



Strom aus Sonnenlicht

Aktuelle Forschungsfragen und Anwendungsfelder in der Landwirtschaft

Stefan Bordihn, Bianca Lim, Rolf Brendel

Institut für Solarenergieforschung GmbH

Am Ohrberg 1 in 31860 Emmerthal

www.isfh.de

Hintergrundbild: <https://solaranalytica.com/qcells-solar-panels/>

- **Im Blitzlicht: Forschungsaktivitäten am Institut für Solarenergieforschung in Hameln**
- **Anwendungsfelder in der Landwirtschaft | Photovoltaik-Zuverlässigkeitsanalyse**
- **Aktuelle Entwicklungen im Überblick**

Das ISFH im Kurzporträt



- Gegründet 1987 als gemeinnützige GmbH zur Förderung der Solarenergie mit dem Land Niedersachsen als einzigen Gesellschafter
- Institutionelle Förderung durch das Nieders. Ministerium für Wissenschaft und Kultur, 70 % durch (Bundes)-Forschungsprojekte
- 160 Mitarbeiter*innen

Projektförderung durch

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag





Fakultät für Mathematik und Physik

- Vorlesungen und Labor: Physik und Charakterisierung von Solarzellen und Halbleitern, Energieumwandlung
- Dozenten: Prof. Dr.-Ing. R. Brendel, Prof. Dr. J. Schmidt

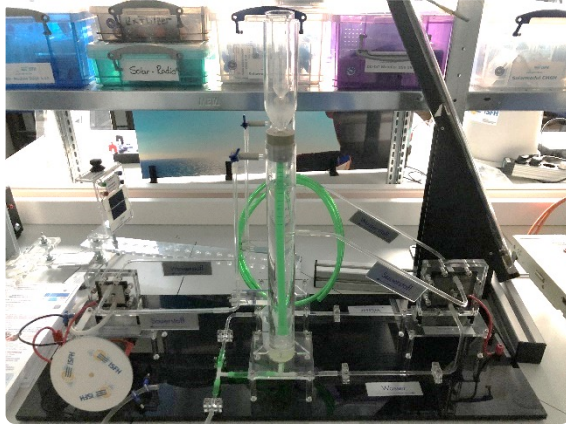
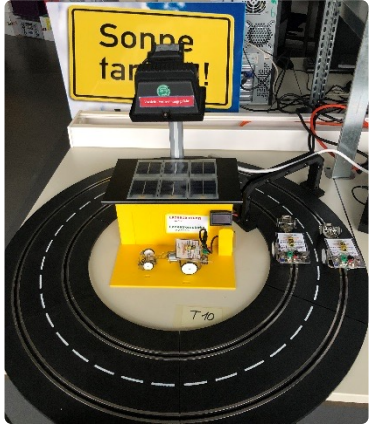
Fakultät für Elektrotechnik und Informatik

- Vorlesungen: Technologie der Solarzellen, Bipolarbauelemente, MOS-Transistoren und -Speicher
- Dozenten: Prof. Dr. R. Peibst, Prof. Dr.-Ing. T. Wietler, Dr.-Ing. J. Krügener



Fakultät für Maschinenbau

- Vorlesungen und Labor: Solarthermie, Photovoltaik
- Dozenten: J. Jensen, Dr. D. Bredemeier



Niedersächsische Lernwerkstatt für Solare Energiesysteme

<https://nils-isfh.de/>

- Themen: von Solarenergie, Wasserstoffherzeugung bis zur Wärmepumpe
- Unterstützung durch ISFH Personal und Laborfläche: Leitung sowie Durchführung durch Lehrer:innen (vom Land Niedersachsen)
- Angebot für Grundschulen, Sekundarstufe I & II, Berufsschulen und Lehrerfortbildung
- Entwicklung von Lernbaukästen mit KOSMOS

Wo wir sind...



Weserbergland

Stadt Hameln

Institut für Solarenergieforschung

Hauptgebäude

Outdoor-Testanlagen

SolarTeC & FlexMod

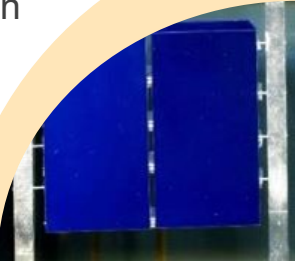
Versuchshaus

Integrierte solare
Systemtechnik

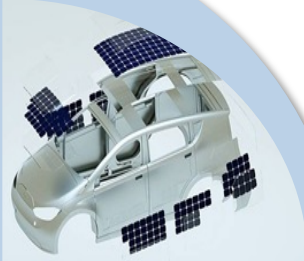
Photovoltaik

Solare Systeme

Industriennahe Solarzellen



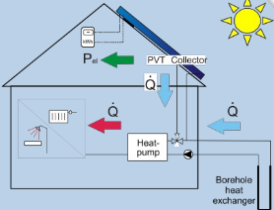
Spezial PV-Module (BIPV & VIPV)



Thermische Systeme für Gebäude



Elektrische Energie Systeme für Gebäude



Wasserstoff & Materialanalyse

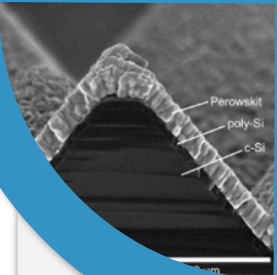


Solkollektoren & Gebäudeintegration



Wärmepumpen

Tandem-Solarzellen



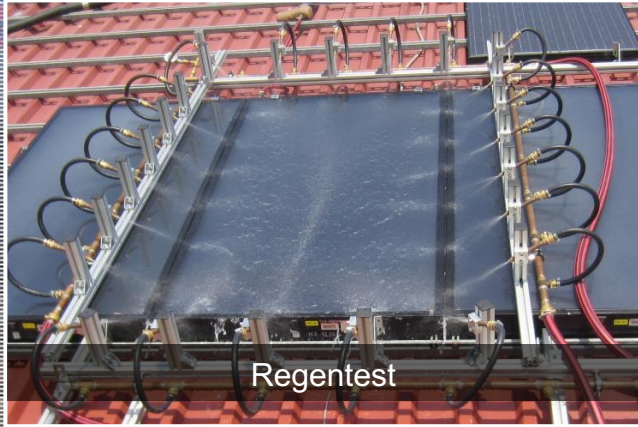
PV-Modul Zuverlässigkeit



Siliziummaterialforschung & Charakterisierung

Forschungsbeispiele: Abteilung Solare Systeme

Solare Systeme: Outdoor-Testanlagen



Outdoor-Testanlagen

Versuchshaus

Integrierte solare
Systemtechnik

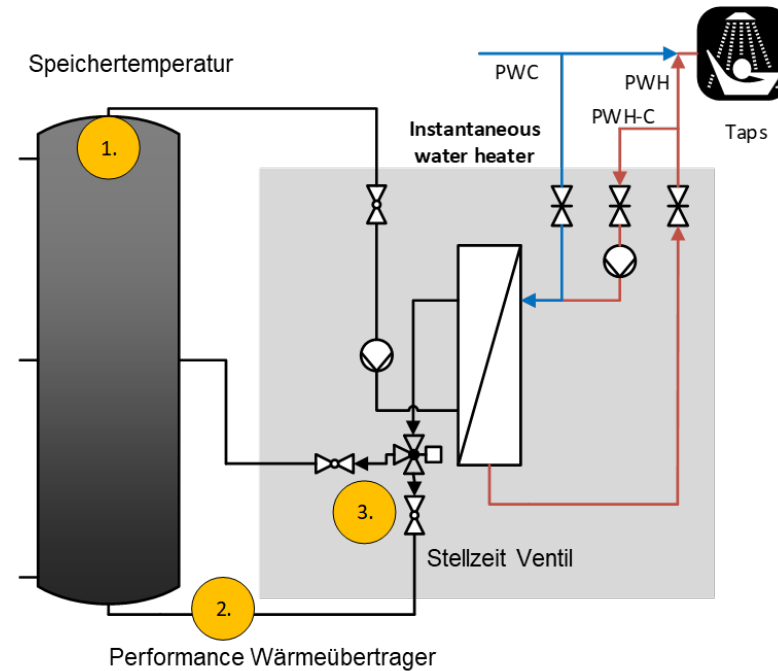
Digitale Abbildung vom
Planungsprozess bis zur
Datenauswertung und
Benutzerrückmeldung

Detailmodellierung der
Komponenten / digitaler
Zwilling

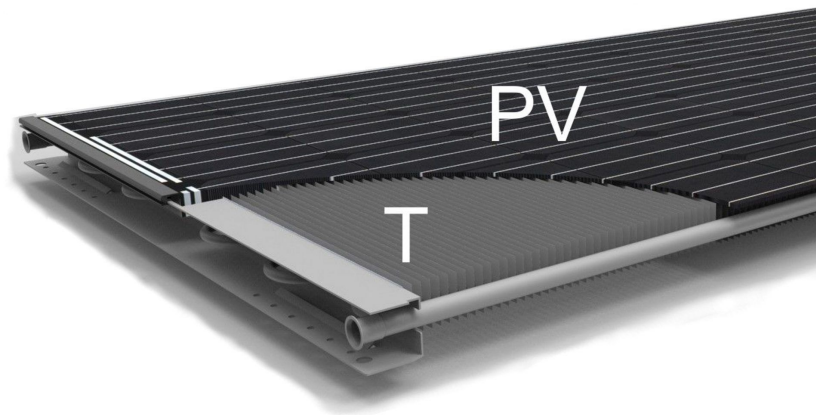
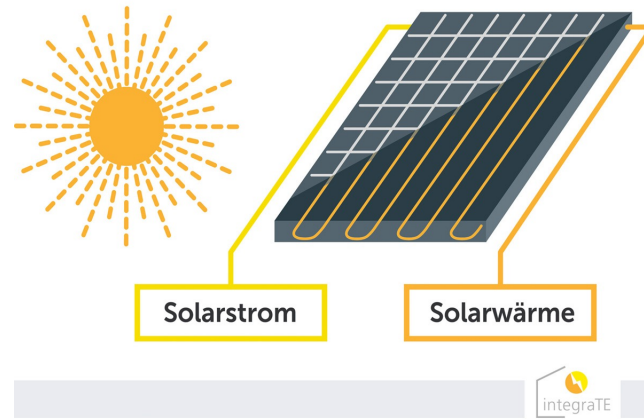
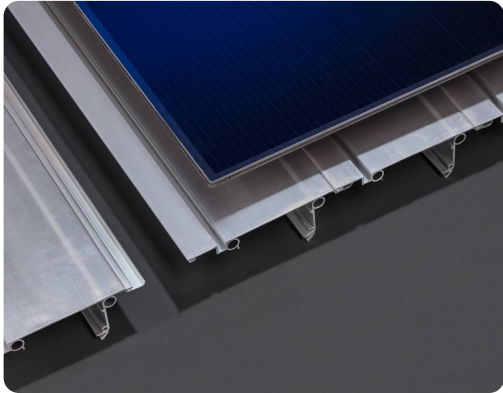




