

Swissolar-Webinar: Ökobilanz von Photovoltaik



Matthias Stucki
matthias.stucki@zhaw.ch

Agenda



1. IEA PVPS Task 12 
2. Ökobilanzberechnungen zu PV
3. Ergebnisse zu Klima- und Gesamtumweltbelastung
4. Rückzahldauer: nicht erneuerbare Primärenergie
5. Alpine PV-Anlagen
6. Fragen & Diskussion 



Zur Person Matthias Stucki



2002 – 2007 Studium MSc. Umweltnaturwissenschaften ETH

2008 – 2012 Projektleiter Ökobilanzen ESU-services GmbH, Ökobilanzierung von Solarenergie für die Internationale Energieagentur IEA

2011 Empa: Aufbau Ökobilanznetzwerk Indien

2012+ ZHAW, Leiter der Forschungsgruppe Ökobilanzierung, Leiter Minor Ökobilanzierung und Labelmanagement, Forschung & Lehre

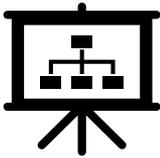
2022+ ZHAW, Leiter Forschungsbereich Ökotechnologien und Energiesysteme

2023+ Schweizer Experte beim Task 12 des IEA PVPS Programme

IEA PVPS Task 12 – PV Sustainability



Ziel der Task 12 ist es, die internationale Zusammenarbeit und den Aufbau von Wissen im Bereich der ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit von PV zu fördern.



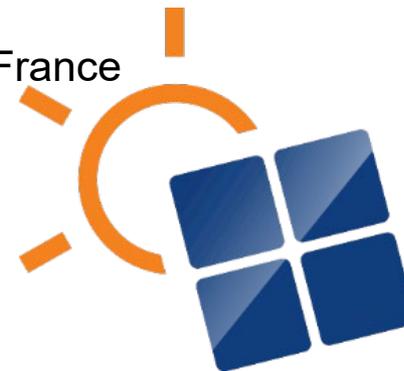
Task 12 Subtasks

- Subtask 1: Circular Economy (CE)
- **Subtask 2: Life Cycle Assessment (LCA)**
- Subtask 3: Ecosystem Integrated PV (ecoPV)
- Subtask 4: Broader Sustainability Aspects (BSA)



Task 12 Operating agents

- Garvin Heath, NREL, USA
- Etienne Drahi, TotalEnergies, France



IEA
PVPS

Das Schweizer Team in der Task 12



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE



Matthias Stucki,
Experte IEA PVPS Task
12, Bereichsleiter
ZHAW



Michael Götz,
Wissenschaftlicher
Assistent, ZHAW
Ökobilanzierung



Rolf Frischknecht,
Experte IEA PVPS Task
12, Inhaber Treeze
GmbH

Faktenblatt: Ökobilanz von Strom aus PV-Anlagen

Technology Collaboration Programme
by IEA

International Energy Agency
Photovoltaic Power Systems Programme

Task 12 Nachhaltigkeit

PVPS

FAKTENBLATT

Ökobilanz von Strom aus PV-Anlagen

AKTUALISIERUNG DER DATEN FÜR DAS JAHR 2023

Autoren: Stucki, M., Gotz, M., de Wild-Scholten, M., Frischknecht, R.
Task 12 Manager:
Garvin Heath, NREL, USA
Etienne Drahi, TotalEnergies, France

<https://iea-pvps.org/fact-sheets/fact-sheet-environmental-life-cycle-assessment-of-electricity-from-pv-systems/>

Agenda



1. IEA PVPS Task 12 
2. **Ökobilanzberechnungen zu PV**
3. Ergebnisse zu Klima- und Gesamtumweltbelastung
4. Rückzahldauer: nicht erneuerbare Primärenergie
5. Alpine PV-Anlagen
6. Fragen & Diskussion 



Ökobilanz: Lebenszyklusperspektive

Quantifizierung der
Umweltauswirkungen über den
ganzen Lebenszyklus eines
Produkts nach ISO 14040.
«Von der Wiege bis zur Bahre»

Lebenszyklus:

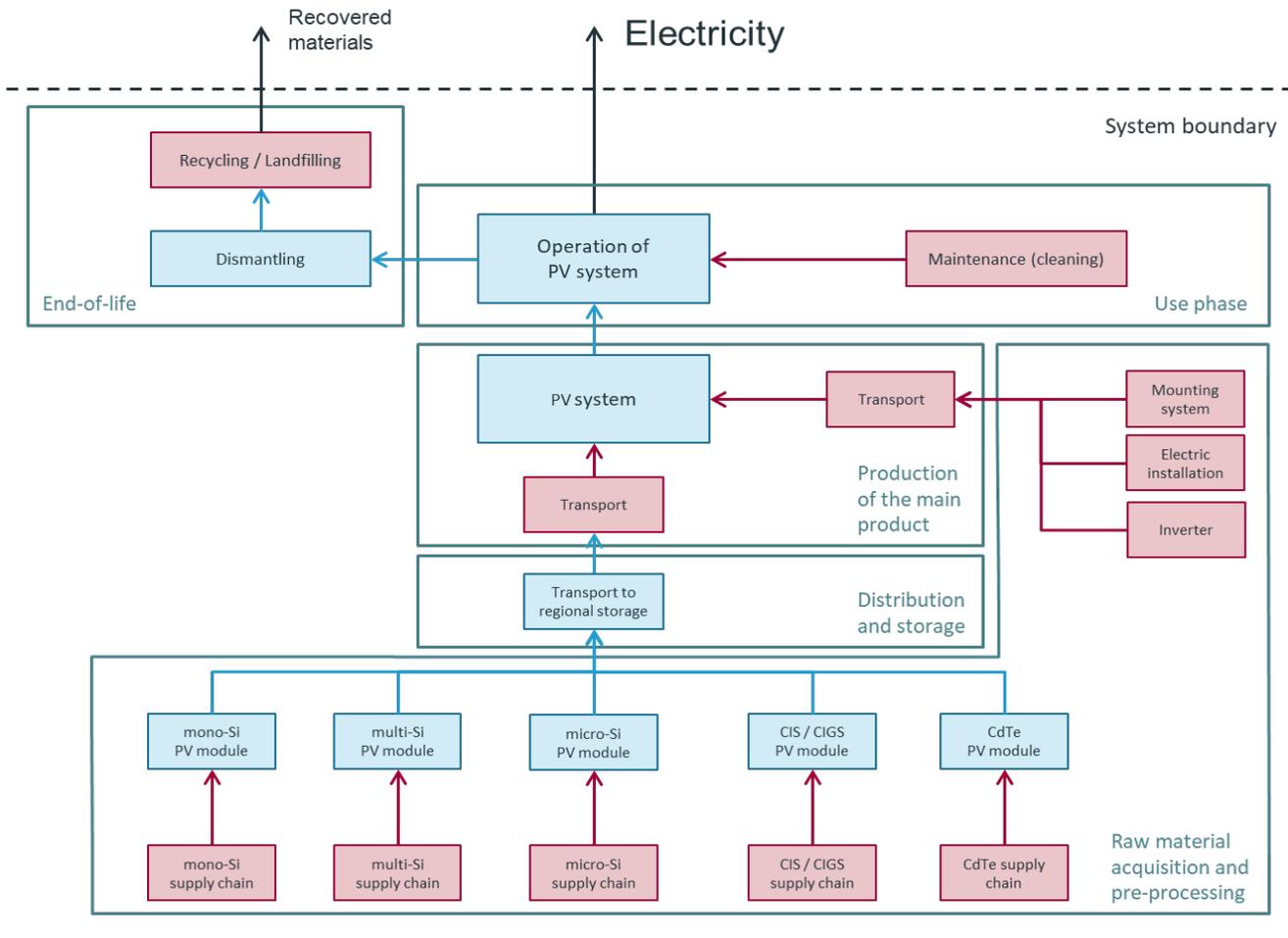
- Rohstoffabbau
- Herstellung
- Distribution & Nutzung
- Entsorgung / Recycling



Untersuchungsrahmen

- **Bezugsgrösse:**
1 kWh Wechselstrom, erzeugt mit einem PV System
Schrägdachsystem in der Schweiz
- **Jahresproduktion:**
975 kWh/kW_p (inkl. Degradation von 0.7 % pro Jahr)
- **Lebensdauer:**
30 Jahre (Panel), 15 Jahre (Wechselrichter)
- **PV Technologien**
 - Cadmium-Tellurid (CdTe)
 - Monokristallines Silizium (mono-Si)
 - Multikristallines Silizium (multi-Si)

Produktsystem und Systemgrenze PV- Stromerzeugung



Primary data from industry:
e.g. inventory data for module production from manufacturing companies

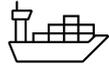
Data from industry and secondary sources:
e.g. data derived from scientific publications, reports and statistics or industry average data.

