	100	%
Anlagenfläche	10.000	m <sup>2</sup>
Anlagenfläche [ha]	1	ha

In dem in Vollmer (2021) betrachteten APV-System wird eine Bewirtschaftung mit der Ackerkultur Kartoffeln betrachtet. Gemäß DIN SPEC 91434 ist hinsichtlich der landwirtschaftlichen Bearbeitung zu beachten, dass der Flächenverlust durch die technischen Anlagen der PV-Module samt Unterkonstruktion höchstens 10 bis 15 % betragen darf. Demnach müssen 90 % der Anlagenfläche mit den Kartoffeln bewirtschaftbar sein.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden jedoch bisher keine Angaben zur genauen Anlagendimension oder zur genutzten Modultechnologie gemacht. Wie in Kapitel 2.4 ausführlich beschrieben, erfolgen in DIN SPEC 91434 grobe Festlegungen zur Anlagendimensionierung. Bezüglich der Höhe wird ein Mindestwert von 2,1 m angegeben. Wichtiger ist jedoch, dass die Dimensionierung sowohl in der Höhe als auch bezüglich der Modulreihenabstände die landwirtschaftliche Bewirtschaftung mit Maschinen sowie die Licht-

und Wasserverfügbarkeit nicht oder wenig negativ beeinflussen. Um diese Vorgaben zu erfüllen, wird im Folgenden ein bereits umgesetztes APV-System mit Kartoffelproduktion überprüft.

Ein in Deutschland bereits umgesetztes APV-System, in dem ebenfalls Kartoffeln angebaut werden, ist die APV-Anlage Heggelbach in der Gemeinde Herdwangen-Schönach in Süddeutschland. Um eine Bewirtschaftung zu gewährleisten wurden die Module in einer Höhe von über 5 m angebracht, die Gesamthöhe der Anlage beträgt 7,8 m. Die landwirtschaftliche bearbeitbare Fläche beträgt 19 m pro Einheit. Insgesamt wurden sieben Einheiten angelegt, sodass die Anlage eine Gesamtbreite von 133 m aufweist. Die Länge der Einheiten beträgt etwa 13 m und wurde ebenfalls an die für die Ernte genutzten Maschinen angepasst. Insgesamt umfasst die Anlage in ihrer Länge zwei Einheiten, sodass sie eine Gesamtlänge von etwa 26 m aufweist. Um die Stromproduktion sowie die Pflanzenproduktion zu optimieren, wurden bifaziale Module, genauer 720 bifaziale Siliziummodule der Marke SolarWorld mit einer Leistung von 270 Watt, verwendet. Die gesamte Modulfläche von 1.206 m<sup>2</sup> erreicht somit eine Leistung von 194,4 kWp. Die Abstände zwischen den Modulen sind 27 % größer als die einer regulären FF-PV-Anlage (Schindele et al. 2020).

Um vor Errichtung der Anlage die Lichtverteilung zu untersuchen, nutzten Trommsdorff et al. (2021) vor der Installation der Anlage Heggelbach einen Ray-tracer der University of California zur Durchführung von Lichtsimulationen in einer virtuellen Umgebung, welcher sowohl direkte als auch diffuse Strahlung berücksichtigt, um auch die Rückstrahlung des Bodens mit einbeziehen zu können. Die Simulationen wurden als Basis für den Entwurf einer APV-Anlage verwendet. Die virtuelle Anlage wurde auf einem 24 m x 133 m großem Feld angelegt und schließlich mit kleineren Veränderungen als echte Anlage in der Nähe des Bodensees umgesetzt. Die Module wurden mit einer Neigung von 20° und in einer Höhe von 5 m installiert. Des Weiteren wurden die Biomasse- und Stromerträge in Abhängigkeit vom Reihenabstand untersucht. Die Simulationen der Studie zeigten, dass die Drehung der Module in Richtung Südwest oder Südost in einer verbesserten homogenen Strahlungsverteilung resultiert. Für die Reihenabstände ergaben die Simulationen, dass die verfügbare Strahlung am Boden mit den Reihenabständen besonders in den Sommermonaten ansteigt. Dementsprechend nehmen auch die Biomasserträge aller in Tabelle 2 genannten Kategorien mit steigendem Reihenabstand zu, wobei die erste Kategorie (+) ein Optimum bei einem Reihenabstand von 4 m erreicht (Trommsdorff et al. 2021).

Letztendlich wurden die Ergebnisse genutzt, um die APV-Anlage Heggelbach zu entwerfen. Hierfür wurde eine Fruchtfolge von Kartoffel, Sellerie, Klee gras und Winterweizen festgelegt. Die Ernteerträge sollten dabei mindestens 80 % des Referenzbetrages unter nicht beschatteten Bedingungen erreichen (vgl. Kapitel 2.4).

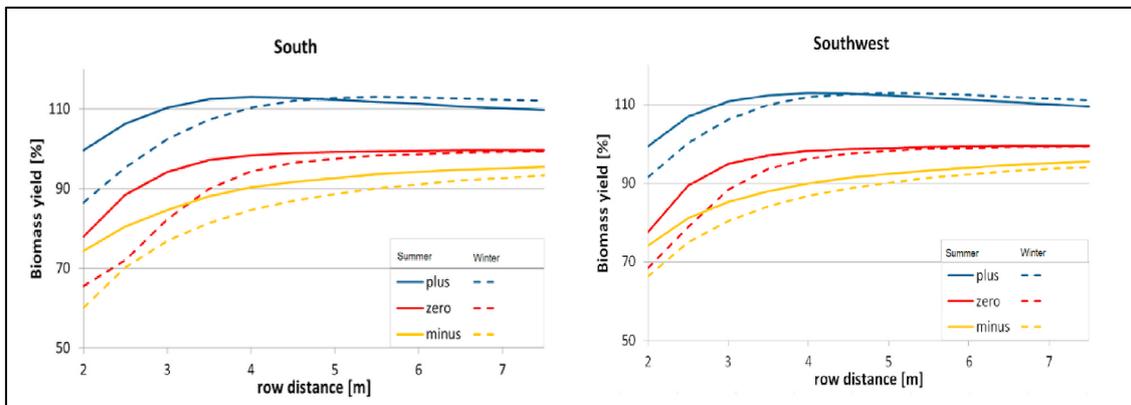


Abbildung 16: Biomasseerträge der Pflanzenkategorien +, 0 und – in % in Abhängigkeit vom Modulreihenabstand mit Ausrichtungen gen Süden (links) und Südwesten (rechts) (Trommsdorff et al. 2021)

Die Reduzierung der Erträge variierte zwischen den einzelnen Kulturen und aufgrund unterschiedlicher Wetterbedingungen zwischen den Jahren der Bewirtschaftung. Während beim Klee gras im Jahr 2017 mit 5 % die geringste Ertragsminderung im Vergleich zur Referenzfläche erreicht wurde, lagen die Erträge der anderen Kulturen etwa 18 bis 19% unter denen der Referenzfläche. Im darauffolgenden Jahr stiegen die Erträge von Winterweizen, Kartoffel und Sellerie jedoch um 3, 11 und 12 %, während beim Klee gras eine Ertragsminderung von etwa 8 % stattfand. Da das Jahr 2018 einen besonders warmen und trockenen Sommer aufwies, gehen die Autoren von einem besonders positiven Effekt unter trockenen und warmen Umweltbedingungen aus, welcher sich im Rahmen der durch den Klimawandel steigenden Temperaturen und verstärkten Extremwetterereignissen verstärken dürfte (Weselek et al. 2021, S. 13). Auf Basis der untersuchten Anlage geben sowohl Weselek et al. (2021) als auch Trommsdorff et al. (2021) Durchschnittswerte für die Leistung einer APV-Anlage mit Kartoffelproduktion an. Für die installierte Leistung ergeben sich demnach Durchschnittswerte von 519,18 kWp pro ha für eine APV-Anlage und 689,66 kWp pro ha für eine konventionelle FF-PV-Anlage (ebd., S. 10).

Tabelle 4 fasst das Anlagendesign der Anlage Heggelbach gemäß Trommsdorff et al. (2021, S. 9) zusammen. Die Angaben weichen geringfügig von den Angaben nach Schindele et al. (2020) ab (Angaben in Klammern).

*Tabelle 4: Zusammenfassung des Anlagendesign der APV-Anlage Heggelbach nach Trommsdorff et al. (2021, S. 9)*

Parameter	Wert	Einheit
Länge/Breite des APV-Systems	25,3 (26), 136,3 (133)	m
Abstände zwischen den Einheiten/Säulen (Länge/Breite)	12,4 (13), 19	m
Modulreihenbreite	3,4	m
Reihenabstände	9,5	m
Höhe	5,5 (5)/8	m
Orientierung (Azimuth)	232,5° (52,5° SW)	
Module	SolarWorld AG, SW 270 duo (bifazial)	
Anzahl der Module	720	Stück
Gesamtleistung	194,4	kWp
Modulfläche	1.206	m <sup>2</sup>
Neigungswinkel	20	°
Inverter	5 x Huawei, SUN2000-36KTL	
Leistung pro Inverter	36	kVA

Auf Basis der in den Tabellen 3 und 4 dargelegten Angaben wurde die Anlagendimensionierung für die in dieser Arbeit untersuchten Anlage angepasst und ergänzt. Für die Dimensionierung der Anlage werden die Angaben zu den Abständen zwischen den Einheiten, der Modulreihenbreite, den Reihenabständen sowie zur Höhe nach Schindele et al. (2020) bzw. Trommsdorff et al. (2021) übernommen, da die Anlage bereits an die Bewirtschaftung der Kartoffelernte angepasst wurde. Um die Anlage auf eine 1 ha große Fläche zu dimensionieren, wird das Anlagendesign Heggelbach (2 Längeneinheiten) um eine Längeneinheit (+13 m) erweitert, sodass sich eine Gesamtlänge von 39 m ergibt. Die Breite wird von sieben auf 13 Einheiten erweitert, sodass sich bei einer Breite von 19 m pro Einheit eine Gesamtbreite von 247 m ergibt. Die Anlagenfläche aus Tabelle 3 (1 ha) wird demnach auf eine Gesamtgröße von 9.633 m<sup>2</sup> angepasst. Abbildung 17 zeigt die Maße einer Einheit.

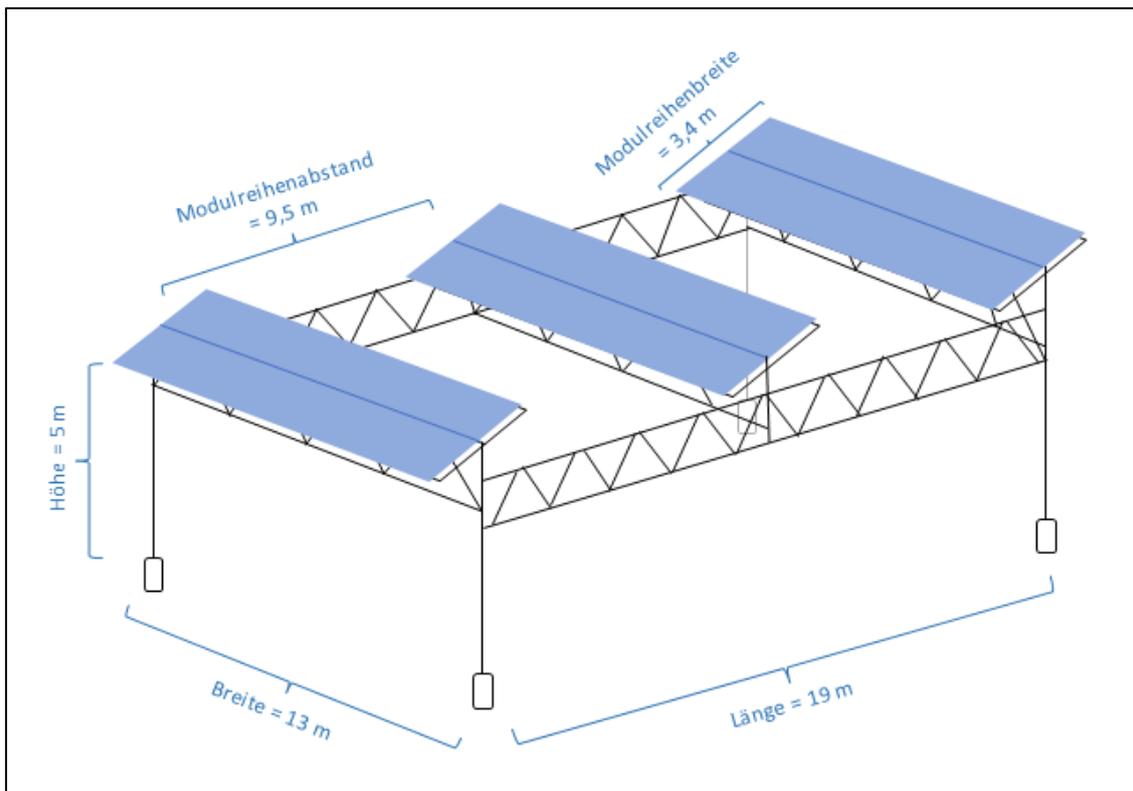


Abbildung 17: Dimensionierung einer Einheit in Anlehnung an die APV-Anlage Heggelbach, o.M.

Gemäß der Angaben nach Schindele et al. (2020) ergibt sich bei einer Leistung von 519,18 kWp pro Hektar und einer Leistung von 0,27 kWp pro Modul für eine 9.633 m<sup>2</sup> große Fläche eine Anlagenleistung von 500,13 kWp. Demnach kann die Anlagenfläche mit 1.852 Modulen bestückt werden (Rechnung 1).

$$\text{Anzahl der Module} = \frac{500,13 \text{ kWp}}{0,27 \frac{\text{kWp}}{\text{Modul}}} = 1.852,3 \text{ Module} \quad (1)$$

Laut Herstellerangaben weisen die Module Maße von 1.675 x 1.001 x 33 mm auf (Sonnenshop e.K. 2021). Bei 1.852 Modulen ergibt sich eine Modulfläche von 3.105,2 m<sup>2</sup> (Rechnung 2).

$$\text{Modulfläche} = 1.852 \text{ Module} * 1,68 \frac{\text{m}^2}{\text{Modul}} = 3.105,2 \text{ m}^2 \quad (2)$$

Als Inverter wird ein 500 kW-Inverter angesetzt. Zur Ermittlung der Stromerträge werden zudem weitere für die Ökobilanzierung wichtige Parameter festgelegt, die einen starken Einfluss auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung haben. Diese Parameter sind die Nutzungsdauer der Anlagen, die Lebensdauer aller Anlagenkomponenten, die Modulwirkungsgrade, die Performance Ratio, die Sonneneinstrahlung am Standort Erfurt sowie Degradationsverluste.

Aufgrund der Auswirkungen der für diese Parameter getroffenen Annahmen, ist eine ausreichende Dokumentation notwendig. Um die Vorgehensweise bei der Ökobilanzierung von PV-Systemen zu vereinheitlichen und damit die Ergebnisse vergleichbarer zu gestalten, werden durch die Arbeitsgruppe des Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS) der IEA zu den oben genannten Parametern Empfehlungen ausgesprochen, die als Grundlage für Annahmen in Ökobilanzierungen genutzt werden sollten. Die festgelegten Werte nach Frischknecht et al. (2016) sind in Tabelle 5 dargestellt. Für die Wirkungsgrade der Module und Inverter wird auf die Herstellerspezifischen Angaben zurückgegriffen.

Tabelle 5: PV-spezifische Annahmen in der Nutzungsphase für die Szenarien 1 und 2

	Wert	Einheit	Quelle
<b>Lebensdauer</b>			
Module	30	Jahre	(Frischknecht et al. 2016)
Inverter (PV-Anlagen über 1 MW)	30	Jahre	
Unterkonstruktion	30-60	Jahre	
Kabel	30	Jahre	
<b>Performance Ratio</b>			
FF-PV-Anlagen	0,8	Faktor	(Frischknecht et al. 2016)
<b>Degradation</b>			
FF-PV-Anlage	0,7	%/a	(Frischknecht et al. 2016)
Sensitivitätsanalyse	0,5	%/a	
<b>Wirkungsgrad</b>			
Module	17,57	%	(SolarWorld o.J.)
Inverter	98,6	%	(Huawei o.J.)

Der Stromertrag in der Nutzungsdauer von 30 Jahren bei den oben beschriebenen Parametern ergibt sich gemäß Hengstler et al. (2021) über die Formel:

$$\begin{aligned}
 \text{Stromertrag (über Nutzungsdauer je 1 m}^2 \text{ Modulfläche)} = & \\
 & (\text{Moduleffizienz} * \text{Performance ratio} * \text{Nutzungsdauer}_{(a)} \\
 & * \text{Sonneneinstrahlung (Anlagenstandort)}_{\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}\right)} \\
 & - \text{Degradationsverluste (Nutzungsdauer)}_{\left(\text{kWh/m}^2\right)}
 \end{aligned}$$

Bei einer Sonneneinstrahlung von etwa 1.100 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) in Erfurt ergibt sich demnach ein Stromertrag von 4.638,33 kWh/m<sup>2</sup> Modulfläche. Bei einer Modulfläche von 3105,2 m<sup>2</sup> werden insgesamt Stromerträge von 14.402.942,3 kWh über einen Zeitraum von 30 Jahren erreicht. Dies entspricht einem jährlichen Stromertrag von 480.098,077 kWh/a, was in etwa dem regionalen

Durchschnitt der Jahre 2010-2020 entspricht (SFV 2021). Die Durchschnittswerte für die Region Arnstadt / Eisenach / Erfurt / Gotha / Nordhausen / Weimar sind in Anhang I dargestellt.

Für die Kartoffelerträge in der Anlage Heggelbach kann in Bayern gemäß Schindele et al. (2020, S. 13) unter normalen Wetterbedingungen mit 334,72 dt pro Hektar und Jahr unter einer APV-Anlage und 418,40 dt pro Hektar ohne PV-System gerechnet werden. Dies entspricht einem Verhältnis von 1,25. Der langjährige Durchschnitt der Kartoffelernte in Thüringen betrug 2014 bis 2019 395 dt pro Hektar. In den Jahren 2018 bis 2020 wurden aufgrund extremer Trockenperioden jedoch unterdurchschnittliche Kartoffelernten in Thüringen erreicht, die 2018 sogar bei -31,6 % und 2020 noch bei -14,4 % lagen (BMEL 2020a; TLS 2019, 2020). Aufgrund dieses Trends und der Ergebnisse nach Weselek et al. (2021, S. 11), die eine Ertragssteigerung bei extremen Trockenperioden von Kartoffeln unter APV von 11 % angaben, wird in dieser Studie für das Szenario eine leichte Steigerung der Kartoffelernte um 5 % im Vergleich zum Hektarertrag des Jahres 2020 (338,2 dt pro Hektar) angenommen. Demnach ergibt sich ein Hektarertrag von 355,11 dt pro Hektar für das APV-Szenario.

Gemäß DIN SPEC 91434 erfolgt die Bewirtschaftung auf 90 % der Fläche (8.669,7 m<sup>2</sup>). Für diese Flächengröße ergibt sich demnach eine zu erwartende Erntemenge von 307,87 dt pro Jahr (Rechnung 3). Über einen Zeitraum von 30 Jahren ergibt sich eine Erntemenge von 9.236,09 dt.

$$\begin{aligned} \text{Erntemenge} &= \frac{355,11 \frac{\text{dt}}{\text{ha}}}{a} * 8.669,7 \text{ m}^2 = \frac{0,035511 \frac{\text{dt}}{\text{m}^2}}{a} * 8.669,7 \text{ m}^2 \\ &= 307,87 \frac{\text{dt}}{a} \end{aligned} \quad (3)$$

Die Angaben in den Tabellen 3 und 4 werden demnach angepasst und ergänzt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Anlagendimensionierung Szenario 1

Parameter	Wert	Einheit
<b>Dimensionierung</b>		
Anlagenlänge	39,00 (3 x 13)	m
Anlagenbreite	247,00 (13 x 19)	m
Gesamtfläche der Anlage	9.633	m <sup>2</sup>
Höhe	5	m
<b>Stromproduktion</b>		
Leistung	500,13	kWp
Leistung der Module	0,27	kWp/Modul
Anzahl Module	1.852,33	Module
Fläche pro Modul	1,68	m <sup>2</sup> /Modul

Parameter	Wert	Einheit
Modulfläche	3.105,76	m <sup>2</sup>
Durchschn. Sonneneinstrahlung Erfurt	1.100	kWh/(m <sup>2</sup> *a)
Stromertrag der Anlage über 30 Jahre	14.402.942,3	kWh
Stromertrag der Anlage pro Jahr	480.098,077	kWh/a
Inverter	500	kW
Kartoffelproduktion		
Anbaufläche (90%)	8.669,8	m <sup>2</sup>
Durchschn. Kartoffelerträge APV	0,036	dt/m <sup>2</sup> /a
Kartoffelerträge Anlage pro Jahr (bez. auf Anbaufläche)	307,87	dt/a
Kartoffelerträge der Anlage über 30 Jahre	9.236,09	dt

4.2.1.2 Szenario 2: Separate Erzeugung von Kartoffeln und PV-Strom

Im zweiten Szenario wird eine Variante betrachtet, bei der die Kartoffel- und die Stromproduktion konventionell getrennt erfolgen. Die FF-PV-Anlage bzw. die landwirtschaftliche Produktion werden so dimensioniert, dass sie die gleiche Menge an Strom bzw. Ernteerträgen wie in Szenario 1 aufweisen. Da dieses Szenario im Gegensatz zu Szenario 1 nur zum Vergleich dient und auf keiner real existierenden Fläche angelegt werden soll, bestehen keine festgesetzten Flächenmaße, an die sich gehalten werden muss (vgl. 1 ha in Szenario 1).

Schindele et al. (2020, S. 10) geben als Richtwert für eine FF-PV-Anlage eine Leistung von 689,66 kWp pro Hektar an. Um den gleichen Stromertrag von 480.098,077 kWh/a bzw. die gleiche Anlagenleistung von 500,13 kWp wie in Szenario 1 zu erreichen, werden für die FF-PV-Anlage demnach 7.251,83 m<sup>2</sup> benötigt (Rechnung 4). Der gesamte Stromertrag soll auch bei diesem Szenario selbst verbraucht werden. Die Modulfläche entspricht der aus Szenario 1, da die gleichen Module verwendet werden.

$$\begin{aligned}
 \text{Ertrag pro m}^2 \text{ und Jahr} &= 0,068966 \frac{\text{kWp}}{\text{m}^2} * \frac{959,95 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}}{a} = \frac{66,20 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{a} \\
 \text{Anlagengröße} &= 480.098,077 \frac{\text{kWh}}{a} : \frac{66,20 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{a} = 7.251,83 \text{ m}^2
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Für die Kartoffelerträge unter konventionellen Anbaubedingungen, d.h. ohne installierte PV-Anlage, wird der aufgrund von anhaltenden Hitzeperioden der Jahre 2018 bis 2020 Hektarertrag des Jahres 2020 angenommen. Dieser betrug 338,2 dt pro Hektar (BMEL 2020a, S. 46). Um den Kartoffelertrag von Szenario 1 mit 307,87 dt pro Jahr zu erreichen, ist demnach eine Anbaufläche von 9.103,19 m<sup>2</sup> erforderlich (Rechnung 5).

$$Anbaufläche = \frac{307,87 \frac{dt}{a}}{\frac{338,2 \frac{dt}{ha}}{a}} = \frac{307,87 \frac{dt}{a}}{0,03382 \frac{dt}{m^2}} = 9.103,19 m^2 \quad (5)$$

Tabelle 7: Anlagendimensionierung Szenario 2

Parameter	Wert	Einheit
<b>Dimensionierung</b>		
Gesamtfläche der Anlage	7.251,83	m <sup>2</sup>
<b>Stromproduktion</b>		
Leistung FF-PV pro Hektar	689,66	kWp/ha
Leistung FF-PV pro m <sup>2</sup>	0,069	kWp/m <sup>2</sup>
Stromertrag der Anlage über 30 Jahre	14.402.942,3	kWh
Stromertrag der Anlage pro Jahr	480.098,077	kWh/a
Ertrag aus Szenario 1	959,95	kWh/kWp/a
Stromertrag pro m <sup>2</sup> und Jahr	66,20	kWh/m <sup>2</sup> /a
<b>Kartoffelproduktion</b>		
Kartoffelertrag über 30 Jahre	9.236,09	dt
Kartoffelertrag pro Jahr	307,87	dt/a
Kartoffelertrag pro m <sup>2</sup>	0,034	dt/m <sup>2</sup> /a
Anbaufläche	9.103,19	m <sup>2</sup>
<b>Gesamtfläche FF-PV-Anlage und Kartoffelanbau</b>	<b>16.355,02</b>	<b>m<sup>2</sup></b>

Für das Szenario 2 ergibt sich bei getrennt stattfindender Produktion somit eine Gesamtfläche von 1,6355 ha (Tabelle 7) im Vergleich zur Anlagengröße von 0,96 ha in Szenario 1.

#### 4.2.1.3 Szenario 3: Separate Erzeugung von Kartoffeln ohne PV-Strom

Im dritten Szenario wird der Kartoffelanbau unter denselben konventionellen Anbaubedingungen wie in Szenario 2, jedoch ohne PV-Stromerzeugung untersucht. Um ebenfalls einen Output von 14.402.942,3 kWh (30 Jahre) zu erreichen und damit die Stromerzeugung zu berücksichtigen, wird die Stromproduktion in diesem Szenario durch konventionelle Energiequellen, d.h. aus dem durchschnittlichen deutschen Strommix modelliert. So wird die Vergleichbarkeit aller Szenarien in Bezug auf die Energie- und Kartoffelproduktion gewährleistet. Tabelle 8 zeigt die Anlagendimensionierung sowie die Annahmen zur Stromerzeugung des Szenarios 3. Für die Kartoffelproduktion ergibt sich demnach eine Fläche von 0,913 ha.

Tabelle 8: Anlagendimensionierung Szenario 3

	Wert	Einheit
<b>Stromproduktion</b>		
Stromerzeugung (Deutscher Strom-Mix, 30 Jahre)	14.402.942,3	kWh

	Wert	Einheit
<b>Fläche Kartoffelanbau</b>		
Kartoffelertrag über 30 Jahre (bez. auf Anbaufläche)	9.236,09	dt
Kartoffelertrag Anlage	307,87	dt/a
Kartoffelertrag pro m <sup>2</sup>	0,03382	dt/m <sup>2</sup> /a
Anbaufläche	9.103,19	m <sup>2</sup>
<b>Gesamtfläche Kartoffelanbau</b>	<b>9.103,19</b>	<b>m<sup>2</sup></b>

#### 4.2.2 Funktionelle Einheit

Auf Basis der in Kapitel 4.2.1 und mit Bezug auf die in Kapitel 3.2.1 getroffenen Aussagen wird im Folgenden die Auswahl der funktionellen Einheit für die Ökobilanzierung begründet. Die funktionelle Einheit dient der Normalisierung der Ergebnisse aus der Wirkungsabschätzung und erlaubt die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme. Die funktionelle Einheit in Ökobilanzierungen landwirtschaftlicher Produkte basieren in der Regel auf der Masse der Endprodukte in kg, dem Energie- oder Proteingehalt der Erzeugnisse in kJ oder der Großvieheinheit. In manchen Studien kommen auch Kombinationen dieser Einheiten, d.h. mehrere funktionelle Einheiten, zum Tragen, da die komplexen, landwirtschaftlichen Systeme hierdurch besser interpretierbar und verständlicher abgebildet werden (Roy et al. 2009, S. 8). Diese funktionellen Einheiten stellen somit geeignete Methoden dar, um verschiedene Produktionsabläufe zu untersuchen (vgl. Heller et al. 2013, S. 12632). Jedoch umfassen APV-Systeme Funktionen, wie bspw. die Stromproduktion, die durch diese Einheiten nicht abgebildet werden (Leon und Ishihara 2018a, S. 5). Leon und Ishihara (2018a, S. 12) schlagen deshalb eine Kombination aus mehreren funktionellen Einheiten vor.

