

Die Photovoltaische Konversion der Kernfusionsenergie der Sonne in Strom auf der Erde kommt ins Multi-Terawatt Zeitalter: Globale Chancen und Herausforderungen



Eicke R. Weber

European Solar Manufacturers Council ESMC
Prof. emer., Dept. of Materials Science, UC Berkeley
Director emer., Fraunhofer Institut für
Solare Energie Systeme ISE Freiburg

DPG – Arbeitskreis Energie AKE

Bad Honnef, 17. April 2026

Die intelligente Nutzung der Energie der Fusion leichter Atomkerne

- Die Sonne strahlt seit Milliarden Jahren Photonen, basierend wesentlich auf der bei der Fusion leichter Wasserstoff-Kerne bei hohem Druck und T zu Helium freigesetzten Energie:



Bilanz: $4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + \gamma$, ${}^4\text{He}$ ist 0.7% leichter als 4 Protonen: **freiwerdende Energie!**

- Einstein beschrieb erstmals korrekt den Photoelektrischen Effekt (NP 1921), die Energie der Photonen der Sonne kann zur Anregung von Elektronen in Silicium verwendet werden!
- Photovoltaische Energiekonversion (PV) ist also die modernste Art der Stromerzeugung!



Kernspaltungs- und Kernfusionskraftwerke auf der Erde

- Bei der Spaltung schwerer Atomkerne, wie bei der Fusion leichter Kerne, gibt es eine Energiedifferenz, die in Form von Photonen (γ -Strahlung) ausgestrahlt werden;
- Bisher ist uns noch keine andere Art der Ernte dieser Energie auf der Erde eingefallen, als die Dampfmaschinen-Technologie des 19. Jahrhunderts:

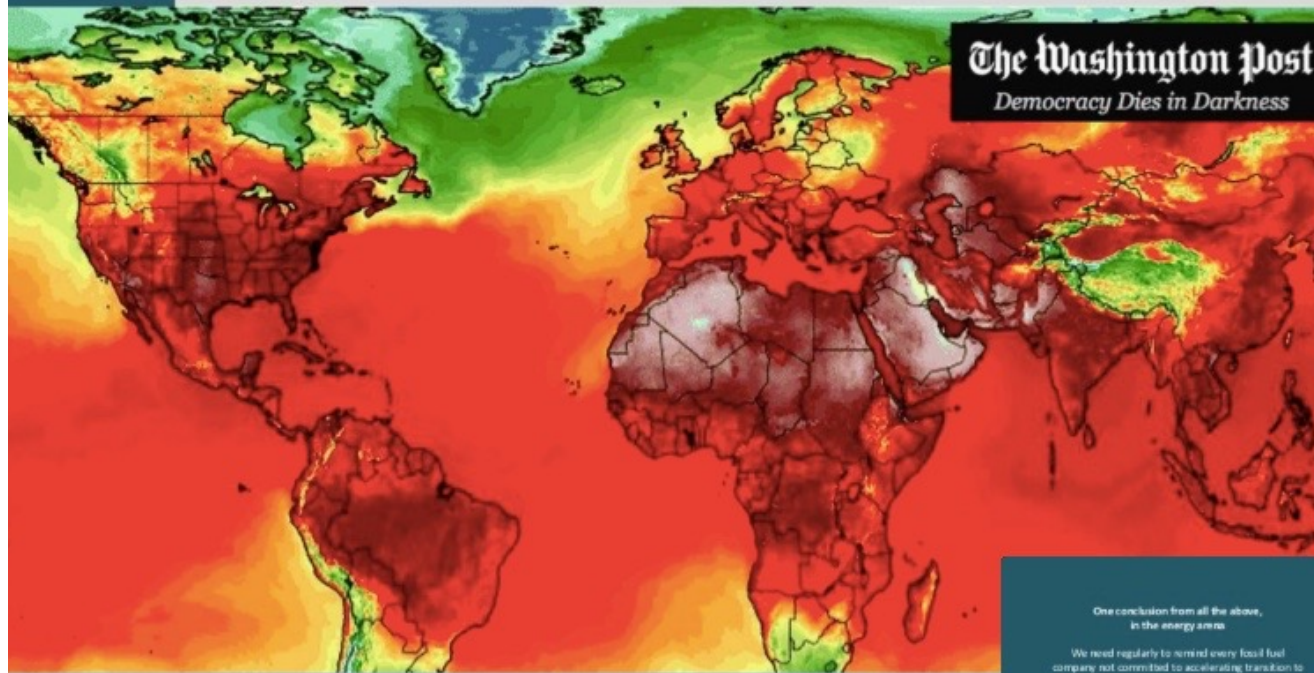
Wir nutzen den Wärme-Anteil des γ -Spektrums, um Wasser zu erhitzen, und mit dem entstehenden Dampf eine Turbine zu betreiben, die Strom erzeugt!

- Wir Physiker sollten uns doch eigentlich entschieden für die modernste Art der Energie-Ernte aus Kernfusionsprozessen einsetzen, mit Hilfe von PV, des photoelektrischen Effekts 😊!