- Prüfstand für **große zentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer**
- Charakterisierung und Optimierung der Regelgüte

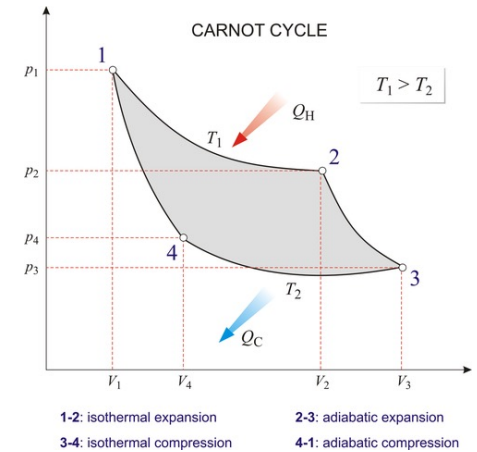


- Ziel: Reduktion des Trinkwarmwasservolumens und **Erhöhung der Energieeffizienz ohne Komforteinbuße**
- Optimierung der Regelung bezüglich Austrittstemperatur des Trinkwarmwassers → **Akzeptanzstudie**

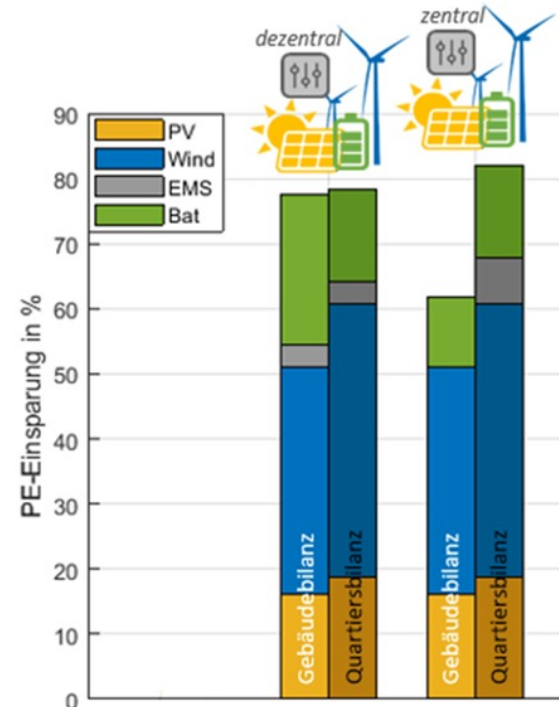
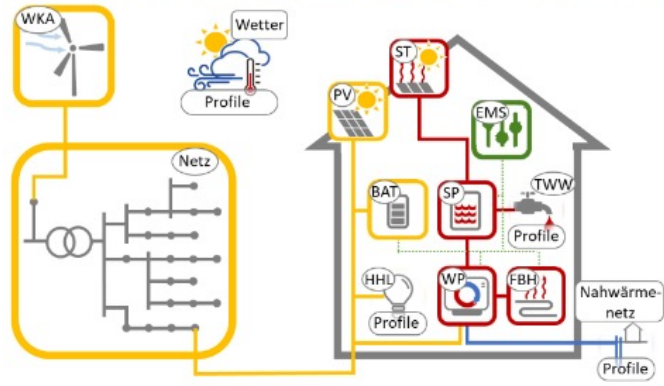


- Steigende Marktnachfrage nach **photovoltaisch-thermischen Kollektoren** → **Gleichzeitige Strom- und Wärmeerzeugung**
- Auch als Wärmequelle für Wärmepumpen nutzbar
- **Konzeption und Realisierung optimierter Module** (Wärmetauscher, Verbindungen PV / Wärmetauscher)
- Bisher KMU-Hersteller mit manueller / halbmanueller Fertigung: Kostensenkungspotential vorhanden
- Erarbeitung und Erprobung optimierter Fertigungskonzepte

Wärmepumpen: Monitoring und Kreisprozesse



- Praktische Anwendung und Monitoring: **Zuverlässigkeits- und Lebenszyklusanalyse** von marktüblichen und Prototyp-Wärmepumpen
- Norm-gerechte Prüfverfahren
- Kreisprozessentwicklung und Systemintegration

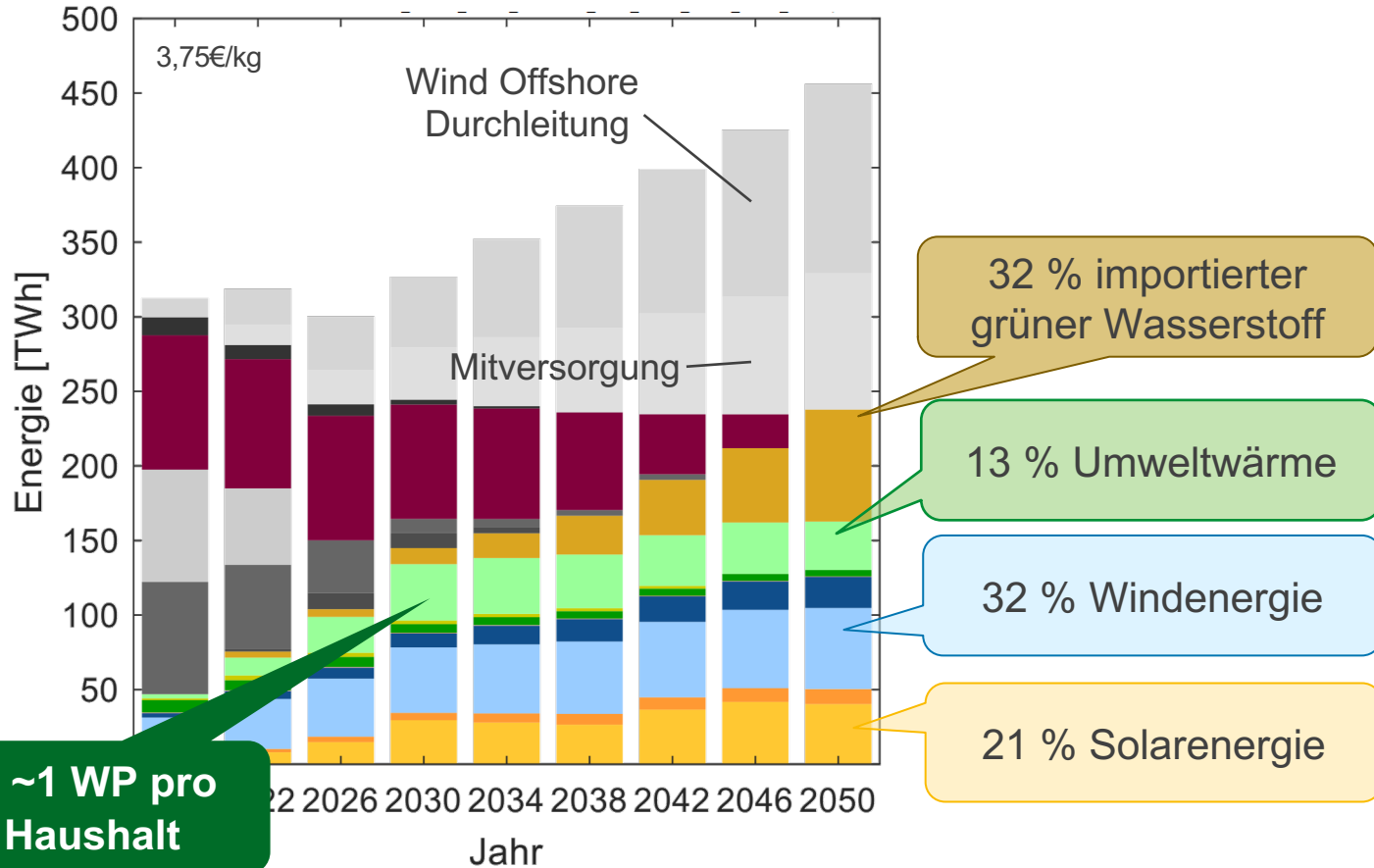


Nutzungsgrad erneuerbarer Energien auf Quartiersebene:

- >60% regionale EE ohne Speicher
- >80% mit Tag-Nacht-Speicherung und zentralem Energiemanagementsystem
- Netzbelastung WP vergleichbar mit E-Autos, im für PV-Anlagen ertüchtigten Netz unproblematisch

Weitere Informationen zur Studie und Leitfaden zur Umsetzung von Wind-Solar-WP-Quartieren: <https://isfh.de/forschung/solare-systeme/projekte/wind-solar-waermepumpen-quartier/>

Szenario für einen Transformationspfad: Wärmepumpenausbau für mehr Effizienz



Entwicklung von Energiesystem- Transformationszenarien

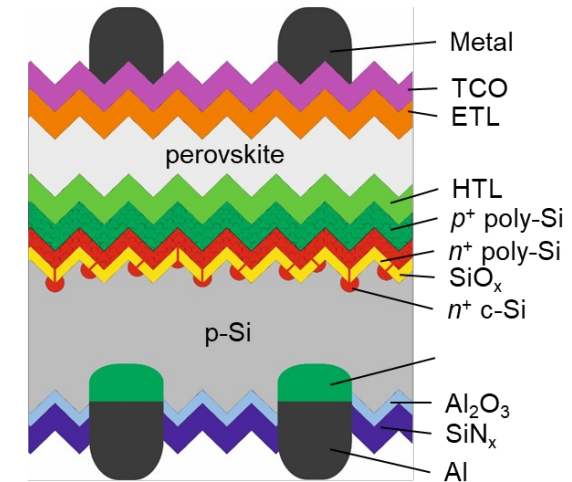
- Der Optimierer reizt das Zubaulimit für Wärmepumpen sofort aus
- Hinweis auf Bevorzugung von Nutzungspfaden mit besonders hoher Effizienz
- Randbedingung: Wasserstoffimportkosten
- Ab 2030 ist bereits eine Wärmepumpe pro Haushalt installiert

Szenario für die Energiebereitstellung in Niedersachsen bei einem H₂-Importpreis von 3,75 €/kg. . Quelle: F. Peterssen et al., „Simulative Kurzstudie zum Einsatz von Wasserstofftechnologie in Niedersachsen, 30.6.2021 www.isfh.de/publikationen/berichte/