Frischknecht et al. (2016, S. 8) schlagen für PV-Systeme eine Funktionseinheit in kWh vor, da dies einen Vergleich verschiedener PV-Technologien und Module sowie zu anderen stromproduzierenden Technologien zulässt. In Anlehnung an Pascaris et al. (2021), bei denen ebenfalls drei Szenarien im Hinblick auf die Erzeugung von Strom und Kaninchenfleisch in einem APV-System untersucht wurden, werden in dieser Arbeit die funktionellen Einheiten von **1 kWh Strom sowie 1 kg Kartoffeln pro Jahr in Thüringen bei den in Kapitel 4.2.1 dargestellten Annahmen zu Strom- und Kartoffelerträgen** festgelegt, die den Multiple-Output-Charakter der zuvor beschriebenen Systeme darstellen. Diese Vorgehensweise bei der Wahl der funktionellen Einheit ist nicht üblich. Da die Szenarien in Kapitel 4.2.1 so angelegt wurden, dass alle zu vergleichenden Systeme dieselben Outputs aufweisen, wird jedoch der Allokation entgegengewirkt, indem eine Systemerweiterung durchgeführt wird (vgl. Abbildung 13). In den

Szenarien 2 und 3 werden demnach zwei Ökobilanzierungen pro System durchgeführt. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden am Ende summiert (vgl. Pascaris et al. 2021, S. 4).

#### 4.2.3 Produktsystem und Systemgrenze

Laut DIN EN ISO 14044 werden Produktsysteme in die Bereiche Materialien/Rohstoffgewinnung, Herstellung, Nutzung und Entsorgung eingeteilt. Leon und Ishihara (2018b) geben ein Produktsystem für APV-Anlagen mit Tomatenproduktion an, welches jedoch nur auf dem Cradle-to-Gate-Prinzip beruht und die Entsorgung und das Recycling nicht mit einbezieht (Abbildung 18). Im Folgenden wird auf beide Seiten der APV-Produkte (Strom und Kartoffeln) näher eingegangen.

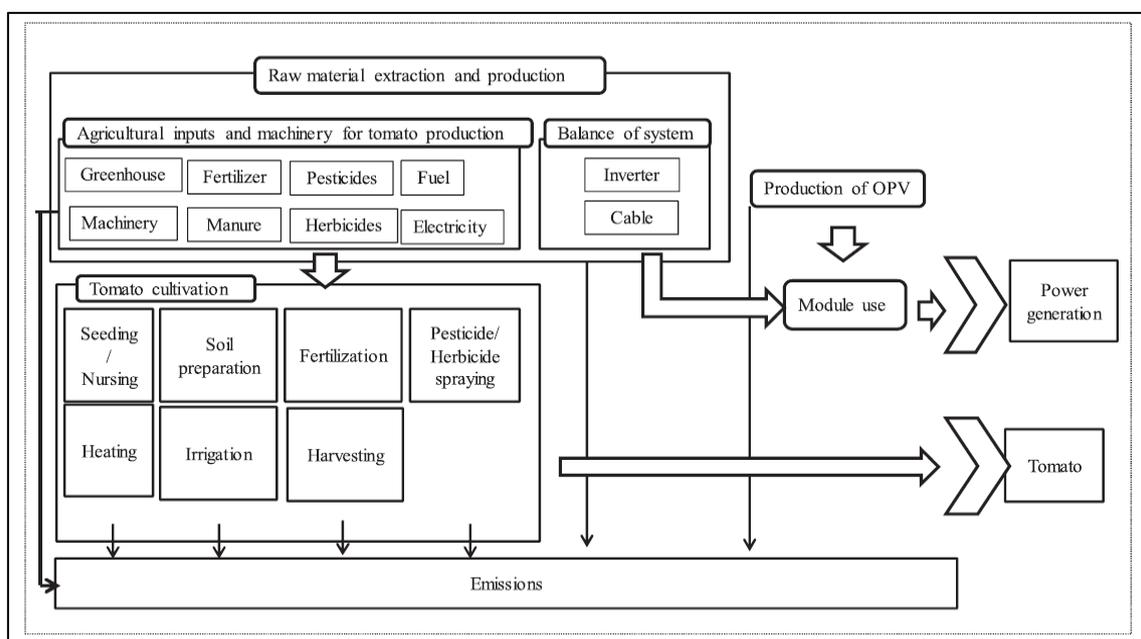


Abbildung 18: Cradle-to-Gate-Produktsystem einer APV-Anlage mit Tomatenproduktion (Leon und Ishihara 2018b)

#### Systemgrenze der Kartoffelproduktion

Die Systemgrenze der Kartoffelproduktion wird i.d.R. in die Bereiche Material/Energieversorgung, Aussaat einschl. der Bodenbearbeitung, Unkrautbekämpfung, Düngung und Bewässerung, Wachstum (s. Aussaat) und Ernte eingeteilt (Timpanaro et al. 2021; Scuderi et al. 2021; Rös et al. 2010; Mouron et al. 2016; Kowalczyk 2019). Die Rohmaterialien und die Energieversorgung umfassen die Inputs:

- Kraftstoffe für Maschinen
- Dünger
- Pestizide
- Kartoffelsamen

- Wasser

In der Regel enthalten die Ökobilanzierungen von landwirtschaftlichen Produkten lediglich Produktsystemgrenzen nach dem Cradle-to-Gate-Prinzip, d.h. bis zu dem Zeitpunkt, an dem das Produkt (bspw. die Kartoffel) das System verlässt. Da die Weiterverarbeitung, die Verpackungen und das Recycling der Verpackungen stark zwischen den einzelnen Kartoffelprodukten variieren, fehlen für die herkömmliche Betrachtung der Kartoffelproduktion geeignete Daten für diese Lebensabschnitte (Scuderi et al. 2021, S. 5; Timpanaro et al. 2021, S. 6; Kowalczyk 2019, S. 3). Sie werden mit einbezogen, wenn die Umweltwirkungen bestimmter weiterverarbeiteter Produkte wie bspw. Pommes-Frites untersucht werden sollen (vgl. Mouron et al. 2016). Da in der vorliegenden Studie lediglich die Kartoffelproduktion in dem APV-System betrachtet wird, und nicht die Weiterverarbeitung zu einem bestimmten Produkt, wird die Systemgrenze ebenfalls nach dem Cradle-to-Gate-Prinzip ausgerichtet. Die Prozesse nach der Ernte wie das Waschen der Kartoffeln, das Verpacken, die Lagerung und der Transport werden demnach als **Abschneidekriterien** definiert und nicht betrachtet.

#### **Systemgrenze der PV-Strom-Produktion**

Für die PV-Seite definieren Frischknecht et al. (2016, S. 9 f.) die für PV-Systeme relevanten Schritte eines Produktsystems samt der Systemgrenzen. Demnach werden die oben genannten Bereiche angepasst. Für die Material/Rohstoffgewinnung als auch für die Herstellung werden die folgenden Teilbereiche als relevant definiert:

- Rohmaterialien und Energieversorgung
- Herstellung der Unterkonstruktion
- Herstellung der Inverter
- Herstellung der PV-Module
- Herstellung der Kabel
- Herstellung aller weiteren Komponenten, die zur Stromerzeugung und zur Einspeisung ins Netz benötigt werden

Der letzte Schritt wird aufgrund des Eigengebrauchs des PV-Stroms nicht betrachtet.

Des Weiteren ergänzen Frischknecht et al. (2016) den Konstruktionsprozess der Anlage, der die Schritte Transport zum Kraftwerksstandort sowie Konstruktion und Installation, samt des Fundaments, der Stützstrukturen und des Zaunes beinhaltet.

Für die Nutzungsphase ergeben sich die Teilbereiche:

- Hilfsstrombedarf
- Instandhaltung
- Reinigung der Module
- Reparaturen und Ersatz

Nach Frischknecht et al. (2016, S. 11 f.) werden zudem auch die folgenden Teilbereiche für das Lebensende festgelegt:

- Rückbau und Demontage
- Abfallaufbereitung
- Entsorgung
- Transporte
- Recycling

Von den in diesem Projekt bekannten Ökobilanzierungen von APV-Systemen nutzten zwei Studien lediglich das Cradle-to-Gate-Prinzip, d.h. das Lebensende einschl. des Recyclings werden nicht betrachtet (Leon und Ishihara 2018b; Pascaris et al. 2021). Bei den übrigen zwei Studien ist die Systemgrenze nicht eindeutig beschrieben, es bestehen keine (Ott et al. 2020), bzw. spärliche Aussagen zum Umgang mit dem Lebensende (Agostini et al. 2021). In Anlehnung an die Ökobilanzstudien mit ausreichender Dokumentation (Pascaris et al. 2021; Leon und Ishihara 2018b) und auf Grundlage der verfügbaren Informationen zur Kartoffelproduktion findet die Ökobilanzierung in dieser Studie ebenfalls nach dem **Cradle-to-Gate-Prinzip** statt, da sowohl Strom- als auch Kartoffelproduktion dieselbe Systemgrenze aufweisen sollten (vgl. Kapitel 3.2.1). Hierdurch entsteht zudem ein stärkerer Fokus auf die eigentliche Bodennutzung und den Flächenverbrauch der Anlagen (vgl. Timpanaro et al. 2021, S. 6). Neben dem Lebensende gelten die Arbeitswege zur Anlage und zurück sowie die Aktivitäten in den Bereichen Verwaltung, Marketing sowie Forschung und Entwicklung als nicht relevant und damit als **Abschneidekriterien** für PV-Systeme (ebd., S. 12).

Während in dem APV-System gemäß DIN EN ISO 14044 der Fokus auf der landwirtschaftlichen Produktion liegt und die Kartoffeln das Hauptprodukt darstellen, wird die Stromproduktion als Nebenprodukt angesehen (Leon und Ishihara 2018b, S. 111).

Der zeitliche und technologische Erfassungsbereich der PV-Technologie umfasst marktreife Technologien die hinsichtlich der Wirkungsgrade und weiterer Leistungskennwerte Zeiträume von 2017 bis 2021 abbilden. Die Hintergrunddaten der für die Wirkungsabschätzung genutzten Datenbank umfassen die Jahre 2011 bis 2018 (vgl. Hengstler et al. 2021, S. 123 f.).

Der geografische Erfassungsbereich umfasst den Standort Thüringen in Deutschland. Für die Herstellung einzelner Technologiebestandteile werden auch Standorte außerhalb Deutschlands und Europas betrachtet.

Abbildung 19 zeigt die gesamte Systemgrenze des Szenarios 1. Die Systemgrenze für Szenario 2 unterscheidet sich nur durch den nicht betrachteten positiven Einfluss der Überdachung mit PV-

Modulen. Bei der Systemgrenze für Szenario 3 wird die PV-Stromproduktion durch den Strombezug aus dem deutschen Strommix gemäß Ecoinvent v6 ersetzt.

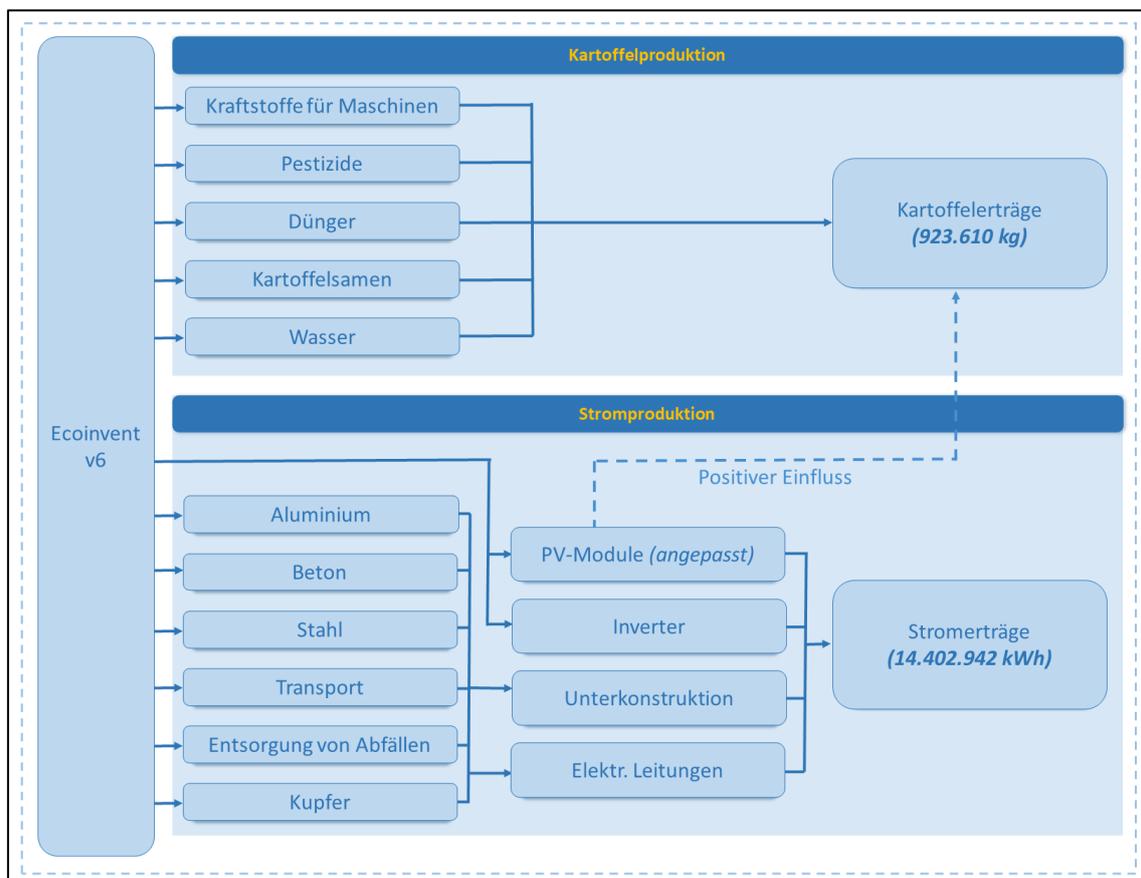


Abbildung 19: Systemgrenze des Szenarios 1

#### 4.2.4 Methode für die Wirkungsabschätzung

Zur Abschätzung der Umweltwirkungen von PV-Systemen sollen nach Frischknecht et al. (2016, S. 13 f.) die Midpoint-Indikatoren der Empfehlungen des „Product- and Organisation Environmental Footprint“ (PEF) Frameworks genutzt werden (European Commission 2013). Die PEF-Methodik hat das Ziel, eine harmonisierte Methodik zur Berechnung der Umweltwirkungen im Rahmen von Ökobilanzierungen bereitzustellen. Im Jahr 2018 wurden die dort beschriebenen Empfehlungen zur Wirkungsabschätzung durch Fazio et al. (2018) aktualisiert. Sie wurden bereits in der Ökobilanzierung einer APV-Anlage nach Agostini et al. (2021, S. 3 f.) genutzt und eignen sich daher für die Anwendung in APV-Systemen. Tabelle 9 zeigt die mit der PEF-Methode zu betrachtenden Wirkungskategorien und -indikatoren. Die dazugehörigen Charakterisierungsmodelle finden sich in Anhang II. Es ist anzumerken, dass die dargestellten Wirkungskategorien samt der Wirkungsindikatoren lediglich Annäherungen darstellen, die keine Aussagen zu tatsächlichen Umweltwirkungen aufzeigen. Vielmehr werden mögliche Wirkungen

aufgezeigt, die auftreten können, wenn die in der jeweiligen Methode angewandten Randbedingungen eintreten (Hengstler et al. 2021, S. 130). Zur Vereinfachung werden die Kategorien den Oberkategorien Klima, Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcen zugeordnet. Die einzelnen Kategorien können jedoch auch Auswirkungen auf die Bereiche der anderen Wirkungskategorien haben.

Tabelle 9: Ausgewählte Wirkungskategorien und -indikatoren nach Fazio et al. (2018, S. 6 f.)

Wirkungskategorie	Indikator	Einheit	
Klima	<b>Climate Change</b>	Strahlungsantrieb als Treibhauspotenzial (Global Warming Potential – GWP 100)	kg CO <sub>2</sub> eq
	<b>Ozone Depletion</b>	Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg CFC-11 eq
	<b>Ionising Radiation</b>	Vergleichende toxische Einheit für den Menschen (CTU <sub>h</sub> )	CTU <sub>h</sub>
	<b>Photochemical Ozone Formation</b>	Vergleichende toxische Einheit für den Menschen (CTU <sub>h</sub> )	CTU <sub>h</sub>
Gesundheit	<b>Particulate Matter</b>	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber PM2.5	Krankheitsfälle
	<b>Human Toxicity, non-cancer</b>	Expositionseffizienz des Menschen relativ zu U235	kBq U <sup>235</sup>
	<b>Human Toxicity (cancer)</b>	Erhöhung der Ozonkonzentration in der Troposphäre	kg NMVOC eq
Ökosysteme	<b>Acidification</b>	Kumulierte Überschreitung	Mol H <sup>+</sup> eq
	<b>Eutrophication (freshwater)</b>	Kumulierte Überschreitung	Mol N eq
	<b>Eutrophication (marine)</b>	Anteil der Nährstoffe, der das Süßwasser-Endkompartiment erreichen (P)	kg P eq
	<b>Eutrophication (terrestrial)</b>	Anteil der Nährstoffe, der das marine Endkompartiment erreicht	kg N eq
	<b>Ecotoxicity (freshwater)</b>	Vergleichende toxische Einheit für Ökosysteme	CTUe
Ressourcen	<b>Land Use</b>	Bodenqualitätsindex (Biotische Produktion, Erosionsbeständigkeit, Mechanische Filterung und Grundwasserneubildung)	Dimensionsloser, aggregierter Index von: kg biotische Produktion/(m <sup>2</sup> *a) kg Erde/(m <sup>2</sup> *a) m <sup>3</sup> Wasser/(m <sup>2</sup> *a) m <sup>2</sup> g.water/(m <sup>2</sup> *a)
	<b>Water Use</b>	Deprivationspotenzial (gewichteter Wasserverbrauch)	kg world eq. deprived
	<b>Resource Use (fossils)</b>	Abiotische Ressourcenerschöpfung	kg Sb eq
	<b>Resource Use (minerals and metals)</b>	Abiotische Ressourcenerschöpfung, fossile Brennstoffe	MJ

#### 4.2.5 Datentypen, Datenquellen und Anforderungen an die Datenqualität

In dieser Studie kommt es zu einer Kombination von Daten unterschiedlicher Herkunft und Qualität. Bei der Kartoffelproduktion wird sowohl für die Vorder- als auch für die Hintergrundprozesse auf die Angaben in der verwendeten Datenbank zurückgegriffen.

Hinsichtlich der PV-Technologie werden soweit frei verfügbar und möglich Primärdaten von Herstellern genutzt. Nicht verfügbare Daten werden durch die Angaben der Datenbank ergänzt. Diese sind in der Regel jedoch älter und werden nur im Falle nicht frei verfügbarer Herstellerangaben oder Angaben aus der Wissenschaft genutzt. Da sich Angaben in der Regel auf konventionelle FF-PV-Anlagen beziehen, werden die Daten zudem durch Ergänzungen aus bisher für APV-Anlagen durchgeführten Ökobilanzierungen vervollständigt und angepasst (Pascaris et al. 2021; Agostini et al. 2021).

Durch die Nutzung der gleichen Datenquellen in allen Szenarien, sowie der Nutzung von Quellen, die in ähnlichen Studien Anwendung fanden, wird die Konsequenz hinsichtlich der Annahmen und Quellen gewährleistet. Im Sinne der Reproduzierbarkeit werden die verwendeten Datenquellen und Annahmen genauestens und transparent dokumentiert. Hierdurch wird gewährleistet, dass Dritte die Vorgehensweise verstehen und nachbilden können.

Da in dieser Studie eine potenzielle und demnach noch nicht vollständig geplante Anlage untersucht, wird die Repräsentativität durch die Verwendung repräsentativer, durchschnittlicher Industriedaten garantiert. Falls keine durchschnittlichen Werte vorhanden oder die Daten veraltet sind, werden sie durch Angaben aus der Wissenschaft aktualisiert.

#### 4.2.6 Vergleichbarkeit der Systeme

Da in dieser Studie verschiedene Szenarien miteinander verglichen werden, werden die jeweiligen Produktsysteme vergleichbar gestaltet und auf dieselbe funktionelle Einheit angewandt (vgl. Kapitel 4.2.1 und 4.2.2). Die Ansprüche an die Datenqualität entsprechen bei allen Szenarien den im Kapitel 4.2.5 beschriebenen Angaben.

#### 4.2.7 Kritische Überprüfung

Die Ökobilanzierung der hier betrachteten Szenarien dient in erster Linie der internen Validierung und Abschätzung einer möglichen APV-Anlage. Als Ziel wird der Vergleich mit der getrennten Produktion von Strom in einer konventionellen FF-PV-Anlage und der konventionellen Kartoffelproduktion sowie der Vergleich zu einer Stromproduktion in Anbetracht der deutschen Strommix festgelegt. Ein externer Vergleich der Ergebnisse ist nicht

vorhergesehen. Aus diesem Grund erfolgt keine ISO-konforme kritische Prüfung. Die Ergebnisse werden jedoch im Rahmen der Bewertung zur Erlangung eines Mastertitels überprüft.

### 4.3 Sachbilanz

#### 4.3.1 Ökobilanzsoftware und -datenbank

Die Erstellung der Sachbilanz sowie die spätere Berechnung der Wirkungsabschätzung erfordern eine datenintensive Verarbeitung. Hierfür stehen verschiedene Ökobilanzsoftwares zur Verfügung. Die Softwares greifen dabei auf bestimmte Datenbanken zurück, die Informationen zu bereits durchgeführten Ökobilanzierungen beinhalten und auch Angaben zu Hintergrunddaten, wie bspw. länderspezifische Strommixe, enthalten. Hierdurch können Produkt- und Elementarflüsse mit den jeweiligen Umweltwirkungen verknüpft und berechnet werden. Die Software übernimmt dabei die Berechnung und Verknüpfung auf Basis der Datenbanken und stellt die Ergebnisse sowohl der Sachbilanz als auch der Wirkungsbilanz benutzerfreundlich dar. Die Datenbanken sind dabei oft unabhängig von der jeweiligen Software, bei manchen Software (bspw. GaBi) bestehen aber auch interne Datenbanken (Lüdemann und Feig 2014, 4 ff.).

Die hier durchgeführte Ökobilanzierung macht das Vorhandensein bestimmter Prozesse und Daten notwendig. Besonders hinsichtlich der Stromproduktion wird auf Datensätze nach Frischknecht et al. (2015) und Stolz et al. (2016) mit Aktualisierungen durch Hengstler et al. (2021) zurückgegriffen. Diese Datensätze wurde für die Ökobilanzdatenbank EcoInvent zusammengestellt. Sie basieren demnach auf den in dieser Datenbank enthaltenen Produkt- und Elementarflüssen sowie auf bestimmten Prozessen. Aufgrund hoher Kosten sowohl für Lizenzen für die Softwares als auch für die Datenbanken musste im Rahmen dieser Arbeit auf Demoverionen zurückgegriffen werden. Zwar existieren kostenfreie Varianten für Ökobilanzsoftwares, diese enthalten jedoch in der Regel nicht die Datenbank EcoInvent. Aus diesem Grund wurde in dieser Studie auf die Demoverision der Software SimaPro zurückgegriffen. Diese wurde vor 30 Jahren entwickelt und stellt einer der meistgebrauchten Software-Lösungen für die Ökobilanzierung dar (SimaPro 2021). Die Demoverision ermöglicht eine zeitlich unbegrenzte Nutzung sowie den Zugriff auf die zuvor erwähnten Daten und Prozesse der Datenbank EcoInvent. Zudem ist die in Kapitel 4.2.4 beschriebene Methodik zur Wirkungsabschätzung enthalten. Die Nutzung der Demoverision erlaubt es jedoch nur, die Ergebnisse und eingerichteten Datensätze insgesamt 16 mal zu speichern (Lüdemann und Feig 2014, S. 8).

### 4.3.2 Sachbilanz Szenario 1

Das Zusammentragen der Sachbilanzdaten für die Anteile der PV-Stromproduktion richtet sich nach Hengstler et al. (2021), die in ihrer Studie Annahmen und Daten für die Ökobilanzierung von Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen aktualisiert haben. Dabei beziehen sie sich zum einen auf den Ökobilanzleitfaden für PV-Systeme der IEA PVPS Task 12 nach Frischknecht et al. (2015) mit Empfehlungen und Mindestanforderungen für die Ökobilanzierung von PV-Anlagen und zum anderen auf die PEFCR für PV-Module. Für PV-Systeme werden dabei die folgenden Komponenten betrachtet:

- PV-Module
- Inverter
- Unterkonstruktion
- Elektrische Leitungen

Bei der Berechnung der Systemkomponenten wird auf unterschiedliche Quellen und Berechnungsverfahren zurückgegriffen. Basis bilden die in der Datenbank Ecoinvent verfügbaren Daten nach den zuvor benannten Studien. Die Berechnung der Systemkomponente Inverter und elektrische Leitungen erfolgt in Bezugnahme zur kWp-Leistung der verbauten Module, die der Unterkonstruktion und der Module erfolgt zu 1 m<sup>2</sup> Modulfläche. Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, erfolgt die Betrachtung der Produktsysteme im Gegensatz zu den Betrachtungen nach Hengstler et al. (2021) ohne das Lebensende. Demnach werden die Systemkomponenten hinsichtlich der Lebenszyklusphasen Herstellung und Nutzung analysiert.

#### 4.3.2.1 Balance of System

##### **Inverter**

Als Inverter wird wie in Kapitel 4.2.1.1 bereits erwähnt zur Vereinfachung ein 500 kW-Inverter angenommen, da Daten für diese Größe bereits in den SimaPro-Daten hinterlegt sind. Für die Herstellungsphase werden die Daten der Ecoinvent v3-Datenbank für einen Inverter aus dem Jahr 2011 genutzt, die wiederum den 2011 veröffentlichten Daten der IEA PVPS Task 12 nach Fthenakis et al. (2011) und Frischknecht et al. (2015) mit den in Tabelle 5 dargestellten Annahmen entsprechen. Die Nutzungsphase der Inverter setzt sich aus den Wirkungsgradverlusten, dem Nachtstromverbrauch, der Nachtstundenzahl pro Jahr und der Lebensdauer zusammen. Da die Wirkungsgradverluste bereits über die Performance Ratio des Gesamtsystems abgebildet werden, erfolgt die Betrachtung der Nutzungsphase der Inverter gemäß Hengstler et al. (2021, S. 150) nur über den Nachtstromverbrauch. Hengstler et al. (2021, S. 150) gehen dabei von 4.380 Std. pro Jahr aus. Gemäß Produktdatenblatt eines 500 kW

Inverters beträgt der Nachtverbrauch in etwa 80-100 W (enfsolar o.J.b, o.J.a). Demnach ergibt sich bei Annahme von 90 W ein Nachtstromverbrauch von 394,2 kWh pro Jahr und 11.826 kWh über den Zeitraum von 30 Jahren, welcher durch den deutschen Strommix abgedeckt wird.

### **Unterkonstruktion**

Für die Herstellung der Unterkonstruktion nutzen Hengstler et al. (2021) ebenfalls die Sachbilanzdaten der PVPS Task 12, in denen bereits die Transporte und die Entsorgung anfallender Abfälle enthalten sind. Die in Frischknecht et al. (2015) angegebenen Sachbilanzdaten werden auf je 1 m<sup>2</sup> Modulfläche bezogen und beschreiben eine reguläre FF-PV-Anlage. Aufgrund der deutlich höher angesetzten Module in einem APV-System müssen diese Daten angepasst werden. Der Materialverbrauch wird demnach nach einer Anlage ausgerichtet, für die bei gleicher Höhe und einem ähnlich Verhältnis von Modulen zur Gesamtfläche die Verbräuche für Stahl, Aluminium und Beton bekannt sind. Laut Frischknecht et al. (2015, S. 57) werden für FF-PV-Anlagen 7,457 kg Stahl pro m<sup>2</sup> Modulfläche verbaut. In der Anlage Heggelbach wurden insgesamt etwa 50.000 kg Stahl verbraucht, was einem Verbrauch von 41,46 kg Stahl pro m<sup>2</sup> Modulfläche entspricht. Dementsprechend wird angenommen, dass der Materialverbrauch (bis auf den Betonverbrauch) einer APV-Anlage etwa 5,56 mal höher ist, als bei einer regulären FF-PV-Anlage. Der Materialverbrauch sowie die Daten für die Entsorgung von Abfällen, die bei der Herstellung anfallen, werden dementsprechend angepasst. Die Angaben für den Transport werden nicht verändert. Da Betonfundamente die landwirtschaftliche Bearbeitung erschweren, wird auf Spinn-Anker aus Stahl zurückgegriffen, die die Anlage ähnlich wie Baumwurzeln sichern. Zur Berechnung des Materialverbrauchs wurde auf die Angaben des Herstellers zurückgegriffen. Demnach bestehen die Spinnanker aus Anker- und Klemmplatte mit Durchmessern zwischen 270 und 370 mm, zwölf Sechskantschrauben sowie 12 Gewindestäben mit Längen zwischen 2 und 12 m sowie einem Durchmesser von 15 mm. Die Stäbe werden mit Winkeln von 30° und 45° gegen die Vertikale in den Boden eingesetzt. Auf Basis dieser Angaben wurde ein Stahlverbrauch von 134,85 kg pro Spinnanker berechnet. Insgesamt müssen 60 Spinnanker eingebracht werden. Dadurch entsteht ein zusätzlicher Stahlverbrauch von etwa 8.091 kg. Tabelle 11 zeigt eine vereinfachte Darstellung der zusammengefassten Materialverbräuche in Materialgruppen und weiterer Sachbilanzdaten. Eine genaue Auflistung der Sachbilanzdaten findet sich in Anhang III.