5th July
2018

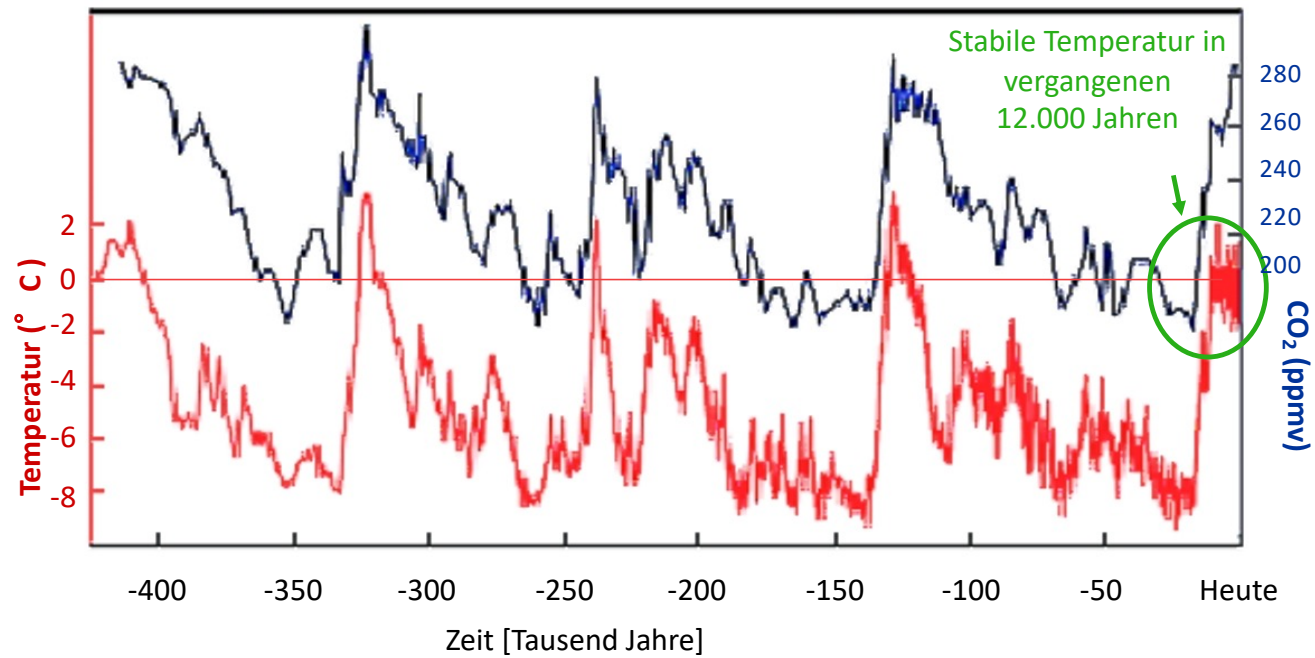
“Red-hot planet: All-time heat records have been set all over the world during the past week”



Africa's hottest temperature ever: 124.3°F (51.3°C) in Northern Siberia: > 90°F> 40°F above normal Los Angeles highest-ever: 111°F. And so on all over the world.

Slide: J. Leggett, 2018:

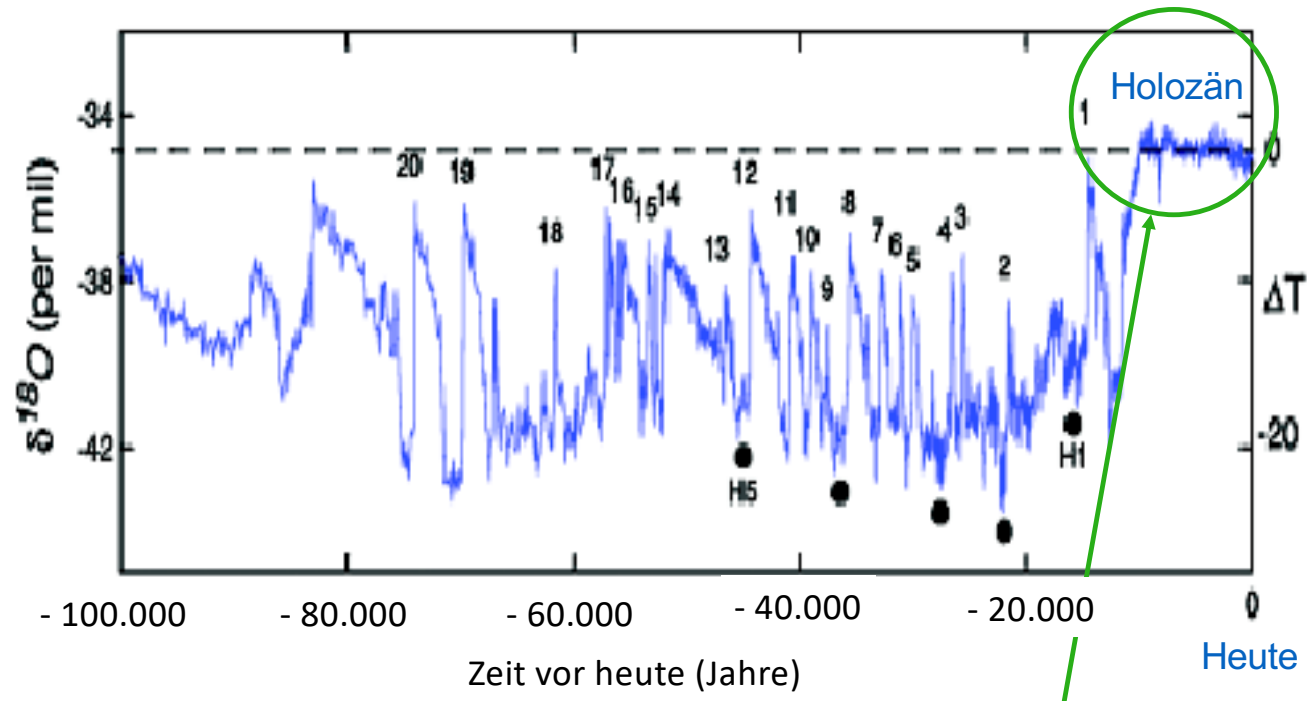
Korrelation zwischen [CO₂] und Temperatur