Lebenswegphasen

• Herstellung



- Ressourcenentnahme, Rohstoffherstellung, Produktion von Solarzellen, Panel, Verkabelung, Wechselrichter



- Distribution und Lagerung, inklusive Transport des Panels nach Europa/in die Schweiz



- Installation des PV Systems, Montage auf dem Dach

• Nutzung (30 Jahre)



- Stromproduktion
- Reinigung (Wasser)

• Entsorgung



- Demontage
- Sortierung und Recycling von Panel und Wechselrichter
- Recycling von Montagematerial und Verkabelung
- Abfallverbrennung und Deponierung

Update 2024 publiziert

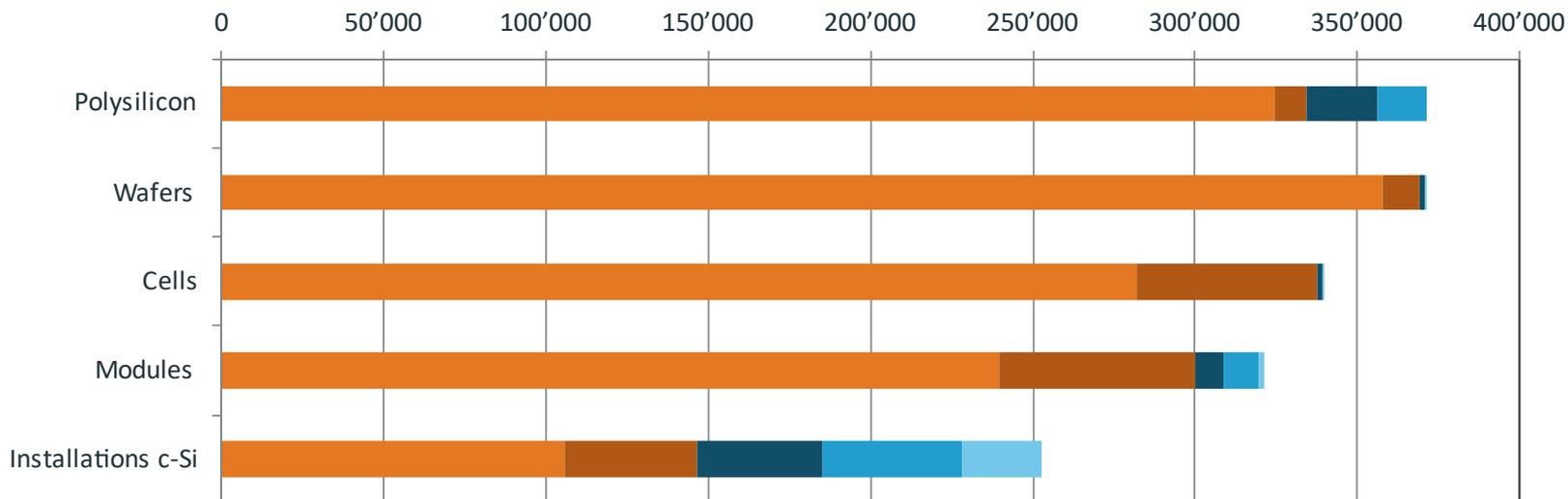
- **PV-Module aus kristallinem Silizium**
 - **Modulwirkungsgrad** (mono-Si: Fraunhofer ISE, 2023; VDMA, 2023; multi-Si: keine Aktualisierung da Produktionsanteil Anteil unter 2%)
 - **Marktanteile Polysilizium-, Ingot-, Wafer-, Zell- und Panelherstellung** (S&P global, 2023)
 - mono-Si: **Strom- und Wärmeenergieverbrauch in der Polysilizium-Ingot-, Wafer-, Zell- und Panelherstellung** (de Wild-Scholten, 2023; VDMA, 2023; IEA PVPS Trends Report, 2023; verschiedene Jahresberichte 2022 von Herstellern (REC, Wacker, Hemlock))
 - mono-Si: **Waferdicke und Siliziumverluste in der Waferproduktion** (VDMA, 2023)
 - mono-Si: Menge an **Metallisierungspaste** (VDMA, 2023)
- **CdTe**
 - Modultyp, **Modulwirkungsgrad und Kapazitäten der Produktionsstätten** (Sinha 2023)

Schlüsselparameter und -daten

Aktualisierung 2024	Einheit	mono-Si	multi-Si	CdTe
Moduleffizienz	%	20.9	18.0	18.4
Waferdicke	µm	160	172.5	n.a.
Sägespalt	µm	57	65	n.a.
Weitere Verluste	µm	3.4	21.4	n.a.
Glasdicke	mm	3.2	3.2	2.1 (front) 2.8 (back)
Energiebedarf				
- MG Silizium Herstellung	kWh/kg	12		
- Polysilizium-Herstellung	kWh/kg	52.3 (elektrisch) + 11.6 (thermisch)		n.a.
- Einkristallziehen / Blockgiessen	kWh/kg	13.5	7.0	n.a.
- Waferherstellung	kWh/m ²	2.7	5.6	n.a.
- Zellenherstellung	kWh/m ²	9.7	17.7	n.a.
- Panelherstellung	kWh/m ²	3.6	7.6	19-23
Bezugsjahr der Produktion- und Markt-Daten		2019 - 2023	2019 - 2021	2020 - 2022

Marktsituation kristallines Silizium in MW PV-Leistung

Photovoltaic power in MW (based on actual production in 2022)



	Installations c-Si	Modules	Cells	Wafers	Polysilicon
China	106'000	239'670	282'001	357'870	324'627
Asia & Pacific	40'291	60'247	55'498	11'347	9'556
Europe	38'700	8'655	1'841	1'622	22'004
Americas	43'400	11'329	0	0	15'330
Middle East and Africa	24'417	1'579	415	110	0

Marktanteil in der PV-Lieferkette von S&P Global Commodity Insights (S&P Global, 2023),
Umrechnungsfaktor für den Polysiliziumbedarf pro MW PV-Leistung: 2,54 Tonnen/MW (S&P Global, 2023).