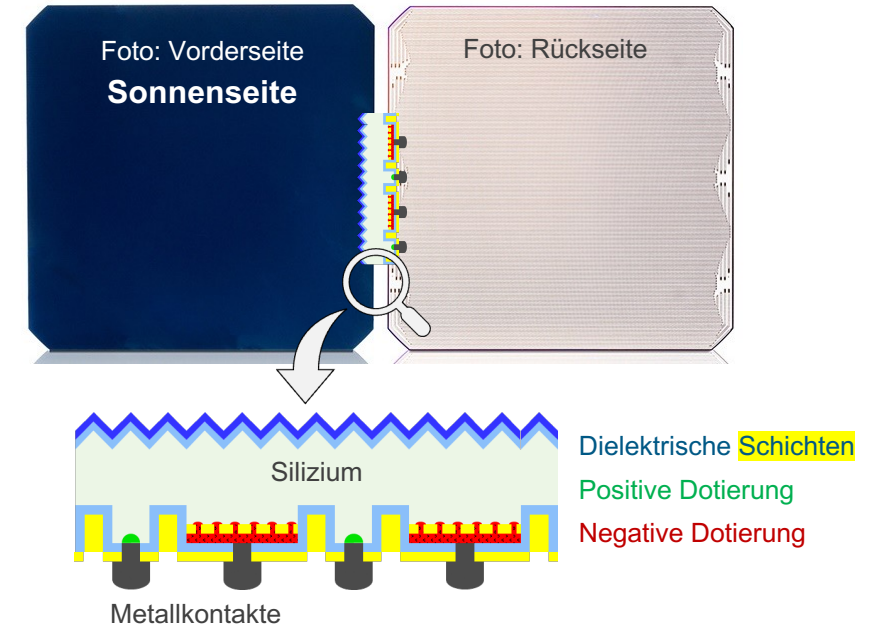
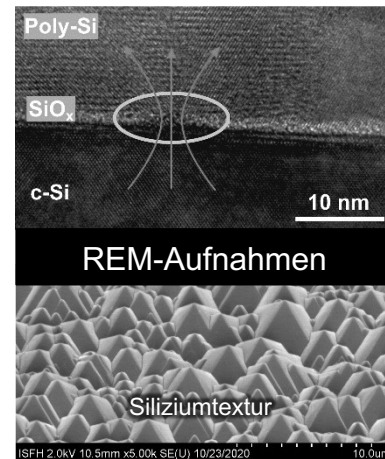
Forschungsbeispiele: Abteilung Photovoltaik



Querschnittsschema Tandemsolarzelle



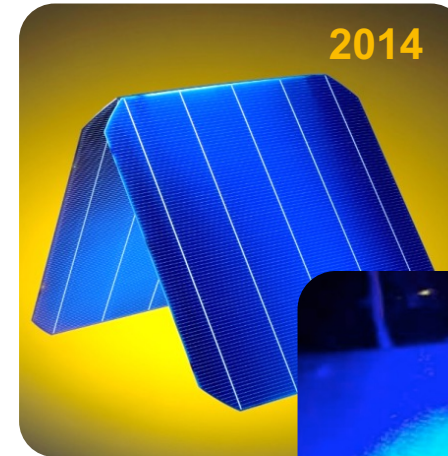
- Entwicklung zukünftiger Solarzellen-Architekturen und Materialien
- Kombination aus Zwei-Solarzellentechnologien



- Weiterentwicklung von Solarzellenstrukturen und Herstellungsprozessen auf industriellem Maßstab
- Optische und elektrische Analyse & Modellierung

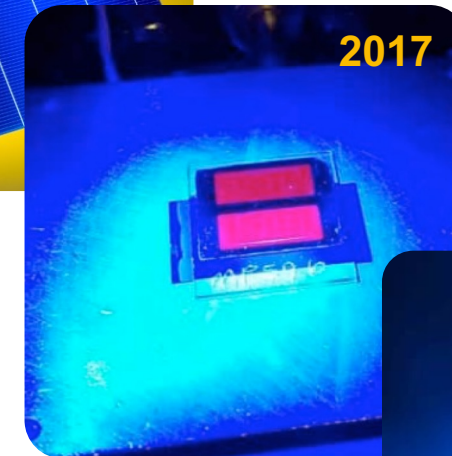
2014 21,2% Weltrekordzelle mit Industrie-Prozess

- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ auf der Solarzellenrückseite
- Bifazialer PERC+ Prozess in Kooperation mit Industriepartnern, mittlerweile Marktstandard



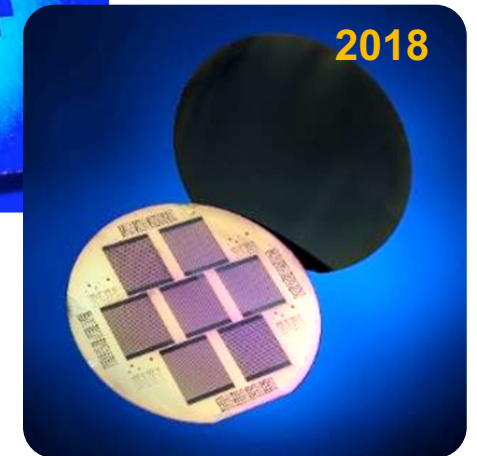
2017 34,5% effiziente Laborzelle

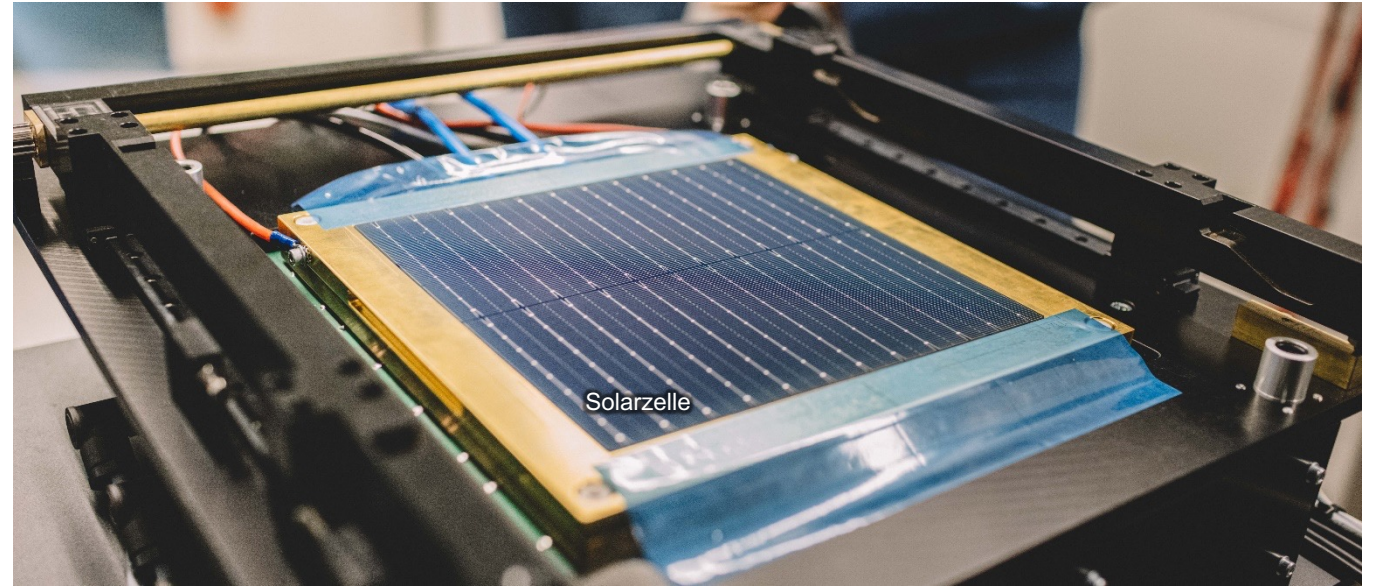
- Triple-Junction Solarzelle in Kooperation mit NREL/USA
- Laborprozess, wird weiter erforscht in Kooperation mit anderen Instituten



2018 26,1% effiziente Weltrekord-Laborzelle

- POLO-Kontakt in Kooperation mit LUH und Industriepartnern
- ISFH bereitet Industrialisierung vor in Kooperation mit Industriepartnern





Akkreditiertes unabhängiges Kalibrierlabor ISFH CalTec

- Hochpräzise Strom-Spannungs-, Quantenausbeute- und Elektrolumineszenz-Messungen von Solarzellen
- Erstentwicklung von Messequipment, Anpassung an Si-Waferformate und Solarzellenarchitekturen



- Technologie offen: Standard-Prozesse aus der Industrie sowie Entwicklung der nächsten und übernächsten Generation
- **Flexible PV-Modulfertigung** über Variation Form und Farbe möglich, je nach Anwendungsziel

Roboter-zentrierte Fertigungseinheit

- Direkt hoch-skalierbare Einheit (35 MW)
- Digitaler Prozess von Planung bis Fertigung
- Computergestützte Auswertung / Optimierung
- Nachhaltigkeit: Recycling-optimierte Materialauswahl

- **Im Blitzlicht: Forschungsaktivitäten am Institut für Solarenergieforschung in Hameln**
- **Anwendungsfelder in der Landwirtschaft | Photovoltaik-Zuverlässigkeitsanalyse**
- **Aktuelle Entwicklungen im Überblick**

Freiflächen-Photovoltaik

- **Effiziente Energieerzeugung** durch optimierte Gestaltung: ggf. Kombination mit Nutztierhaltung (Schafe)
- Verbesserung des Naturschutz' (Details nächste Folie)



Bildquelle: <https://www.q-cells.eu/nc/consumer/power-plants-for-project-developers.html>

Agri-Photovoltaik

- **Mehrfachnutzung** bestehender Fläche: Kombination landwirtschaftliche Nutzung und Strom-Erzeugung
- Teilweise Erhöhung des Ertrags (Schutz vor Starkregen, Reduzierung Austrocknung)



Bildquelle: BayWa r.e.