Source: J. Petit et al., 1999, Nature 399, 429-436



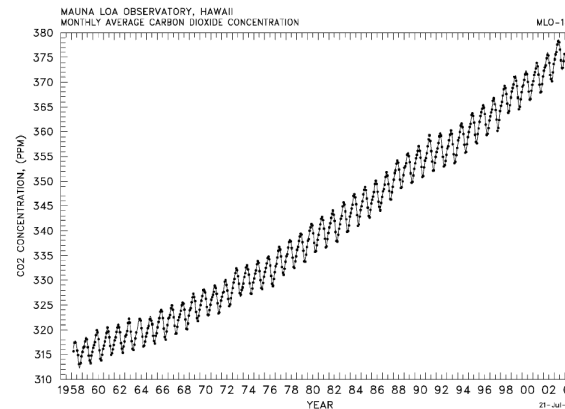
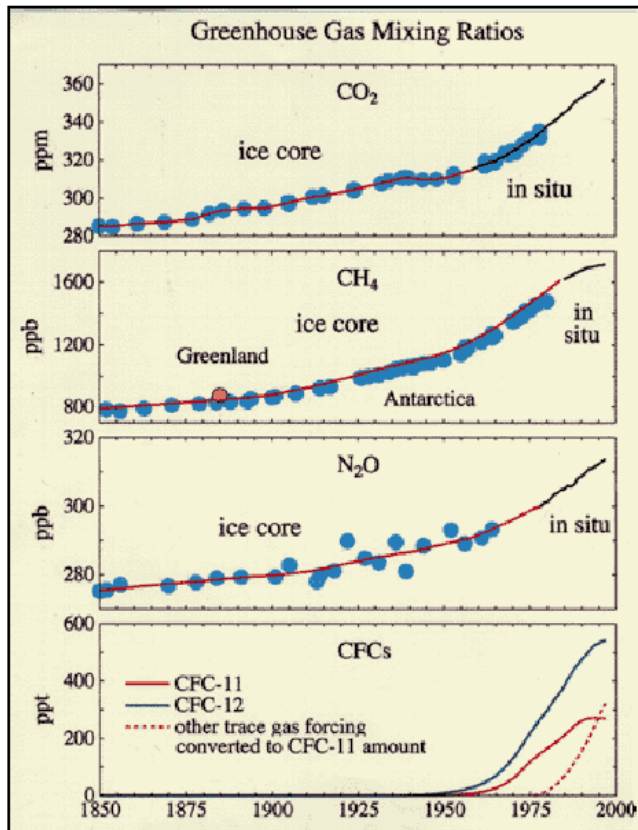
Klimageschichte der letzten 100.000 Jahre



Quelle: A. Ganopolski et al., 2001, Nature 409, 153-158

Aus noch nicht genau verstandenen
Gründen waren die letzten ca. 12.000
Jahre ausserordentlich T-stabil:
Dies ist der Holozän

Konzentration der klimaschädlichen Gase in den letzten 150 Jahren



Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa

Graphics Digital Data

C.D. Keeling and T.P. Whorf

Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography,
University of California, La Jolla, California 92093-0444, U.S.A.

