

LCA und CO₂-Bilanz von Agri-PV im Apfelanbau: Integration von Batteriespeichern sowie Wasserstoff- und Ammoniakpfaden

Zielsetzung

Ökologische Bewertung einer obstbauoptimierten, hochaufgeständerten Agri-PV-Anlage in Thüringen und Vergleich mit konventionellen Systemen

Analyse der CO₂-Emissionen von Batteriespeichern, Wasserstoff- und Ammoniaksystemen für die Kombination mit Agri-PV

LCA

Material & Methoden

CO₂-Bilanz

- Ökobilanz nach EU Environmental Footprint-Framework 3.1.
- Datenbank Ecoinvent 3.12 & Agri-footprint 6.3
- Cradel to Gate Ansatz
- Funktionelle Einheiten: 1 kWh Strom und 1 kg Äpfel

Datenquelle APV

- Geplante 3 ha APV-Anlage Bad Klosterlausnitz nach DINSpec Kategorie 1 mit einer Leistung von 4,2 MWp
- Lebenszeit produzierte Energie → 115.421,29 MWh

- CO₂ Auswirkung über Lebenszeit in kg CO₂/kWh.
- Literaturrecherche Daten von 2020-2025
- Sichtung von über 150 wissenschaftlichen Publikationen
- Bezug auf marktreife Energiespeichersysteme

Energiespeichersysteme

- Lithium-Eisen Batterien (LFP), H₂ + NH₃ PEM (Proton Exchange Membrane)- und AEL (alkalische Elektrolyse)-Elektrolyse
- Annahme von 50 % Speicherung → 57.710,64 MWh

Untersuchung von drei Szenarien

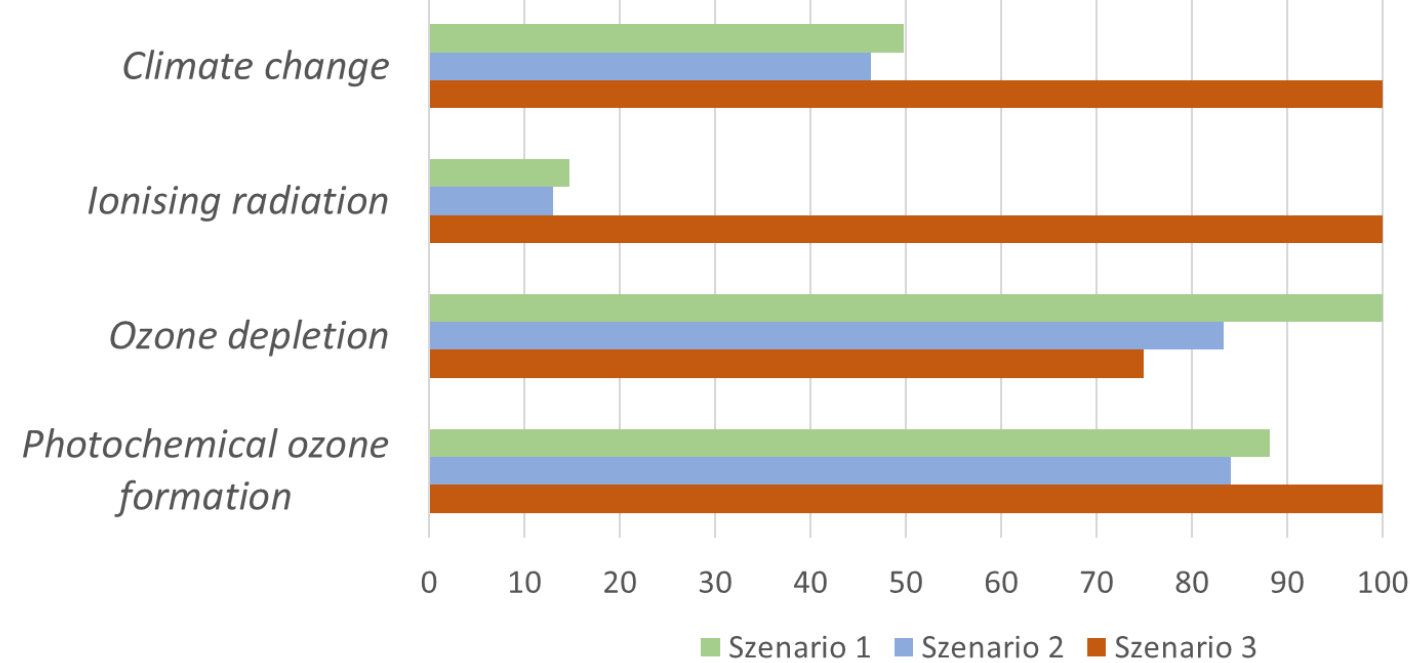
- Szenario 1: Agri-PV + Bio-Apfelanbau
- Szenario 2: Getrennte Produktion (FFPV + Bio-Apfelanbau)
- Szenario 3: Getrennte Produktion deutscher Strommix 2024 + Bio-Apfelanbau