www.derwinzer.at/news/2021/10/photovoltaik-im-weingarten.html



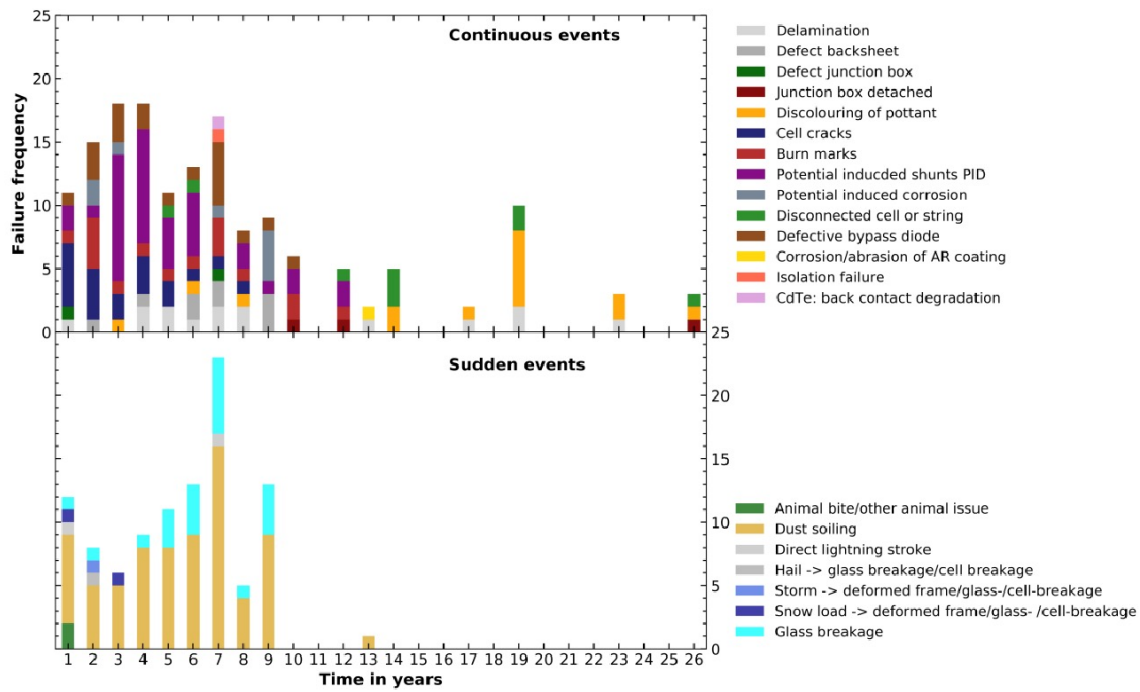
Bildquelle: Goldbeck Solar

- Detektion und Erkennung von **Fehlern (Beschädigung oder Degradation) in PV-Modulen**:
 - 1) bei der Abnahme
 - 2) während des Betriebs
- Warum ist das wichtig ?
 - a) **Leistungsverlust (Wirtschaftlichkeit)**
 - b) **Sicherheitsrisiko (z. B. Brandgefahr)**
- Wie können diese Fehler erkannt werden ?

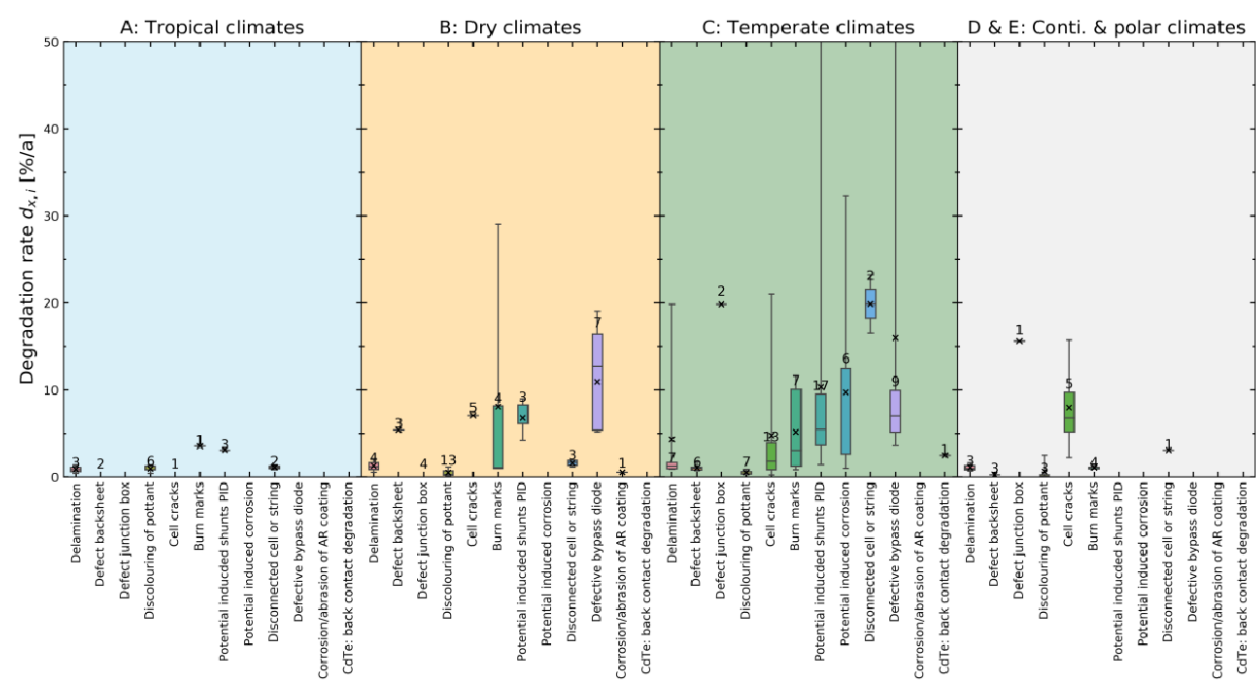




Fehleranzahl nach Alter, Typ






Leistungsverlust nach Klima, Typ

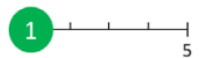






Quelle: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/11/Report-IEA%E2%80%9393PVPS-T13-23_2021-Quantification-of-Technical-Risks-in-PV-Power-Systems_rev01.pdf


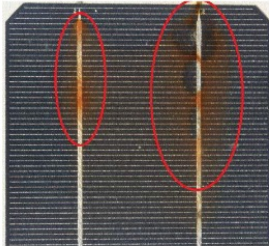







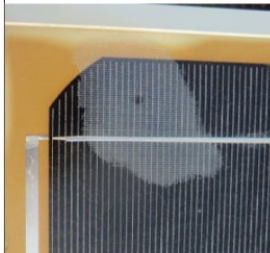








Sicherheitskategorie

Safety category	Description
	Failure has no effect on safety.
	Failure may cause a fire (f), electrical shock (e) or a physical danger (m) if a follow-up failure and/or a second failure occurs.
	Failure can directly cause a fire (f), electrical shock (e) or a physical danger (m).

Leistungskategorie

Performance category	Description
	The defect has no direct effect on performance.
	The defect has a minor impact on performance.
	The defect has a moderate impact on performance.
	The defect has a high impact on performance.
	The defect has a catastrophic impact on performance.

Fehler-Beispiele

Examples	Fehler-Beispiele		
4-6			
	Dark discoloration at cell edges, between cells and over gridlines and busbars. [37]	Dark discoloration over metalization. [37]	Backsheet air side yellowing. [37]
Severity	 	 	 
Examples	13-15		
			
	Delamination creating a continuous path between electric circuit and the edge. [40]	Delamination with corrosion. [1] (see also FS1-11)	Delamination caused by detachment of backsheet with exposure of encapsulant from the back. [SUPSI]
Severity	 	 	 

Quelle: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/11/Report-IEA%E2%80%9393PVPS-T13-23_2021-Quantification-of-Technical-Risks-in-PV-Power-Systems_rev01.pdf

Und wie detektiere ich das ?

Bin ich mir wirklich sicher, ob es ein Fehler ist ?

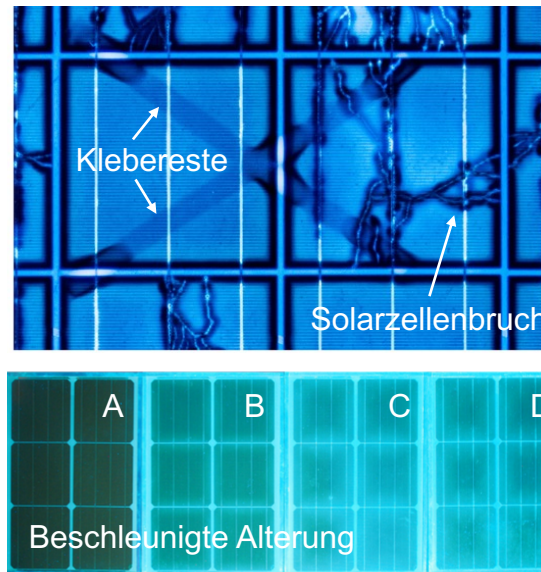
Wie soll ich 20.000 EL-Bilder eines PV-Parks ansehen ?



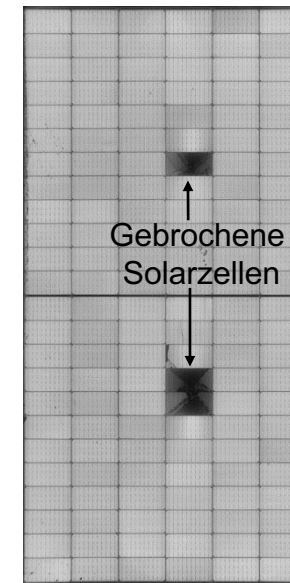
- **Erstentwicklung Modulanalysen: Elektro- & UV-Lumineszenz**
- Methodenentwicklung: KI-gestützte Fehlererkennung
- Klassifizierung von Modulfehlern und Lebenszyklustests