Agenda



1. IEA PVPS Task 12 
2. Ökobilanzberechnungen zu PV
3. **Ergebnisse zu Klima- und Gesamtumweltbelastung** 
4. Rückzahldauer: nicht erneuerbare Primärenergie
5. Alpine PV-Anlagen
6. Fragen & Diskussion 

Treibhausgasemissionen pro kWh

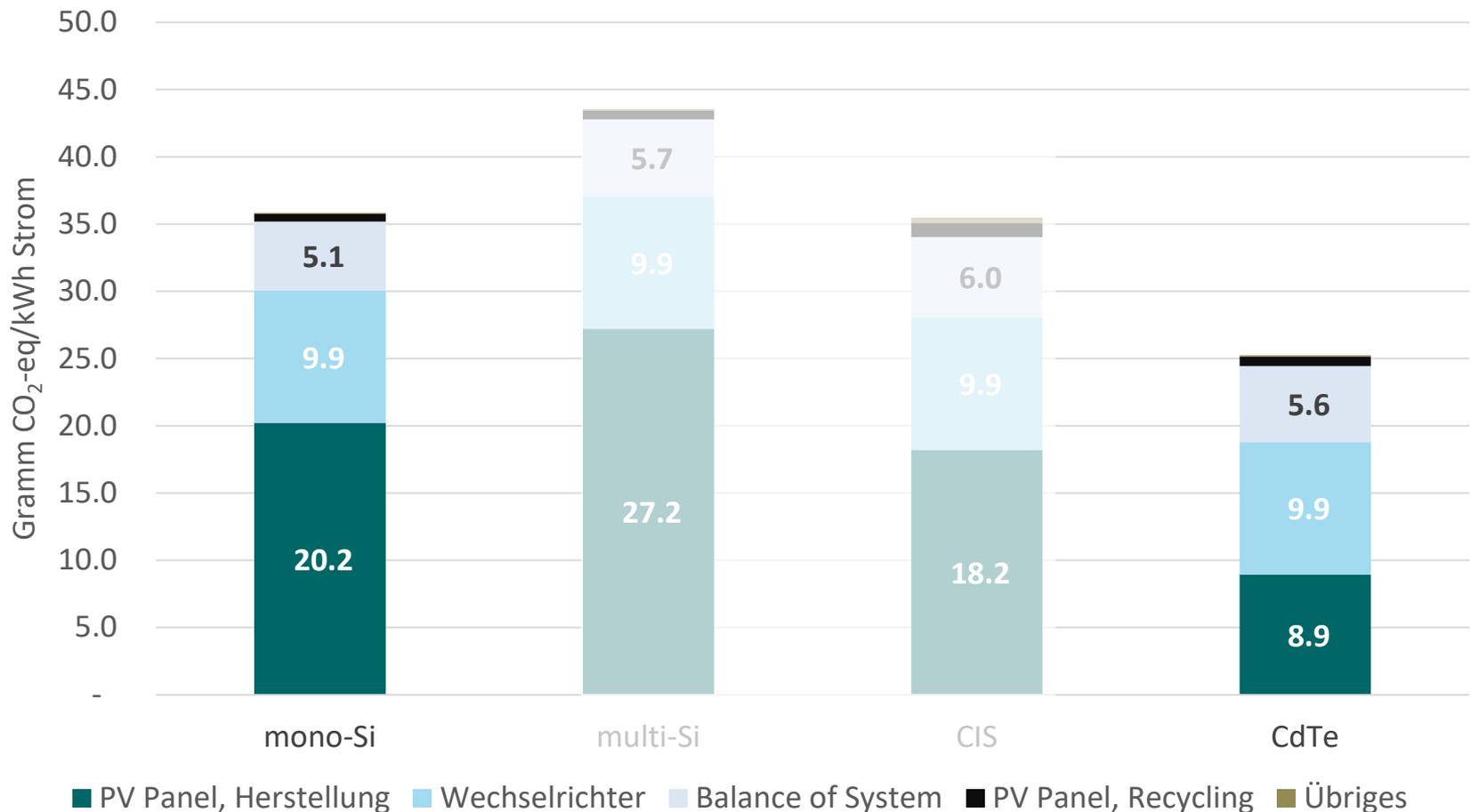
g CO ₂ -eq/kWh	mono-Si	multi-Si	CdTe	CH-Mix
Aktualisierung 2024	35.8	43.6	25.2	125
bisher ⁺	43.1	42.9	27.2	-
Änderung	- 19 %	+ 2 %	- 7 %	-