Ergebnisse

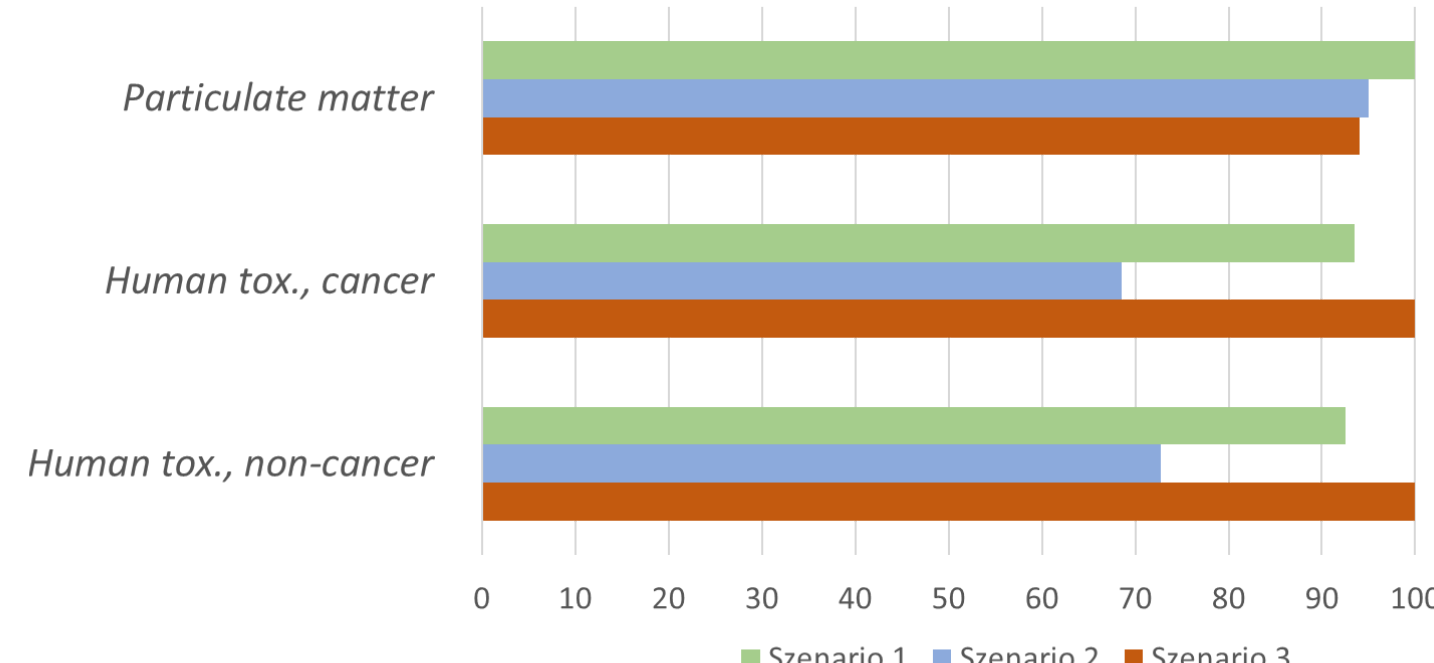
Kombination aus FFPV (Freiflächen-PV) /Agri-PV und Lithium-Ionen-Batteriespeicher weist den geringsten CO₂-Ausstoß für bereitgestellte Energie auf.