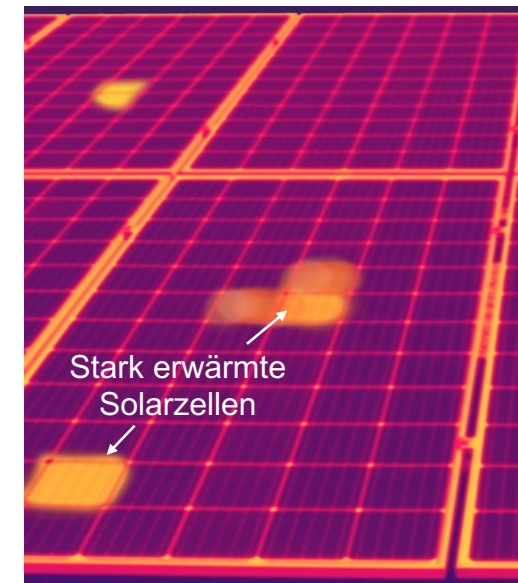
UV- Fluoreszenz

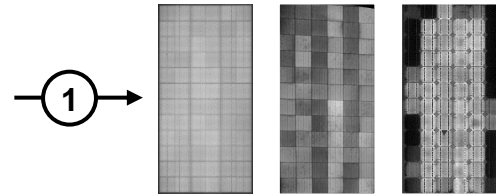


Elektrolumineszenz



Wärmebildaufnahmen

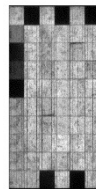




① Elektrolumineszenz-Aufnahmen

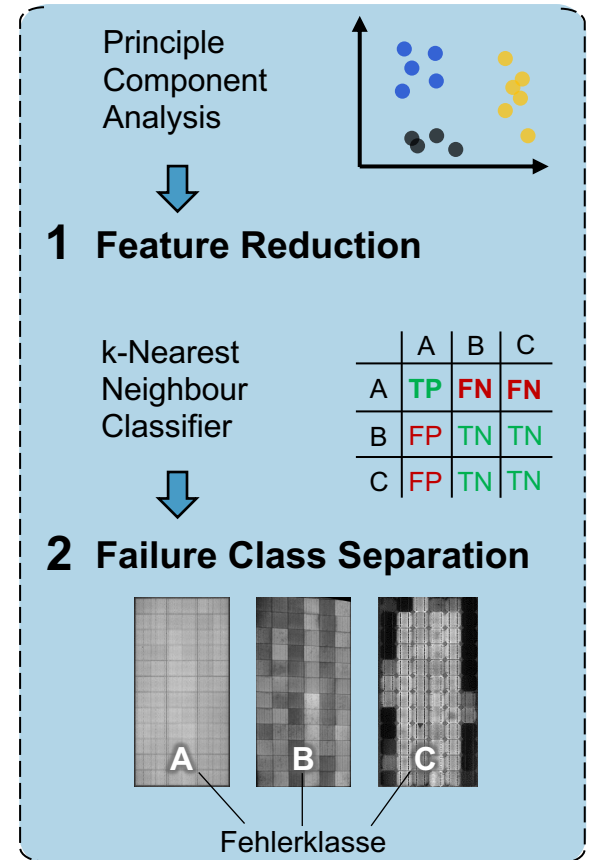
KI-Anlernen
Keine Klassierung
Keine Typenvorgabe

② Feldmessung
neue/unbekannte
Aufnahmen

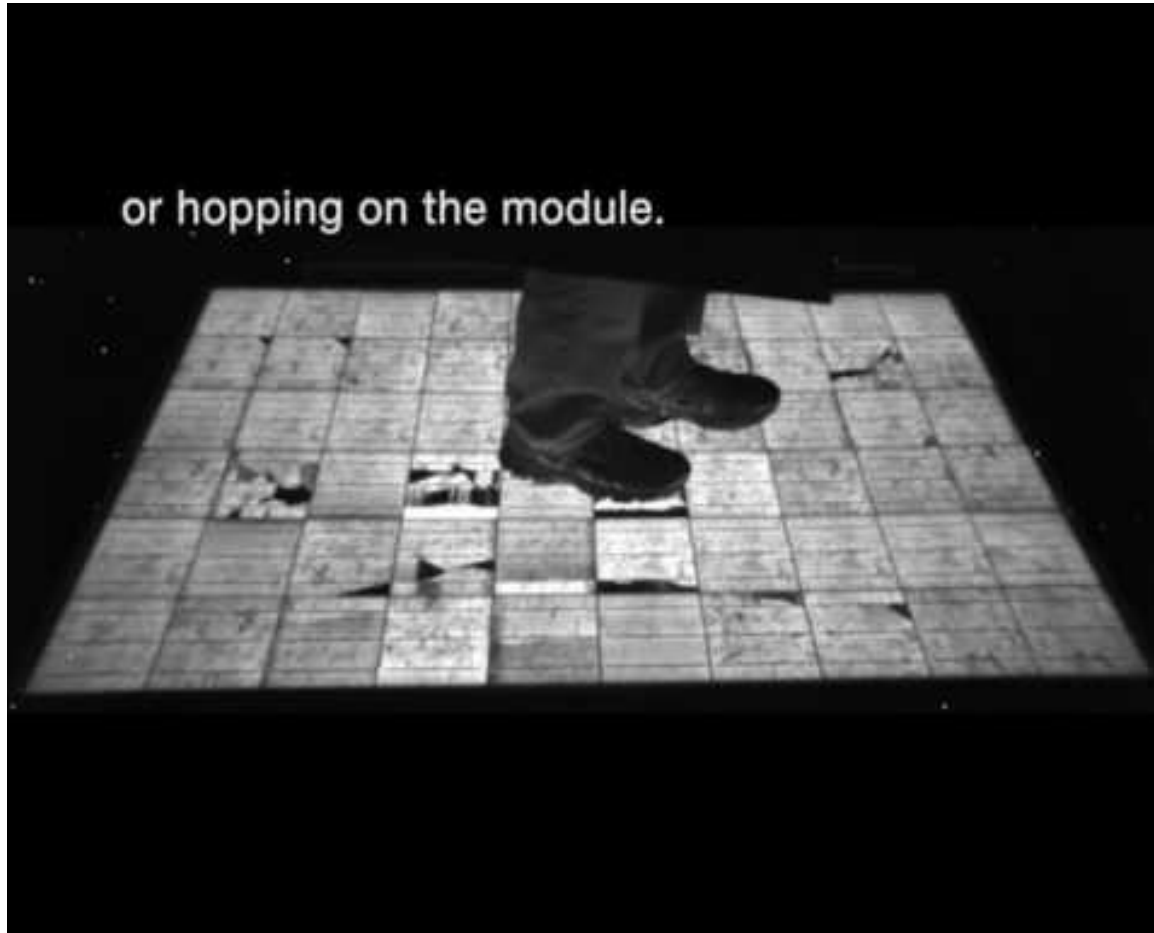


**Automatische Identifikation
eines Fehlers und dessen Degradationstyps**

MASCHINEN-LERN-ALGORITHMUS



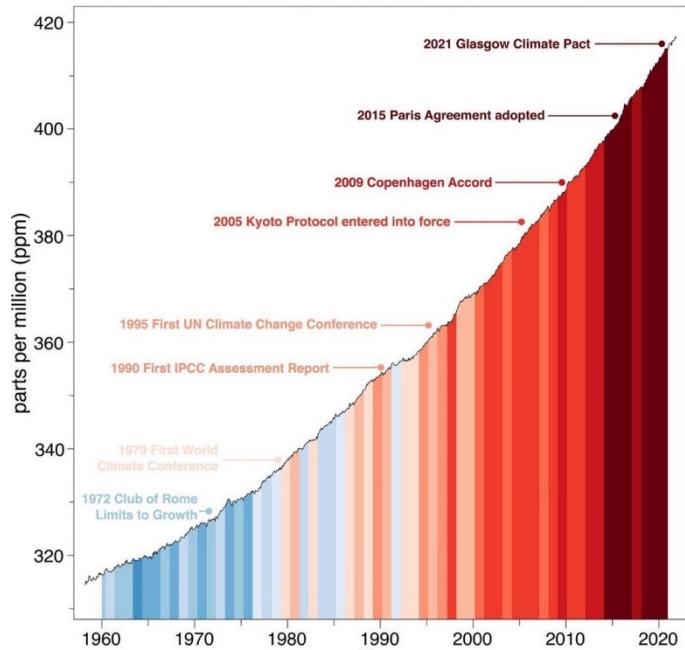
S. Bordihn, A. Fladung, J. Schlipf, M. Köntges, *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS* (12) 3 (2022).



Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=-qdyxlybmc>



Trend der CO₂-Konzentration



Bildquelle: Professor Mark Maslin via X

Niedersachsen +1.5 °C (2023)

Mailand 2023, Canberra 2020 – Hagel im Sommer



<https://news.sky.com/video/a-hail-storm-in-northern-italy-led-to-ice-flowing-through-the-streets-of-seregno-12925467>

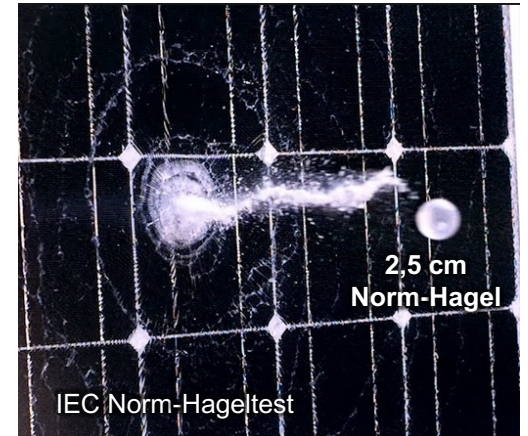


Reale Hagelkörner

<https://www.telegraph.co.uk/world-news/2023/07/21/tennis-ball-sized-hailstones-italy-venice-verona-storm/>