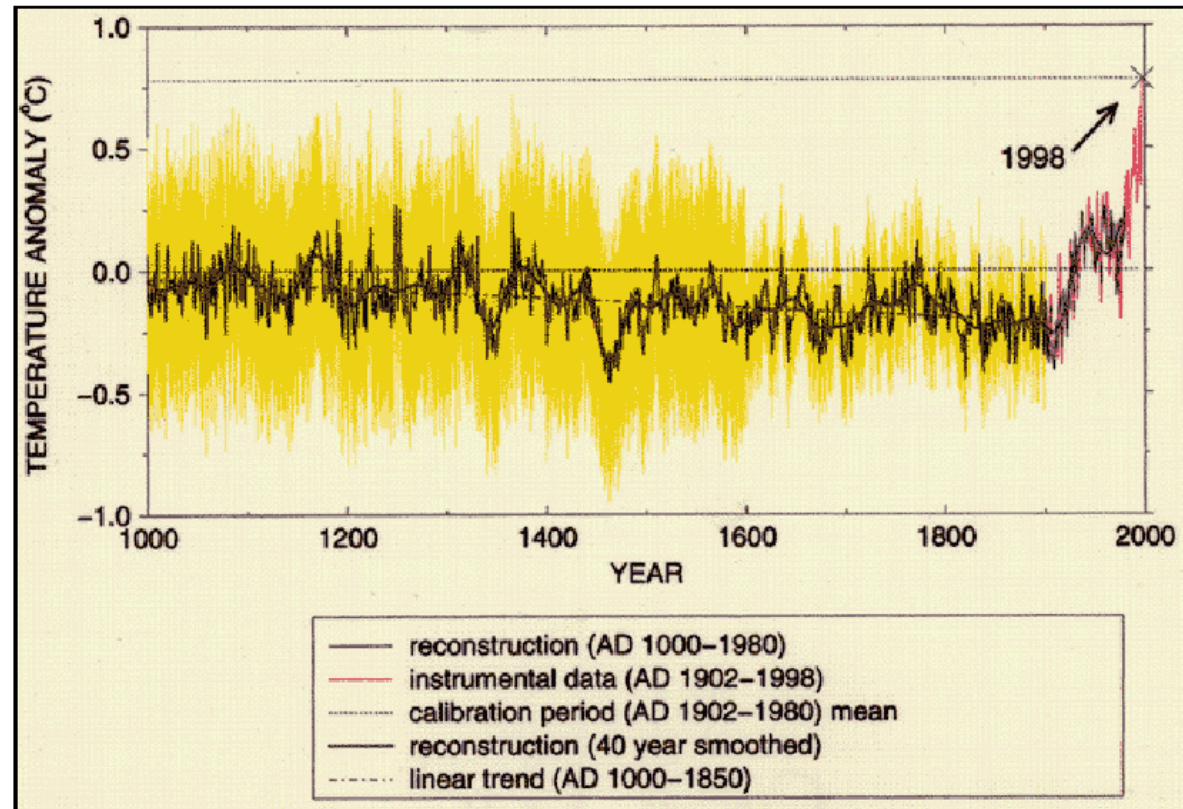
Period of Record

1958-2003

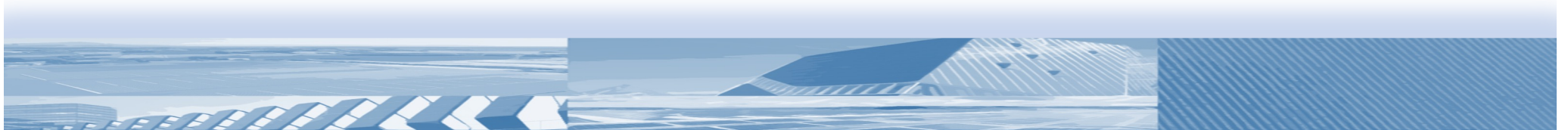
Fig. 1. Concentrations of principal anthropogenic greenhouse gases in the industrial era [Hansen *et al.*, 1998; Hansen and Sato, 1999]. Black curves denote measurements of in situ atmospheric samples collected in recent years [NOAA, 1999a, b, c; Houghton *et al.*, 1995]. Points denote concentrations determined from air bubbles trapped in polar ice sheets

Source: T.S. Ledley *et al.*, EOS 80, 453 (1999)

Temperaturgeschichte der letzten 1000 Jahre

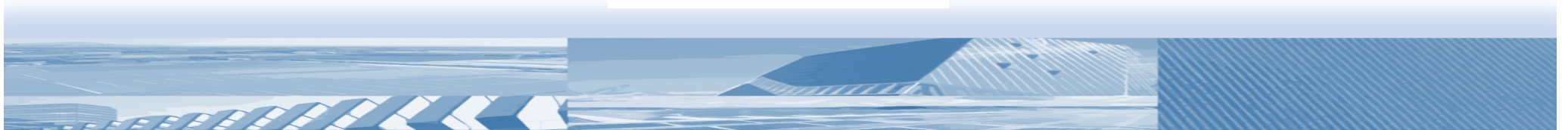
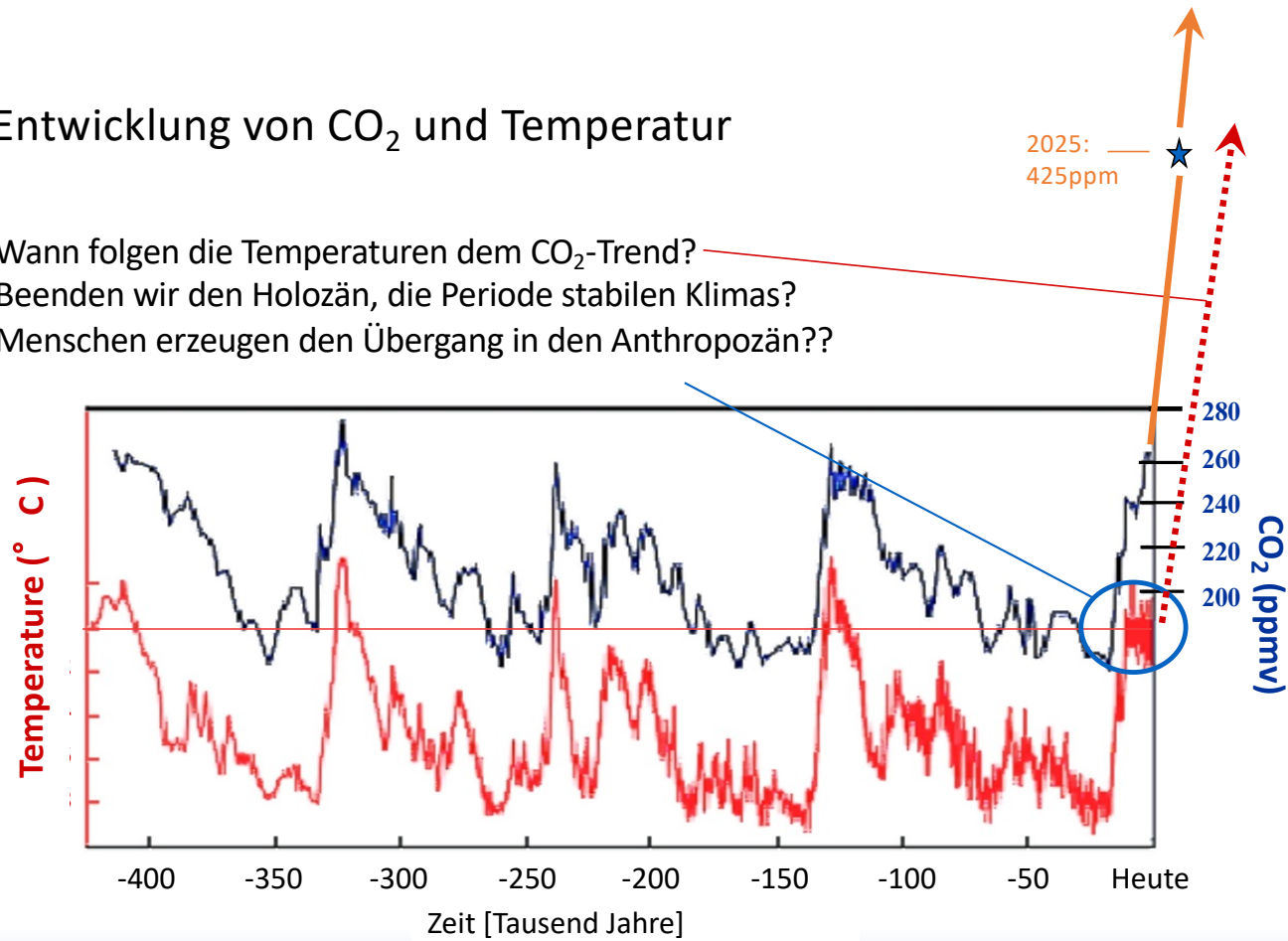