### **Elektrische Leitungen**

Für die elektrischen Leitungen werden in Anlehnung an Hengstler et al. (2021, S. 160) die Sachbilanzdaten für elektrische Leitungen einer 570 kWp-Freifläche aus der Studie nach Stolz et

al. (2016, S. 72) verwendet. Die dortigen Angaben werden auf jeweils 1 kWp Anlagenleistung modelliert und dann auf die in Szenario 1 betrachtete Anlagenleistung (500,13 kWp) hochgerechnet. Für eine Vereinfachung der Darstellung wurden auch hier die Materialverbräuche und sonstigen Sachbilanzdaten in Gruppen zusammengefasst. Eine genaue Auflistung der Sachbilanzdaten findet sich in Anhang III.

#### 4.3.2.2 c-Si PV-Module mit mono c-Si Solarzellen

Für die Herstellung der Silizium-Solarmodule wird auf die qualitativ hochwertigen Sachbilanzdaten nach Frischknecht et al. (2015) zurückgegriffen. Diese Daten basieren auf einer Veröffentlichung von Jungbluth et al. (2012), die 2014 durch Wild-Scholten (2014) aktualisiert wurde. Aufgrund der seitdem stark ansteigenden Nachfrage konnten die Herstellungsprozesse der PV-Module weiter optimiert werden, sodass Hengstler et al. (2021) auf Basis einer Sensitivitätsanalyse Parameter analysiert haben, die einen starken Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse haben. Diese Parameter wurden mit Hilfe von Annahmen und Ergebnissen aus der Literatur für die c-Si Module aktualisiert. Hierbei wurden verschiedene Prozessschritte analysiert, die von der Herstellung des Siliziums bis zur Solarzellenherstellung reichen (Hengstler et al. 2021, S. 168 f.). Tabelle 10 zeigt die Basisdaten nach Frischknecht et al. (2015) und die Aktualisierungen gemäß Hengstler et al. (2021, S. 173 f.), auf die sich in dieser Studie bezogen wird. Da die Sachbilanzdaten nach Frischknecht et al. (2015) in die analysierten Prozessschritte aufgeteilt sind, können die relevanten Daten in SimaPro angepasst werden. Für alle Prozessschritte werden die chinesischen Herstellungsszenarien angenommen.

*Tabelle 10: Werte zur Sachbilanzierung von mono c-Si Solarzellen nach Frischknecht et al. (2015) mit Aktualisierungen nach Hengstler et al. (2021)*

Prozessschritt	Basiswerte nach Frischknecht et al. (2015)	Aktualisierung nach Hengstler et al. (2021)
Metallurgisches Silizium (MG-Si)	-	Keine Aktualisierung
Solarsilizium (SG-Si); Herstellungsmix	Mix aus Elektroniksilizium, Off-grade Elektroniksilizium, Solarsilizium	100 % Solarsilizium
Solarsilizium (SG-Si); MG Silizium	1,13 kg/kg SG-Si	1,1 kg/kg SG-Si
Solarsilizium (SG-Si), Elektrische Energie	110 kWh/kg SG-Si	60 kWh/kg SG-Si
Solarsilizium (SG-Si); Thermische Energie	185 MJ/kg SG-Si	60-80 MJ/kg SG-Si Annahme 70 MJ/kg SG-Si
Solarsilizium (SG-Si); Salzsäure	~1,6 kg/kg SG-Si	Ca. 30-50 % dieser Menge; Annahme 0,65 kg/kg SG-Si

Prozessschritt	Basiswerte nach Frischknecht et al. (2015)	Aktualisierung nach Hengstler et al. (2021)
Silizium Einkristall (mono c-Si); elektrische Energie	~68,2 kWh/kg Einkristall	35 kWh/kg Einkristall

Die Prozessschritte werden einzeln mitsamt der in Tabelle 10 dargestellten Ergänzungen in SimaPro eingegeben und ergeben Werte für 1 m<sup>2</sup> PV-Modul. Für die Sachbilanz werden gemäß Kapitel 4.2.1.1 3.106 m<sup>2</sup> Modulfläche benötigt. Für die vereinfachte Darstellung umfasst Tabelle 11 nur die Angabe der benötigten Modulfläche. Detaillierte Sachbilanzdaten der in Tabelle 10 beschriebenen Prozessschritte samt der Aktualisierungen finden sich in Anhang III. Die gesamten Materialien und Prozesse der Stromproduktion werden anschließend in einer Produktphase zusammengefasst und ergeben zusammen den Output 14.402.942,3 kWh.

#### 4.3.2.3 Kartoffelproduktion

Insgesamt ergeben sich durch die Kartoffelproduktion Erträge von 307,87 dt pro Jahr. Über einen Zeitraum von 30 Jahren werden die Kartoffelerträge entsprechend auf 9.236,19 dt dimensioniert. Für die Kartoffelproduktion werden die bereits in SimaPro vorhandenen Daten für die Kartoffelproduktion in Deutschland genutzt. Die verfügbaren Sachbilanzdaten zur Kartoffelproduktion enthalten die Inputs aus der Düngung, Landnutzungsänderung, dem Gebrauch der Maschinen und der Bewässerung. Die Daten weisen jedoch einen für Deutschland gemittelten Ertrag von 441 dt pro Hektar auf. Für das Szenario 1 wird dieser Wert an die in Kapitel 5.2.1.1 beschriebenen 355,11 dt pro Hektar angepasst. Hinsichtlich der Bewässerung und Verwendung von Dünger und Pestiziden wurden keine Änderungen vorgenommen, da bisher keine genauen Zahlen für die Kartoffelproduktion unter APV bekannt waren. Tabelle 11 zeigt die gesamte Sachbilanz des Szenarios 1, dimensioniert für die in Kapitel 4.2.1.1 beschriebenen Anlagengröße und Kartoffelproduktion.

Tabelle 11: Sachbilanzdaten des Szenarios 1

Szenario 1			
Materialien & Prozesse	Erforderliche Inputs	Einheit	Quelle/Datenbank
<b>Stromproduktion</b>			
<b>Inverter</b>			
Inverter 500 kW (Global)		1 Stk.	Ecoinvent 3
Electricity, medium voltage (DE)	11.826	kWh	Ecoinvent 3
<b>Unterkonstruktion</b>			
Aluminiumprofil, gesamt, APV	68.724	kg	Frischknecht et al. 2015, angepasst
Verpackung (Karton), gesamt, APV	1.492	kg	Frischknecht et al. 2015, angepasst

<b>Szenario 1</b>			
<b>Materialien &amp; Prozesse</b>	<b>Erforderliche Inputs</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle/Datenbank</b>
Kunststoffteile, gesamt, APV	94	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Edelstahlbauteile, gesamt, APV	4.576	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Stahlbauteile, gesamt, APV	136.854	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Transport, gesamt	20.178	tkm	Frisknecht et al. 2015
Entsorgung Verpackung (Karton), gesamt, APV	1.492	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Entsorgung Kunststoffteile, gesamt, APV	94	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Änderung der Flächennutzung, gesamt	29.318	m <sup>2</sup>	Frisknecht et al. 2015
Flächeninanspruchnahme, gesamt	4.248	m <sup>2</sup>	Frisknecht et al. 2015
<b>Elektrische Leitungen</b>			
Kupferkabel	655	kg	Stolz et al. 2016
Kunststoffe	884	kg	Stolz et al. 2016
Stahl	82	kg	Stolz et al. 2016
Transport	206	tkm	Stolz et al. 2016
Entsorgung Kunststoffreste	676	kg	Stolz et al. 2016
Entsorgung Reste elektrische Kabel	4	kg	Stolz et al. 2016
<b>PV-Modul</b>			
Photovoltaic panel, single-Si, at plant	3.106	m <sup>2</sup>	Frisknecht et al. 2015, Hengstler et al. 2021, Ecoinvent 3
<b>Kartoffelproduktion über 30 Jahre</b>			
Kartoffeln, at farm, DE, APV	9.236,198	dt	Agri-footprint 5, Anpassung Kartoffelertrag pro Hektar

### 4.3.3 Sachbilanz Szenario 2

#### 4.3.3.1 Balance of System

##### **Inverter**

Da das Szenario 2 dieselbe Anlagenleistung wie Szenario 1 aufweist, werden die in Tabelle 11 dargestellten Inverter-Sachbilanzdaten ebenfalls für das Szenario 2 übernommen.

##### **Unterkonstruktion**

Im Gegensatz zu den in Szenario 1 angepassten Sachbilanzdaten der Unterkonstruktion, die sich aus der Höhe des APV-Systems ergeben, erfolgt in Szenario 2 keine Anpassung an die in Frisknecht et al. (2015) angegebenen Daten. Des Weiteren werden bei der FF-PV-Anlage im Gegensatz zur APV-Anlage in Szenario 1 Beton-Fundamente verbaut.

### Elektrische Leitungen

Sachbilanzdaten für elektrische Leitungen einer 570 kWp-Freifläche aus der Studie nach Stolz et al. (2016, S. 72) verwendet und auf die Anlagenleistung von 500,13 kWp dimensioniert.

#### 4.3.3.2 c-Si PV-Module mit mono c-Si Solarzellen

Für Szenario 1 wird ebenfalls auf die Sachbilanzdaten nach Frischknecht et al. (2015) zurückgegriffen. Hierbei erfolgt ebenso die Anpassung gemäß der Angaben in Tabelle 10. Die gesamten Inputs aus der Stromproduktion werden in einer Produktphase zusammengefasst und ergeben zusammen den Output 14.402.942,3 kWh.

#### 4.3.3.3 Kartoffelproduktion

Für die Kartoffelproduktion in Szenario 2 wird ebenfalls auf die bereits in SimaPro verfügbaren Daten der Datenbank Agri-footprint 5 zurückgegriffen. Der Kartoffelertrag wird hier von den standartmäßig in der Ecoinvent-Datenbank für Deutschland gemittelten 441 dt pro Hektar auf die in Kapitel 4.2.1.2 beschriebenen, auf Thüringen bezogenen 338,2 dt pro Hektar korrigiert (vgl. Kapitel 4.2.1.2). Tabelle 12 zeigt die gesamte Sachbilanz des Szenarios 2, dimensioniert für die in Kapitel 4.2.1.2 beschriebenen Anlagengröße und Kartoffelproduktion. Für eine übersichtlichere Darstellung wurden die Materialien und Prozesse in Tabelle 12 zu Gruppen zusammengefasst. Für dieses Szenario werden dem System ebenfalls die vermiedenen Emissionen aus der PV-Stromproduktion gutgeschrieben.

Tabelle 12: Sachbilanzdaten des Szenarios 2

Szenario 2			
Materialien & Prozesse	Erforderliche Inputs	Einheit	Quelle/Datenbank
<b>Stromproduktion</b>			
<b>Inverter</b>			
Inverter 500 kW (Global)	1	Stk.	Ecoinvent 3
Electricity, medium voltage (DE)	11.826	kWh	Ecoinvent 3
<b>Unterkonstruktion</b>			
Aluminiumprofil, gesamt	12.361	kg	Frischknecht et al. 2015, angepasst
Beton, gesamt	4.014	kg	Frischknecht et al. 2015, angepasst
Verpackung (Karton), gesamt	268	kg	Frischknecht et al. 2015, angepasst
Kunststoffteile, gesamt	17	kg	Frischknecht et al. 2015, angepasst
Edelstahlbauteile, gesamt	823	kg	Frischknecht et al. 2015, angepasst

<b>Szenario 2</b>			
<b>Materialien &amp; Prozesse</b>	<b>Erforderliche Inputs</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle/Datenbank</b>
Stahlbauteile, gesamt	23.160	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Transport, gesamt	20.178	tkm	Frisknecht et al. 2015
Entsorgung Verpackung (Karton), gesamt	268	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Entsorgung Kunststoffteile, gesamt	17	kg	Frisknecht et al. 2015, angepasst
Änderung der Flächennutzung, gesamt	29.318	m <sup>2</sup>	Frisknecht et al. 2015
Flächeninanspruchnahme, gesamt	4.248	m <sup>2</sup>	Frisknecht et al. 2015
<b>Elektrische Leitungen</b>			
Kupferkabel	655	kg	Stolz et al. 2016
Kunststoffe	884	kg	Stolz et al. 2016
Stahl	82	kg	Stolz et al. 2016
Transport	206	tkm	Stolz et al. 2016
Entsorgung Kunststoffreste	676	kg	Stolz et al. 2016
Entsorgung Reste elektrische Kabel	4	kg	Stolz et al. 2016
<b>PV-Modul</b>			
photovoltaic panel, single-Si, at plant	3.106	m <sup>2</sup>	Frisknecht et al. 2015, Hengstler et al. 2021, Ecoinvent 3
<b>Kartoffelproduktion</b>			
Kartoffeln, at farm, DE	9236,19803	dt	Agri-footprint 5, Anpassung Kartoffelertrag pro Hektar

#### 4.3.4 Sachbilanz Szenario 3

##### 4.3.4.1 Stromproduktion

Für das Szenario 3 wird gemäß Kapitel 4.2.1.3 kein PV-System betrachtet. Das Szenario soll demnach vielmehr einen Vergleich mit dem deutschen Strommix ermöglichen. Hierfür werden die 14.402.942 kWh Strom in der Sachbilanz durch den deutschen Strommix (2021) gemäß Ecoinvent v3 abgebildet.

##### 4.3.4.2 Kartoffelproduktion

Die Kartoffelproduktion in Szenario 3 entspricht den Angaben in Szenario 2. Der Kartoffelertrag wird hier von den standartmäßig in der Ecoinvent-Datenbank für Deutschland gemittelten 441 dt pro Hektar auf die in Kapitel 4.2.1.2 beschriebenen, auf Thüringen bezogenen 338,2 dt pro Hektar korrigiert (vgl. Kapitel 4.2.1.3). Tabelle 13 zeigt die gesamte Sachbilanz des Szenarios 3.

Tabelle 13: Sachbilanzdaten des Szenarios 3

<b>Szenario 3</b>			
<b>Materialien &amp; Prozesse</b>	<b>Erforderliche Inputs</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle/Datenbank</b>
<b>Stromproduktion</b>			
Electricity, medium voltage (DE)	14.402.942	kWh	Ecoinvent 3
<b>Kartoffelproduktion</b>			
Kartoffeln, at farm, DE	9236,19803	dt	Agri-footprint 5, Anpassung Kartoffelertrag pro Hektar

## 5 Wirkungsbilanzergebnisse

### 5.1 Wirkungsbilanz Szenario 1

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanzierung für jedes Szenario dargestellt. Anschließend findet ein Vergleich der Ergebnisse statt. Die Wirkungsbilanzergebnisse des Szenarios 1 je Wirkungskategorie sind in Tabelle 14 abgebildet. Die Tabelle zeigt sowohl die einzelnen Werte für die Kartoffel- und die Stromproduktion als auch die Gesamtergebnisse des APV-Systems. Die detaillierten Wirkungsbilanzdaten finden sich in Anhang IV. Die Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion an den gesamten Umweltwirkungen sind in Anhang V dargestellt.

Tabelle 14: Wirkungsbilanzergebnisse Szenario 1 je Wirkungskategorie

Szenario 1		Pro 1 kg Kartoffeln und 1 kWh Strom			
Wirkungskategorie		Einheit	Summe	Kartoffelprod.	Stromprod.
Klima	Climate Change	kg CO <sub>2</sub> eq	1,90E-01	8,60E-02	1,04E-01
	Ozone Depletion	kg CFC-11eq	1,06E-08	9,24E-10	9,63E-09
	Ionising Radiation	kBq U-235 eq	6,75E-03	1,49E-03	5,26E-03
	Photochemical Ozone Formation	kg NMVOC eq	6,14E-04	2,35E-04	3,79E-04
Gesundh.	Particulate Matter	Krankheitsfälle	1,82E-08	1,19E-08	6,32E-09
	Human Toxicity (non-cancer)	CTUh	1,86E-08	1,65E-08	2,14E-09
	Human Toxicity (cancer)	CTUh	4,86E-10	2,24E-10	2,62E-10
Ökosysteme	Acidification	Mol H <sup>+</sup> eq	2,11E-03	1,56E-03	5,47E-04
	Eutrophication (freshwater)	kg P eq	8,75E-05	4,77E-05	3,98E-05
	Eutrophication (marine)	kg N eq	1,93E-03	1,82E-03	1,15E-04
	Eutrophication (terr)	Mol N eq	8,18E-03	6,91E-03	1,27E-03
	Ecotoxicity (freshwater)	CTUe	1,38E+02	1,34E+02	3,48E+00
Ressourcen	Land Use	Aggr. Index	1,55E+01	1,48E+01	6,73E-01
	Water Use	m <sup>3</sup> depriv.	5,77E-02	1,34E-02	4,43E-02
	Resource Use (fossils)	MJ	1,88E+00	6,47E-01	1,23E+00
	Resource Use (minerals and metals)	kg Sb eq	1,08E-05	2,94E-08	1,08E-05

Abbildung 20 zeigt die Anteile der Kartoffel- sowie der PV-Stromproduktion an den Gesamtergebnissen je Wirkungskategorie. Die Anteile der PV-Stromproduktion des Szenarios 1 können auf die einzelnen Systemkomponenten (Module, Unterkonstruktion, elektrische Leitungen und Inverter) aufgeteilt werden. In insgesamt acht der 16 Wirkungskategorien wird ein Großteil (>50 %) der Umweltwirkungen durch die Kartoffelproduktion pro kg Kartoffeln erreicht. Dies umfasst die Kategorien *Particulate Matter*, *Human Toxicity (non-cancer)*, *Acidification*, alle drei *Eutrophierungskategorien*, *Ecotoxicity (freshwater)* und *Land Use*. In den

restlichen Kategorien erreicht die PV-Stromproduktion höhere Anteile an den Wirkungsbilanzergebnissen.

In der Kategorie *Climate Change* macht die Stromproduktion mit 0,104 kg CO<sub>2</sub> eq etwa 55 % der insgesamt 0,19 kg CO<sub>2</sub> eq aus. In den weiteren klimarelevanten Kategorien *Ozone Depletion*, *Ionising Radiation* und *Photochemical Ozone Formation* macht die Stromproduktion mit etwa 61 bis 91 % ebenfalls den Großteil der Gesamtergebnisse aus. Innerhalb der PV-Stromproduktion tragen die Module am stärksten zu den Umweltwirkungen in allen vier Klima-Wirkungskategorien bei, gefolgt von der Unterkonstruktion. Die elektrischen Leitungen und der Inverter machen nur etwa 0,3 bis 0,77 % der Umweltwirkungen aus.

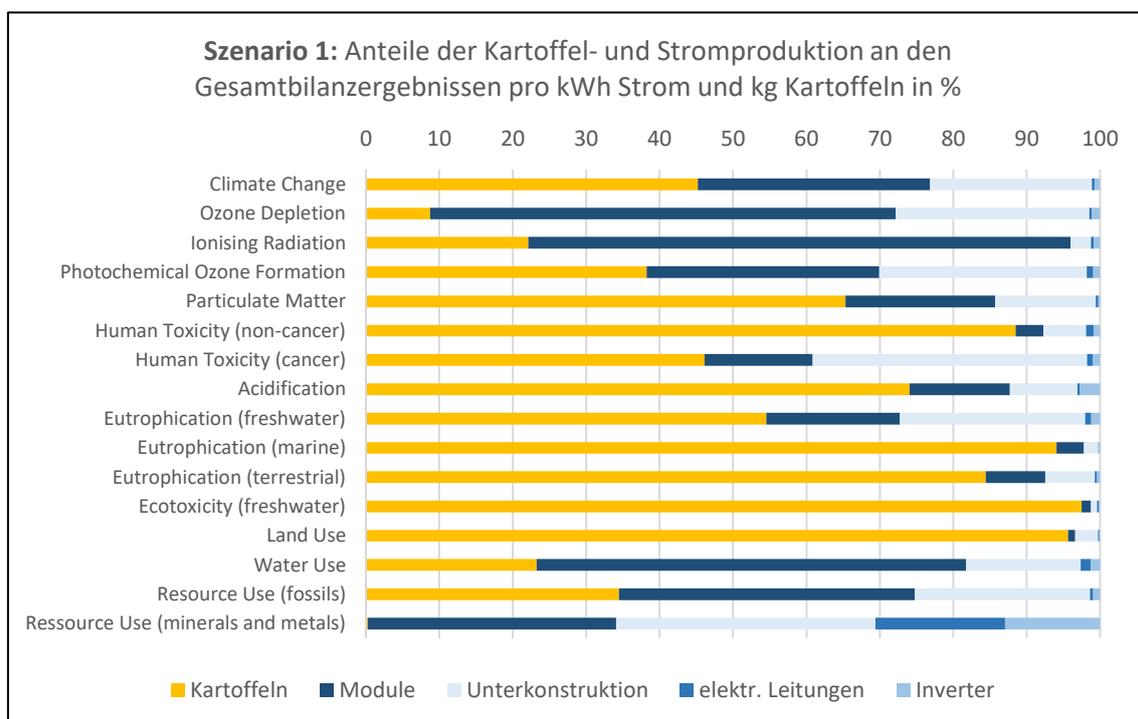


Abbildung 20: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion samt der Systemkomponenten am Gesamtergebnis der Wirkungsbilanzierung je Wirkungskategorie in Szenario 1

Bei den gesundheitsrelevanten Wirkungskategorien werden in der Kategorie *Particulate Matter* 1,82E-08 Krankheitsfälle pro produzierter kWh Strom und produziertem kg Kartoffeln verursacht, wobei die Kartoffelproduktion etwa 65 % ausmacht. Die restlichen 35 % aus der PV-Stromproduktion werden größtenteils durch die Module (20,4 %) und die Unterkonstruktion (13,7 %) erzeugt. In den Kategorien *Human Toxicity (non-cancer)* und *Human Toxicity (cancer)* entstehen Umweltwirkungen von 1,86E-08 und 4,86E-10 CTUh. Etwa 88,5 % der Kartoffelproduktion tragen dabei zu den Ergebnissen der *Human Toxicity (non-cancer)*-Kategorie bei, während sie bei der *Human Toxicity (cancer)*-Kategorie mit 46 % einen deutlich geringeren

Anteil hat. In beiden Fällen liegen die Umweltwirkungen der Unterkonstruktion über denen der Module. In allen drei Kategorien machen auch hier die elektrischen Leitungen und der Inverter mit zwischen 0,26 und 1,05 % die geringsten Umweltwirkungen aus.

Bei den ökosystemrelevanten Wirkungskategorien trägt in allen Fällen die Kartoffelproduktion mit zwischen 54,5 und 97,4 % am stärksten zu den Umweltwirkungen bei. In der Kategorie *Acidification* erreicht sie 0,00156 Mol H<sup>+</sup> eq von insgesamt 0,00211 Mol H<sup>+</sup> eq. Das Eutrophierungspotenzial für Süßwasser (*Eutrophication (freshwater)*) liegt bei insgesamt 8,75E-05 kg P eq, für marine Ökosysteme (*Eutrophication (marine)*) bei 0,00193 kg N eq und für terrestrische Ökosysteme (*Eutrophication (terrestrial)*) bei 0,0082 Mol N eq. Die Ökotoxizität für Süßwasser (*Ecotoxicity (freshwater)*) liegt für das Szenario 1 bei 138 CTUe. Die drei zuletzt genannten Umweltwirkungen werden fast ausschließlich durch die Kartoffelproduktion verursacht. Der Anteil der PV-Stromproduktion an den Gesamtwirkungen liegt hier lediglich zwischen 2,5 und 15,5 %.

In der Wirkungskategorie *Land Use* entsteht durch das Szenario 1 ein Wert von 15,5 pro kWh Strom und kg Kartoffeln, von denen 14,83 durch die Kartoffelproduktion verursacht werden. Dies entspricht einem Anteil von etwa 96 %. Zudem werden 0,0577 m<sup>3</sup> Wasser verbraucht (*Water Use*), an erster Stelle bei der Herstellung der Module (58,5 %), gefolgt von der Unterkonstruktion (15,6 %). Durch die Kartoffelproduktion werden 0,0134 m<sup>3</sup> verbraucht, was einem Anteil von 23,27 % entspricht. Die Ressourcennutzung fossiler Energieträger (*Resource Use (fossils)*) entspricht einem Energieverbrauch von etwa 1,88 MJ. Auch hier wird mit 40,29 % und 23,9 % ein Großteil durch die Herstellung der Module sowie der Unterkonstruktion und damit durch die PV-Stromproduktion beansprucht. Die Kartoffelproduktion trägt mit 0,65 MJ pro kg Kartoffeln zu etwa 34,47 % zum Ressourcenverbrauch bei. In der letzten Kategorie, der Ressourcennutzung von Mineralen und Metallen (*Resource Use (minerals and metals)*) werden etwa 99,7 % durch die PV-Stromproduktion, allen voran durch die Herstellung der Module und der Unterkonstruktion, verbraucht. Dies entspricht etwa 1,08E-05 kg Sb eq. Im Vergleich zu den vorherigen Kategorien werden hier mit Anteilen von 17,64 und 12,96 % auch durch die elektrischen Leitungen und den Inverter relevante Umweltwirkungen verursacht. Für die Kartoffelproduktion werden lediglich 2,94E-08 kg Sb eq pro kg Kartoffeln benötigt.

## 5.2 Wirkungsbilanz Szenario 2

Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung des Szenarios 2, sowohl die Ergebnisse der Kartoffel- und Stromproduktion als auch die Umweltwirkungen des gesamten Systems je

Wirkungskategorie. In den klimarelevanten Wirkungskategorien werden in den Kategorien *Ozone Depletion* und *Ionising Radiation* ein Großteil der Umweltwirkungen (88,8 und 77,3 %) durch die Stromproduktion verursacht (Abbildung 21). In der Kategorie *Ozone Depletion* kommen etwa 81 % der insgesamt 8,27E-09 kg CFC-11 eq durch die Herstellung der Module zustande. Auch in der Kategorie *Ionising Radiation* werden mit 75,6 % der insgesamt 6,60E-03 kBq U-235 eq ein Großteil der Umweltwirkungen durch die Modulherstellung erzeugt. In den Kategorien *Climate Change* und *Photochemical Ozone Formation* werden mit 55,2 und 49,8 % der insgesamt 0,156 kg CO<sub>2</sub> eq und 0,0047 kg NMVOC eq durch die Kartoffelproduktion in etwa gleiche Anteile wie durch die Stromproduktion erzeugt. Die detaillierten Wirkungsbilanzdaten finden sich in Anhang IV. Die Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion an den gesamten Umweltwirkungen sind in Anhang V dargestellt.