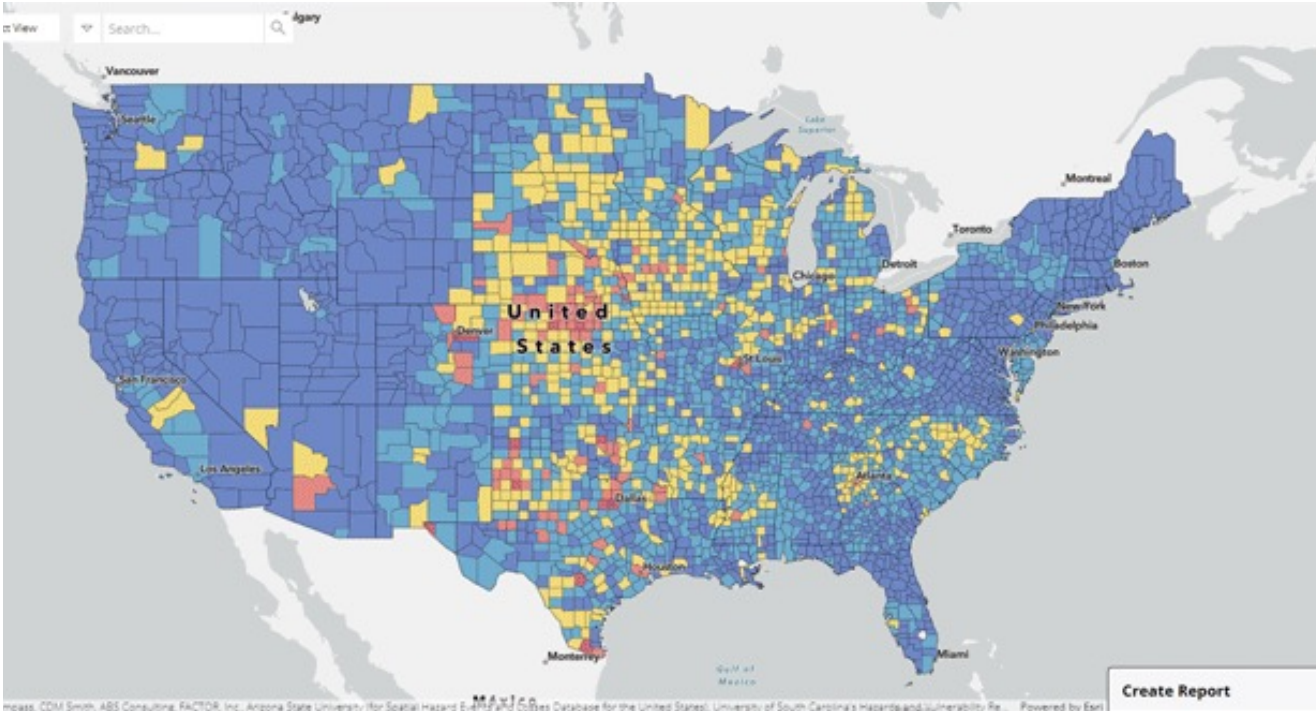
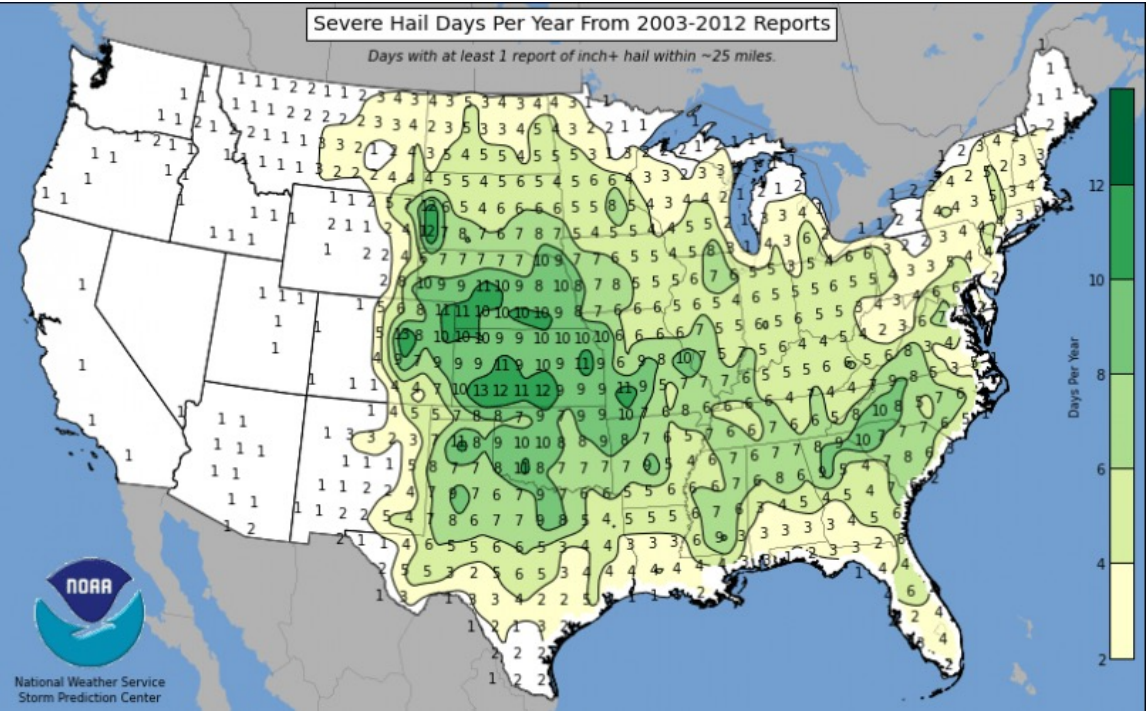


<https://www.gardelectrical.com.au/blog/solar-panels-and-hail> (Hail storm Canberra 2020)



https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=QMR_GpsrlzM

Hagel nicht überall gleich wahrscheinlich



National Oceanic and Atmospheric Administration and National Weather Service's (NOAA) Storm Prediction Center

Federal Emergency Management Agency's (FEMA) National Risk Index

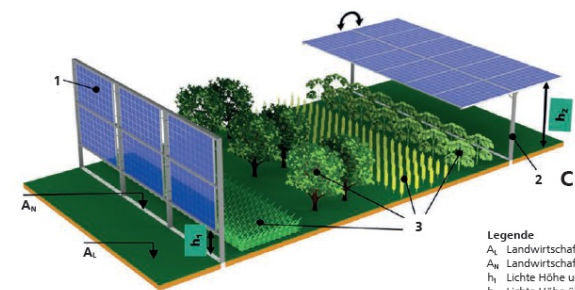
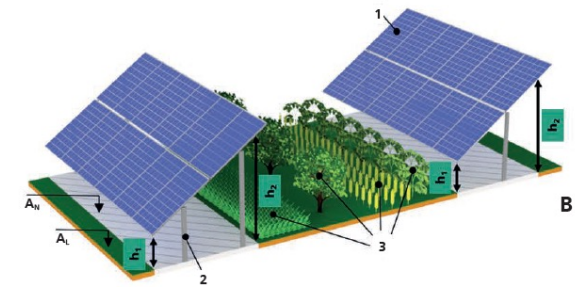
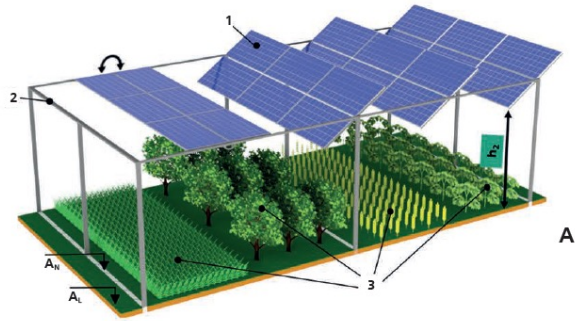
Spezielle PV-Modul und Unterkonstruktionen



PV-Module ersetzen Hagel- und Starkregenschutz, deren Ereignisse zunehmen werden

Kombination von Spezial PV-Anwendungen mit Niedersächsischen Obstanbau und der Viehzucht

Agri-PV: Konzepte angepasst an Anforderung



Legende
A_N Landwirtschaftlich nutzbare Fläche
A_L Landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
h₁ Lichte Höhe unter 2,10 m
h₂ Lichte Höhe über 2,10 m
1 Beispiele zu Solarmodulen
2 Aufständering
3 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

Abbildungen: Fraunhofer ISE



- Agri-PV Konzepte können an Bedarf der landwirtschaftlichen Nutzung angepasst werden
- Vorteile für den Ertrag durch Wasser- und Sonnen-Regelung (Starkregen, Verdunstung, Dürre)
- Mechanisches beiseite Klappen oder hohes Aufständering: keinen Einfluss auf Landmaschinenbetrieb

Spezial-Lösungen investitionsintensiv

Weitere Konstruktionskonzepte mit Standardmodulen

Ortsveränderliche Lösungen...



Ein-Achsen Tracker



Hochaufgeständert

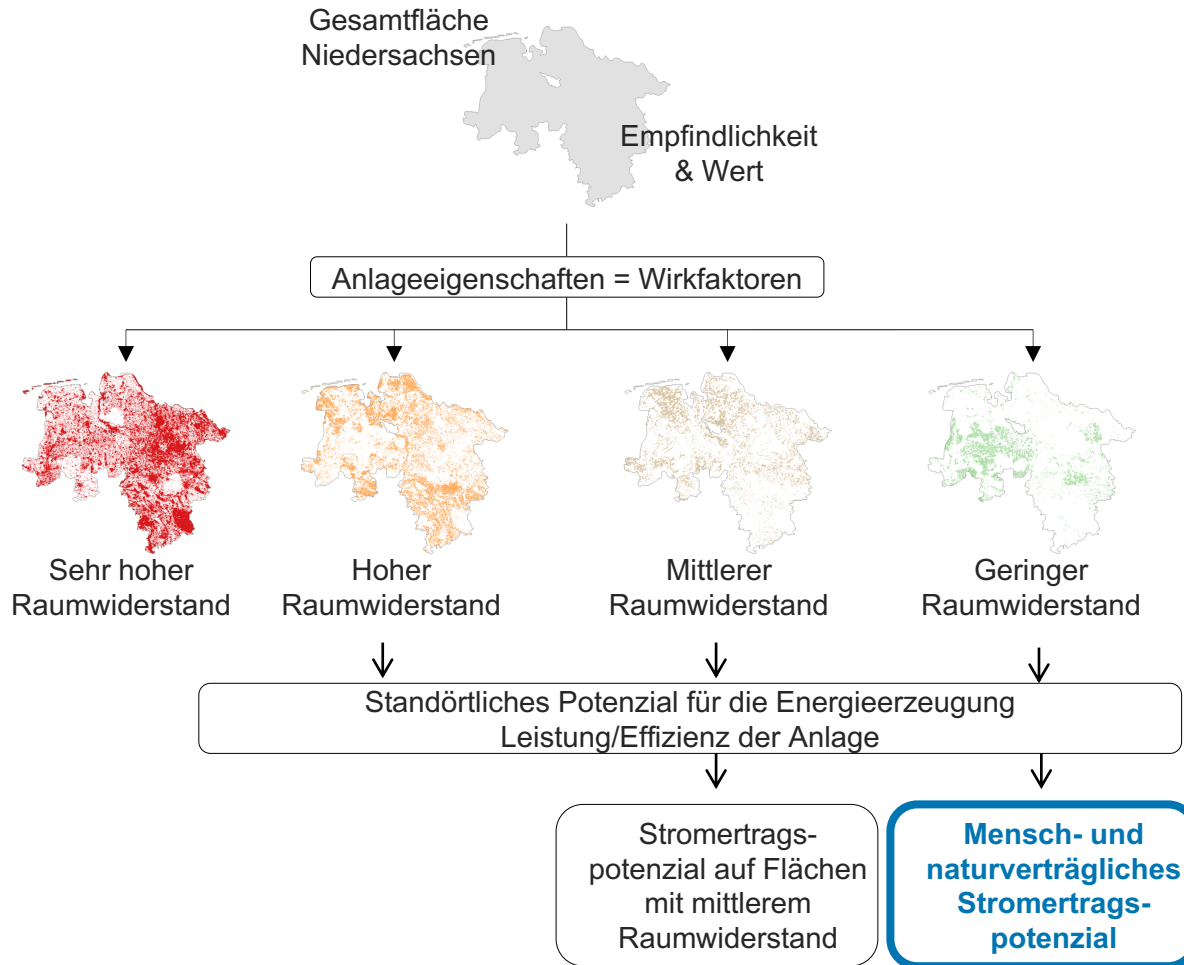


Senkrechte Aufständerung



Noch mehr Energiebereitstellung vom Feld ?