Source: T.S. Ledley *et al.*, EOS 80, 453 (1999)

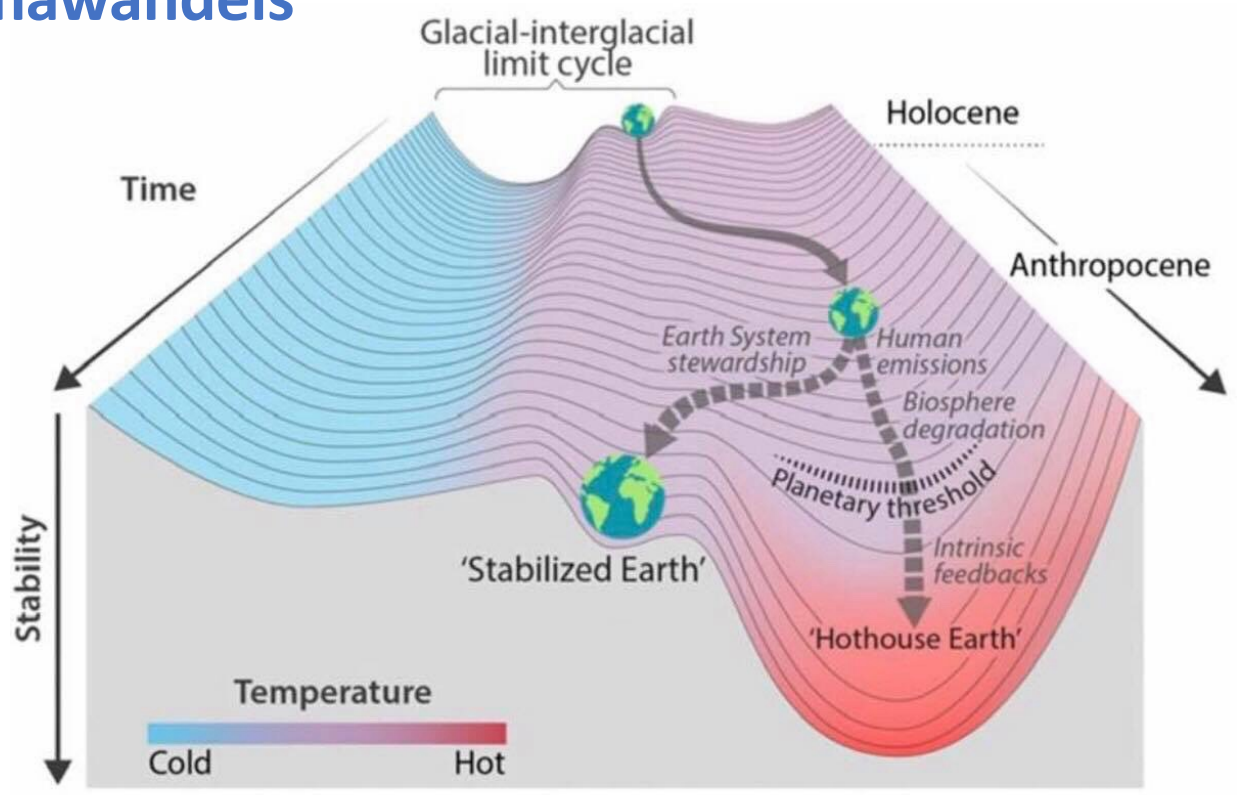


Entwicklung von CO₂ und Temperatur

Wann folgen die Temperaturen dem CO₂-Trend?
Beenden wir den Holozän, die Periode stabilen Klimas?
Menschen erzeugen den Übergang in den Anthropozän??