Tabelle 15: Wirkungsbilanzergebnisse Szenario 2 je Wirkungskategorie

Szenario 2		Pro 1 kg Kartoffeln und 1 kWh Strom			
Wirkungskategorie		Einheit	Summe	Kartoffelprod.	Stromprod.
Klima	Climate Change	kg CO <sub>2</sub> eq	1,56E-01	8,60E-02	6,96E-02
	Ozone Depletion	kg CFC-11 eq	8,27E-09	9,24E-10	7,34E-09
	Ionising Radiation	kBq U-235 eq	6,60E-03	1,49E-03	5,10E-03
	Photochemical Ozone Formation	kg NMVOC eq	4,72E-04	2,35E-04	2,37E-04
Gesundh.	Particulate Matter	Krankheitsfälle	1,62E-08	1,19E-08	4,26E-09
	Human Toxicity (non-cancer)	CTUh	1,77E-08	1,65E-08	1,24E-09
	Human Toxicity (cancer)	CTUh	3,35E-10	2,24E-10	1,11E-10
Ökosysteme	Acidification	Mol H <sup>+</sup> eq	1,83E-03	1,56E-03	2,71E-04
	Eutrophication (freshwater)	kg P eq	6,93E-05	4,77E-05	2,16E-05
	Eutrophication (marine)	kg N eq	1,90E-03	1,82E-03	8,35E-05
	Eutrophication (terrestrial)	Mol N eq	7,73E-03	6,91E-03	8,23E-04
	Ecotoxicity (freshwater)	CTUe	1,37E+02	1,34E+02	2,55E+00
Ressourcen	Land Use	Aggr. Index	1,61E+01	1,56E+01	5,33E-01
	Water Use	m <sup>3</sup> depriv.	5,03E-02	1,34E-02	3,69E-02
	Resource Use (fossils)	MJ	1,51E+00	6,47E-01	8,62E-01
	Resource Use (minerals and metals)	kg Sb eq	8,87E-06	2,94E-08	8,85E-06

Bei den gesundheitsrelevanten Umweltwirkungen wird bei allen drei Kategorien der Hauptteil durch die Kartoffelproduktion verursacht. In der Wirkungskategorie *Particulate Matter* entstehen insgesamt 1,62E-08 Krankheitsfälle je kWh Strom und kg Kartoffeln. Der Anteil der Kartoffelproduktion entspricht in dieser Kategorie etwa 73,6 %. In der Kategorie *Human Toxicity (non-cancer)* ist dieser Anteil mit 93 % der insgesamt 1,77E-08 CTUh deutlich höher. In der

Kategorie *Human Toxicity (cancer)* entsprechen die Umweltwirkungen durch die Kartoffelproduktion etwa 66,9 % der insgesamt  $3,35E-10$  CTUh.

Auch bei den ökosystemrelevanten Umweltwirkungen verursacht die Kartoffelproduktion die höchsten Anteile. In der Kategorie *Acidification* werden insgesamt  $0,0019$  Mol H<sup>+</sup> eq erreicht. Die  $0,00156$  Mol H<sup>+</sup> eq der Kartoffelproduktion entsprechen etwa 80,1 %. In der Wirkungskategorie *Eutrophication (freshwater)* werden 68,9 % durch die Kartoffelproduktion erzeugt. Insgesamt werden  $6,93E-05$  kg P eq erzeugt. Mit 95,6 % von insgesamt  $0,00182$  kg N eq verursacht die Kartoffelproduktion in der Kategorie *Eutrophication (marine)* die zweithöchsten Anteile an den gesamten Umweltwirkungen der ökosystemrelevanten Umweltwirkungen. Die höchsten Anteile werden mit 98,1 % der insgesamt  $136,8$  CTUe in der Kategorie *Ecotoxicity (freshwater)* erreicht. Das Eutrophierungspotenzial terrestrischer Ökosysteme (*Eutrophication (terrestrial)*) entspricht in Szenario 2  $0,0077$  Mol N eq. Auch hier wird mit 89,4 % ein Großteil durch die Kartoffelproduktion verursacht. In allen Wirkungskategorien der ökosystemrelevanten Umweltwirkungen macht die Modulherstellung den jeweils größten Anteil bei der Stromproduktion aus.

Während auch bei der Wirkungskategorie *Land Use* mit 96,7 % von insgesamt  $16,12$  Einheiten der Großteil der Umweltwirkungen durch die Kartoffelproduktion verursacht wird, entstehen bei den Umweltwirkungen *Water Use*, *Resource use*, *fossils* und *Resource Use (minerals and metals)* die meisten Umweltwirkungen durch die Stromproduktion. Mit 67 % von insgesamt  $0,05$  m<sup>3</sup> wird in der Wirkungskategorie *Water Use* das meiste Wasser durch die Modulherstellung verbraucht. Auch bei den fossilen Energieträgern erzeugt die Modulherstellung mit 50,1 % der insgesamt  $1,51$  MJ die höchsten Werte. Bei dem Ressourcenverbrauch in der Kategorie *Resource Use (minerals and metals)* entspricht die Kartoffelproduktion nur etwa 0,3 % der insgesamt  $8,87E-06$  kg Sb eq. Auch hier erzeugt die Modulherstellung mit 41,2 % den größten Ressourcenverbrauch, gefolgt von 21,1 % durch die Herstellung der Unterkonstruktion.

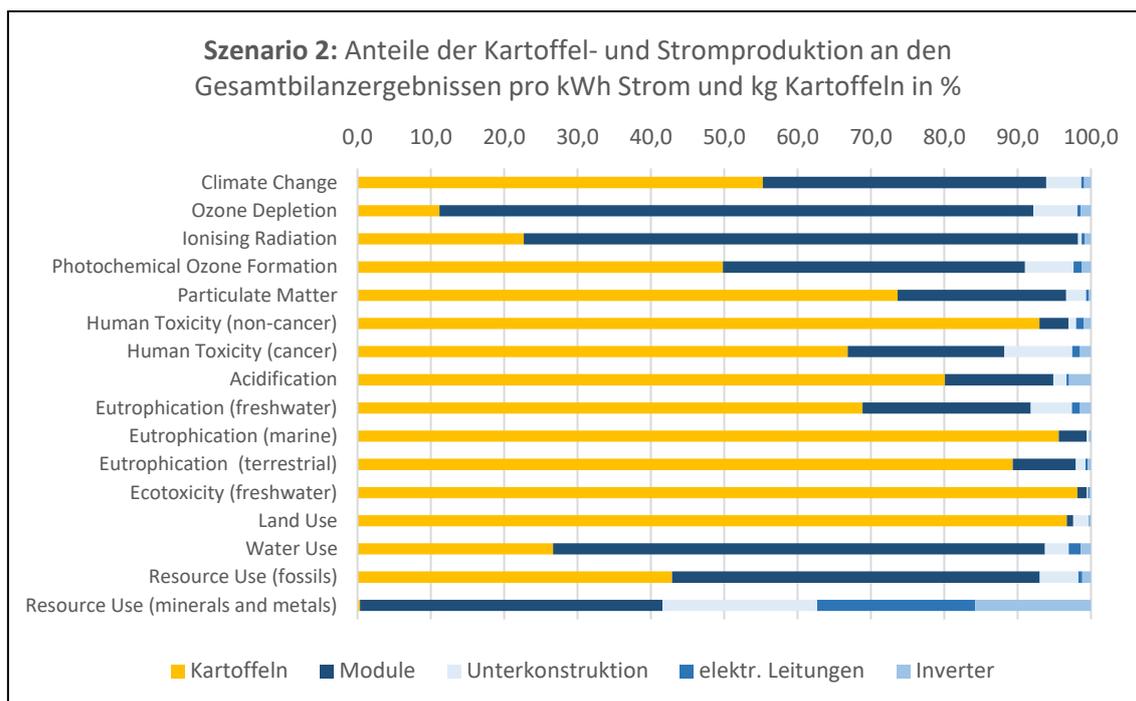


Abbildung 21: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion samt der Systemkomponenten am Gesamtergebnis der Wirkungsbilanzierung je Wirkungskategorie in Szenario 2

### 5.3 Wirkungsbilanz Szenario 3

Die Wirkungsbilanzergebnisse für Szenario 3 sind in Tabelle 16 abgebildet. Die Tabelle zeigt sowohl die gesamten Umweltwirkungen des betrachteten Szenarios als auch die jeweiligen Wirkungen der Kartoffel- und Stromproduktion. Die Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion an den gesamten Umweltwirkungen sind in Anhang V dargestellt.

Tabelle 16: Wirkungsbilanzergebnisse Szenario 3 je Wirkungskategorie

Szenario 3		Pro 1 kg Kartoffeln und 1 kWh Strom			
Wirkungskategorie		Einheit	Summe	Kartoffelprod.	Stromprod.
Klima	Climate Change	kg CO <sub>2</sub> eq	6,73E-01	8,60E-02	5,87E-01
	Ozone Depletion	kg CFC-11 eq	3,56E-08	9,24E-10	3,46E-08
	Ionising Radiation	kBq U-235 eq	1,02E-01	1,49E-03	1,01E-01
	Photochemical Ozone Formation	kg NMVOC eq	1,01E-03	2,35E-04	7,71E-04
Gesundh.	Particulate Matter	Krankheitsfälle	1,67E-08	1,19E-08	4,78E-09
	Human Toxicity (non-cancer)	CTUh	2,08E-08	1,65E-08	4,33E-09
	Human Toxicity (cancer)	CTUh	3,60E-10	2,24E-10	1,36E-10
Ökosysteme	Acidification	Mol H <sup>+</sup> eq	2,87E-03	1,56E-03	1,31E-03
	Eutrophication (freshwater)	kg P eq	9,36E-04	4,77E-05	8,89E-04
	Eutrophication (marine)	kg N eq	2,27E-03	1,82E-03	4,55E-04
	Eutrophication (terrestrial)	Mol N eq	1,00E-02	6,91E-03	3,10E-03
	Ecotoxicity (freshwater)	CTUe	1,44E+02	1,34E+02	9,72E+00

Szenario 3		Pro 1 kg Kartoffeln und 1 kWh Strom			
Wirkungskategorie		Einheit	Summe	Kartoffelprod.	Stromprod.
Ressourcen	Land Use	<i>Aggr. Index</i>	2,33E+01	1,56E+01	7,71E+00
	Water Use	<i>m<sup>3</sup> depriv.</i>	1,76E-01	1,34E-02	1,62E-01
	Resource Use (fossils)	<i>MJ</i>	8,63E+00	6,47E-01	7,98E+00
	Resource Use, minerals and metals	<i>kg Sb eq</i>	1,68E-06	2,94E-08	1,65E-06

Wie Abbildung 22 zeigt, machen sowohl die Kartoffel- als auch die Stromproduktion unter Verwendung der funktionellen Einheiten in jeweils acht der 16 Kategorien einen Hauptteil (>51 %) der Umweltwirkungen aus. Der höchste Anteil der Stromproduktion am Gesamtergebnis wird mit 0,1 kBq U-235 eq in der Kategorie *Ionising Radiation* erreicht, was einem Anteil von 98,5 % entspricht. Insgesamt entstehen durch das Szenario 3 in dieser Kategorie Umweltwirkungen von 0,102 kBq U-235 eq. Ein ähnliches Ergebnis wird in der Kategorie *Ozone Depletion* erreicht. Hier liegt der Anteil der Stromproduktion mit 3,46457E-08 kg CFC-11 eq bei 97,4 % am Gesamtergebnis. In der Kategorie *Climate Change* werden mit 0,59 kg CO<sub>2</sub> eq durch die Strom- und 0,09 kg CO<sub>2</sub> eq durch die Kartoffelproduktion insgesamt Umweltwirkungen von 0,67 kg CO<sub>2</sub> eq erzeugt. Während die Kartoffelproduktion in den Kategorien der Umweltwirkungen auf die Ökosysteme einen Großteil der Umweltwirkungen ausmacht, liegt bei der Kategorie *Eutrophication (freshwater)* der Anteil der Stromproduktion mit 94,9 % über denen der Kartoffelproduktion. Insgesamt entstehen durch das Szenario 3 in der Kategorie Umweltwirkungen von 0,0093 kg P eq. Auch in den Kategorien *Water Use*, *Resource Use (fossils)* und *Resource Use (minerals and metals)* erreicht die Stromproduktion Anteile zwischen 92,4 und 98,2 % an den Gesamtwirkungen.

Die Umweltwirkungen durch die Kartoffelproduktionen erreichen in den Kategorien *Particulate Matter*, *Human Toxicity (non-cancer)*, *Human Toxicity (cancer)*, *Acidification*, *Eutrophication (marine)*, *Eutrophication (terrestrial)*, *Ecotoxicity (freshwater)* und *Land Use* höhere Anteile als die Stromproduktion. Besonders in der Kategorie *Ecotoxicity (freshwater)* werden mit 134,26 CTUe im Vergleich zu 9,72 CTUe fast die gesamten Umweltwirkungen durch die Kartoffelproduktion erzeugt. Auch in den Kategorien *Particulate Matter*, *Human Toxicity (non-cancer)* und *Eutrophication (marine)* werden durch den Kartoffelanbau Anteile über 70 % erreicht.

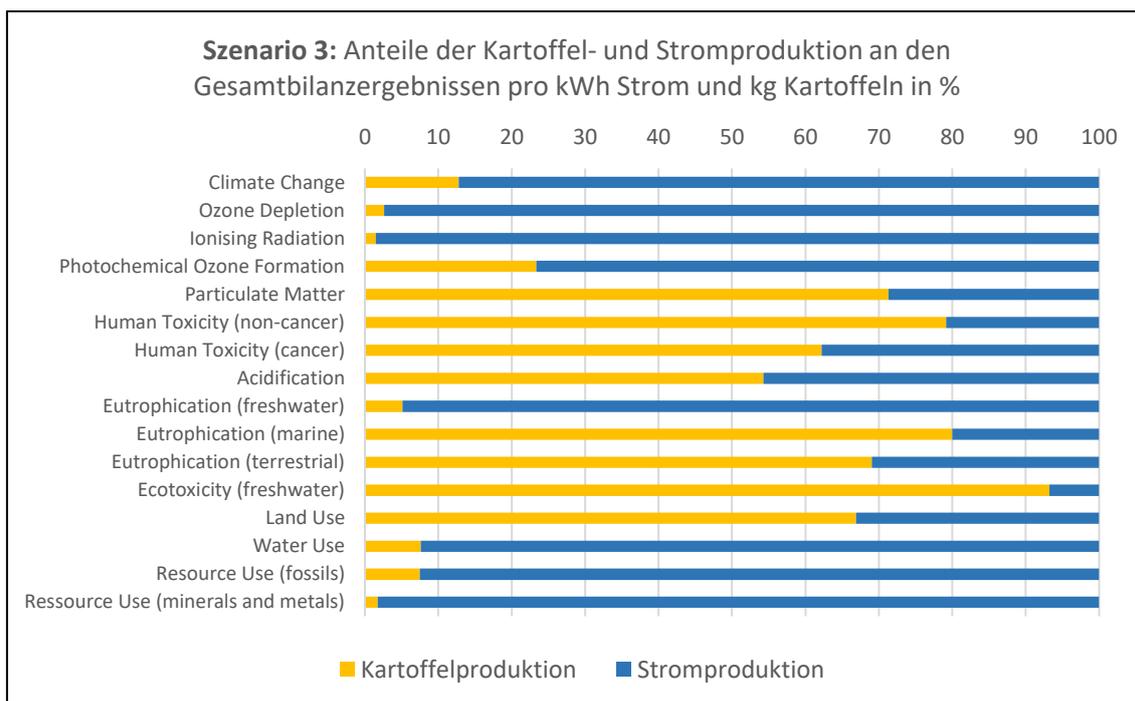


Abbildung 22: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion am Gesamtergebnis der Wirkungsbilanzierung je Wirkungskategorie in Szenario 2

## 5.4 Vergleich der Ergebnisse zwischen den Szenarien

Auf Basis der in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 beschriebenen Ergebnisse können die Szenarien 1 bis 3 nun je Wirkungskategorie verglichen werden. Die Ergebnisse werden hinsichtlich ihrer relativen Umweltwirkungen verglichen. Dabei wird der jeweils höchste Wert als 100 % angesetzt. Die relativen Umweltwirkungen der übrigen Szenarien werden in Relation zu diesem Wert dargestellt.

### 5.4.1 Klimarelevante Wirkungskategorien

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller Szenarien hinsichtlich der Ergebnisse in den klimarelevanten Wirkungskategorien *Climate Change*, *Ozone Depletion*, *Ionising Radiation* und *Photochemical Ozone Formation* verglichen.

In der Kategorie *Climate Change* werden die höchsten Emissionen mit 0,67 kg CO<sub>2</sub> eq in Szenario 3 erreicht (Abbildung 23). Das APV-Szenario (Szenario 1) erreicht hier mit 0,19 kg CO<sub>2</sub> eq pro kWh Strom und kg Kartoffeln 28 % der Ergebnisse aus Szenario 3. Demnach können durch das APV-Szenario im Vergleich zu einer reinen Kartoffelproduktion mit Bezug aus dem deutschen Strommix etwa 72 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Szenario 2 stellt das Szenario mit den geringsten Umweltwirkungen in der Kategorie dar. Es verursacht etwa 23 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3. Mit 0,16 kg CO<sub>2</sub> eq können somit etwa 77 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

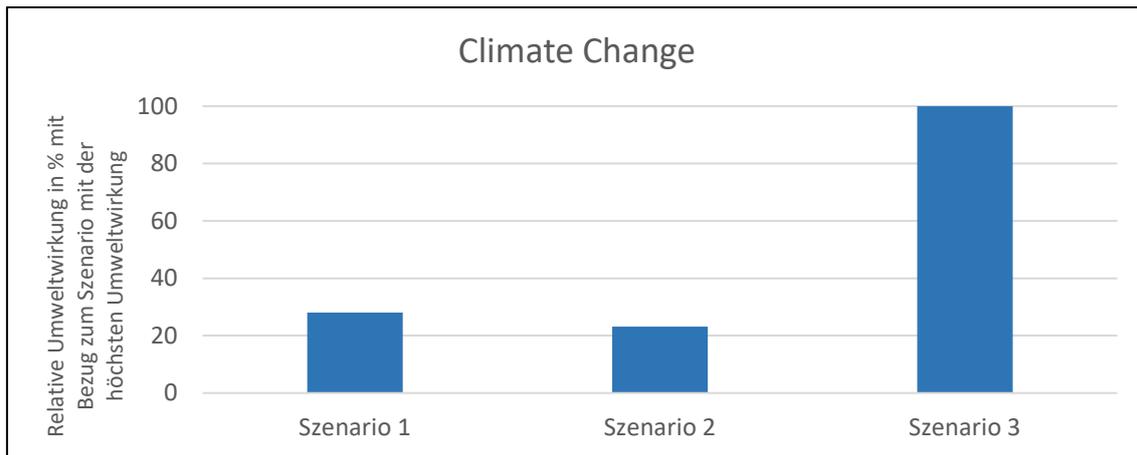


Abbildung 23: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Climate Change

Abbildung 24 zeigt die relativen Umweltwirkungen in der Kategorie *Ozone Depletion*. Auch hier werden durch Szenario 3 die höchsten Umweltwirkungen verursacht, sodass die in Szenario 3 verursachten  $3,56E-08$  kg CFC-11 eq als 100 % angesetzt werden. In Szenario 1 werden  $1,06E-08$  kg CFC-11 eq verursacht, was etwa 30 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 entspricht. Die geringsten Umweltwirkungen entstehen mit  $8,27E-09$  kg CFC-11 eq und demnach 23 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 in Szenario 2. Durch das APV-Szenario (Szenario 1) und das Szenario mit getrennter Kartoffel- und Stromproduktion (Szenario 2) können 70 bzw. 77 % an CFC-11 eq pro kWh Strom und kg Kartoffeln eingespart werden.

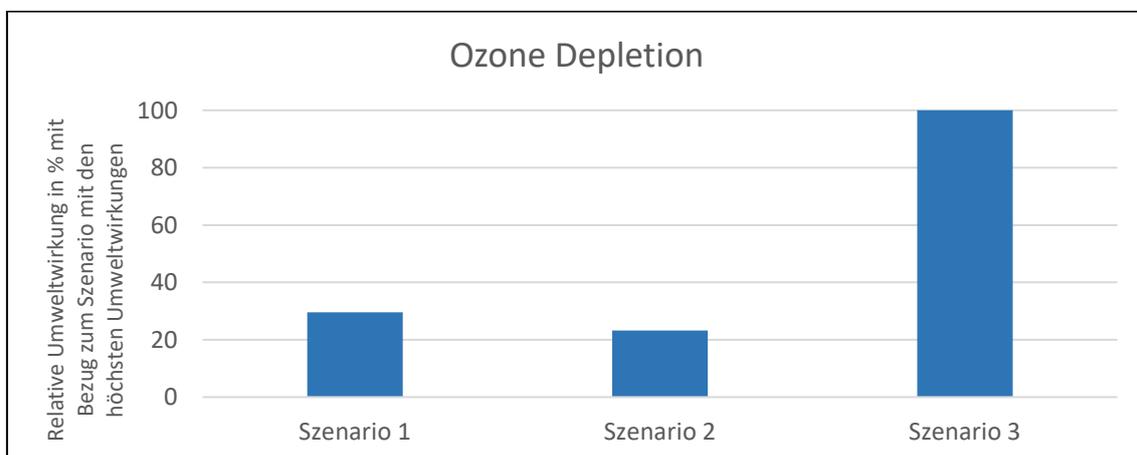


Abbildung 24: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Ozone Depletion

Mit  $0,102$  kGq U-235 eq werden auch in Szenario 3 die höchsten Umweltwirkungen in der Kategorie *Ionising Radiation* erreicht (Abbildung 25). In Szenario 1 entstehen 7 %, in Szenario 2 6 % der Umweltwirkungen in Relation zu Szenario 3. Durch die beiden Szenarien mit PV-Stromproduktion können demnach etwa 93 bis 94 % der Umweltwirkungen im Vergleich zu Szenario 3 eingespart werden.

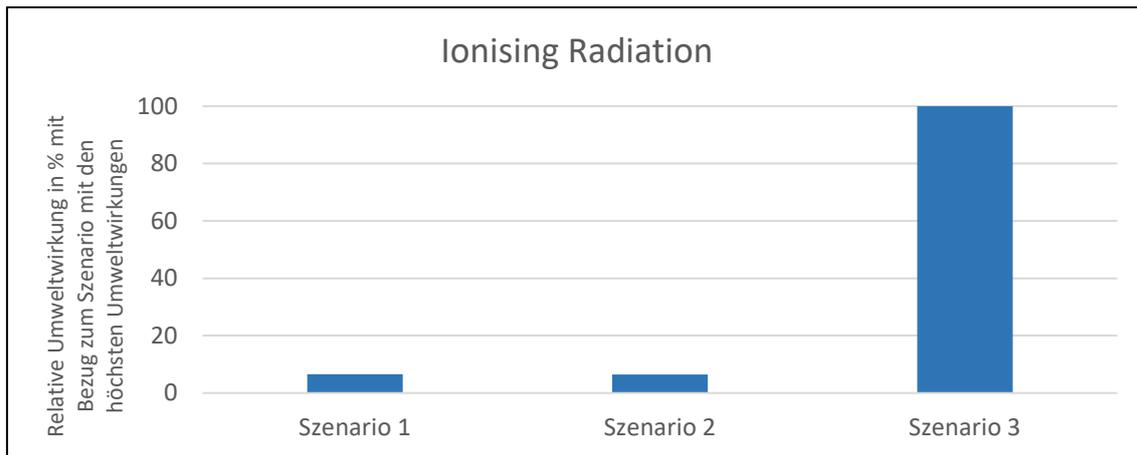


Abbildung 25: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie Ionising Radiation

In Abbildung 26 werden die relativen Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie *Photochemical Ozone Formation* dargestellt. Szenario 3 verursacht mit 0,001 kg NMVOC die höchsten Umweltwirkungen. Die in Szenario 1 erreichten 0,0006 kg NMVOC eq entsprechen etwa 61 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3. Szenario 2 verursacht mit 0,00047 kg NMVOC eq etwa 47 % der in Szenario 3 verursachten Umweltwirkungen. Demnach können durch die Szenarien 1 und 2 in der Wirkungskategorie *Photochemical Ozone Formation* 39 und 53 % der Umweltwirkungen pro kWh Strom und kg Kartoffeln eingespart werden.

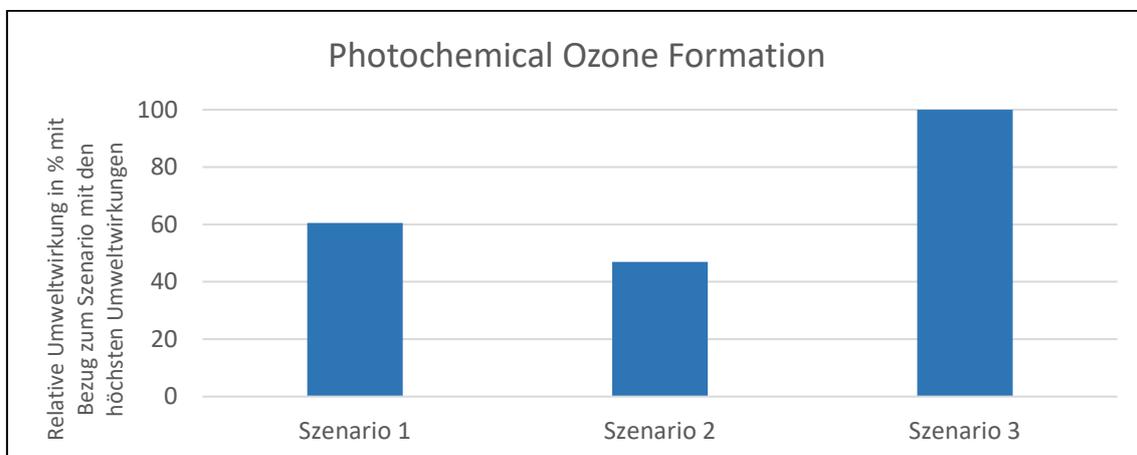


Abbildung 26: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie Photochemical Ozone Formation

#### 5.4.2 Gesundheitsrelevante Wirkungskategorien

Die folgenden Abbildungen zeigen die relativen Umweltwirkungen der Kategorien *Particulate Matter*, *Human Toxicity (non-cancer)* und *Human Toxicity (cancer)*. In der ersten Wirkungskategorie werden die höchsten Umweltwirkungen mit 1,82E-08 Krankheitsfällen pro kWh Strom und kg Kartoffeln im ersten Szenario erreicht (Abbildung 27). Im Vergleich dazu

verursacht Szenario 2 mit  $1,62E-08$  Krankheitsfällen etwa 89 % der in Szenario 1 durch Feinstaub ausgelösten Krankheitsfälle. Die Umweltwirkungen aus Szenario 3 entsprechen etwa 92 % der Umweltwirkungen aus Szenario 1.

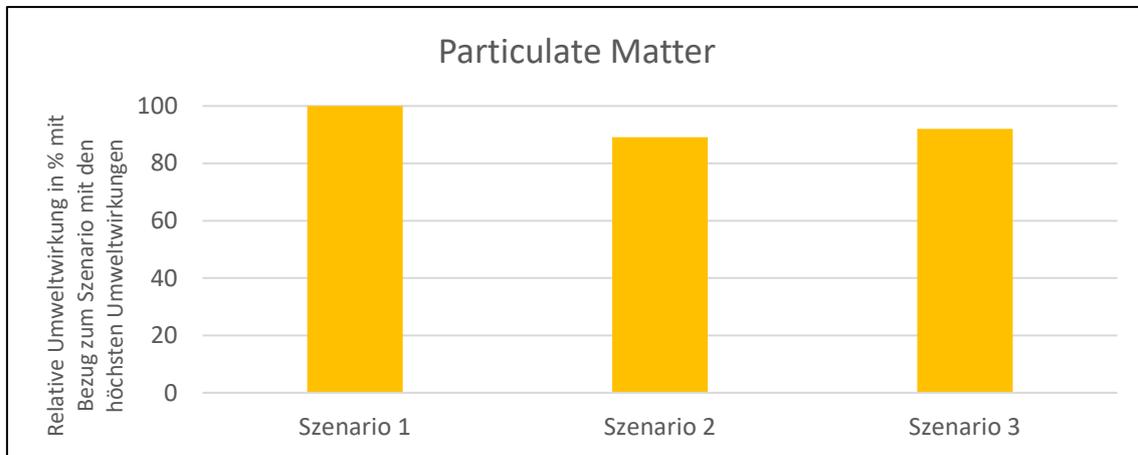


Abbildung 27: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Particulate Matter

In der Wirkungskategorie *Human Toxicity (non-cancer)* werden mit  $2,08E-08$  CTUh die höchsten Umweltwirkungen wiederum durch Szenario 3 verursacht (Abbildung 28). Szenario 1 erzeugt Umweltwirkungen von  $1,86E-08$  CTUh, was einem Anteil von 89 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 entspricht. Szenario 2 bringt mit  $1,77E-08$  CTUh und demnach 85 % die geringsten Umweltwirkungen hervor. Im Vergleich zu einer konventionellen Kartoffelproduktion mit Strombezug aus dem durchschnittlichen deutschen Strommix können durch die Szenarien 1 und 2 11 bis 15 % der nicht krebsverursachenden humantoxischen Umweltwirkungen eingespart werden.