INSIDE Projekt

Projektpartner: ISFH, Institut für Umweltplanung IUP

Förderung Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

- Analyse von PV-FFA: Lebensgemeinschaften
- Beeinträchtigung der baulichen Gestaltung auf optischen Eindruck (Akzeptanz)

**Bestimmung des resultierenden
Raumwiderstands → Verträglichkeitsanalyse**

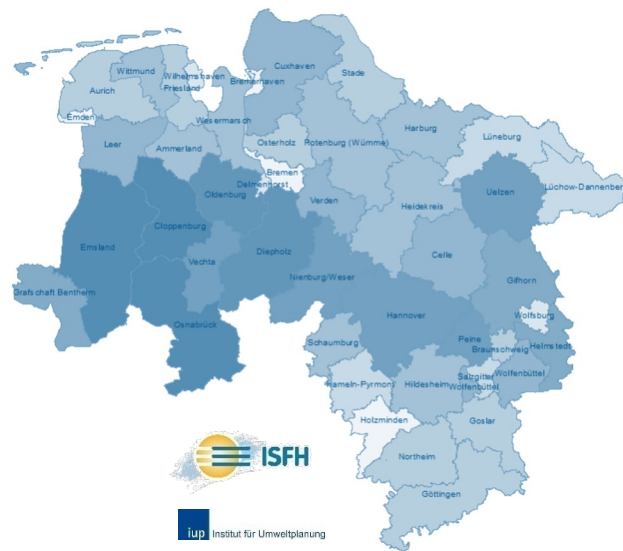
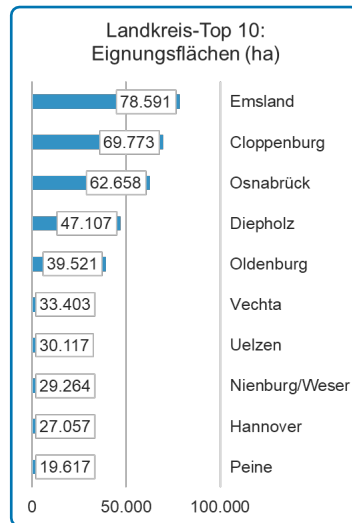
Synergien zwischen PV-Potential und Viehbestand

- Hohes PV-Potenzial im Südwesten Niedersachsens
- Westliche Landkreise mit hoher Viehbestandsdichte

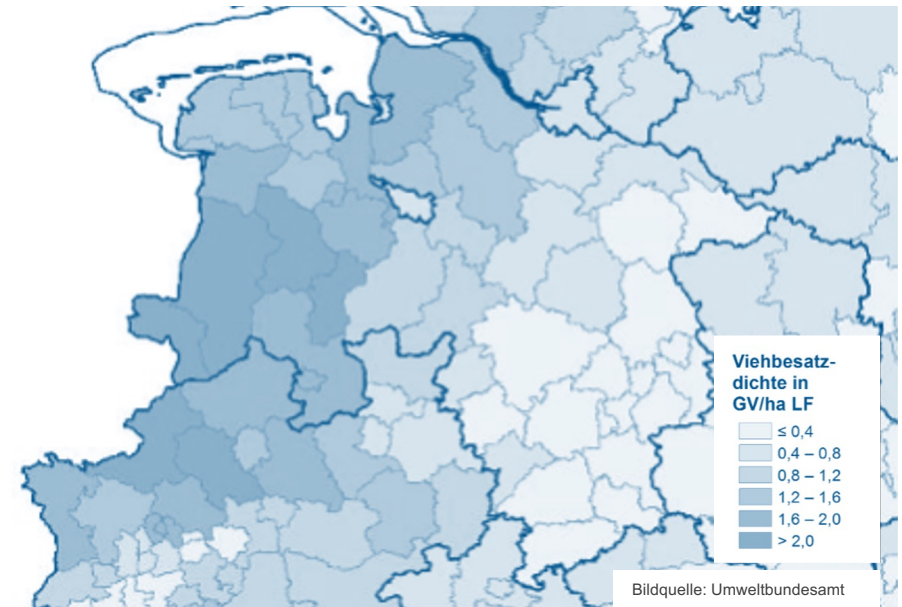


Kombinierte Nutzung mittels Spezial-PV-Anwendungen

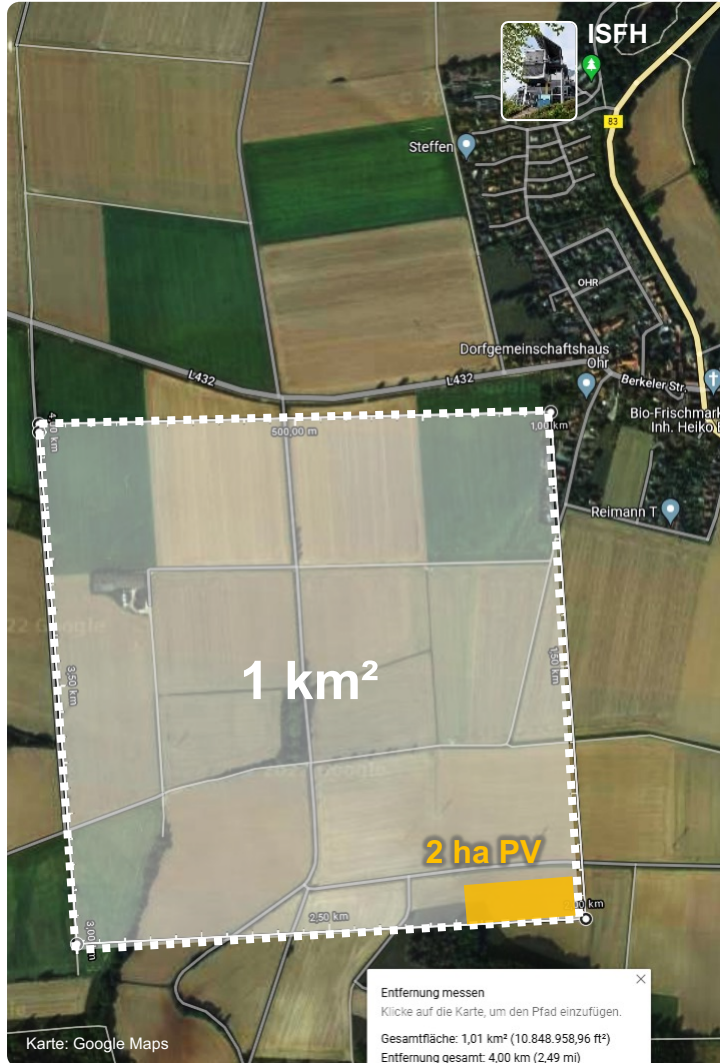
PV-Potenzial nach Verträglichkeitsanalyse je Landkreis



Viehbestandsdichte

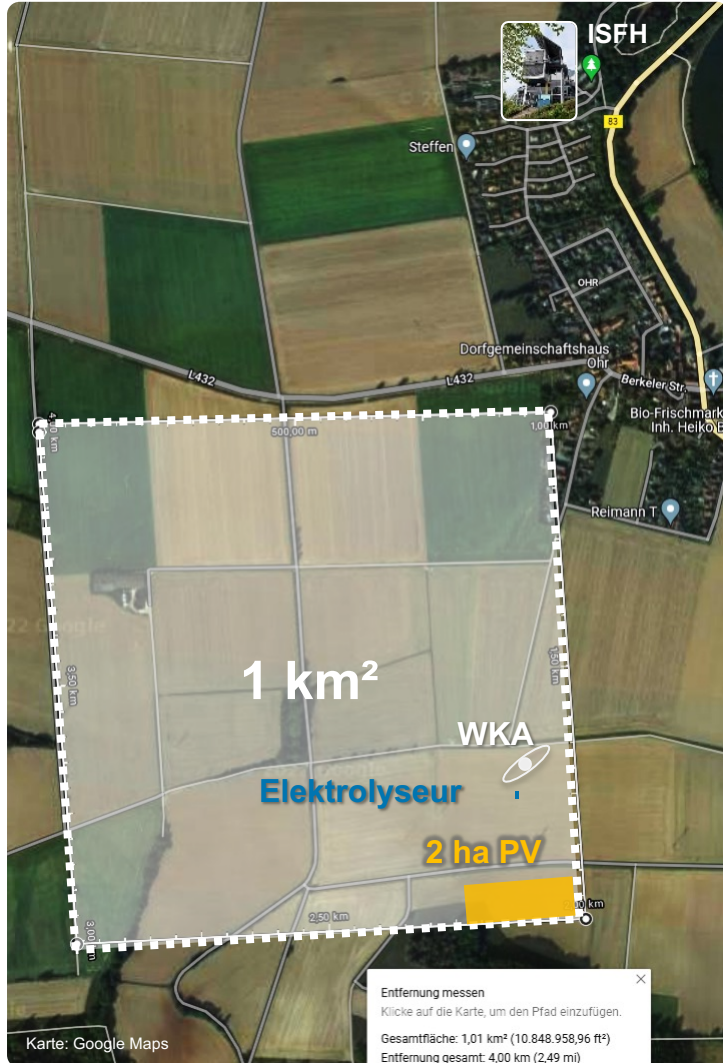


Siehe auch Masthühnerbestand: <https://www.ven-nds.de/projekte/abgeschlossene-projekte/fleischexporte/in-niedersachsen>



- **Energiepflanzenanbau in Nds auf 1 km² (100 ha):**
2,22 GWh Strom aus Biogas in Niedersachsen (Inventur 2018)
267.000 ha Anbaufläche decken 83% der Bemessungsleistung von 892 MW: Annahme 8.000 h/a Anlagenausnutzung → Produktion von 22,2 kWh_{el}/(ha·a)
- **2,04 ha PV-Freifläche** in Nds. (**2,5 MW**): 2,22 GWh Strom
INSIDE-Projektbericht (ISFH/IUP)
Moderne Freiflächenanlagen erreichen in Nds. 1090 MWh/(ha·a)