LCA

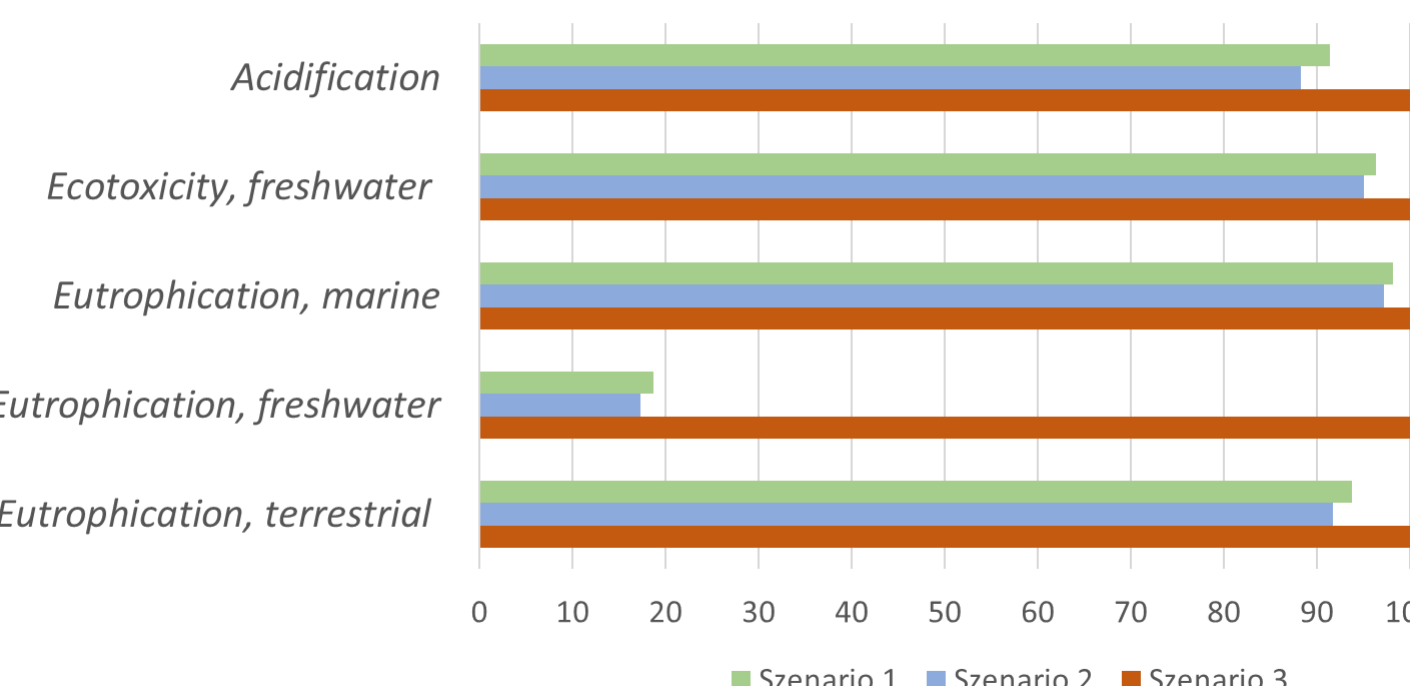
Klimarelevante Wirkungskategorien



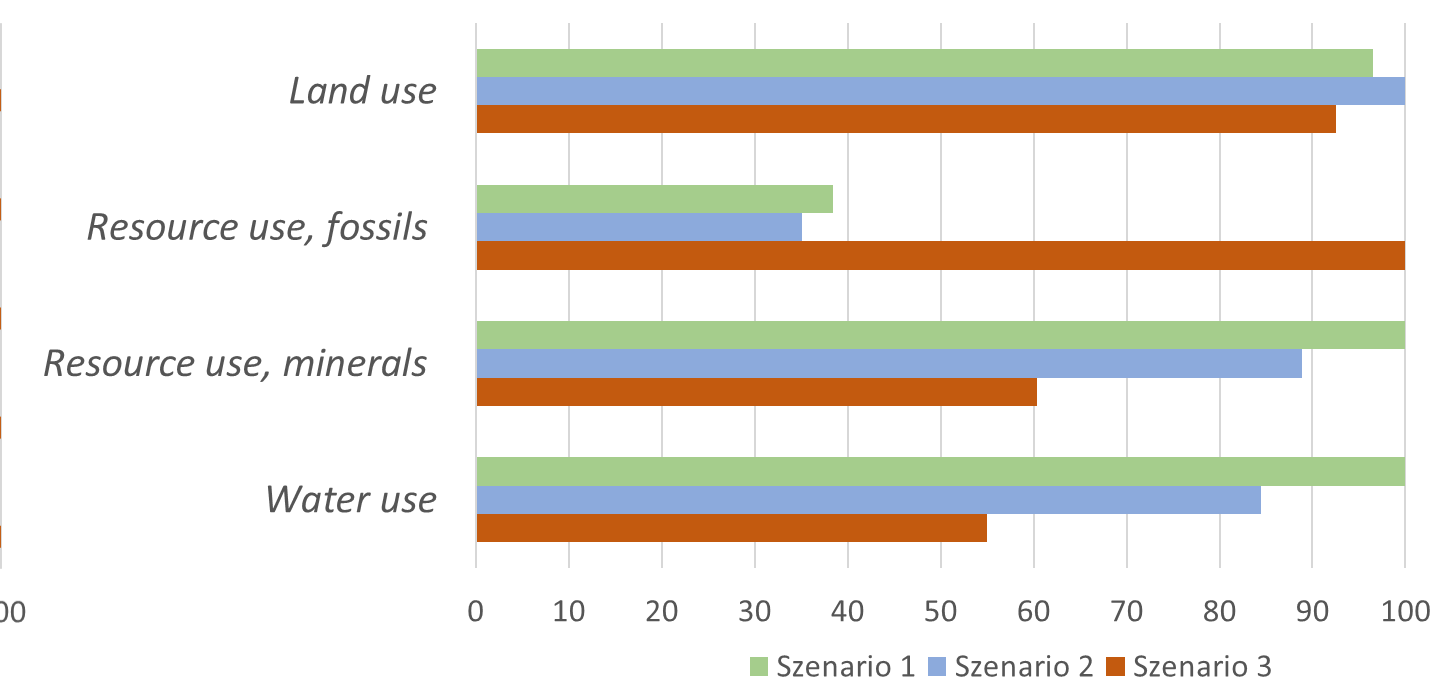
Gesundheitlich relevante Wirkungskategorien



Ökosystem relevante Wirkungskategorien



Ressourcen relevante Wirkungskategorien



- Photovoltaik in fast allen Wirkungskategorien besser als der deutsche Strommix
- Agri-PV und FFPV haben ähnliche Umweltwirkungen
- FFPV geringfügig besser (meist < 10 % Unterschied)
 - Ursache: höherer Materialbedarf

- **Agri-PV besser als Strommix in 12 von 16 Wirkungskategorien (besonders in klimarelevanten)**

CO₂-Bilanz

- Lithium-Ionen-Batterien haben geringste spezifische CO₂-Emissionen pro gespeicherter kWh
- Wasserstoff (H₂) und Ammoniak (NH₃) haben höhere spezifische Emissionen pro kWh (best case +22%)
 - Ursache geringere Wirkungsgrade (besonders Ammoniak)
- Chemische Speicher bleiben wichtig für Langzeitspeicherung

Gesamtergebnisse

- **Ökologisch günstigste Kombination Agri-PV / FFPV + Batteriespeicher**