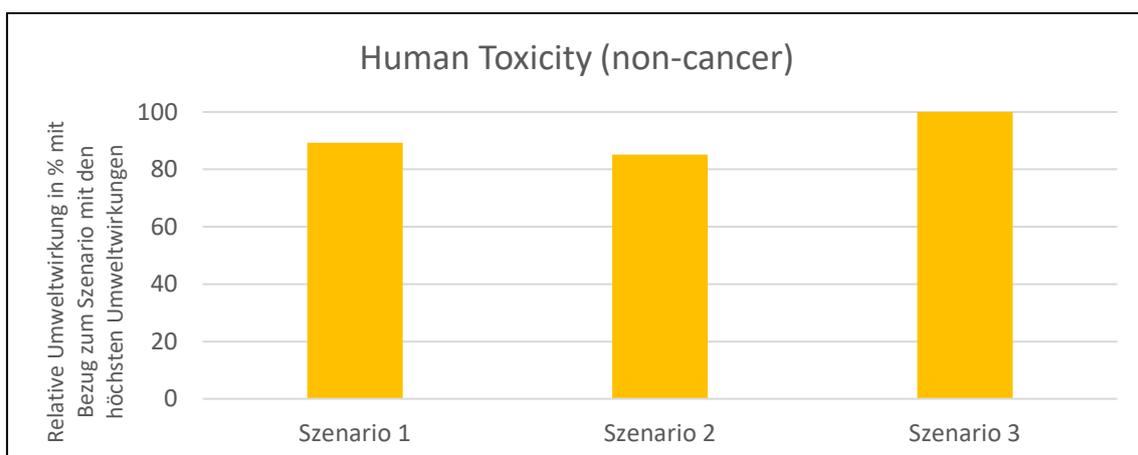


Abbildung 28: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Human Toxicity (non-cancer)

Bei den krebserzeugenden humantoxischen Umweltwirkungen (*Human Toxicity (cancer)*) werden mit  $4,86E-10$  CTUh in Szenario 1 die höchsten Umweltwirkungen ausgelöst (Abbildung 29). Die in Szenario 2 erzeugten  $3,35E-10$  CTUh entsprechen im Vergleich zu Szenario 1 etwa 70 %. Die Umweltwirkungen in Szenario 3 erreichen mit  $3,60E-10$  CTUh etwa 76 % der Umweltwirkungen aus Szenario 1.

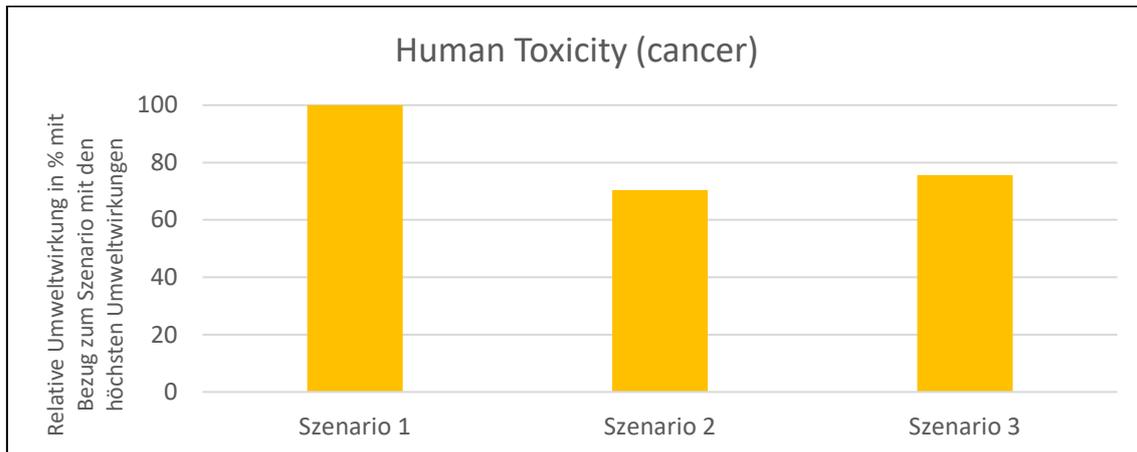


Abbildung 29: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie *Human Toxicity (cancer)*

#### 5.4.3 Ökosystemrelevante Wirkungskategorien

Hinsichtlich der ökosystemrelevanten Wirkungskategorien werden die höchsten Umweltwirkungen bei allen Kategorien in Szenario 3 erreicht. In der Wirkungskategorie *Acidification* entspricht dies  $0,00287$  Mol H<sup>+</sup> eq pro kWh Strom und kg Kartoffeln (Abbildung 30). Im Vergleich dazu entsprechen die Umweltwirkungen in Szenario 1 in dieser Kategorie mit  $0,0021$  Mol H<sup>+</sup> eq etwa 73 %. Szenario 2 verursacht mit  $0,0019$  Mol H<sup>+</sup> eq die geringsten Umweltwirkungen. Dieser Wert entspricht 68 % der Umweltwirkungen in Szenario 3.

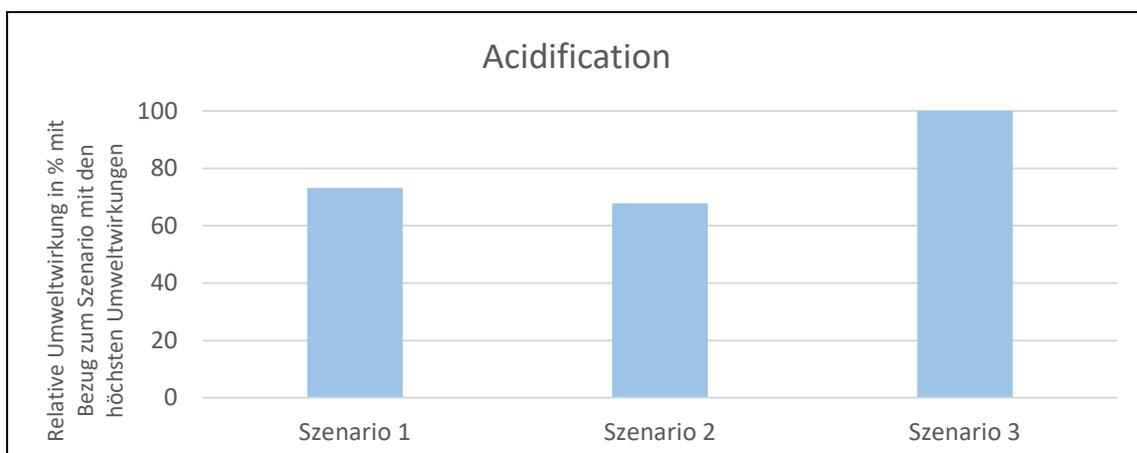


Abbildung 30: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie *Acidification*

In der Wirkungskategorie *Eutrophication (freshwater)* werden in Szenario 3 Umweltwirkungen von  $9,36E-04$  kg P eq verursacht (Abbildung 31). Die  $8,75E-05$  kg P eq aus Szenario 1 machen etwa 9 % der Umweltauswirkungen aus Szenario 3 aus, die Umweltwirkungen aus Szenario 2 entsprechen demnach etwa 7 % ( $6,93E-05$  kg P eq). Durch die PV-Stromproduktion der Szenarien 1 und 2 können demnach etwa 91 bis 93 % der Umweltwirkungen in der Kategorie *Eutrophication (freshwater)* eingespart werden.

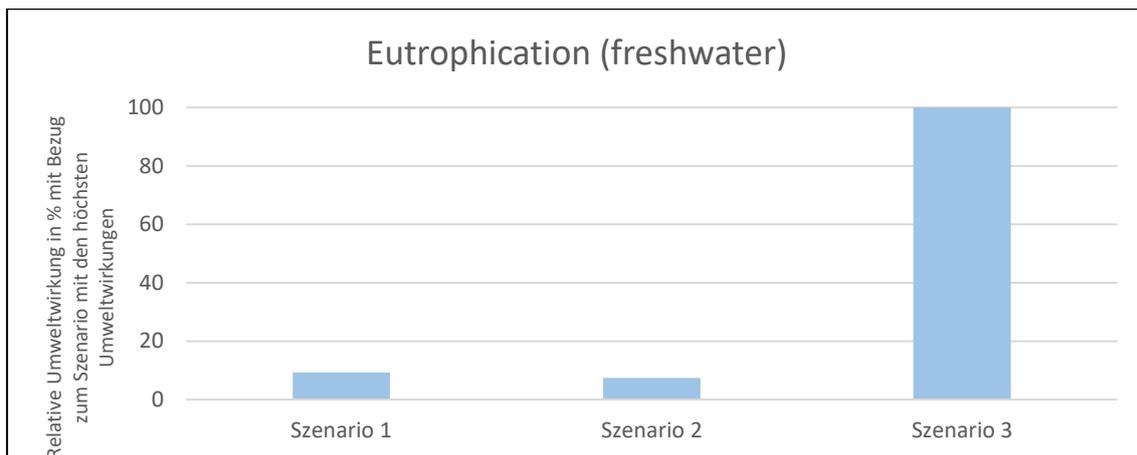


Abbildung 31: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie *Eutrophication (freshwater)*

In der Wirkungskategorie *Eutrophication (marine)* entsprechen die Umweltwirkungen aus Szenario 1 mit  $0,00193$  kg N eq etwa 85 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 ( $0,0023$  kg N eq). Szenario 2 verursacht mit  $0,001902$  kg N eq die geringsten Umweltwirkungen in dieser Kategorie, was in Relation mit denen aus Szenario 3 etwa 84 % entspricht (Abbildung 32).

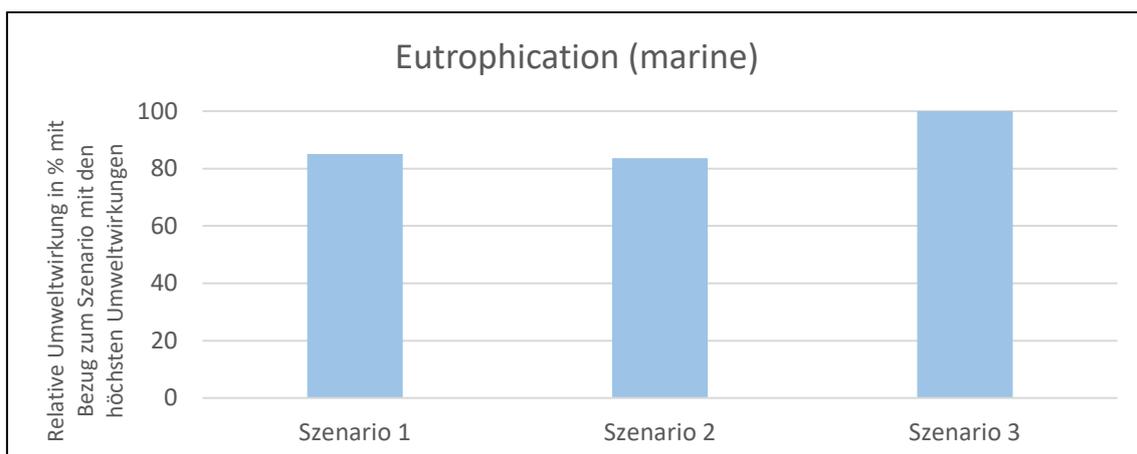


Abbildung 32: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie *Eutrophication (marine)*

Auch in der Wirkungskategorie *Eutrophication (terrestrial)* werden durch Szenario 3 die höchsten Umweltwirkungen verursacht (Abbildung 33). Mit  $0,0082$  Mol N eq und  $0,0077$  Mol N

eq entsprechen die Umweltwirkungen aus den Szenarien 1 und 2 etwa 82 und 77 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3. Es können demnach etwa 18 bis 23 % im Vergleich zu Szenario 3 eingespart werden.

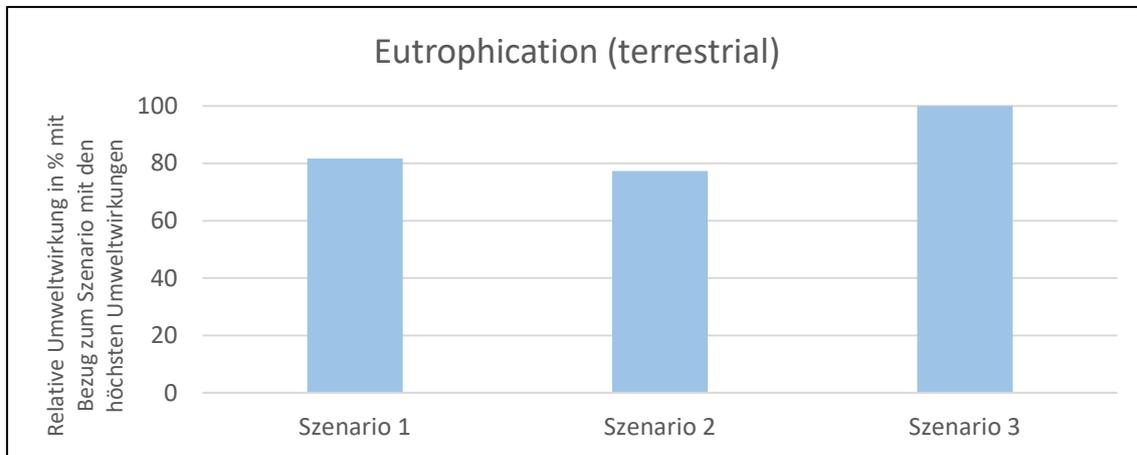


Abbildung 33: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Eutrophication (terrestrial)

Mit 137,73 CTUe machen die Umweltwirkungen des Szenarios 1 in der Kategorie *Ectotoxicity, freshwater* etwa 96 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 aus (143,98 CTUe). In Szenario 2 werden 136,81 CTUe erreicht, was etwa 95 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 entspricht (Abbildung 34).

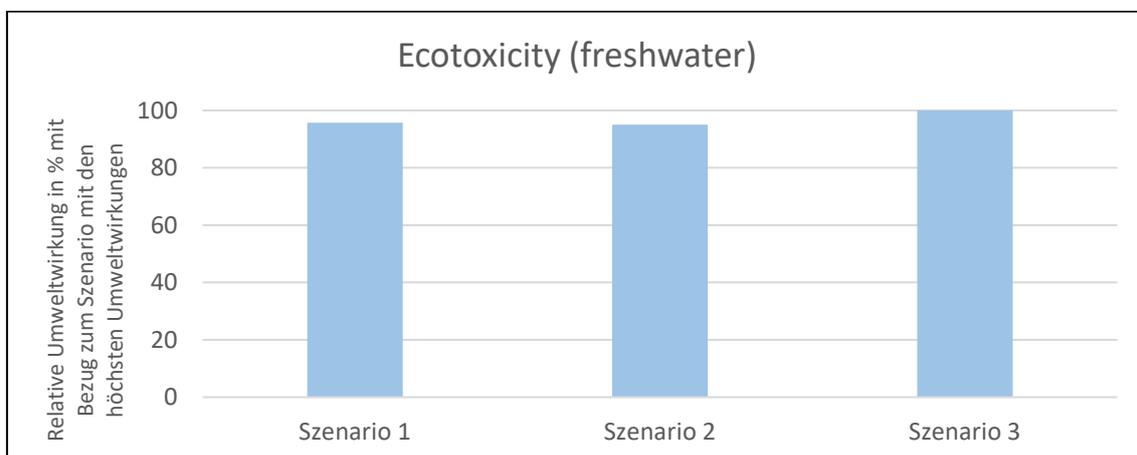


Abbildung 34: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Ecotoxicity (freshwater)

#### 5.4.4 Ressourcenrelevante Wirkungskategorien

Bei den ressourcenrelevanten Wirkungskategorien *Land Use, Water Use* und *Resource Use (fossils)* werden durch Szenario 3 erneut die höchsten Umweltwirkungen erreicht. In Szenario 1 in der Kategorie *Land Use* wird ein Wert von 15,5 erreicht, was dem geringsten Wert entspricht

und etwa 67 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 ausmacht (Abbildung 35). In Szenario 2 werden mit 16,12 etwa 69 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 erreicht.

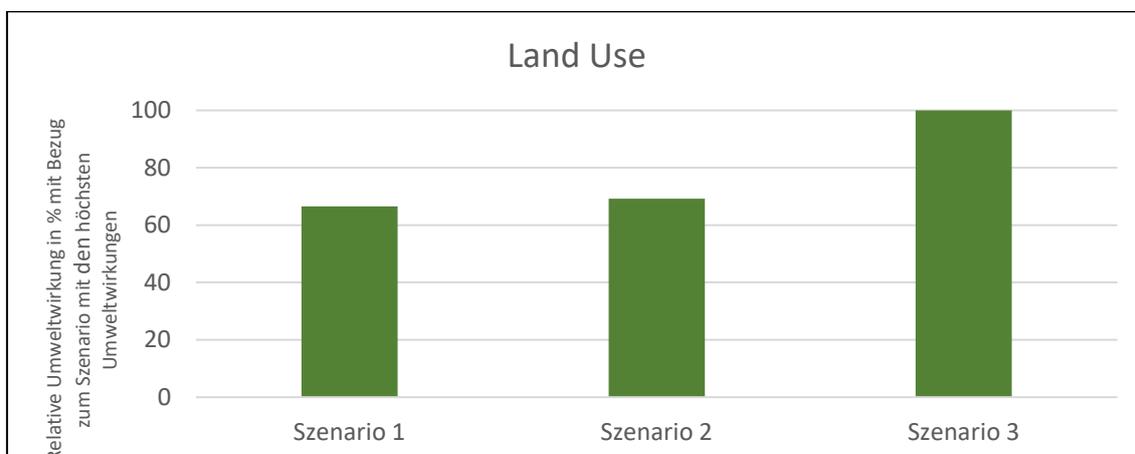


Abbildung 35: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Land Use

Die in Szenario 1 verbrauchten Wassermengen (*Water Use*) von 0,0577 m<sup>3</sup> entsprechen etwa 33 % der Wassermengen in Szenario 3, welches den höchsten Wasserverbrauch verursacht (Abbildung 36). Die geringsten Wassermengen werden in Szenario 2 mit 0,0503 m<sup>3</sup> und demnach 29 % der Wassermengen in Szenario 3 verbraucht.

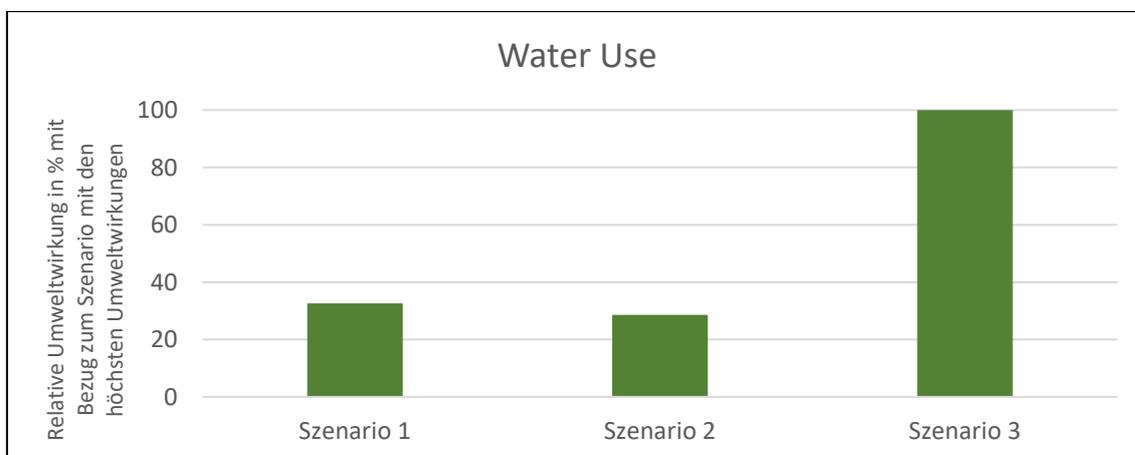


Abbildung 36: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Water Use

Beim Ressourcenverbrauch fossiler Energieträger (*Resource Use (fossils)*) werden die geringsten Umweltwirkungen durch das Szenario 2 erreicht (Abbildung 37). Die Umweltwirkungen entsprechen mit etwa 1,51 MJ etwa 17 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3. Auch in Szenario 1 werden mit 1,88 MJ nur etwa 22 % der Umweltwirkungen aus Szenario 3 erreicht.

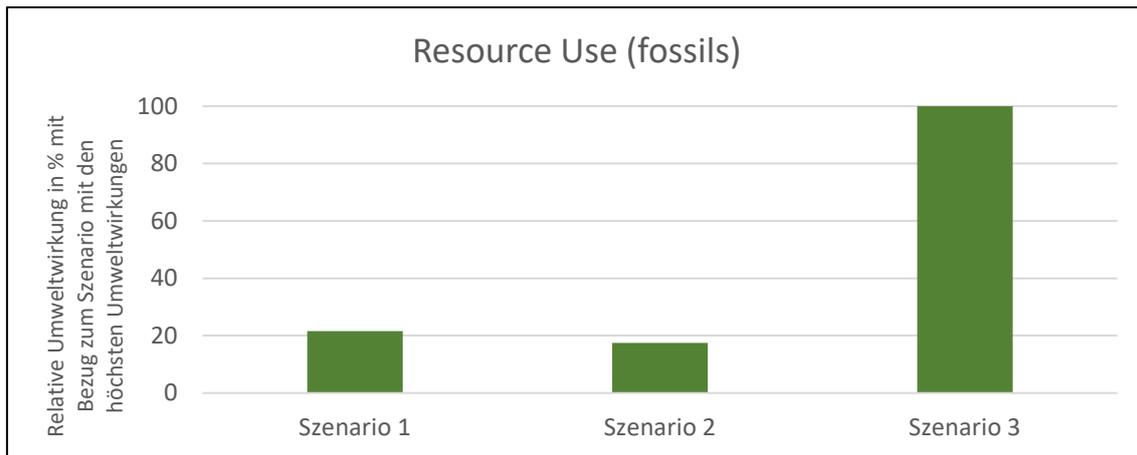


Abbildung 37: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Resource Use (fossils)

In Szenario 1 werden in der Wirkungskategorie *Resource Use (minerals and metals)* die meisten Ressourcen verbraucht (Abbildung 38). Im Vergleich zu den  $1.08E-05$  kg Sb eq werden in Szenario 2 mit  $8,87E-06$  etwa 82 % verbraucht. Für Szenario 3 werden mit  $1,68E-06$  kg Sb eq etwa 16 % der Ressourcen aus Szenario 1 und damit die wenigsten Ressourcen benötigt.

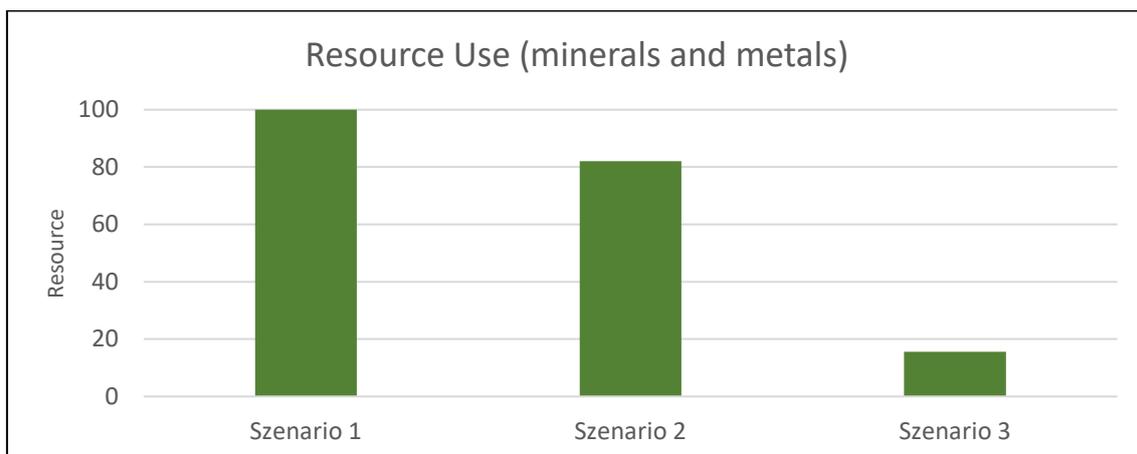


Abbildung 38: Relative Umweltbilanzergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in % in Relation zum Szenario mit den höchsten Umweltwirkung in der Wirkungskategorie Resource use (minerals and metals)

## 6 Auswertung und Interpretation

### 6.1 Schlüsselergebnisse und signifikante Parameter

In dieser Studie wurden modellhaft die Umweltwirkungen einer APV-Anlage mit den Umweltwirkungen von Systemen mit getrennt stattfindender Kartoffel- und Stromproduktion, die sowohl mit einer FF-PV-Anlage als auch mit dem deutschen Strom-Mix erzeugt wird, untersucht. Insgesamt werden durch das APV-Szenario (Szenario 1) ähnliche Umweltwirkungen wie durch das Szenario 2 (FF-PV-Szenario mit räumlich getrennter Kartoffelproduktion) verursacht. Wie Kapitel 5.4 zeigt, werden in 12 von insgesamt 17 Wirkungskategorien die höchsten Umweltwirkungen durch das Szenario 3 (Kartoffelproduktion und Stromproduktion durch deutschen Strom-Mix) erreicht, von denen in 8 Kategorien die Kartoffelproduktionen den Großteil der Umweltwirkungen verursacht. In 15 Wirkungskategorien verursacht das Szenario 2 die geringsten Umweltwirkungen. Für die unterschiedlichen Ergebnisse sollen im Folgenden mögliche Erklärungsansätze sowie relevante Parameter diskutiert werden. Aufgrund der Limitationen durch die Verwendung der Demo-Version von SimaPro konnte keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, die einen eindeutigen Überblick über die Hauptverursacher der Umweltwirkungen geben kann. Die Ergebnisse wurden deshalb hinsichtlich der prozentualen Anteile der Systemkomponente an den Umweltwirkungen analysiert.

Da die Kartoffelproduktion in allen drei Szenarien identisch bzw. sehr ähnlich ist, sind die Unterschiede in den Ergebnissen auf die Stromproduktion zurückzuführen. In Szenario 3 wurde auf den deutschen Strom-Mix zurückgegriffen. Besonders in den klimarelevanten Wirkungskategorien *Climate Change*, *Ozone Depletion*, *Ionising Radiation* und *Photochemical Ozone Formation* bestehen große Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Szenario 3 und Szenario 2 sowie teilweise Szenario 1. Obgleich der deutsche Strommix einen wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien aufweist, wurden 2020 noch etwa 36,2 % durch fossile Brennstoffe wie Braunkohle, Steinkohle und Erdgas gedeckt (Fraunhofer ISE 2021), was die im Vergleich zu den Szenarien mit PV-Stromproduktion hohen Umweltwirkungen in diesen Kategorien erklärt. Zwischen Szenario 1 und Szenario 2 bestehen lediglich geringe Unterschiede in diesen Wirkungskategorien. Hinsichtlich der Stromproduktion unterscheiden sich Szenario 1 und Szenario 2 lediglich in der Höhe der Unterkonstruktion, sodass die erhöhten Umweltwirkungen in Szenario 1 auf die erhöhten Verbräuche an Stahl und sonstigen Komponenten der Unterkonstruktion zurückzuführen sind. Da bei aufgeständerten APV-Systemen deutlich größere Höhen erreicht werden müssen als bei FF-PV-Systemen, können die Unterschiede hier

vermutlich nicht reduziert werden. Zwar erreicht Szenario 3 auch bei den ökosystemrelevanten Wirkungskategorien *Acidification*, *Eutrophication (freshwater)*, *Eutrophication (marine)*, *Eutrophication (terrestrial)* und *Ecotoxicity (freshwater)* die höchsten Umweltwirkungen, die Unterschiede zwischen den Szenarien in den Wirkungskategorien *Acidification*, *Eutrophication (marine)*, *Eutrophication (terrestrial)* und *Ecotoxicity (freshwater)* sind hier jedoch deutlich geringer. Hier verursacht die Kartoffelproduktion in allen Szenarien den Großteil der Umweltwirkungen. Durch die Düngung, den Einsatz von Pestiziden sowie die hierfür aufgebrauchte Energie gelangen Stoffe in Boden und Wasser, die zu den genannten Umweltwirkungen führen (Liu et al. 2021; Khan und Mohammad 2014; Huang et al. 2017). Da die Kartoffelproduktion in allen Szenarien ähnlich modelliert wurde, sind die relativ geringen Unterschiede dennoch auf die Stromproduktion zurückzuführen. Die Unterschiede zwischen Szenario 1 und 2 entstehen hier wie zuvor erwähnt ebenfalls durch die Herstellung der Unterkonstruktion, die in Szenario 1 deutlich mehr Material erfordert. Sie fallen jedoch mit Unterschieden zwischen 1 und 5 % sehr gering aus. Der Unterschied zum Szenario 3 ergibt sich vermutlich durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Sowohl für marine (Jaworski et al. 1997) als auch terrestrische (Bednova et al. 2018) Ökosysteme stellen Stickstoffoxide durch die Verbrennung fossiler Energieträger eine Ursache für die ansteigende Eutrophierung dar. Gleiches gilt für die Wirkungskategorie *Acidification* (Rice und Herman 2012).