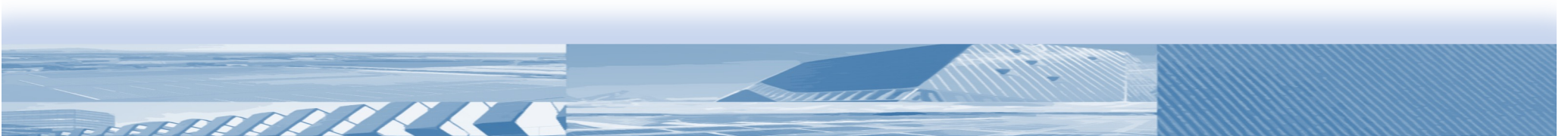
Hothouse Earth: Die Gefahr katastrophalen Klimawandels



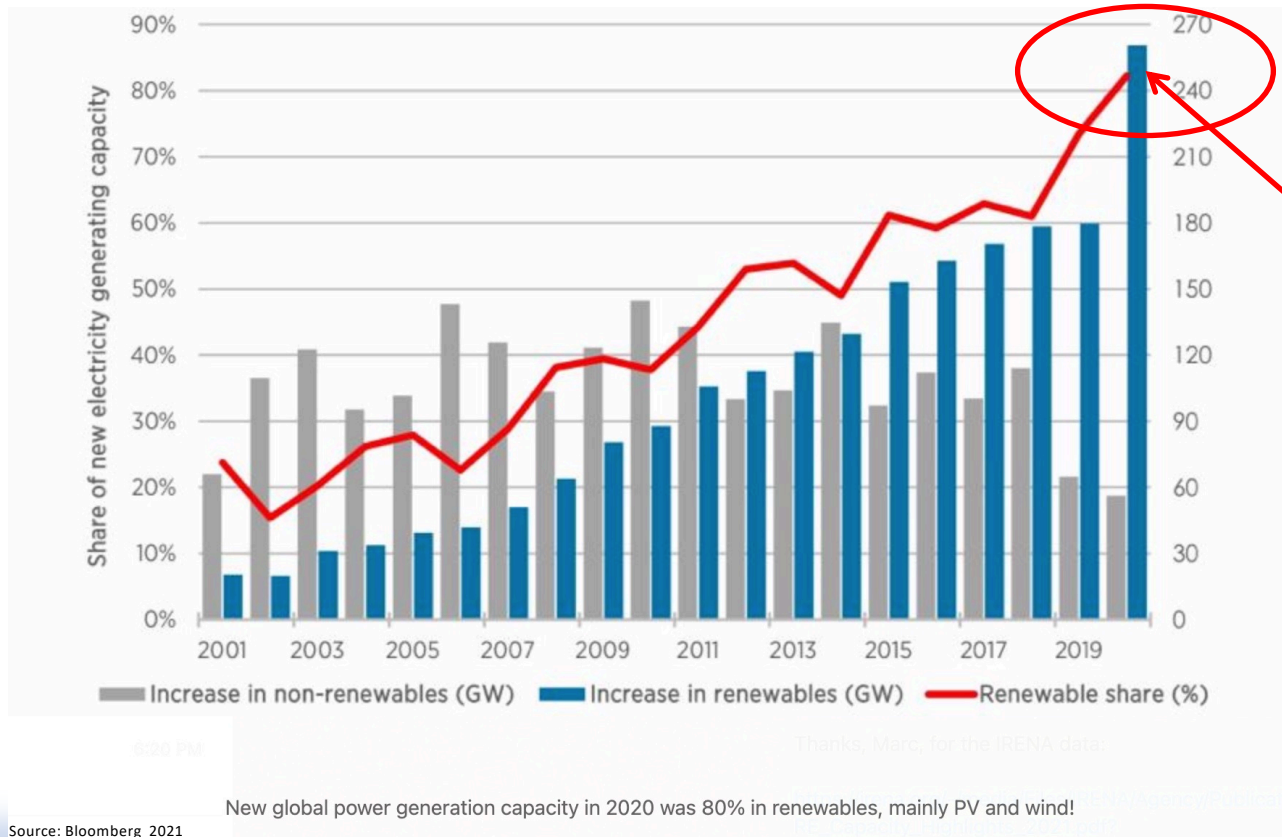
Source: W. Shell and other IPCC Authors, incl. J. Schellnhuber, PNAS 8/2018

Der drohende Klimawandel – was ist zu tun?

- Raschest mögliche **Reduktion unserer Emissionen** an klimaschädlichen Gasen, besonders CO₂ und Methan (CH₄)!
- Raschest mögliche **Transformation unseres Energiesystems**, die Umstellung auf effiziente erneuerbare Energien in allen Sektoren:
100% RE (regenerative Energien) sollte nicht erst für 2050 angestrebt werden, sondern bereits 2030 für Strom, 2035 für alle anderen Sektoren der Energieversorgung (Gebäude, Wärme, Industrie, Transport....).