50-fach höhere Flächenausnutzung der PV gegenüber Energiepflanzen in Bezug auf die Stromerzeugung



- **2,5 MW PV & 1,9 MW WKA & 2 MW Elektrolyse** (~2,5 ha):

6,6 GWh Wasserstoff: 7,35 ct/kWh

Gestehungskosten 2025 bezogen auf Heizwert, IEA-Preismodell:
Elektrolyse ohne H₂-Speicher

97,5 ha für Naturschutz oder Nahrungsmittelproduktion

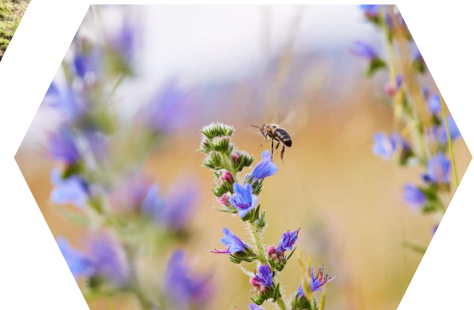
2,5 ha für Energiebereitstellung

BNE Studie: Solarparks – Gewinn für die Biodiversität

https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/20191119_bne_Studie_Solarparks_Gewinne_fuer_die_Biodiversitaet_online.pdf (11/2019)

- Förderung der Biodiversität durch FF-PV Parks (75 Parks untersucht)
- Schlüssel ist neben Standortwahl angepasstes Flächenmanagement
- Weitere Untersuchungen nötig – mit standardisierten Monitoring

Studie liefert Rückschlüsse auf bauliche Gestaltung der FF-PV-Anlagen, Standortwahl etc.





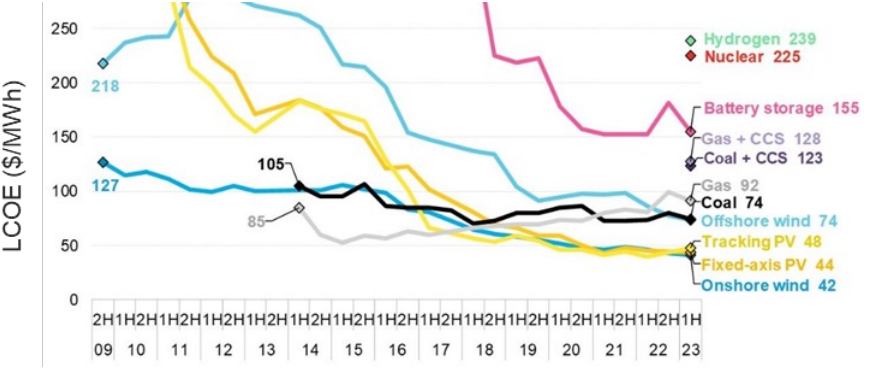
Stadtwerke Finsterwalde und East Energy wollen Wasserstoff-Produktion als CO₂-freie Fernwärmequelle nutzen

<https://www.pv-magazine.de/2022/06/30/stadtwerke-finsterwalde-und-east-energy-aollen-wasserstoff-produktion-als-co2-freie-fernwaermequelle-nutzen/> (06/2022)

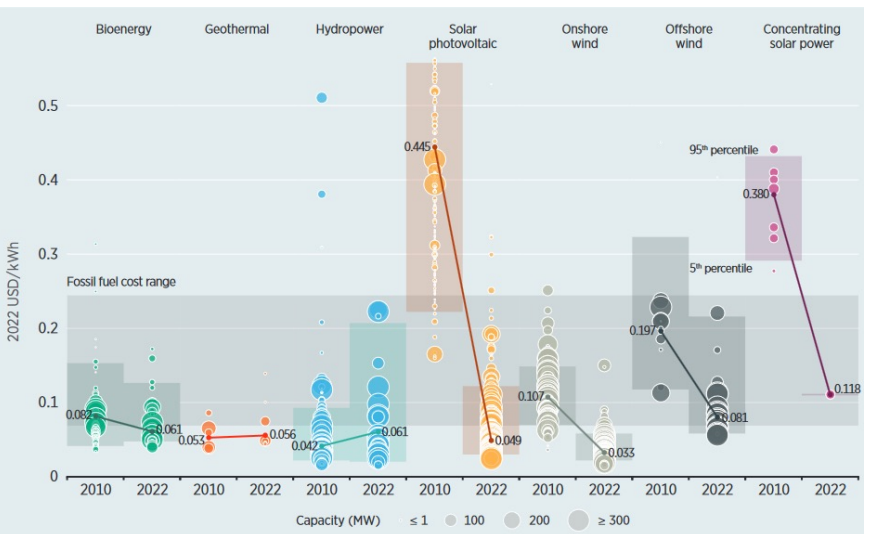
- „East Energy will in Brandenburg **mit Strom aus Photovoltaik und Wind etwa 3000 Tonnen Wasserstoff jährlich produzieren**. Die bei der Elektrolyse entstehenden rund 35.000 Megawattstunden Prozesswärme sollen an die Stadtwerke Finsterwalde für deren Fernwärmenetz geliefert werden.“
- Sektoren-Kopplung: **ohne EEG-Förderung**: 200-Megawatt-Solarkraftwerk, 30-Megawatt-Windpark, 20-Megawatt-Elektrolyseur (~3000 t H₂/a)
- Biomethanol-Werk in Planung
- Standort Finsterwalde: nahe BASF (Schwarzheide) → Zulieferung Batterie-Industrie / EV-Industrie

- **Im Blitzlicht: Forschungsaktivitäten am Institut für Solarenergieforschung in Hameln**
- **Anwendungsfelder in der Landwirtschaft | Photovoltaik-Zuverlässigkeitsanalyse**
- **Aktuelle Entwicklungen im Überblick**

Stromgestehungskosten: Photovoltaik 4ct€/kWh



Bloomberg: <https://about.bnef.com/blog/cost-of-new-renewables-temporarily-rises-as-inflation-starts-to-bite/>



IRENA: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>

Netzbetreiber: Erneuerbare werden den Strompreis dauerhaft senken



© imago/Joerg Boethling Bereits in wenigen Jahren wird der Strompreis spürbar sinken, sagt der Chef des Netzbetreibers 50Hertz.

a Redaktion *agrarteute*, *agrarteute*
am Sonntag, 13.08.2023 - 06:00 (2 Kommentare)

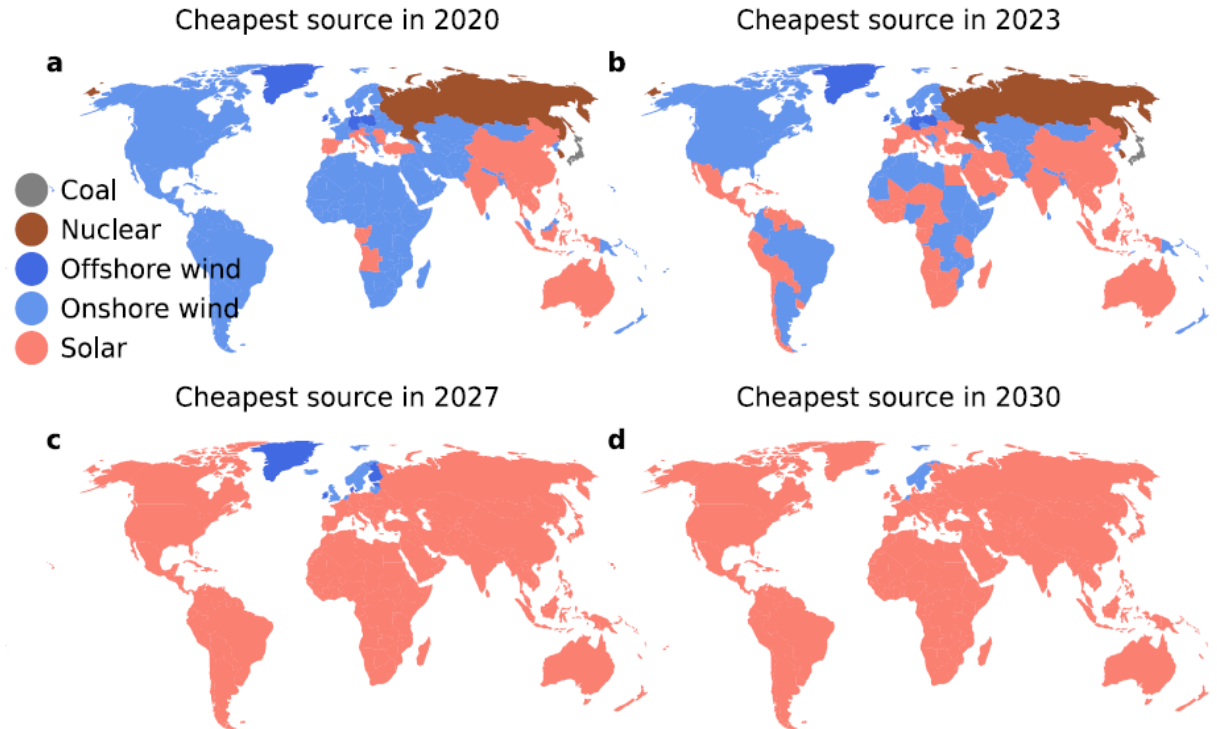
Nach Einschätzung von Stefan Kapferer, Chef des Übertragungsnetzbetreibers 50Hertz, wird es in Deutschland bald dauerhaft günstigen Strom geben. Ein Standortvorteil für die Unternehmen im Land.

Im letzten Jahr stammte bereits jede sechste Kilowattstunde zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energien, erklärte der Vorsitzende der 50Hertz-Geschäftsführung. Damit kostete sie 10 Cent oder weniger. Kapferer erwartet, dass mit dem Ausbau erneuerbarer Energien die Stromversorgung bereits in drei bis vier Jahren nachhaltig werde. Gleichzeitig würden dann die **Strompreise** deutlich sinken.

50Hertz ist der Betreiber des Stromnetzes im Norden und Osten Deutschlands. Das Unternehmen baut das Netz für die Energiewende aus und sorgt für die Integration erneuerbarer Energien.

Umsetzungsbeispiel in Alaska





F. J. M. M. Nijse et al., Nature Communications 14, 6542 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41971-7>

Weltweit günstigste Energiequelle in den nächsten 7 Jahren

Schon heute: Geringste Stromgestehungskosten



Vielen Dank.

Stefan Bordihn, Bianca Lim, Rolf Brendel

Institut für Solarenergieforschung GmbH

Am Ohrberg 1 in 31860 Emmerthal

www.isfh.de

Projektförderung durch

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