1 kWh Wechselstrom; Jahresertrag: 975 kWh/kWp, inkl. Degradation (linear, 0.7%/a). Lebensdauer: 30 Jahre (Panel), 15 Jahre (Wechselrichter)

⁺ Grundlage: KBOB-Empfehlung 2009/1:2022, Version 5

Treibhausgasemissionen pro kWh

Treibhausgasemissionen, c-Si Panel, Schrägdach, aufgesetzt, Schweiz,



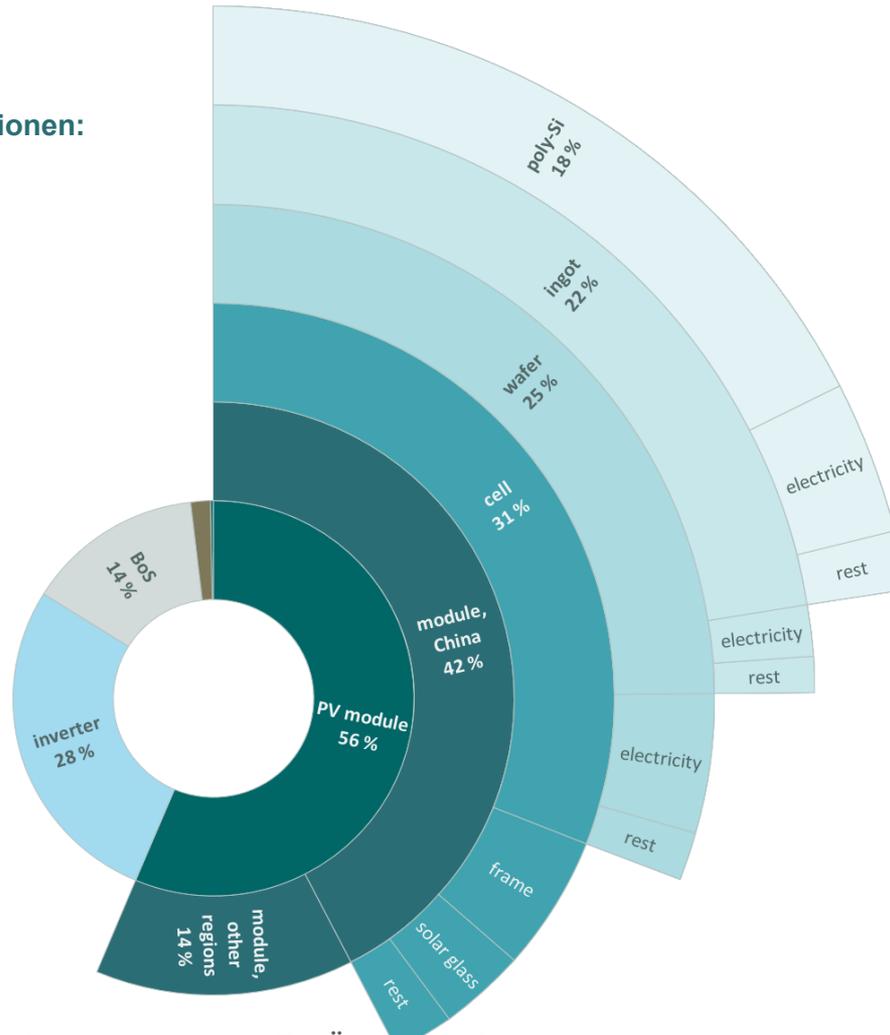
Kristalline Si Panels: Beiträge in der Lieferkette

Supply Chain Contributions to Greenhouse Gas Emissions (mono-Si, slanted roof, Europe)