Die Unterschiede in den Ergebnissen der gesundheitsrelevanten Wirkungskategorien liegen zwischen 11 und 30 %. In allen Szenarien wird auch hier ein Großteil durch die Kartoffelproduktion verursacht, da die Landwirtschaft durch die Freisetzung von Ammoniak erheblich zur Feinstaubbildung beiträgt (Pattey und Qiu 2012; Wagner et al. 2015). Wie bereits erwähnt, waren die Annahmen zur Kartoffelproduktion bei allen Szenarien sehr ähnlich, sodass anzunehmen ist, dass die Unterschiede in der Stromproduktion liegen. Die Herstellung der PV-Module in den Szenarien 1 und 2 erfolgt in China. Wenngleich China das Land mit dem höchsten Anteil an Erneuerbaren Energien darstellt, wird ein Großteil des Primärenergieverbrauchs durch Kohle gedeckt (BP p.l.c. 2021). Die Ursache für die in Szenario 1 erhöhten Umweltwirkungen in den genannten Kategorien liegt jedoch vermutlich in den erhöhten Stahlverbräuchen bei der Herstellung der Unterkonstruktion, da die Annahmen für die Modulherstellung in Szenario 1 und 2 die gleichen sind. Die Emissionen der Stahlindustrie werden in der Literatur als eine der Hauptursachen für Feinstaubemissionen und menschliche Gesundheitsrisiken dargestellt (Jia et al. 2018; Olmez et al. 2016).

In der Wirkungskategorie Land Use erreicht Szenario 1 aufgrund der gesteigerten Effizienz niedrigere Werte als die übrigen Szenarien. Auch beim Wasserverbrauch liegen die höchsten Werte beim dritten Szenario, da die Verstromung von Kohle mit einem hohen Wasserverbrauch einhergeht und in manchen Ländern sogar zur Wasserknappheit beiträgt (Ma et al. 2018). Der Anteil an erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch ist in Deutschland zwar höher als in China (AG Energiebilanzen e.V. 2021), dieser Umstand kann den Ressourcenverbrauch fossiler Energieträger in Szenario 3 jedoch auch trotz der in China produzierten PV-Module nicht ausgleichen. Die erhöhte Ressourcennutzung in der Kategorie *Resource Use (minerals and metals)* ist wie bereits beschrieben auf die erhöhten Materialverbräuche durch die Unterkonstruktion zurückzuführen. Beide PV-Szenarien sind demnach hinsichtlich mineralischer und metallischer Ressourcen materialintensiv. Die verwendeten Materialien können jedoch zum Großteil recycelt werden.

Die Sensitivitätsanalyse in Hengstler et al. (2021) zeigt, dass die Nutzungsparameter (Anlagenlaufzeit, Modullebensdauer, Inverterlebensdauer, Performance Ratio, Degradationsverluste) und die Herstellungsphase der PV-Module sowie der Unterkonstruktion einen Großteil der Umweltwirkungen in der Stromproduktion verursachen. Den größten Einfluss hat dabei der bezogene Strom-Mix bei der Modulherstellung, der sich je nach Land deutlich unterscheiden kann. In dieser Studie wurde von der Modulherstellung in China ausgegangen, welcher im Vergleich mit der mono c-Si PV Modulherstellung im asiatisch-pazifischem Raum, in den USA und Europa das höchste Treibhausgaspotenzial aufweist (Hengstler et al. 2021, 182 f.). Da in dieser Studie auf dieselben Sachbilanzdaten für die Stromproduktion zurückgegriffen wurde, können die Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse auf die hier beschriebenen Ergebnisse übertragen werden. Die Produktion in einem der genannten Länder könnte die Umweltwirkungen beider PV-Szenarien, allen voran in den klimarelevanten Wirkungskategorien, demnach noch deutlich verbessern.

## 6.2 Vollständigkeit und Konsistenz

Neben der Rohstoffgewinnung und der Vorverarbeitung stellt das Recycling bzw. der End-of-life-Prozessschritt einen der relevantesten Lebenszyklusstadien von PV-Modulen dar (Stolz et al. 2016, S. 139). Aufgrund methodisch notwendiger Festlegungen konnte dieser Abschnitt im Lebenszyklus der beiden PV-Szenarien jedoch nicht berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.3). Um auch das Lebensende in einer Ökobilanzierung betrachten zu können, müssten die Systemgrenzen sowohl der Kartoffel- als auch der Stromproduktion zu einem cradle-to-grave-Ansatz erweitert werden. Dies kann erhebliche Auswirkungen auf die Umweltbilanz haben.

Hengstler et al. (2021, S. 254) zeigen, dass auch bzw. gerade durch die Berücksichtigung des Lebensendes PV-Systeme vor allem in den klimarelevanten Wirkungskategorien deutlich bessere Ergebnisse gegenüber fossilen Energieträgern aufweisen.

Des Weiteren wurde bei der Betrachtung der Strom-Mixe für die Sachbilanz sowohl in China als auch in Deutschland auf Hintergrunddaten aus dem Jahr 2014 zurückgegriffen. In beiden Ländern haben sich der Strom-Mix und damit auch die Umweltwirkungen seitdem stark verändert. Aufgrund wachsender Anteile an erneuerbaren Energien kann auch in diesen Bereichen mit einer Verbesserung der Umweltbilanzen aller Szenarien gerechnet werden.

Insgesamt handelt es sich bei den für die Stromproduktion verwendeten Daten nach Stolz et al. (2016) und Frischknecht et al. (2015) um vollständige und detaillierte Daten, die auf Messungen und Herstellerangaben beruhen und eine hohe Qualität aufweisen (Hengstler et al. 2021, S. 259). Durch die Aktualisierungen gemäß Hengstler et al. (2021) konnten auch die Probleme mit dem Datenalter teilweise beseitigt werden. Die Aktualisierungen wurden auf Basis von Literaturangaben durchgeführt und durch externe Expert\*innen überprüft. Für beide PV-Szenarien wurden demnach Daten aus denselben Quellen verwendet. Die für die Kartoffelproduktion aller Szenarien verwendeten Daten aus der Agri-footprint 5 Datenbank basieren auf aktuellen Studien und umfassen alle relevanten Prozesse zur Kartoffelproduktion im konventionellen Anbau. Insgesamt wurden die festgelegten Systemgrenzen somit vollständig abgebildet. Da bei allen Szenarien die gleichen Outputs generiert und auf dieselben Daten, Annahmen und Methoden zurückgegriffen wurde, können die modellierten Systemgrenzen sowie die Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz als konsistent angesehen werden.

Insgesamt basieren die in dieser Studie ermittelten Ergebnisse über die Ökobilanz für ein APV-System im Vergleich zu Systemen mit getrennt stattfindender Strom- und Kartoffelproduktion auf Annahmen hinsichtlich der Anlagen-Designs und Modellierungen der Sachbilanzdaten. Wenngleich die verwendeten Daten als vollständig und konsistent angesehen werden können, stellen die hier beschriebenen Ergebnisse eine generelle Einschätzung potenzieller Umweltwirkungen von APV-Systemen dar und erlauben die allgemeine Einordnung eines solchen Systems im Vergleich zu herkömmlich umgesetzten Systemen. Sie stellen jedoch keine präzisen und auf eine spezifische APV-Anlage übertragbare Wirkungen dar. Sollen die Umweltwirkungen einer spezifischen Anlage untersucht werden, sollte im Rahmen der Sachbilanz auf spezifische auf realen Werten basierende Daten zurückgegriffen werden. Die hier

beschriebene Methodik und Vorgehensweise kann jedoch als Leitfaden zur Durchführung einer Ökobilanzierung für APV-Anlagen dienen.

Da die unterschiedlichen Softwares und Datenbanken zur Durchführung von Ökobilanzierungen auf teilweise unterschiedlichen Daten und Modellen beruhen, muss hier zudem angemerkt werden, dass sich die Auswahl der Software und der Datenbanken auch trotz DIN-konformer Vorgehensweise auf die Ergebnisse auswirken kann (Speck et al. 2016).

### 6.3 Ökobilanzierungen als Umweltanalyseinstrument für APV-Systeme

Ökobilanzierungen stellen ein Instrument der Umweltanalyse auf Mikroebene, d.h. für bestimmte Produkte oder Dienstleistungen dar. Die Umweltwirkungen wurden deshalb auf die beiden Produkte Kartoffeln und Strom bezogen. Gleichzeitig bilden sie relativ große geografische Wirkungsbereiche ab, da die Herstellung und Rohstoffgewinnung für bestimmte Komponente überall auf der Welt stattfinden können. Wie Kapitel 2.6 aufgezeigt hat, entstehen viele der bisher erforschten Vorteile von APV-Systemen am Vorhabensstandort, indem Feldfrüchte vor extremen Witterungsbedingungen geschützt, der Wasserverbrauch verringert oder die Biodiversität erhöht werden. Solche Vorteile auf Projektmaßstabebene können durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produktes im globalen Kontext relativiert werden. Sollen Umweltwirkungen am Vorhabensstandort auf Makro-, d.h. auf Projektebene, ermittelt werden, stellt bspw. eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) eine geeignetere Methode dar, die die hier ermittelten Ergebnisse auf der Projektebene spezifizieren können, sodass sowohl Vor- als auch Nachteile eines bestimmten Systems am Vorhabensstandort herausgearbeitet werden. Die Umweltwirkungen beider Umweltanalyseinstrumente unterscheiden sich demnach hinsichtlich der Größe des Analyseobjekts und des betrachteten Maßstabs

Die Ergebnisse einer Ökobilanzierung stellen zudem im Vergleich zu einer UVP nicht die wirklich auftretenden Auswirkungen auf die Umwelt dar, sondern bilden potenzielle Umweltwirkungen im Rahmen des Lebenszyklus eines Produktes dar. Sie kann dabei einen Aspekt in der Entscheidungsfindung abbilden und diese unterstützen. Bei der Umsetzung einer Anlage spielen jedoch auch finanzielle Aspekte eine Rolle, die in dieser Studie nicht betrachtet wurden.

## 7 Ausblick: Potenziale zur Verbesserung der Ökobilanz

Wie zuvor gezeigt werden konnte, weisen APV-Systeme im Vergleich zum Strombezug aus dem deutschen Strom-Mix hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen deutliche Vorteile auf. Die meisten APV-Projekte stellen jedoch noch Forschungsvorhaben dar, in denen ein optimales Anlagendesign sowie verbesserte Materialien derzeit erforscht und weiterentwickelt werden. Die allgemeinen Entwicklungen aus der PV-Branche sowie Erkenntnisse aus den Projekten zur APV können dabei helfen, die Ökobilanzen von APV-Systemen noch weiter zu verbessern. Hierfür soll im Folgenden ein Ausblick auf mögliche Verbesserungspotenziale gegeben werden.

Insgesamt ist bei allen in dieser Studie betrachteten Szenarien anzumerken, dass sich bei den Annahmen zur Kartoffelproduktion auf den konventionellen Anbau bezogen wurde. Hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Ökobilanzen konventionellen und ökologischen Anbaus bestehen unterschiedliche Aussagen. Aufgrund höherer Emissionen klimarelevanter Gase durch verstärkte Dünger- und Pestizidnutzung wird beim konventionellen Anbau insgesamt jedoch von einer schlechteren Ökobilanz gegenüber ökologischem Anbau ausgegangen (Rahmann et al. 2008). Demgegenüber können beim ökologischen Anbau geringeren Ernteerträge in Bezug zur Anbaufläche stehen, die in der Ökobilanzierung in der Regel auf die Produkteinheit (bspw. 1 kg des Produktes) bezogen werden und die Vorteile der umweltfreundlicheren Verfahren aufwiegen könnten. Boone et al. (2019) schlagen deshalb die Allokation auf Basis der Bereitstellung von Ökosystemleistungen vor, mit der die überwiegenden Vorteile stärker herausgearbeitet werden. Allerdings zeigen andere Untersuchungen eines 30-jährigen Systemvergleichs ein gleiches Ernteniveau. In Jahren mit großer Trockenheit können sogar höhere Ernteerträge durch den ökologischen Anbau erreicht werden (Rodale Institute 2011). Es lässt sich demnach vermuten, dass die Umweltbilanz der in dieser Studie betrachteten Systeme durch eine ökologische Kartoffelproduktion verbessert werden könnte.

Auch eine Elektrifizierung der Landwirtschaft könnte bei gleichzeitigem Ausbau der Erneuerbaren Energien die Ökobilanz von APV-Anlagen verbessern. Wie eingangs erklärt, stellt die Landwirtschaft einen der größten Emittenten von THG dar, was vor dem Hintergrund des Klimawandels eine Entwicklung zu nachhaltigeren Bewirtschaftungsmethoden erfordert. Die Nutzung elektrischer Fahrzeuge kann hierbei eine entscheidende Rolle einnehmen. Elektrische Antriebssysteme stehen dabei zwar noch vor Herausforderungen hinsichtlich der Kosten und der Speicherdichte, sie erreichen jedoch bereits sehr gute Wirkungsgrade und eine zukünftige Verbesserung der Speicherpotenziale wird angenommen (Pickel 2018, S. 55). Elektrifizierte

Traktoren oder Anbaumaschinen sind bereits verfügbar (ZF Friedrichshafen AG o.J.). Auch Smart-Farming-Technologien, die die Prozessgestaltung, bspw. der Bewässerung von Feldfrüchten, optimieren können (ebd.), können sich positiv auf die Ökobilanz auswirken und die Bewirtschaftung in APV-Systemen erleichtern. Die Digitalisierung der Landwirtschaft wird als die vierte Revolution der Landwirtschaft bezeichnet und umfasst bspw. die Nutzung autonom fahrender Maschinen wie Ernterobotern (Knierim et al. 2019, S. 3; Fountas et al. 2015, S. 14). Hierdurch könnten Problemen der Zugänglichkeit durch zu große Maschinen in APV-Systemen entgegengewirkt und die Höhe der Unterkonstruktion reduziert werden.

Die Stahlverbräuche für die Produktion der Unterkonstruktion, die bei vielen der Wirkungskategorien einen der Hauptverursacher der Umweltwirkungen darstellten, wurden auf Basis der APV-Anlage Heggelbach kalkuliert, da diese auf die Kartoffelproduktion angepasst wurde. Die Anlage Heggelbach stellt eine der ersten in Deutschland umgesetzten APV-Anlagen und damit eine Pilotanlage dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Materialverbrauch zukünftig durch Erfahrungen aus weiteren Projekten und aufgrund verschiedener Anlagendesigns verringert werden kann. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Seiltragsystemen, die die Unterkonstruktionen aus Stahl ersetzen sowie den Materialverbrauch und die Umweltwirkungen deutlich verringern könnten. Solche Seilsysteme befinden sich zur Zeit in der Weiterentwicklung und ermöglichen eine uneingeschränkte Nutzung der sich darunter befindenden Flächen (area + GmbH o.J.). Auch die Verwendung anderer Materialien könnte die Umweltbilanz von APV-Systemen noch deutlich verbessern. In einer Anlage in den Niederlanden wird bereits eine Unterkonstruktion aus Holz verwendet (SolarPower Europe 2021, S. 47). Hinsichtlich der Modultechnologie lässt sich aufgrund der bisherigen Entwicklungen vermuten, dass die Materialverbräuche verringert sowie die Effizienz der Module auch in Zukunft steigen werden, was sich positiv auf die Umweltbilanz von PV-Systemen, einschließlich der APV, auswirken wird. Hengstler et al. (2021, S. 254) haben aufgezeigt, dass CIGS- und CdTe-Module geringere Umweltwirkungen als mono- und multikristalline Silizium-Module verursachen und damit eine bessere Ökobilanz aufweisen. Zudem können Anlagen durch neue Ansätze wie flexible Solarmodule besser an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden, wodurch diese die Ökobilanz durch einen verringerten Materialverbrauch positiv beeinflussen können (vgl. Flisom AG o.J.).

Viele der beschriebenen Technologien sind bereits verfügbar und können sowohl in der regulären FF-PV als auch in der APV eingesetzt werden. Der Transfer von Forschung und Entwicklung der APV in die Praxis kann dabei helfen, vorteilhafte Technologien

weiterzuentwickeln und zu fördern. Hierdurch werden Emissionen und Ressourcenverbrauch weiter verringert und die Ökobilanz von PV-Systemen, einschließlich der APV, wird noch weiter verbessert.

## 8 Fazit

Die Landwirtschaft steht vor vielfältigen Herausforderungen. Neben dem Klimawandel, der vermehrt zu Extremereignissen wie Trockenperioden und Starkregenereignissen und damit zu einer forcierten Anpassung der Landwirtschaft führen wird, stellt vor allem in bevölkerungsreichen Ländern wie Deutschland die Flächenkonkurrenz mit anderen Nutzungen, bspw. dem Ausbau der erneuerbaren Energien, ein Kernproblem dar. Ein möglicher Lösungsansatz für diese Probleme stellt die APV dar, die die landwirtschaftliche Produktion mit der Generierung von erneuerbarem Strom flächenschonend vereint. Die über den landwirtschaftlichen Flächen installierten PV-Anlagen bieten neben der flächenschonenden Stromproduktion Vorteile hinsichtlich der Anbaubedingungen. Mit dieser Studie wurden die Umweltwirkungen einer APV-Anlage untersucht und die Forschungslücke hinsichtlich aufgeständerter Anlagen geschlossen.

Hierfür wurden drei Szenarien zur Produktion von Kartoffeln und Strom hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen mit Hilfe einer Ökobilanzierung analysiert. Im Fokus stand dabei die Betrachtung eines APV-Systems, welches beide Produktionen in einem System vereint. Das APV-System (Szenario 1) wurde hinsichtlich seiner Auswirkungen mit zwei weiteren Systemen verglichen: Das Szenario 2 umfasste die voneinander räumlich getrennte Produktion von Kartoffeln sowie Strom mit Hilfe einer Freiflächen-PV-Anlage, in Szenario 3 wurde die PV-Stromproduktion durch den deutschen Strom-Mix ersetzt. Als Output wurden bei allen Szenarien über 30 Jahre Stromerträge von 14.402.942 kWh und Kartoffelerträge von 923.610 kg berechnet. Die vergleichende Ökobilanzierung hat aufgezeigt, dass Systeme mit PV-Stromproduktion Systemen mit Strombezug aus dem deutschen Strommix in nahezu allen Wirkungskategorien überlegen sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass APV-Anlagen ähnliche Umweltwirkungen wie FF-PV-Anlagen verursachen und nur geringe Unterschiede aufweisen. Die Ursachen der Umweltwirkungen sind je nach Wirkungskategorie sehr unterschiedlich und zu etwa gleichen Teilen der Kartoffel- und der Stromproduktion zuzurechnen. Hinsichtlich des aufgeständerten APV-Systems entstehen die erhöhten Umweltwirkungen im Vergleich zum Szenario mit einer von der Kartoffelproduktion entkoppelten FF-PV-Anlage in der Regel durch die erhöhten Materialverbräuche für die Herstellung der Unterkonstruktion. Im Vergleich dazu konnten Studien zeigen, dass APV-Anlagen mit vertikal ausgerichteten PV-Modulen oder zur Produktion von Kaninchenfleisch sogar bessere Ökobilanzen als FF-PV-Anlagen erreichen (vgl. Agostini et al.

2021; Pascaris et al. 2021). Dennoch weist das APV-Szenario in 13 der insgesamt 16 Wirkungskategorien teilweise deutlich geringere Umweltwirkungen als eine konventionell getrennt stattfindende Strom- und Kartoffelproduktion auf, in der Wirkungskategorie Land Use werden sogar die geringsten Umweltwirkungen erreicht, was die Effizienz von APV-Systemen hinsichtlich des Flächenverbrauchs verdeutlicht, selbst wenn die Herstellung der Anlagenkomponente und nicht nur der Flächenverbrauch der Anlage selbst betrachtet werden. Aufgrund der modellhaften Dimensionierung der Szenarien, speziell der APV-Anlage, ist zu beachten, dass sich die Materialverbräuche nach einer bereits umgesetzten Anlage in Bayern (Anlage Heggelbach) richteten. Die Anlage stellt eine Pilotanlage dar, für die eine sehr stabile Unterkonstruktion errichtet wurde. In Zukunft kann von deutlich geringeren Materialverbräuchen für die Unterkonstruktion und damit auch mit verringerten Umweltwirkungen gerechnet werden, die den Unterschied einerseits zwischen beiden PV-Szenarien verringern werden, andererseits den Unterschied zu dem dritten Szenario (Strombezug aus dem deutschen Strom-Mix) vergrößern wird. Hierdurch werden sich die Vorteile der APV auch hinsichtlich der überregionalen Umweltwirkungen vermutlich verstärken.

Insgesamt weist die APV ein hohes technisches Potenzial auf, das in Deutschland in der Kategorie der schattentoleranten Kulturen etwa 1.700 GWp beträgt und demnach ein Vielfaches der derzeitig installierten PV-Kapazität entspricht (Trommsdorff et al. 2020, S. 10). Die hier erbrachten Ergebnisse liefern eine allgemeine Einschätzung zu den Umweltwirkungen der APV und zeigen damit die größtenteils positiven Effekte der APV auf. Besonders vor dem Hintergrund des Klimawandels entsteht durch die APV eine Lösung einer Vielzahl von Problemen des 21. Jahrhunderts. Die Ergebnisse zeigen, dass die APV ähnliche Umweltwirkungen wie bisher genutzte FF-PV-Anlagen verursachen und damit im Vergleich zu fossilen Energieträgern einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Gleichzeitig wirken sie der steigenden Flächenkonkurrenz in der Landwirtschaft entgegen und können die Klimawandelanpassung der Landwirtschaft vor dem Hintergrund des Klimawandels unterstützen. Generell stellt die Ökobilanzierung ein Umweltinstrument zur Einschätzung der global verursachten Umweltwirkungen bei der Herstellung und beim Gebrauch von Produkten dar. Die Vorteile von APV-Systemen gegenüber FF-PV-Anlagen ergeben sich größtenteils auf der Projektebene, d.h. direkt am Vorhabensstandort. Die direkten, erwartbaren Auswirkungen auf die Schutzgüter nach § 2 UVPG können bei APV-Systemen demnach geringer ausfallen als bei FF-PV-Systemen. Besonders hinsichtlich des lokalen Wasser- und Flächenverbrauchs, der positiven Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit oder die Artenvielfalt stellt die APV ein vielversprechendes

Instrument zur Bewältigung derzeitiger und zukünftiger Problemstellungen wie dem Biodiversitätsverlust, dem Klimawandel und dem ansteigenden Flächenverbrauch dar.

## 9 Literaturverzeichnis

Abiona, B. G.; Fakoya, E. O.; Esun, J. (2016): The Impacts of Climate Change on the Livelihood of Arable Crop Farmers in Southwest, Nigeria, S. 289–296. DOI: 10.1007/978-3-319-25814-0\_20.

Adeh, E. H.; Good, S. P.; Calaf, M.; Higgins, C. W. (2019): Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 11442. DOI: 10.1038/s41598-019-47803-3.

Adeh, E. H.; Selker, J. S.; Higgins, C. W. (2018): Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. In: *PloS one* 13 (11), e0203256. DOI: 10.1371/journal.pone.0203256.

AG Energiebilanzen e.V. (2021): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2020. Online verfügbar unter [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ageb\\_jahresbericht2020\\_20210406b\\_dt.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2020_20210406b_dt.pdf).

Agostini, A.; Colauzzi, M.; Amaducci, S. (2021): Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. In: *Applied Energy* 281, S. 116102. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116102.

Agovino, M.; Casaccia, M.; Ciommi, M.; Ferrara, M.; Marchesano, K. (2019): Agriculture, climate change and sustainability: The case of EU-28. In: *Ecological Indicators* 105, S. 525–543. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.04.064.

DIN SPEC 91434, 2021: Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung.

AL-agele, H. A.; Proctor, K.; Murthy, G.; Higgins, C. (2021): A Case Study of Tomato (*Solanum lycopersicon* var. Legend) Production and Water Productivity in Agrivoltaic Systems. In: *Sustainability* 13 (5), S. 2850. DOI: 10.3390/su13052850.

Amaducci, S.; Yin, X.; Colauzzi, M. (2018): Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. In: *Applied Energy* 220, S. 545–561. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.081.

area + GmbH (o.J.): area + Unterkonstriktion. Online verfügbar unter <http://www.area-plus.de/technik.html>, zuletzt geprüft am 05.12.2021.

Arneth, A.; Denton, F.; Agus, F.; Elbehri, A.; Erb, K.; Elasha, B. O.; Rahimi (2019): Framing and context. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.): An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, S. 77–129. Online verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/12/04\\_Chapter-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/12/04_Chapter-1.pdf), zuletzt geprüft am 24.04.2021.

Barron-Gafford, G. A.; Pavao-Zuckerman, M. A.; Minor, R. L.; Sutter, L. F.; Barnett-Moreno, I.; Blackett, D. T. et al. (2019): Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. In: *Nat Sustain* 2 (9), S. 848–855. DOI: 10.1038/s41893-019-0364-5.

Bayerische Staatskanzlei (2018): Beihilfefähigkeit eines Solarparks. Urteil vom 15.11.2018 - VG Regensburg RO 5 K 17.1331. Online verfügbar unter <https://www.gesetze->

bayern.de/Content/Document/Y-300-Z-BECKRS-B-2018-N-35338, zuletzt aktualisiert am 15.11.2018, zuletzt geprüft am 27.06.2021.

Beck, M.; Bopp, G.; Goetzberger, A.; Oberfell, T.; Reise, C.; Schindele, S. (2012): Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest. 5 pages / 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 4096-4100. DOI: 10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.2.25.

Bednova, O. V.; Kuznetsov, V. A.; Tarasova, N. P. (2018): Eutrophication of an Urban Forest Ecosystem: Causes and Effects. In: *Dokl. Earth Sc.* 478 (1), S. 124–128. DOI: 10.1134/S1028334X18010208.

Begon, M.; Howarth, R. W.; Townsend, C. R. (2017): *Ökologie*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Behrendt, S.; Erdmann, L.; Marwede, M.; Caporal, S. (2010): Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+. Arbeitspaket 9 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess). Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal. Online verfügbar unter [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/3698/file/MaRess\\_AP9\\_1.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/3698/file/MaRess_AP9_1.pdf).

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2020a): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2020. Reihe: Daten-Analysen. Bonn (Daten-Analysen). Online verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/EQB-1002000-2020.pdf>.

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.) (2020b): Erntebericht 2020. Mengen und Preise. Berlin.

BMJV (2014a): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz). EEG, vom 21.07.2014, zuletzt geändert am 16.07.2021.

BMJV (2014b): Verordnung zur Durchführung der Direktzahlungen an Inhaber landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von Stützungsregelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik. Direktzahlungen-Durchführungsverordnung - DirektZahlDurchfV, vom 22.09.2020.

BMJV (2017): Baugesetzbuch. BauGB, vom 03.11.2017, zuletzt geändert am 10.09.2021.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf>, zuletzt geprüft am 29.05.2021.

bne - Bundesverband Neue Energiewirtschaft (2020): Solarparks – Gewinne für die Biodiversität. Untersuchung zum Einfluss der Photovoltaik auf die Artenvielfalt. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/Leitfaeden\\_Branchenuebersichten\\_usw/20200406\\_bne\\_kurzfassung\\_biodiv\\_studie\\_2019.pdf](https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/Leitfaeden_Branchenuebersichten_usw/20200406_bne_kurzfassung_biodiv_studie_2019.pdf).

Bogdanski, A.; Dubois, O.; Jamieson, C.; Krell, R. (2010): Making Integrated Food-Energy Systems Work for People and Climate. An Overview. Hg. v. Food and Agriculture Organization of the

United Nations (FAO). Rom, Italien. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/3/i2044e/i2044e.pdf>.