Fraction of Renewable Energy in the Growth of Global Energy Capacities 2001-2020

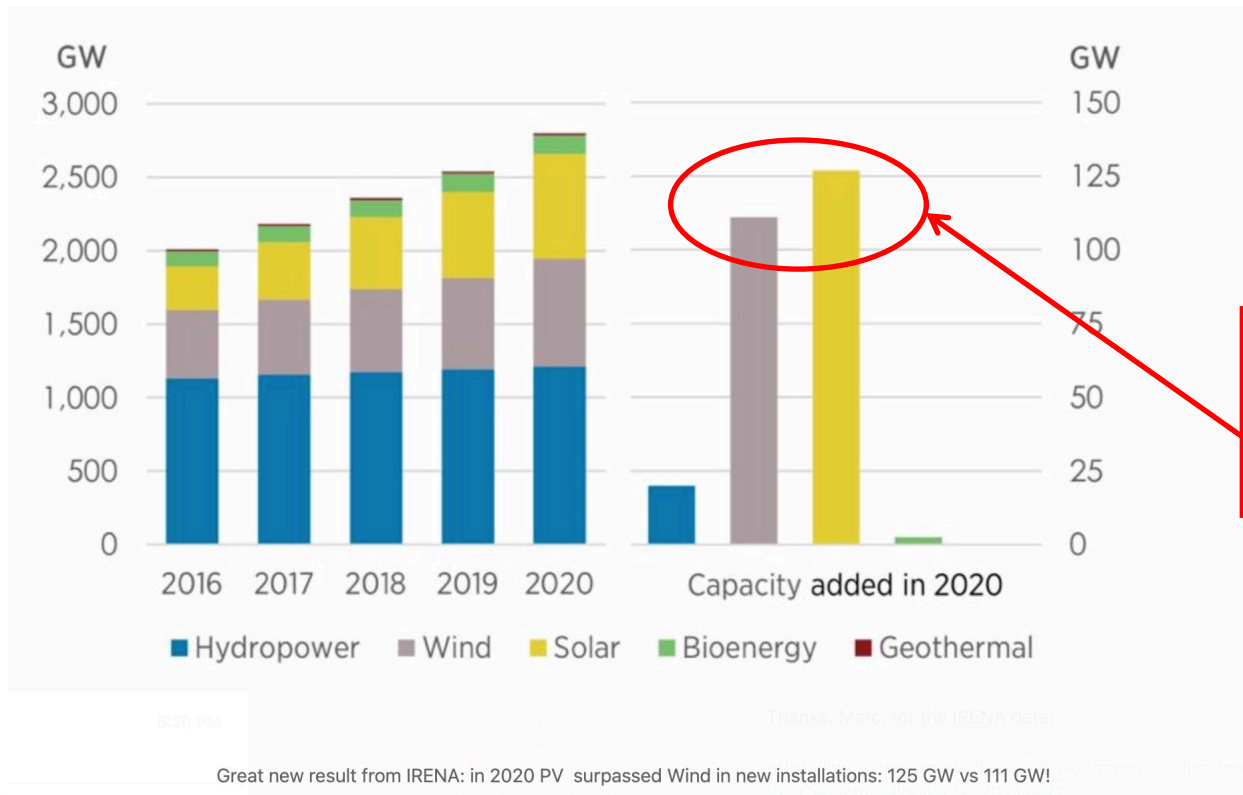


2020:
More than 80% of all newly installed power generation is based on renewable energy!

Source: Bloomberg 2021

New global power generation capacity in 2020 was 80% in renewables, mainly PV and wind!

Wachstum der Erneuerbaren Energien Kapazitäten 2016-2020



Heute:
Zubau an Solarenergie
übertrifft Zubau an
Windanlagen!