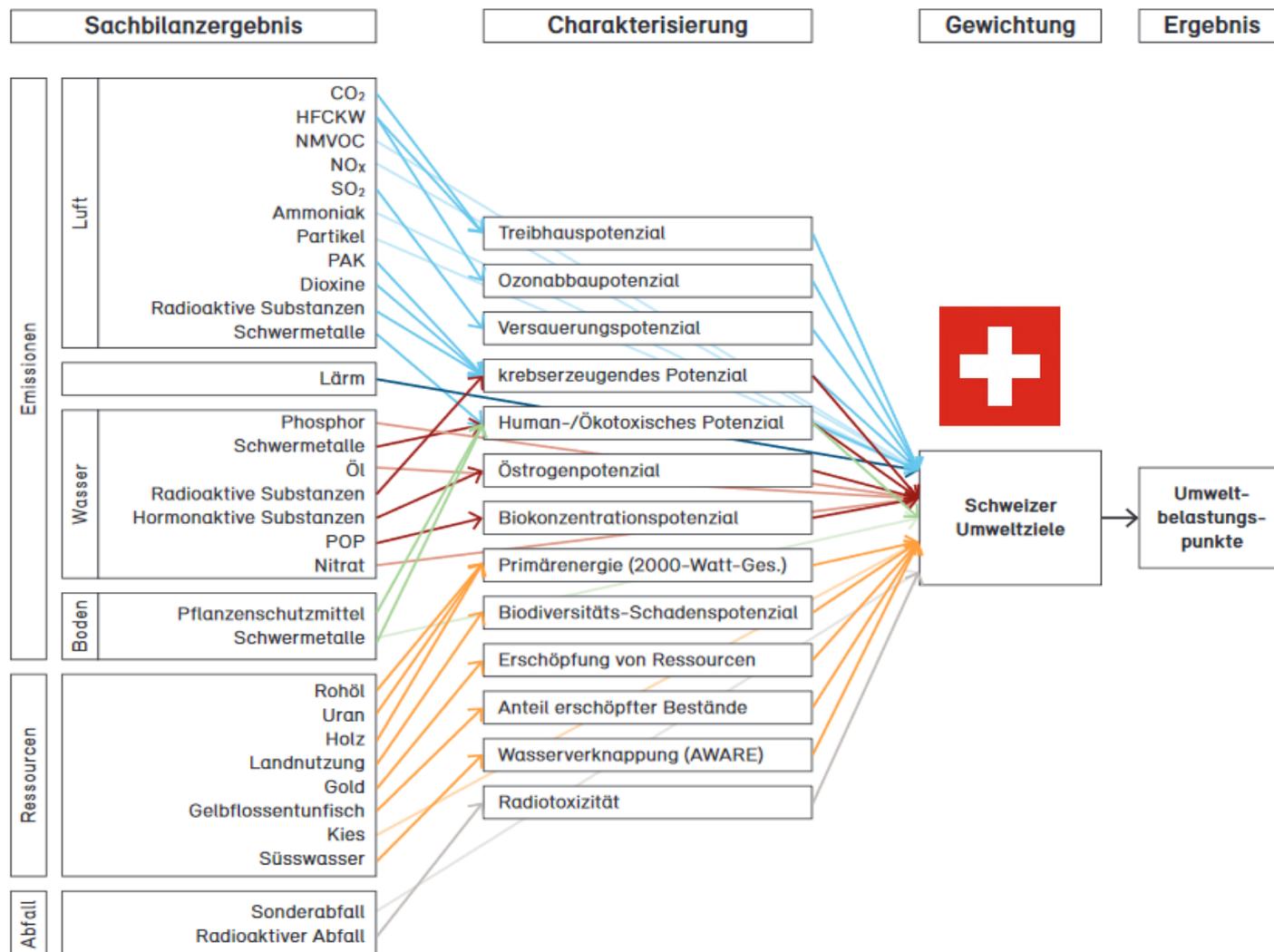
total mono-Si system THG-Emissionen:
35.8 g CO₂-eq / kWh

mono-Si Modul THG-Emissionen:
20.2 g CO₂-eq / kWh

1 kWh Wechselstrom; Jahresertrag: 975 kWh/kWp, inkl. Degradation (linear, 0.7%/a).
Lebensdauer: 30 Jahre (Panel), 15 Jahre (Wechselrichter)



Gesamtumweltbelastung gemäss der Methode der ökologischen Knappheit



Gesamtumweltbelastung pro kWh

UBP/kWh	Mono-Si	Multi-Si	CdTe	CH-Mix
Aktualisierung 2024	98	113	78.3	515
bisher +	110	112	79.9	-
Änderung	- 12 %	+1 %	-2 %	-

1 kWh Wechselstrom; Jahresertrag: 975 kWh/kWp, inkl. Degradation (linear, 0.7%/a). Lebensdauer: 30 Jahre (Panel), 15 Jahre (Wechselrichter)

+ Grundlage: KBOB-Empfehlung 2009/1:2022, Version 5

Agenda



1. IEA PVPS Task 12 
2. Ökobilanzberechnungen zu PV
3. Ergebnisse zu Klima- und Gesamtumweltbelastung
4. **Rückzahldauer: nicht erneuerbare Primärenergie**
5. Alpine PV-Anlagen
6. Fragen & Diskussion 



Rückzahldauer nicht erneuerbare Primärenergie

[Jahre]	mono-Si	multi-Si	CIS	CdTe
Europamix ¹⁾	1.0	1.2	1.2	0.8
CH-Mix ²⁾	1.7	2.0	2.0	1.3
Moduleffizienz	20.9	18.0	17.0	18.4