Boone, L.; Roldán-Ruiz, I.; van Linden, V.; Muylle, H.; Dewulf, J. (2019): Environmental sustainability of conventional and organic farming: Accounting for ecosystem services in life cycle assessment. In: *The Science of the total environment* 695, S. 133841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133841.

BP p.l.c. (2021): Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition. Online verfügbar unter <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.

Brandt, P. (2011): Gefährdung der „Food Security“ durch die Auswirkungen des Klimawandels. In: *J. Verbr. Lebensm.* 6 (2), S. 253–275. DOI: 10.1007/s00003-011-0685-4.

Bundesrat (2020): Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Gesetzesbeschluss des Deutschen Bundestages. Berlin (Bundesrat-Drucksache, 763/20).

Bundesrat Wi - Bundesrat, Wirtschaftsausschuss; Bundesrat AV - Bundesrat, Ausschuss für Agrarpolitik und Verbraucherschutz; Bundesrat U - Bundesrat, Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Empfehlungen der Ausschüsse zu Punkt 33 der 995. Sitzung des Bundesrates am 6. November 2020. 28.10.20 (Wi – AV – U). Berlin (Bundesrat-Drucksache, 569/1/20).

Bundesregierung (2020): Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Stellungnahme des Bundesrates und Gegenäußerung der Bundesregierung. Berlin (Bundesrat-Drucksache, 19/24234).

Bundesregierung (2021): Klimaschutzgesetz 2021. Generationenvertrag für das Klima. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, zuletzt geprüft am 04.12.2021.

Busse, V.; Campen, C.; Conrads, L.; Dag˘asan, P.; Trockel, S. (2016): Das EEG 2017: Die wichtigsten Änderungen. Hg. v. Energieagentur NRW. Düsseldorf. Online verfügbar unter [https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/wp-content/uploads/2019/06/EA-paper-8\\_final.pdf](https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/wp-content/uploads/2019/06/EA-paper-8_final.pdf).

BVerWG (2019): Beihilfefähigkeit eines Maislabyrinths. Urteil vom 04.07.2019 - BVerwG 3 C 11.17. Online verfügbar unter <https://www.bverwg.de/040719U3C11.17.0>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2021, zuletzt geprüft am 27.06.2021.

Calzadilla, A.; Rehdanz, K.; Betts, R.; Falloon, P.; Wiltshire, A.; Tol, R. S. J. (2013): Climate change impacts on global agriculture. In: *Climatic Change* 120 (1-2), S. 357–374. DOI: 10.1007/s10584-013-0822-4.

Challinor, A. J.; Watson, J.; Lobell, D. B.; Howden, S. M.; Smith, D. R.; Chhetri, N. (2014): A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. In: *Nature Clim Change* 4 (4), S. 287–291. DOI: 10.1038/nclimate2153.

ClimateWatch (Hg.) (2021): Data Explorer. Online verfügbar unter [https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=cait&historical-emissions-end\\_year=2018&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions-regions=All%20Selected%2CWORLD&historical-emissions-sectors=All%20Selected&historical-emissions-start\\_year=2018&page=14&sort\\_col=country&sort\\_dir=ASC](https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=cait&historical-emissions-end_year=2018&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions-regions=All%20Selected%2CWORLD&historical-emissions-sectors=All%20Selected&historical-emissions-start_year=2018&page=14&sort_col=country&sort_dir=ASC), zuletzt geprüft am 29.05.2021.

DESA - Department of Economic and Social Affairs, Population Division (Hg.) (2017): World Population Prospects. The 2017 Revision. Volume I: Comprehensive Tables. New York, USA.

dhp technology AG (2021): Wir kreieren ganzheitliche Energielösungen mit dem Solarfaltdach HORIZON. Online verfügbar unter <https://dhp-technology.ch/>, zuletzt geprüft am 03.07.2021.

Eckstein, D.; Künzel, V.; Schäfer, L. (2021): Global Climate Risk Index 2021. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2019 and 2000-2019. Briefing Paper. Hg. v. GermanWatch. Bonn.

Eckstein, D.; Künzel, V.; Schäfer, L.; Wings, M. (2019): Global Climate Risk Index 2020. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2018 and 1999-2018. Hg. v. GermanWatch. Bonn.

eia - U.S. Energy Information Administration (Hg.) (2019): International Energy Outlook 2019: Table 10: World carbon dioxide emissions by region. Online verfügbar unter <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/#/?id=10-IEO2019&region=0-0&cases=Reference&start=2010&end=2050&f=A&linechart=Reference-d080819.2-10-IEO2019&sid=Reference-d080819.26-10-IEO2019&sourcekey=0>, zuletzt aktualisiert am Januar 2019, zuletzt geprüft am 25.04.2021.

Elamri, Y.; Cheviron, B.; Lopez, J.-M.; Dejean, C.; Belaud, G. (2018): Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. In: *Agricultural Water Management* 208, S. 440–453. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.07.001.

Energieagentur Rheinland-Pfalz (Hg.) (2017): Attraktive Geschäftsmodelle mit PV-Anlagen. Eine Studie im Auftrag der Energieagentur Rheinland-Pfalz GmbH in Zusammenarbeit mit BET – Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH. Kaiserslautern. Online verfügbar unter [https://www.energieagentur.rlp.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/Broschueren\\_zum\\_Download/Solarinitiative\\_Brosch\\_170526.pdf](https://www.energieagentur.rlp.de/fileadmin/user_upload/pdf/Broschueren_zum_Download/Solarinitiative_Brosch_170526.pdf).

Energieagentur Rheinland-Pfalz (Hg.) (2021): Rahmenbedingungen für PV-Freiflächenanlagen. Die Rolle der Kommune als Planungsträger und Gestalter. Kaiserslautern. Online verfügbar unter [https://www.energieagentur.rlp.de/fileadmin/user\\_upload/erneuerbare\\_energien/Handout\\_PV\\_Freiflaechen\\_20210427.pdf](https://www.energieagentur.rlp.de/fileadmin/user_upload/erneuerbare_energien/Handout_PV_Freiflaechen_20210427.pdf).

enfsolar (o.J.a): BSG500KTL-A. BYD Company Limited. Online verfügbar unter <https://de.enfsolar.com/pv/inverter-datasheet/6411>, zuletzt geprüft am 31.10.2021.

enfsolar (o.J.b): Equinox 500kW/630kW/750kW/1MW. Satcon Technology Corp. Online verfügbar unter <https://de.enfsolar.com/pv/inverter-datasheet/9431>, zuletzt geprüft am 31.10.2021.

European Commission (2013): Empfehlung der Kommission vom 9. April 2013 für die Anwendung gemeinsamer Methoden zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen. (2013/179/eu). Amtsblatt der Europäischen Union. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/93cb8358-b80d-11e2-ab01-01aa75ed71a1>.

Fazio, S.; Biganzioli, F.; Laurentiis, V. de; Zampori, L.; Sala, S.; Diaconu, E. (2018): Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods. Version 2, from ILCD to EF 3.0. European Commission. Ispra, Italien.

Flisom AG (o.J.): eFlex - Flexible CIGS Solar PV modules. Online verfügbar unter [https://www.flisom.com/wp-content/uploads/2020/09/Datasheet\\_eFlex\\_GEN3\\_1x1-BL\\_CH.pdf](https://www.flisom.com/wp-content/uploads/2020/09/Datasheet_eFlex_GEN3_1x1-BL_CH.pdf).

Fountas, S.; Carli, G.; Sørensen, C. G.; Tsiropoulos, Z.; Cavalaris, C.; Vatsanidou, A. et al. (2015): Farm management information systems: Current situation and future perspectives. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 115, S. 40–50. DOI: 10.1016/j.compag.2015.05.011.

Fraunhofer ISE - Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hg.) (2020): Newsletter Agri-Photovoltaik. Online verfügbar unter <https://newsletter.fraunhofer.de/viewonline2/17114/921/157/4j9r6pYs/l6lpP6bKMo/1>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2020, zuletzt geprüft am 06.06.2021.

Fraunhofer ISE - Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2021): Der Strommix in Deutschland 202 [NETTO]. Online verfügbar unter <https://strom-report.de/download/strommix-2020-deutschland/>, zuletzt geprüft am 17.11.2021.

Frischknecht, R. (2020): Lehrbuch der Ökobilanzierung. Berlin: Springer-Verlag.

Frischknecht, R.; Heath, G.; Raugei, M.; Sinha, P.; Wild-Scholten, M. de; Fthenakis, V. et al. (2016): Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity. 3rd Edition. IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. 3. Aufl. (Report IEA-PVPS T12-06:2016). Online verfügbar unter [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Task\\_12\\_-\\_Methodology\\_Guidelines\\_on\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_of\\_Photovoltaic\\_Electricity\\_3rd\\_Edition.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Task_12_-_Methodology_Guidelines_on_Life_Cycle_Assessment_of_Photovoltaic_Electricity_3rd_Edition.pdf).

Frischknecht, R.; Itten, R.; Sinha, P.; Wild-Scholten, M. de; Zhang, J.; Fthenakis, V. et al. (2015): Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12. Report IEA-PVPS 12-04:2015. Online verfügbar unter [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS\\_Task\\_12\\_LCI\\_LCA.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_Task_12_LCI_LCA.pdf).

Fthenakis, V.; Kim, H. C.; Frischknecht, R.; Raugei, M.; Sinha, P.; Stucki, M. (2011): Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12. Report IEA-PVPS 12-02:2011. Online verfügbar unter [http://www.clca.columbia.edu/Task12\\_LCI\\_LCA\\_10\\_21\\_Final\\_Report.pdf](http://www.clca.columbia.edu/Task12_LCI_LCA_10_21_Final_Report.pdf).

GDV - Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (Hg.) (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland. Stand: November 2016. Berlin. Online verfügbar unter

<https://www.gdv.de/resource/blob/8942/fa2dc37ecb8fafbb8b6fe7c2ae1a10d1/publikation---landwirtschaftliche-mehrgefahrenversicherung-fuer-deutschland-data.pdf>.

Global Carbon Project (2020): CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2019 (in Millionen Tonnen). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/>, zuletzt geprüft am 24.04.2021.

Goetzberger, A.; Zastrow, A. (1981): Kartoffeln unter dem Kollektor. Neuer Vorschlag der Fraunhofer-Gesellschaft. In: *Sonnenenergie* 6 (3), S. 19–22.

Guinée, J. B. (2015): Selection of Impact Categories and Classification of LCI Results to Impact Categories. In: Michael Z. Hauschild und Mark A. J. Huijbregts (Hg.): *Life Cycle Impact Assessment*. Heidelberg, New York, London: Springer Science+Business Media (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment), S. 17–38.

Hauschild, M. Z.; Huijbregts, M. A. J. (2015): Introducing Life Cycle Assessment. In: Michael Z. Hauschild und Mark A. J. Huijbregts (Hg.): *Life Cycle Impact Assessment*. Heidelberg, New York, London: Springer Science+Business Media (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment), S. 1–16.

Hauschild, M. Z.; Rosenbaum, R. K.; Olsen, S. I. (2018): *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing.

Heller, M. C.; Keoleian, G. A.; Willett, W. C. (2013): Toward a life cycle-based, diet-level framework for food environmental impact and nutritional quality assessment: a critical review. In: *Environmental science & technology* 47 (22), S. 12632–12647. DOI: 10.1021/es4025113.

Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Weidner, S.; Held, M.; Briem, A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (CLIMATE CHANGE, 35/2021). Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06\\_cc\\_35-2021\\_oekobilanzen\\_windenergie\\_photovoltaik.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf).

Hoesly, R. M.; Smith, S. J.; Feng, L.; Klimont, Z.; Janssens-Maenhout, G.; Pitkanen, T. et al. (2018): Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). In: *Geosci. Model Dev.* 11 (1), S. 369–408. DOI: 10.5194/gmd-11-369-2018.

Huang, J.; Xu, C.; Ridoutt, B. G.; Wang, X.; Ren, P. (2017): Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. In: *Journal of Cleaner Production* 159, S. 171–179. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.008.

Huawei (o.J.): SUN2000-36KTL. Smart String Inverter. Online verfügbar unter <https://solar.huawei.com/en/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Fde%2Fdatasheet%2FSUN2000-36KTL.pdf>, zuletzt geprüft am 12.09.2021.

Huppes, G.; van Oers, L.; Pretato, U.; Pennington, D. W. (2012): Weighting environmental effects: Analytic survey with operational evaluation methods and a meta-method. In: *Int J Life Cycle Assess* 17 (7), S. 876–891. DOI: 10.1007/s11367-012-0415-x.

Ifeanyi-obi, C. C.; Togun, A. O.; Lamboll, R. (2016): Influence of Climate Change on Cocoyam Production in Aba Agricultural Zone of Abia State, Nigeria, S. 261–273. DOI: 10.1007/978-3-319-25814-0\_18.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis (Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Unter Mitarbeit von T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. B. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung et al. Cambridge, Vereinigtes Königreich, New York, USA: Cambridge University Press. Online verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf) (Accessed 25 April 2021), zuletzt geprüft am 25.04.2021.

Itsubo, N. (2015): Weighting. In: Michael Z. Hauschild und Mark A. J. Huijbregts (Hg.): Life Cycle Impact Assessment. Heidelberg, New York, London: Springer Science+Business Media (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment), S. 301–330.

Jaworski, N. A.; Howarth, R. W.; Hetling, L. J. (1997): Atmospheric Deposition of Nitrogen Oxides onto the Landscape Contributes to Coastal Eutrophication in the Northeast United States. In: *Environ. Sci. Technol.* 31 (7), S. 1995–2004. DOI: 10.1021/es960803f.

Jensen, A. A.; Hoffman, L.; Møller, B. T.; Schmidt, A.; Christiansen, K.; Elkington, J.: Life Cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information sources. Hg. v. European Environment Agency (Environmental Issues Series, 6). Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C/Issue-report-No-6.pdf>.

Jia, J.; Cheng, S.; Yao, S.; Xu, T.; Zhang, T.; Ma, Y. et al. (2018): Emission characteristics and chemical components of size-segregated particulate matter in iron and steel industry. In: *Atmospheric Environment* 182, S. 115–127. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.051.

Jošt, M.; Kegelman, L.; Korte, L.; Albrecht, S. (2020): Monolithic Perovskite Tandem Solar Cells: A Review of the Present Status and Advanced Characterization Methods Toward 30% Efficiency. In: *Adv. Energy Mater.* 10 (26), S. 1904102. DOI: 10.1002/aenm.201904102.

JRC European Commission - European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. General guide for Life Cycle Assessment. Detailed guidance. 1. Aufl. Luxemburg: Publications Office of the European Union.

Jungbluth, N.; Stucki, M.; Flury, K.; Frischknecht, R.; Büsler, S. (2012): Life Cycle Inventories of Photovoltaics. ESU-services Ltd.

Kelm, T.; Metzger, J.; Jachmann, H. (2019): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Abschlussbericht. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg; Bosch & Partner GmbH. Online verfügbar unter [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi\\_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf?__blob=publicationFile&v=7).

Khan, M. N.; Mohammad, F. (2014): Eutrophication: Challenges and Solutions, S. 1–15. DOI: 10.1007/978-94-007-7814-6\_1.

Knierim, A.; Kernecker, M.; Erdle, K.; Kraus, T.; Borges, F.; Wurbs, A. (2019): Smart farming technology innovations – Insights and reflections from the German Smart-AKIS hub. In: *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 90-91, S. 100314. DOI: 10.1016/j.njas.2019.100314.

Kostik, N.; Bobyl, A.; Rud, V.; Salamov, I. (2020): The potential of agrivoltaic systems in the conditions of southern regions of Russian Federation. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 578 (1), S. 12047. DOI: 10.1088/1755-1315/578/1/012047.

Kowalczyk, Z. (2019): Environmental impact of potato cultivation on plantations covering areas of various sizes. In: *E3S Web Conf.* 132, S. 2002. DOI: 10.1051/e3sconf/201913202002.

Latnussa, C. E. L.; Mancini, L.; Blengini, G. A.; Ardente, F.; Pennington, D. (2016): Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels. European Union. Ispra, Italien (JRC Technical Reports).

Laurent, A.; Hauschild, M. Z. (2015): Normalisation. In: Michael Z. Hauschild und Mark A. J. Huijbregts (Hg.): *Life Cycle Impact Assessment*. Heidelberg, New York, London: Springer Science+Business Media (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment), S. 271–300.

Leon, A.; Ishihara, K. N. (2018a): Assessment of new functional units for agrivoltaic systems. In: *Journal of environmental management* 226, S. 493–498. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.013.

Leon, A.; Ishihara, K. N. (2018b): Influence of allocation methods on the LC-CO<sub>2</sub> emission of an agrivoltaic system. In: *Resources, Conservation and Recycling* 138, S. 110–117. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.06.017.

Lichner, C. (2017): Agro-Photovoltaik: Ein falscher Name kann viel kaputt machen. Hg. v. pv-magazine. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2017/10/23/agro-photovoltaik-ein-falscher-name-kann-viel-kaputt-machen/>, zuletzt aktualisiert am 23.10.2017, zuletzt geprüft am 06.06.2021.

Liu, L.; Zheng, X.; Wei, X.; Kai, Z.; Xu, Y. (2021): Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication. In: *Scientific reports* 11 (1), S. 23015. DOI: 10.1038/s41598-021-02521-7.

Loladze, I. (2014): Hidden shift of the ionome of plants exposed to elevated CO<sub>2</sub> depletes minerals at the base of human nutrition. In: *eLife Sciences* 3, e02245. DOI: 10.7554/eLife.02245.001.

Lüdemann, L.; Feig, K. (2014): Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung – eine softwareergonomische Analyse. In: *Logistics Journal: nicht referierte Veröffentlichungen* 2014. DOI: 10.2195/lj\_NotRev\_luedemann\_de\_201409\_01.

Ma, X.; Yang, D.; Shen, X.; Zhai, Y.; Zhang, R.; Hong, J. (2018): How much water is required for coal power generation: An analysis of gray and blue water footprints. In: *The Science of the total environment* 636, S. 547–557. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.309.

Marrou, H.; Guilioni, L.; Dufour, L.; Dupraz, C.; Wery, J. (2013a): Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? In: *Agricultural and Forest Meteorology* 177, S. 117–132. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.

Marrou, H.; Wery, J.; Dufour, L.; Dupraz, C. (2013b): Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. In: *European Journal of Agronomy* 44, S. 54–66. DOI: 10.1016/j.eja.2012.08.003.

Mbow, C.; Rosenzweig, C.; Barioni, L. G.; Benton, T. G.; Herrero, M.; Krishnapillai, M. et al. (2019): Food security. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.): An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, S. 437–550. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SRCCL-Chapter-5.pdf>, zuletzt geprüft am 24.04.2021.

Mendelsohn, R. (2014): The Impact of Climate Change on Agriculture in Asia. In: *Journal of Integrative Agriculture* 13 (4), S. 660–665. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60701-7.

Minx, J. C.; Lamb, W. F.; Andrew, R. M.; Canadell, J. G.; Crippa, M.; Döbbeling, N. et al. (2021): A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019. In: *Earth Syst. Sci. Data* 13 (11), S. 5213–5252. DOI: 10.5194/essd-13-5213-2021.

Mouron, P.; Willersinn, C.; Möbius, S.; Lansche, J. (2016): Environmental Profile of the Swiss Supply Chain for French Fries: Effects of Food Loss Reduction, Loss Treatments and Process Modifications. In: *Sustainability* 8 (12), S. 1214. DOI: 10.3390/su8121214.

Muhl, M.; Berger, M.; Finkbeiner, M. (2021): Distance-to-target weighting in LCA—A matter of perspective. In: *Int J Life Cycle Assess* 26 (1), S. 114–126. DOI: 10.1007/s11367-020-01837-2.

Myers, S. S.; Zanobetti, A.; Kloog, I.; Huybers, P.; Leakey, A. D. B.; Bloom, A. J. et al. (2014): Increasing CO<sub>2</sub> threatens human nutrition. In: *Nature* 510 (7503), S. 139–142. DOI: 10.1038/nature13179.

Olmez, G. M.; Dilek, F. B.; Karanfil, T.; Yetis, U. (2016): The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study. In: *Journal of Cleaner Production* 130, S. 195–201. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.139.

Ott, E. M.; Kabus, C. A.; Baxter, B. D.; Hannon, B.; Celik, I. (2020): Environmental Analysis of Agrivoltaic Systems. DOI: 10.1016/B978-0-12-819727-1.00012-1.

Pascaris, A. S.; Handler, R.; Schelly, C.; Pearce, J. M. (2021): Life cycle assessment of pasture-based agrivoltaic systems: Emissions and energy use of integrated rabbit production. In: *Cleaner and Responsible Consumption* 3, S. 100030. DOI: 10.1016/j.clrc.2021.100030.

Pattey, E.; Qiu, G. (2012): Trends in primary particulate matter emissions from Canadian agriculture. In: *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)* 62 (7), S. 737–747. DOI: 10.1080/10962247.2012.672058.

Pickel, P. (2018): Elektrifizierung in der Landwirtschaft – wo und wofür? In: In Zukunft elektrisch – Energiesysteme im ländlichen Raum. KTBL-Tagung vom 7. bis 8. März 2018 in Bayreuth. Online verfügbar unter [https://www.ktbl.de/fileadmin/user\\_upload/Allgemeines/Download/Tagungen-2018/KTBL-Tagung-2018/KTBL-Tage\\_2018-Beitraege.pdf](https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/Tagungen-2018/KTBL-Tagung-2018/KTBL-Tage_2018-Beitraege.pdf).

Pizzol, M.; Weidema, B.; Brandão, M.; Osset, P. (2015): Monetary valuation in Life Cycle Assessment: a review. In: *Journal of Cleaner Production* 86, S. 170–179. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.007.

Putnam, A. E.; Broecker, W. S. (2017): Human-induced changes in the distribution of rainfall. In: *Science advances* 3 (5), e1600871. DOI: 10.1126/sciadv.1600871.

pv-magazine (2020): Erstes Photovoltaik-Faltdach über Parkplätzen in der Schweiz installiert. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2020/07/22/erstes-photovoltaik-faltdach-ueber-parkplaetzen-in-der-schweiz-installiert/>, zuletzt aktualisiert am 23.07.2020, zuletzt geprüft am 03.07.2021.

Quaschnig, V. (2018): Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie - Energiewende. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag.

Rahmann, G.; Aulrich, K.; Barth, K.; Böhm, H.; Koopmann, R.; Oppermann, R. et al. (2008): Klimarelevanz des Ökologischen Landbaus - Stand des Wissens. In: *Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research* 1/2 (58), S. 71–89.

Rasul, G. (2021): Twin challenges of COVID-19 pandemic and climate change for agriculture and food security in South Asia. In: *Environmental Challenges* 2, S. 100027. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100027.

Reise, C.; Müller, B.; Armbruster, A.; Reich, N.; Kiefer, K. (2012): Ist eine Performance Ratio von mehr als 90 Prozent machbar?

REN21 (2020): Renewables 2020 Global Status Repor. Paris: REN21 Secretariat. Online verfügbar unter [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf), zuletzt geprüft am 25.04.2021.

Rice, K. C.; Herman, J. S. (2012): Acidification of Earth: An assessment across mechanisms and scales. In: *Applied Geochemistry* 27 (1), S. 1–14. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.09.001.

Riediger, J.; Breckling, B.; Nuske, R. S.; Schröder, W. (2014): Will climate change increase irrigation requirements in agriculture of Central Europe? A simulation study for Northern Germany. In: *Environmental sciences Europe* 26 (1), S. 18. DOI: 10.1186/s12302-014-0018-1.

Riediger, J.; Breckling, B.; Svoboda, N.; Schröder, W. (2016): Modelling regional variability of irrigation requirements due to climate change in Northern Germany. In: *The Science of the total environment* 541, S. 329–340. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.043.

Rodale Institute (2011): The Farming Systems Trial. Celebrating 30 years. Online verfügbar unter <https://rodaleinstitute.org/wp-content/uploads/fst-30-year-report.pdf>.

Röös, E.; Bajželj, B.; Smith, P.; Patel, M.; Little, D.; Garnett, T. (2017): Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures. In: *Global Environmental Change* 47, S. 1–12. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2017.09.001.

Röös, E.; Sundberg, C.; Hansson, P.-A. (2010): Uncertainties in the carbon footprint of food products: a case study on table potatoes. In: *Int J Life Cycle Assess* 15 (5), S. 478–488. DOI: 10.1007/s11367-010-0171-8.

Roy, P.; Nei, D.; Orikasa, T.; Xu, Q.; Okadome, H.; Nakamura, N.; Shiina, T. (2009): A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. In: *Journal of Food Engineering* 90 (1), S. 1–10. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016.

Scharf, J.; Grieb, M.; Fritz, M. (2021): Agri-Photovoltaik. Stand und offene Fragen. 1. Aufl. Straubing: Eigenverlag (Berichte aus dem TFZ, 73).

Schindele, S.; Trommsdorff, M.; Schlaak, A.; Obergfell, T.; Bopp, G.; Reise, C. et al. (2020): Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. In: *Applied Energy* 265, S. 114737. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114737.

Schlenker, W.; Lobell, D. B. (2010): Robust negative impacts of climate change on African agriculture. In: *Environ. Res. Lett.* 5 (1), S. 14010. DOI: 10.1088/1748-9326/5/1/014010.

Scuderi, A.; Cammarata, M.; La Via, G.; Pecorino, B.; Timpanaro, G. (2021): Life-Cycle Assessment of Biofortified Productions: The Case of Selenium Potato. In: *ASI* 4 (1), S. 1. DOI: 10.3390/asi4010001.

Sekiyama, T.; Nagashima, A. (2019): Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. In: *Environments* 6 (6), S. 65. DOI: 10.3390/environments6060065.

SFV - Solarenergie-Förderverein Deutschland e.V. (2021): Bundesweite Aufnahme der monatlichen Stromertragsdaten von PV-Anlagen. Regionale Ertragsübersichten - Übersicht für die Region Arnstadt / Eisenach / Erfurt / Gotha / Nordhausen / Weimar und alle Jahre (Stand: 08.10.2021 09:47:12). Bundesgeschäftsstelle Aachen. Online verfügbar unter [https://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region\\_uebersichten.pl/kl](https://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region_uebersichten.pl/kl), zuletzt aktualisiert am 08.10.2021, zuletzt geprüft am 08.10.2021.

SimaPro (2021): About SimaPro. Online verfügbar unter <https://simapro.com/about/>, zuletzt geprüft am 14.11.2021.

Smith, P.; Bustamante, M.; Ahammad, H.; Clark, H.; Dong, H.; Elsiddig, E. A. et al. (2014): Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.): Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 811–922. Online verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf).

SolarPower Europe (2018): Global Market Outlook: For Solar Power / 2018 - 2022. Brüssel, Belgien. Online verfügbar unter <https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018/09/Global-Market-Outlook-2018-2022.pdf>, zuletzt geprüft am 26.04.2021.

SolarPower Europe (2020): Global Market Outlook: For Solar Power / 2020 - 2024. Brüssel, Belgien. Online verfügbar unter [https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2020/07/31-SPE-GMO-report-hr-hyperlinks.pdf?cf\\_id=31064](https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2020/07/31-SPE-GMO-report-hr-hyperlinks.pdf?cf_id=31064), zuletzt geprüft am 25.04.2021.

SolarPower Europe (2021): Agrisolar. Best Practices Guidelindes. Version 1.0. Brüssel, Belgien. Online verfügbar unter <https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2021/05/1721-SPE-Agrisolar-Best-Practices-Guidelines-02-mr.pdf>.

SolarWorld (o.J.): Sunmodule Bisun. SW 270 duo. Online verfügbar unter [https://www.solaricashop.com/download/solarworld/sw\\_bisun\\_270\\_en.pdf](https://www.solaricashop.com/download/solarworld/sw_bisun_270_en.pdf), zuletzt geprüft am 12.09.2021.

Sonnenshop e.K. (2021): SolarWorld \*Sunmodule® Bisun SW 270 duo\* 270 Watt. Online verfügbar unter <https://www.sonnenshop.de/solarmodule/solarworld/solarworld-sunmodule-bisun-sw-270-duo-270-watt>, zuletzt geprüft am 05.09.2021.

Speck, R.; Selke, S.; Auras, R.; Fitzsimmons, J. (2016): Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results. In: *Journal of Industrial Ecology* 20 (1), S. 18–28. DOI: 10.1111/jiec.12245.