Speicher-Typ / Erzeugungsszenario	kg CO ₂ /kWh *	Gesamt Energie Speicherkapazität in MWh **	Lebenszeit CO ₂ in t ***	Lebenszeit CO ₂ in t für Szenario 1 ****	Lebenszeit CO ₂ in t für Szenario 2 ****	Lebenszeit CO ₂ in t für Szenario 3 ****
Batterie LFP	0,069	51.939,58	3.583,83	15.183,83	12.193,83	58.683,83
Wasserstoff AEL	0,089	18.755,96	1.631,77	13.231,77	10.241,77	56.731,77
Wasserstoff PEM	0,1	21.814,62	2.181,46	13.781,46	10.791,46	57.281,46
Ammoniak AEL	0,092	10.907,31	1.003,47	12.603,47	9.613,47	56.103,47
Ammoniak PEM	0,088	13.088,77	1.151,81	12.751,81	9.761,81	56.251,81

*pro eingespeicherter kWh für Batterien und pro kWh H₂ und NH₃ in Strom umgewandelt / **pro Speicherform von 50% erzeugter Energie (= 115.421.286,9 / 2= 57.710,64) MWh / ***pro auf Lebenszeit entstehendes CO₂ in t pro Speichertechnologie / **** Gesamt CO₂ Emissionen Bezüglich der Gesamtlebenszeit von 30 Jahren in Kombination mit den jeweiligen Speichertechnologien: CO₂ Emissionen von Szenario 1 → 11.600 t CO₂, Szenario 2 → 8.610 t CO₂, Szenario 3 → 55.100 t CO₂