1 kWh Wechselstrom; Jahresertrag: 975 kWh/kWp, inkl. Degradation (linear, 0.7%/a). Lebensdauer: 30 Jahre (Panel), 15 Jahre (Wechselrichter)

¹⁾ Europamix: Mix aller nicht erneuerbaren Kraftwerke im ENTSO-E Raum

²⁾ CH-Mix: Produktion und kommerzieller Handel

Zeitreihen: Treibhausgasemissionen für Mono-Si-PV-Systeme

Aufdach-Photovoltaikanlage aus kristallinem Silizium für Wohngebäude in der Schweiz

	unit	1996	2003	2007	2014	2016	2020	2021	2024
Treibhausgas- emissionen	g CO ₂ eq / kWh	121	72	76	80	107	43	43	36
Moduleffizienz	%	13.6	14.8	14.0	14.0	15.1	19.5	20.0	20.9
jährlicher Ertrag	kWh / kWp	862	882	922	922	882	976	976	976

Annahmen und Datenquellen

Lebensdauer: 30 Jahre (Panel), 15 Jahre
(Wechselrichter)Hintergrunddaten:
1996: Ökoinventare von Energiesystemen
2003: ecoinvent v1.01
2007: ecoinvent v2.0
2014: ecoinvent v2.2
2016: KBOB LCA data DQRv2:2016
2020: UVEK LCA data DQRv2:2020
2021: UVEK LCA data DQRv2:2022
2023: UVEK LCA data DQRv2:2022

Referenzen:

1996: Ciseri L., Doka G., Vollmer M. (1996). Photovoltaik, in Frischknecht et al. (1996) Ökoinventare von Energiesystemen, Bern
2003/2007: Jungbluth N. (2003). Photovoltaik. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (Ed. Dones R.). Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH
2014: Jungbluth N., Stucki M., Flury K., Frischknecht R. and Buesser S. (2012). Life Cycle Inventories of Photovoltaics. ESU-services Ltd., Uster, CH
2016: Frischknecht, R., Itten R., Sinha P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H. C., Raugei, M., Stucki, M. (2015). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-04:2015
2020: IEA-PVPS Report T12-19:2020
2021: Frischknecht, R. (Ed.) (2022). Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV systems, 2021 data update. IEA-PVPS.

Ausblick: geplante Aktualisierungen 2025

- Anpassung Referenzsysteme und Modulgrößen
 - Aktualisierung Modultechnologien nach Datenverfügbarkeit
 - Aktualisierung Wechselrichter-Daten
 - Aktualisierung globale Marktanteile auf allen Stufen der Lieferkette
 - Aktualisierung chinesischer Strom in der PV-Produktion
- Alle Daten, der Task 12 werden in aggregierter Form öffentlich zugänglich und frei verfügbar gemacht.