Stolz, P.; Frischknecht, R.; Wyss, F.; Wild-Scholten, M. de (2016): PEF screening report of electricity from photovoltaic panels in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots. 24 April 2016 - v.2.0. Schweiz, Niederlande. Online verfügbar unter [http://pvthin.org/wp-content/uploads/2020/05/174\\_PEFRCR\\_PV\\_LCA-screening-report\\_v2.0.pdf](http://pvthin.org/wp-content/uploads/2020/05/174_PEFRCR_PV_LCA-screening-report_v2.0.pdf).

Sun, Y.; Zhang, X.; Zwiers, F. W.; Song, L.; Wan, H.; Hu, T. et al. (2014): Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. In: *Nature Clim Change* 4 (12), S. 1082–1085. DOI: 10.1038/NCLIMATE2410.

Timpanaro, G.; Branca, F.; Cammarata, M.; Falcone, G.; Scuderi, A. (2021): Life Cycle Assessment to Highlight the Environmental Burdens of Early Potato Production. In: *Agronomy* 11 (5), S. 879. DOI: 10.3390/agronomy11050879.

TLS - Thüringer Landesamt für Statistik (2019): Erneut unterdurchschnittliche Kartoffelernte in Thüringen. Pressemitteilung 332/2019 vom 26. November 2019. Online verfügbar unter [https://statistik.thueringen.de/presse/2019/pr\\_332\\_19.pdf](https://statistik.thueringen.de/presse/2019/pr_332_19.pdf), zuletzt aktualisiert am 26.11.2019.

TLS - Thüringer Landesamt für Statistik (2020): Thüringer Kartoffelernte fällt unterdurchschnittlich aus. Pressemitteilung 291/2020 vom 27. November 2020. Online verfügbar unter [https://statistik.thueringen.de/presse/2020/pr\\_291\\_20.pdf](https://statistik.thueringen.de/presse/2020/pr_291_20.pdf), zuletzt aktualisiert am 27.11.2020.

Trommsdorff, M.; Gruber, S.; Keinath, T.; Hopf, M.; Hermann, C.; Schönberger, F. et al. (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Oktober 2020. Ein Leitfaden für Deutschland. 1. Aufl. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE). Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/APV-Leitfaden.pdf>.

Trommsdorff, M.; Kang, J.; Reise, C.; Schindele, S.; Bopp, G.; Ehmann, A. et al. (2021): Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140, S. 110694. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110694.

Tubiello, F. N.; Rosenzweig, C.; Conchedda, G.; Karl, K.; Gütschow, J.; Xueyao, P. et al. (2021): Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. In: *Environ. Res. Lett.* 16 (6), S. 65007. DOI: 10.1088/1748-9326/ac018e.

Tubiello, F. N.; Salvatore, M.; Córdor Golec, R. D.; Ferrara, A.; Rossi, S.; Biancalani, R. et al. (2014): Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks: 1990 – 2011 Analysis. ESS Working Paper 2. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/3/i3671e/i3671e.pdf>, zuletzt geprüft am 24.04.2021.

Umweltbundesamt (Hg.) (2020): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 201. Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change\\_22-2020\\_nir\\_2020\\_de\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de_0.pdf).

DIN EN ISO 14044, 2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006.

DIN EN ISO 14040, 2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006.

vbvh - von Bredow Valentin Herz Rechtsanwälte (2021): PV-Anlagen und Landwirtschaft: der VGH Bayern bestätigt die Fördermöglichkeit von Agri-PV. Online verfügbar unter <https://www.vbvh.de/news-detail/pv-anlagen-und-landwirtschaft-der-vgh-bayern-bestaetigt-die-foerdermoeglichkeit-von-agri-pv/>, zuletzt geprüft am 04.12.2021.

Vollmer, V. (2021): Übersicht Wirtschaftlichkeit. APV - Hochaufgeständert, zuletzt aktualisiert am 13.07.2021.

Wagner, S.; Angenendt, E.; Beletskaya, O.; Zeddies, J. (2015): Costs and benefits of ammonia and particulate matter abatement in German agriculture including interactions with greenhouse gas emissions. In: *Agricultural Systems* 141, S. 58–68. DOI: 10.1016/j.agsy.2015.09.003.

Watter, H. (2015): Regenerative Energiesysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Weselek, A.; Bauerle, A.; Hartung, J.; Zikeli, S.; Lewandowski, I.; Högy, P. (2021): Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. In: *Agron. Sustain. Dev.* 41 (5). DOI: 10.1007/s13593-021-00714-y.

Weselek, A.; Ehmann, A.; Zikeli, S.; Lewandowski, I.; Schindele, S.; Högy, P. (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 39 (4). DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.

Wild-Scholten, M. de (2014): Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data collection. SmartGreenScans. Online verfügbar unter <http://smartgreenscans.nl/publications/SmartGreenScans-2014-Life-Cycle-Assessment-of-Photovoltaics-Status-2011-Part-1-Data-Collection--Sample-Pages.pdf>.

Wirth, H. (2021): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE). Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.

ZF Friedrichshafen AG (o.J.): Elektrifizierung. Online verfügbar unter [https://www.zf.com/products/de/agriculture/highlights/technology\\_highlights/electrification/electrification\\_1.html](https://www.zf.com/products/de/agriculture/highlights/technology_highlights/electrification/electrification_1.html), zuletzt geprüft am 06.12.2021.

Zhang, X.; Wan, H.; Zwiers, F. W.; Hegerl, G. C.; Min, S.-K. (2013): Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. In: *Geophys. Res. Lett.* 40 (19), S. 5252–5257. DOI: 10.1002/grl.51010.

## 10 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Alle wörtlich oder sinngemäß den Schriften anderer entnommenen Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Dortmund, den 12.12.2021

Christin Busch

## 11 Anhang

### Anhang I: Ergänzungen zur Anlagendimensionierung

Anh.-Tabelle 1: Regionaler Jahresdurchschnitt der Stromerträge für die Region Arnstadt / Eisenach / Erfurt / Gotha / Nordhausen / Weimar nach SFV (2021)

Jahr	Regionaler Jahresdurchschnitt (kWh/kWp)	Gesamtdurchschnitt 2010 – 2020 (kWh/kWp/a)
2020	1020	965,82
2019	1002	
2018	1003	
2017	912	
2016	932	
2015	986	
2014	954	
2013	879	
2012	968	
2011	1083	
2010	885	

### Anhang II: Methodische Ergänzungen

Anh.-Tabelle 2: Ausgewählte Wirkungskategorien und -indikatoren samt der Charakterisierungsmodelle gemäß Fazio et al. (2018, S. 6 f.)

Impact category	Indicator	Unit	Recommended default LCIA model
Climate Change	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)
Ozone Depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPs as in (WMO 1999)
Human Toxicity (cancer) effects	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)
Human Toxicity (cancer) effects	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)
Particulate Matter/Respiratory inorganics	Human health effects associated with exposure to PM2.5	Disease incidences	PM model recommended by UNEP (UNEP 2016)
Ionising Radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U235	kBq U <sup>235</sup>	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)

Impact category	Indicator	Unit	Recommended default LCIA model
Photochemical ozone formation	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe 2008
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	Mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)
Eutrophication (terrestrial)	Accumulated Exceedance (AE)	Mol N eq	Accumulated Exceedance (AE)
Eutrophication, aquatic freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe
Eutrophication, aquatic marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe
Ecotoxicity (freshwater)	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model, (Rosenbaum et al, 2008)
Land Use	Soil quality index <sup>6</sup> (Biotic production, Erosion resistance, Mechanical filtration and Groundwater replenishment)	Dimensionless, aggregated index of: kg biotic production/ (m <sup>2</sup> *a) kg soil/ (m <sup>2</sup> *a) m <sup>3</sup> water/ (m <sup>2</sup> *a) m <sup>3</sup> g.water/ (m <sup>2</sup> *a)	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)
Water scarcity	User deprivation potential (deprivationweighted water consumption)	kg world eq. deprived	Available WATER REMaining (AWARE) in UNEP, 2016
Resource Use (minerals and metals)	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML Guinée et al. (2002) and van Oers et al. (2002).
Resource Use, energy carriers	Abiotic resource depletion – fossil fuels (ADP-fossil)	MJ	CML Guinée et al. (2002) and van Oers et al. (2002)

### Anhang III: Sachbilanzdaten

Anh.-Tabelle 3: Sachbilanzdaten der Unterkonstruktion für die Szenarien 1 und 2

		pro m <sup>2</sup> Modulfläche			
		Geogr. Bezug	Einheit	Szenario 2	Szenario 1
technosp here	aluminium, production mix, wrought alloy, at plant	RER	kg	3,98	22,13
	corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	kg	8,64E-02	0,48
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	kg	0,000909	0,01

			pro m <sup>2</sup> Modulfläche		
	Geogr. Bezug	Einheit	Szenario 2	Szenario 1	
	polystyrene, high impact, HIPS, at plant	RER	kg	4,55E-03	0,03
	polyurethane, flexible foam, at plant	RER	kg	0	0,00
	synthetic rubber, at plant	RER	kg	0	0,00
	steel, low-alloyed, at plant	RER	kg	0	0,00
	chromium steel 18/8, at plant	RER	kg	0,247	1,37
	reinforcing steel, at plant	RER	kg	7,21	40,09
	concrete, normal, at plant	CH	m <sup>3</sup>	5,37E-04	0,00
	section bar extrusion, aluminium	RER	kg	3,98	22,13
	sheet rolling, steel	RER	kg	0	0,00
	zinc coating, pieces	RER	m <sup>2</sup>	0,156	0,87
	zinc coating, coils	RER	m <sup>2</sup>	0,109	0,61
transport	transport, lorry > 16t, fleet average	RER	tkm	0,217	0,22
	transport, freight, rail	RER	tkm	5,14	5,14
	transport, can <3.5t	RER	tkm	1,14	1,14
disposal	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to municipal incineration	CH	kg	0,0864	0,48
	disposal, building, polyethylene/polypropylene products, to final disposal	CH	kg	0,000909	0,01
	disposal, building, polystyrene isolation, flame-retardant, to final disposal	CH	kg	0,00455	0,03
	Transformation, from pasture and meadow	-	m <sup>2</sup>	4,72	4,72
	Transformation, to industrial area, built up	-	m <sup>2</sup>	1,5	1,50
	Transformation, to industrial area, vegetation	-	m <sup>2</sup>	3,22E+00	3,22
	Occupation, industrial area, built up	-	m <sup>2</sup>	45	45,00
Occupation, industrial area, vegetation	-	m <sup>2</sup>	96,6	96,60	

Anh.-Tabelle 4: Sachbilanzdaten der elektrischen Leitungen für die Szenarien 1 und 2

			570 kWp	1 kWp	500,13 kWp	
	Geogr. Bezug	Einheit				
materials	Copper, at regional stage	RER	kg	7,41E+02	1,30E+00	6,50E+02
	wire drawing, copper	RER	kg			
	brass, at plant	RER	kg	1,36	2,39E-03	1,19E+00
	zinc, primary, at regional storage	RER	kg	2,73	4,79E-03	2,40E+00
	steel, low-alloyed, at plant	RER	kg	52,9	9,28E-02	4,64E+01
	nylon 6, at plant	RER	kg	15,7	2,75E-02	1,38E+01
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	kg	709	1,24E+00	6,22E+02

		Geogr. Bezug	Einheit	570 kWp	1 kWp	500,13 kWp
	polyvinylchloride, bulk polymerised, at plant	RER	kg	44,9	7,88E-02	3,94E+01
	polycarbonate, at plant	RER	kg	0,136	2,39E-04	1,19E-01
	epoxy resin, liquid, at plant	RER	kg			
transport	transport, lorry>16t, fleet average	RER	tkm	49,6	8,70E-02	4,35E+01
	transport, freight, rail	RER	tkm	185	3,25E-01	1,62E+02
disposal	disposal, plastic, industr. Electronics, 15.3% water, to municipal incineration	RER	kg	770	1,35E+00	6,76E+02
	disposal, building, electric wiring, to final disposal	RER	kg	4,09	7,18E-03	3,59E+00

Anh.-Tabelle 5: Sachbilanzdaten für metallurgisches Silizium für die Szenarien 1 und 2

		Geogr. Bezug	Einheit	Modulherstellung China
Product	MG-silicone, at plant	CN	kg	1
Technosphere	electricity, medium voltage, at grid	CN	kWh	11
	wood chips, mixed, u=120%, at forest	RER	m³	0,00325
	hard coal coke, at plant	RER	MJ	2,31E+01
	graphite, at plant	RER	kg	0,1
	charcoal, at plant	GLO	kg	0,17
	petroleum coke, at refinery	RER	kg	0,5
	silica sand, at plant	DE	kg	2,7
	oxygen, liquid, at plant	RER	kg	0,02
	disposal, slag from MG silicon production, 0% water, to inert material landfill	CH	kg	0,025
	silicone plant	RER	Unit	1E-11
	transport, transoceanic freight ship	OCE	tkm	2,55
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	tkm	0,156
	transport, freight, rail	RER	tkm	0,069
emission air, low population density	Heat, waste	-	MJ	71,3
	Arsenic		kg	9,42E-09
	Aluminium		kg	0,00000155
	Antimony		kg	7,85E-09
	Boron		kg	2,79E-07
	Cadmium		kg	3,14E-10
	Calcium		kg	0,000000775
	Carbon monoxide, biogenic		kg	0,00062
	Carbon monoxide, fossil		kg	0,00138
	Carbon dioxide, biogenic		kg	1,61
	Carbon dioxide, fossil		kg	3,58
Chromium		kg	7,85E-09	

	Geogr. Bezug	Einheit	Modulherstellung China
Chlorine		kg	7,85E-08
Cyanide		kg	6,87E-08
Fluorine		kg	3,88E-08
Hydrogene sulfide		kg	0,0005
Hydrogene fluoride		kg	0,0005
Iron		kg	0,00000388
Lead		kg	0,000000344
Mercury		kg	7,85E-09
NMVOc, non-methane volatile organic compounds, unsecified origin		kg	0,000096
Nitrogen oxides		kg	0,00974
Particulates, > 10 um		kg	7,75E-03
Potassium		kg	6,20E-05
silicone plant		kg	7,51E-03
Sodium		kg	7,75E-07
Sulfur dioxide		kg	1,22E-02
Tin		kg	7,85E-09

Anh.-Tabelle 6: Sachbilanzdaten für Solarsilizium für die Szenarien 1 und 2

	Geogr. Bezug	Einheit	Szenario 2	Szenario 1	
Product	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	CN	kg	1	1
Technosphere	hydrogen, liquid, at plant	RER	kg	5,01E-02	5,01E-02
	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	kg	3,48E-01	3,48E-01
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	tkm	2,66E+00	2,66E+00
	transport, freight, rail	RER	tkm	2,40E+00	2,40E+00
	silicone plant	RER	unit	1,00E-11	1,00E-11
emission air, low population density	Heat, waste	-	kg	351	351
	AOX, Asorbable Organic Halogen as Cl	-	kg	1,26E-05	1,26E-05
	BOD5, Biological Oxygen Demand	-	kg	2,05E-04	0,000205
	COD, Chemical Oxygen Demand	-	kg	2,02E-03	2,02E-03
	Chloride	-	kg	3,60E-02	3,60E-02
	Copper, Ion	-	kg	1,02E-07	1,02E-07
	Nitrogen	-	kg	2,08E-04	2,08E-04

		Geogr. Bezug	Einheit	Szenario 2	Szenario 1
	Phosphate	-	kg	2,80E-06	2,80E-06
	Sodium, ion	-	kg	3,38E-02	3,38E-02
	Zinc, ion	-	kg	1,96E-06	1,96E-06
	Iron, ion	-	kg	5,61E-06	5,61E-06
	DOC, Dissolved Organic Carbon	-	kg	9,10E-04	9,10E-04
	TOC, Total Organic Carbon	-	kg	9,10E-04	9,10E-04

Anh.-Tabelle 7: Sachbilanzdaten für Einkristall für die Szenarien 1 und 2

		Geogr. Bezug	Einheit	Szenario 2	Szenario 1
Product	CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant	CN	kg	1	1
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin, CN	-	m³	5,09E+00	5,09E+00
technosphere	electricity, medium voltage, at grid	CN	kWh	6,82E+01	3,50E+01
	natural gas, burned in industrial furnace low Nox > 100kW	RER	MJ	6,82E+01	6,82E+01
water	tap water	RER	kg	9,41E+01	9,41E+01
	water, deionised, at plant	CH	kg	4,01E+00	4,01E+00
materials	silicon, production mix, photovoltaics, at plant	GLO	kg	7,81E-01	-
	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	CN	kg	-	7,81E-01
	argon, liquid, at plant	RER	kg	1,00E+00	1,00E+00
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	kg	1,00E-02	1,00E-02
	nitric acid, 50% in H2O, at plant	RER	kg	6,68E-02	6,68E-02
	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	kg	4,15E-02	4,15E-02
	ceramic tiles, at regional storage	CH	kg	1,67E-01	1,67E-01
	lime, hydrated, packed, at plant	CH	kg	2,22E-02	2,22E-02
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	tkm	9,12E-01	9,12E-01
	transport, freight, rail	RER	tkm	1,41E+00	1,41E+00
infrastructure	silicone plant	RER	unit	1,00E-11	1,00E-11

		Geogr. Bezug	Einheit	Szenario 2	Szenario 1
	disposal, waste, Si waterprod., inorg, 9,4% water, to residual material landfill	CH	kg	1,67E-01	1,67E-01
emission air, high population density	Heat, waste	-	MJ	2,46E+02	2,46E+02
emission water, river	Hydroxide	-	kg	3,67E-01	3,67E-01
	BOD5, Biological Oxygen Demand	-	kg	1,30E-01	1,30E-01
	COD, Chmeical Oxygen Demand	-	kg	1,30E-01	1,30E-01
	DOC, Dissolved Organic Carbon	-	kg	4,05E-02	4,05E-02
	TOC, Total Organic Carbon	-	kg	4,05E-02	4,05E-02
	Nitrogen oxides	-	kg	3,39E-02	3,39E-02
	Nitrate	-	kg	8,35E-02	8,35E-02

### Anhang IV: Detaillierte Wirkungsbilanzergebnisse

Anh.-Tabelle 8: Detaillierte Wirkungsbilanz Szenario 1

pro 1 kWh Strom und 1 kg Kartoffeln		Szenario 1						
Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Potatoes, at farm/DE	Electricity, medium	Module	Unterkonstruktion	Kabel	Inverter
Climate Change	kg CO <sub>2</sub> eq	1,90E-01	8,60E-02	1,04E-01	0,060	0,041981	0,000	0,0014
Ozone Depletion	kg CFC-11eq	1,06E-08	9,24E-10	9,63E-09	6,693	2,7895E-09	3,499	1,1733
Ionising Radiation	kBq U-235 eq	6,75E-03	1,49E-03	5,26E-03	0,004	0,000187	2,486	5,8252
Photochemical Ozone Formation	kg NMVOC eq	6,14E-04	2,35E-04	3,79E-04	98509	26	E-05	E-05
Particulate Matter	Krankheitsfälle	1,82E-08	1,19E-08	6,32E-09	0,000	0,000173	5,381	5,7210
Human Toxicity (non-cancer)	CTUh	1,86E-08	1,65E-08	2,14E-09	1944	76	E-06	5E-06
Human Toxicity (cancer)	CTUh	4,86E-10	2,24E-10	2,62E-10	3,714	2,4956E-09	6,158	4,7143
Acidification	Mol H+ eq	2,11E-03	1,56E-03	5,47E-04	6,943	1,0863E-10	1,868	1,6802
Eutrophication (freshwater)	kg P eq	8,75E-05	4,77E-05	3,98E-05	7,151	1,8156E-10	3,458	5,0475
Eutrophication (marine)	kg N eq	1,93E-03	1,82E-03	1,15E-04	0,000	0,000194	7,082	5,8043
Eutrophication (terrestrial)	Mol N eq	8,18E-03	6,91E-03	1,27E-03	28744	06	E-06	7E-05
Ecotoxicity (freshwater)	CTUe	137,73903	2	1,34E+02	1,59E-05	2,2088E-05	7,568	1,0414
Land Use	Dimensionslose r, aggregierter Index	1,55E+01	1,48E+01	6,73E-01	7,220	3,8652E-05	1,75E-06	2,5550
					0,000	0,000551	2,555	3,2771
					66445	26	E-05	1E-05
					1,791	1,130934	0,278	0,2825
					30069	22	4153	81156
					0,145	0,487797	0,021	0,0191
					10924	63	1762	62752

pro 1 kWh Strom und 1 kg Kartoffeln		Szenario 1						
Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Potatoes, at farm/DE	Electricity, medium	Module	Unterkonstruktion	Kabel	Inverter
Water Use	<i>m³ depriv.</i>	5,77E-02	1,34E-02	4,43E-02	0,033 74311	0,008997 2	0,000 8262	0,0007 08189
Resource Use (fossils)	<i>MJ</i>	1,88E+00	6,47E-01	1,23E+00	0,756 78983	0,448361 18	0,008 0539	0,0176 35286
Ressource use, minerals and metals	<i>kg Sb eq</i>	1,08E-05	2,94E-08	1,08E-05	3,659 E-06	3,8223E-06	1,909 E-06	1,4024 9E-06

Anh.-Tabelle 9: Detaillierte Wirkungsbilanz Szenario 2

pro 1 kWh Strom und 1 kg Kartoffeln		Szenario 1						
Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Potatoes, at farm/DE	Electricity, medium	Module	Unterkonstruktion	Kabel	Inverter
Climate Change	<i>kg CO<sub>2</sub> eq</i>	1,56E-01	8,60E-02	6,96E-02	6,01E-02	7,43E-03	6,19E-04	1,46E-03
Ozone Depletion	<i>kg CFC-11 eq</i>	8,27E-09	9,24E-10	7,34E-09	6,69E-09	4,97E-10	3,50E-11	1,17E-10
Ionising Radiation	<i>kBq U-235 eq</i>	6,60E-03	1,49E-03	5,10E-03	4,99E-03	3,31E-05	2,49E-05	5,83E-05
Photochemical Ozone Formation	<i>kg NMVOC eq</i>	4,72E-04	2,35E-04	2,37E-04	1,94E-04	3,12E-05	5,38E-06	5,72E-06
Particulate Matter	<i>Krankheitsfälle</i>	1,62E-08	1,19E-08	4,26E-09	3,71E-09	4,40E-10	6,16E-11	4,71E-11
Human Toxicity (non-cancer)	<i>CTUh</i>	1,77E-08	1,65E-08	1,24E-09	6,94E-10	1,92E-10	1,87E-10	1,68E-10
Human Toxicity (cancer)	<i>CTUh</i>	3,35E-10	2,24E-10	1,11E-10	7,15E-11	3,11E-11	3,46E-12	5,05E-12
Acidification	<i>Mol H+ eq</i>	1,95E-03	1,56E-03	3,87E-04	2,87E-04	3,47E-05	7,08E-06	5,80E-05
Eutrophication (freshwater)	<i>kg P eq</i>	6,93E-05	4,77E-05	2,16E-05	1,59E-05	3,90E-06	7,57E-07	1,04E-06
Eutrophication (marine)	<i>kg N eq</i>	1,90E-03	1,82E-03	8,35E-05	7,22E-05	7,01E-06	1,75E-06	2,56E-06
Eutrophication (terrestrial)	<i>Mol N eq</i>	7,73E-03	6,91E-03	8,23E-04	6,64E-04	1,00E-04	2,56E-05	3,28E-05
Ecotoxicity (freshwater)	<i>CTUe</i>	1,37E+02	1,34E+02	2,55E+00	1,79E+00	2,00E-01	2,78E-01	2,83E-01
Land Use	<i>Dimensionslose r, aggregierter Index</i>	1,61E+01	1,56E+01	5,33E-01	1,45E-01	3,47E-01	2,12E-02	1,92E-02
Water Use	<i>m³ depriv.</i>	5,03E-02	1,34E-02	3,69E-02	3,37E-02	1,62E-03	8,26E-04	7,08E-04
Resource Use (fossils)	<i>MJ</i>	1,51E+00	6,47E-01	8,62E-01	7,57E-01	7,98E-02	8,05E-03	1,76E-02
Ressource use, minerals and metals	<i>kg Sb eq</i>	8,87E-06	2,94E-08	8,85E-06	3,66E-06	1,87E-06	1,91E-06	1,40E-06

## Anhang V: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion inkl. der Systemkomponente an den gesamten Umweltwirkungen

Anh.-Tabelle 10: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion inkl. der Systemkomponente an den gesamten Umweltwirkungen in Szenario 1 in %

Wirkungskategorie	Kartoffel In	Stromproduktion				Gesamt
		Module	Unterkonstruktion	elektr. Leitungen	Inverter	
Climate Change	45,21	31,62	22,08	0,33	0,77	100
Ozone Depletion	8,75	63,39	26,42	0,33	1,11	100
Ionising Radiation	22,14	73,86	2,77	0,37	0,86	100
Photochemical Ozone Formation	38,25	31,65	28,29	0,88	0,93	100
Particulate Matter	65,34	20,38	13,69	0,34	0,26	100
Human Toxicity (non-cancer)	88,51	3,73	5,84	1,00	0,90	100
Human Toxicity (cancer)	46,14	14,72	37,38	0,71	1,04	100
Acidification	74,04	13,65	9,22	0,34	2,76	100
Eutrophication (freshwater)	54,55	18,16	25,23	0,86	1,19	100
Eutrophication (marine)	94,05	3,73	2,00	0,09	0,13	100
Eutrophication (terrestrial)	84,43	8,12	6,74	0,31	0,40	100
Ecotoxicity (freshwater)	97,47	1,30	0,82	0,20	0,21	100
Land Use	95,66	0,94	3,15	0,14	0,12	100
Water Use	23,27	58,48	15,59	1,43	1,23	100
Resource Use (fossils)	34,47	40,29	23,87	0,43	0,94	100
Ressource use, minerals and metals	0,27	33,81	35,32	17,64	12,96	100

Anh.-Tabelle 11: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion inkl. der Systemkomponente an den gesamten Umweltwirkungen in Szenario 2 in %

Wirkungskategorie	Kartoffel In	Stromproduktion				Gesamt
		Module	Unterkonstruktion	elektr. Leitungen	Inverter	
Climate Change	55,2	38,6	4,8	0,4	0,9	100
Ozone Depletion	11,2	81,0	6,0	0,4	1,4	100
Ionising Radiation	22,7	75,6	0,5	0,4	0,9	100
Photochemical Ozone Formation	49,8	41,2	6,6	1,1	1,2	100
Particulate Matter	73,6	23,0	2,7	0,4	0,3	100
Human Toxicity (non-cancer)	93,0	3,9	1,1	1,1	0,9	100
Human Toxicity (cancer)	66,9	21,3	9,3	1,0	1,5	100
Acidification	80,1	14,8	1,8	0,4	3,0	100
Eutrophication (freshwater)	68,9	22,9	5,6	1,1	1,5	100
Eutrophication (marine)	95,6	3,8	0,4	0,1	0,1	100
Eutrophication (terrestrial)	89,4	8,6	1,3	0,3	0,4	100
Ecotoxicity (freshwater)	98,1	1,3	0,1	0,2	0,2	100

Wirkungskategorie	Kartoffel In	Stromproduktion				Gesamt
		Module	Unterkonstruktion	elektr. Leitungen	Inverter	
Land Use	96,7	0,9	2,2	0,1	0,1	100
Water Use	26,7	67,0	3,2	1,6	1,4	100
Resource Use (fossils)	42,9	50,1	5,3	0,5	1,2	100
Ressource use, minerals and metals	0,3	41,2	21,1	21,5	15,8	100

Anh.-Tabelle 12: Anteile der Kartoffel- und Stromproduktion an den gesamten Umweltwirkungen in Szenario 3 in %

	Kartoffelproduktion	Stromproduktion	Gesamt
Climate Change	12,8	87,2	100,
Ozone Depletion	2,6	97,4	100,
Ionising Radiation	1,5	98,5	100,
Photochemical Ozone Formation	23,4	76,6	100,
Particulate Matter	71,3	28,7	100,
Human Toxicity (non-cancer)	79,2	20,8	100,
Human Toxicity (cancer)	62,2	37,8	100,
Acidification	54,3	45,7	100,
Eutrophication (freshwater)	5,1	94,9	100,
Eutrophication (marine)	80,0	20,0	100,
Eutrophication (terrestrial)	69,0	31,0	100,
Ecotoxicity (freshwater)	93,2	6,8	100,
Land Use	66,9	33,1	100,
Water Use	7,6	92,4	100,
Resource Use (fossils)	7,5	92,5	100,
Ressource use, minerals and metals	1,8	98,2	100,