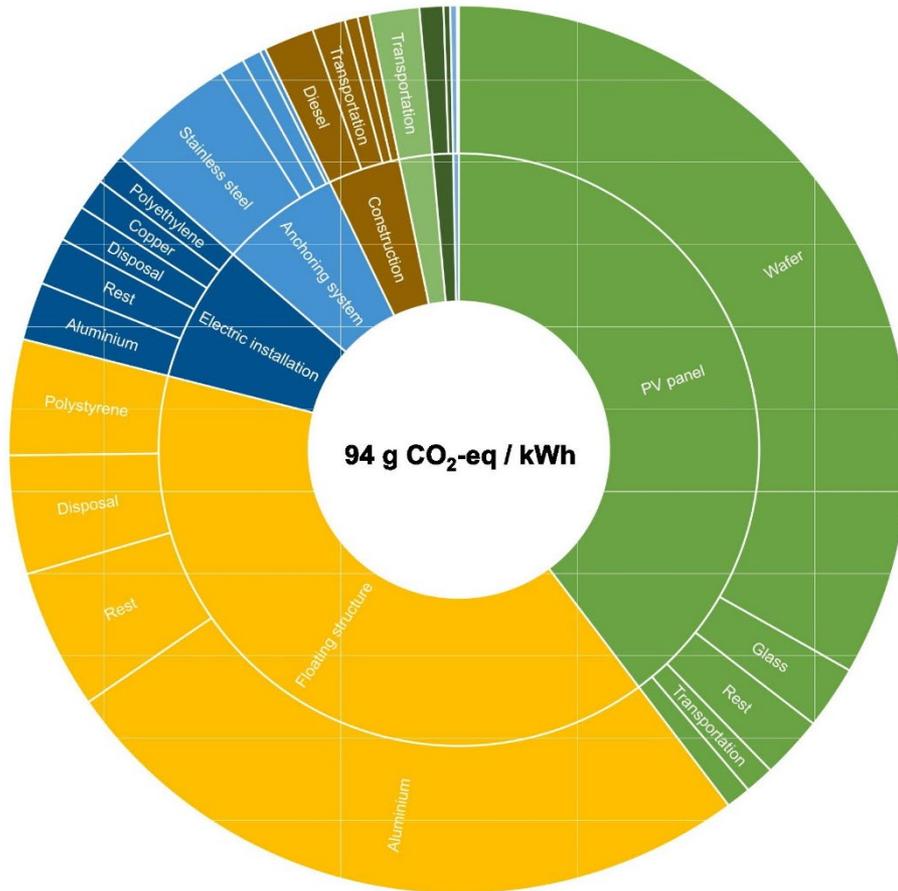
Agenda



1. IEA PVPS Task 12 
2. Ökobilanzberechnungen zu PV
3. Ergebnisse zu Klima- und Gesamtumweltbelastung
4. Rückzahldauer: nicht erneuerbare Primärenergie
5. **Alpine PV-Anlagen**
6. Fragen & Diskussion 



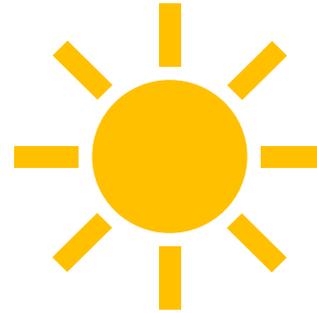
Alpine PV-Anlagen: Schwimmende Anlage auf Stausee



Frehner, A., Stucki, M., & Itten, R. (2024). Are alpine floatovoltaics the way Forward? Life-Cycle environmental impacts and energy payback time of the Worlds' first High-Altitude floating solar power plant. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 68, 103880. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103880>



Schlussfolgerungen



- ✓ Der Klima-Fussabdruck für Solarstrom aus PV-Schrägdach-Anlagen mit kristallinen Modulen wurde in den letzten 8 Jahren um 2/3 gesenkt.
- ✓ Dieser ist nun mit knapp 36 g CO₂-eq/kWh so tief wie noch nie.
- ✓ Die nicht-erneuerbare Energierückzahldauer dieser Anlagen liegt erstmals bei einem Jahr.
- ✓ Weitere Umweltoptimierungen sind möglich, insbesondere durch verstärkten Einsatz von erneuerbarer Energie in der Produktion und durch weitere Steigerung der Effizienz.
- ✓ Solarstrom verursacht deutlich weniger Umweltbelastung als der Schweizer Verbrauchermix.

Life Cycle Assessment @ ZHAW



Matthias Stucki & Michael Götz

Forschungsgruppe Ökobilanzierung

Zürcher Hochschule für Angewandte
Wissenschaften

Institut für Umwelt und Natürliche
Ressourcen

Grüntal, Postfach, CH-8820 Wädenswil

Tel.: +41 58 934 57 192

E-Mail: matthias.stucki@zhaw.ch

Internet: www.zhaw.ch/iunr/lca/



Life Cycle Assessment

Rohstoffabbau ► Herstellung ► Nutzung ► Entsorgung | Recycling

Wichtigste Quellen

- de Wild-Scholten M. & de Wild P. (2023). Task 12 LCI light update. Version date: October 2023. Personal communication via mail (28th October 2023).
- Fraunhofer ISE (2023). Photovoltaics Report. Freiburg, Germany, Feb 21st 2023.
- Frischknecht R. (2022). Environmental life cycle assessment of electricity from PV systems. 2021 data update. [Fact sheet & slide deck](#). International Energy Agency, IEA, Paris.
- Frischknecht R., Stolz P., Krebs L., de Wild-Scholten M., Sinha P. and Raugei M. (2020). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, [Report T12-19:2020](#). International Energy Agency, IEA, Paris.
- Frischknecht R., Stolz P., Heath G., Raugei M., Sinha P. and de Wild-Scholten M. (2020). Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 4th edition, [Report T12-18:2020](#). International Energy Agency, IEA, Paris.
- IEA-PVPS (2023). Trends in Photovoltaic Applications 2023, IEA PVPS Task 1, IEA PVPS T1-43:2023.
- S&P Global (2023). S&P Global Commodity Insights. PV Module Supply Chain Tracker: Q1 2023.
- Sinha P. (2023). First Solar Series 6 and 7 LCI Data. Personal communication via mail (July to October 2023).
- Smith B. L., Woodhouse M., Horowitz K. A. W., Silverman T. J., Zuboy J. and Margolis R. M. (2021). Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results. National Renewable Energy Laboratory, NREL, Golden, CO, USA.
- Stucki, M., Götz, M., de Wild-Scholten, M., & Frischknecht, R. (2024). [Fact sheet & slide deck: environmental life cycle assessment of electricity from PV systems](#). International Energy Agency, IEA, Paris
- VDMA (2023). International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - 2022 Results, 14th edition, VDMA Photovoltaic Equipment.