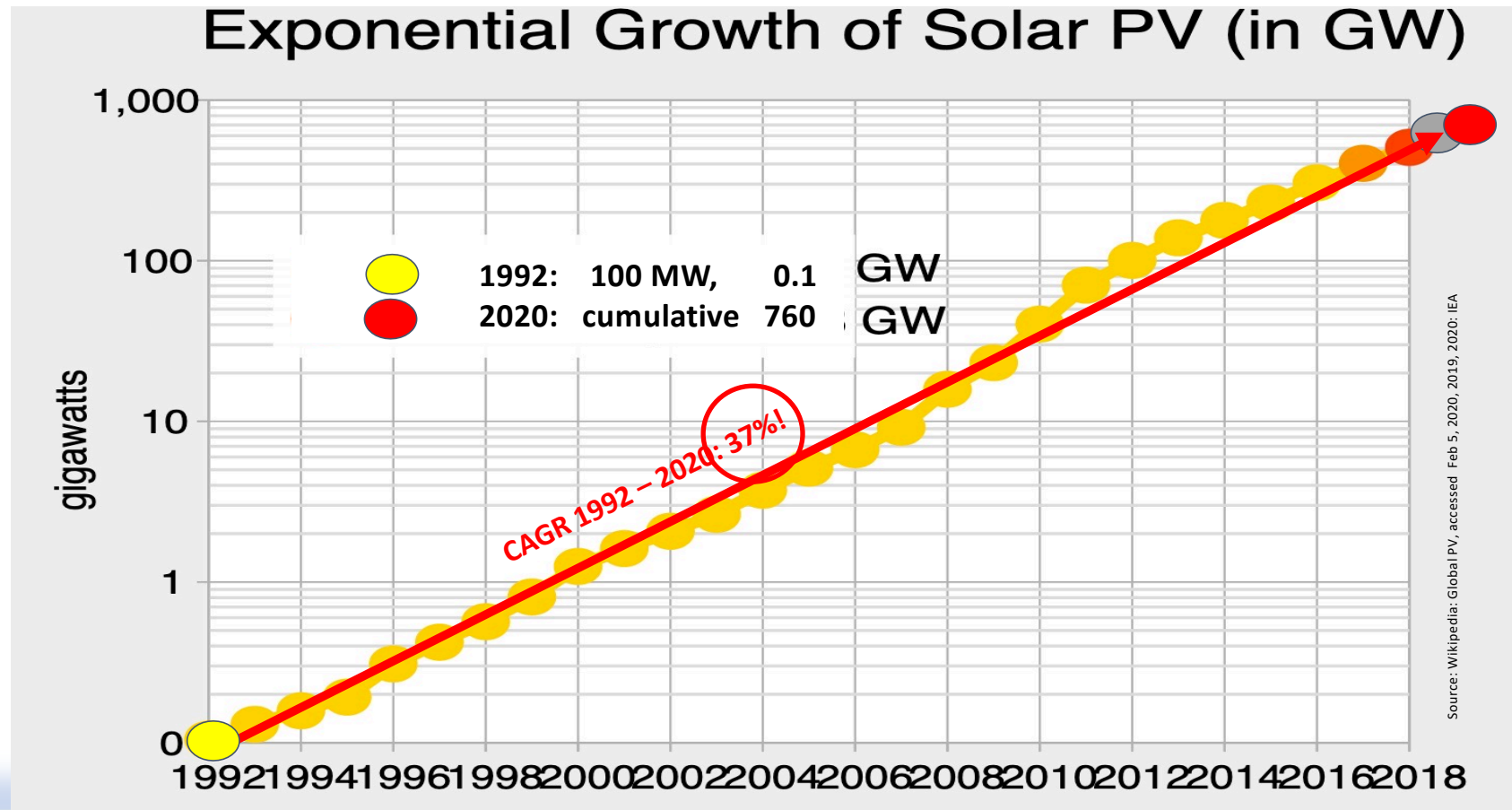
Source: Bloomberg 2021

17.04.26

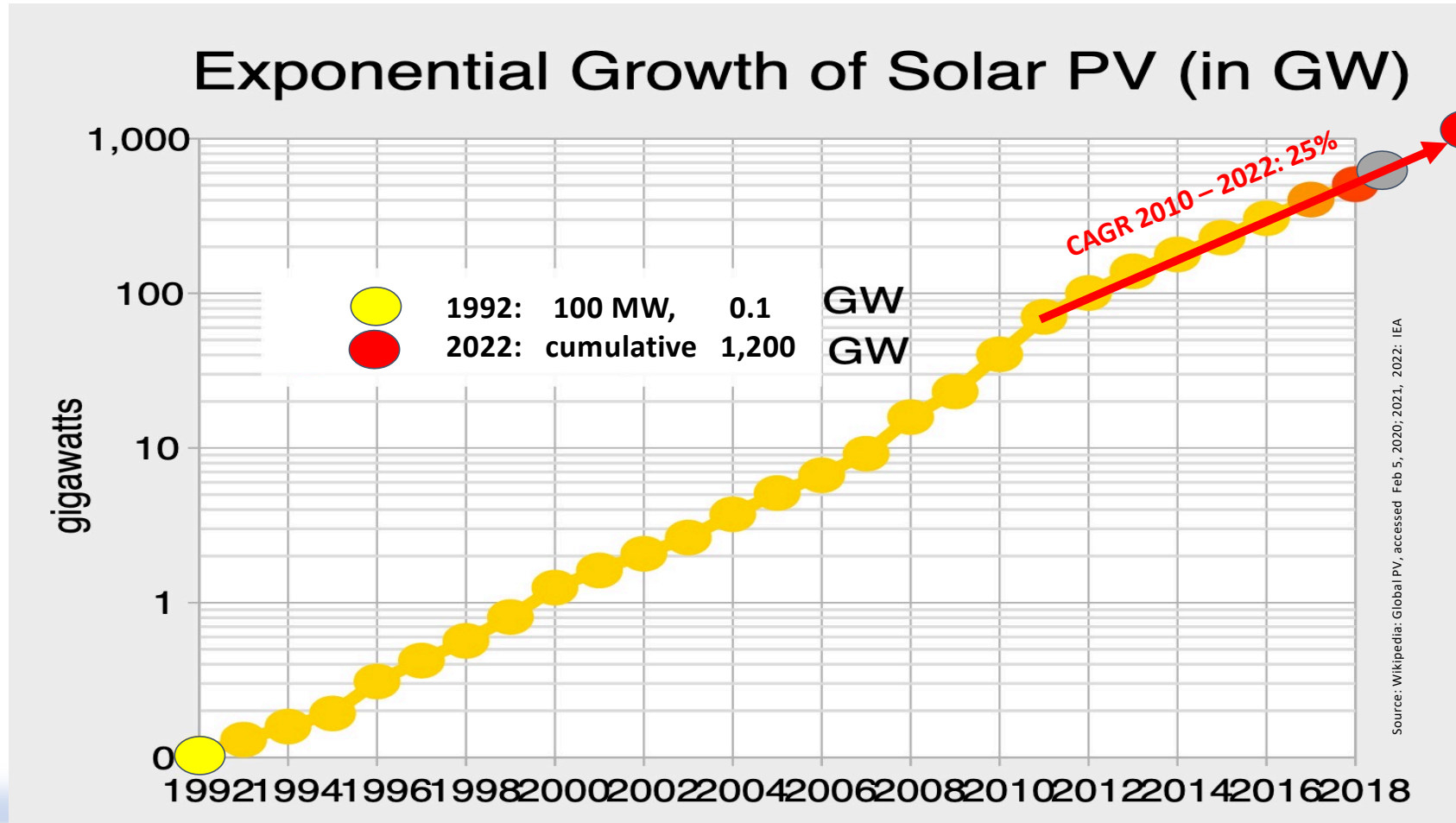
Eicke R. Weber

13

Globales Wachstum von PV Installationen 1980 – 2020



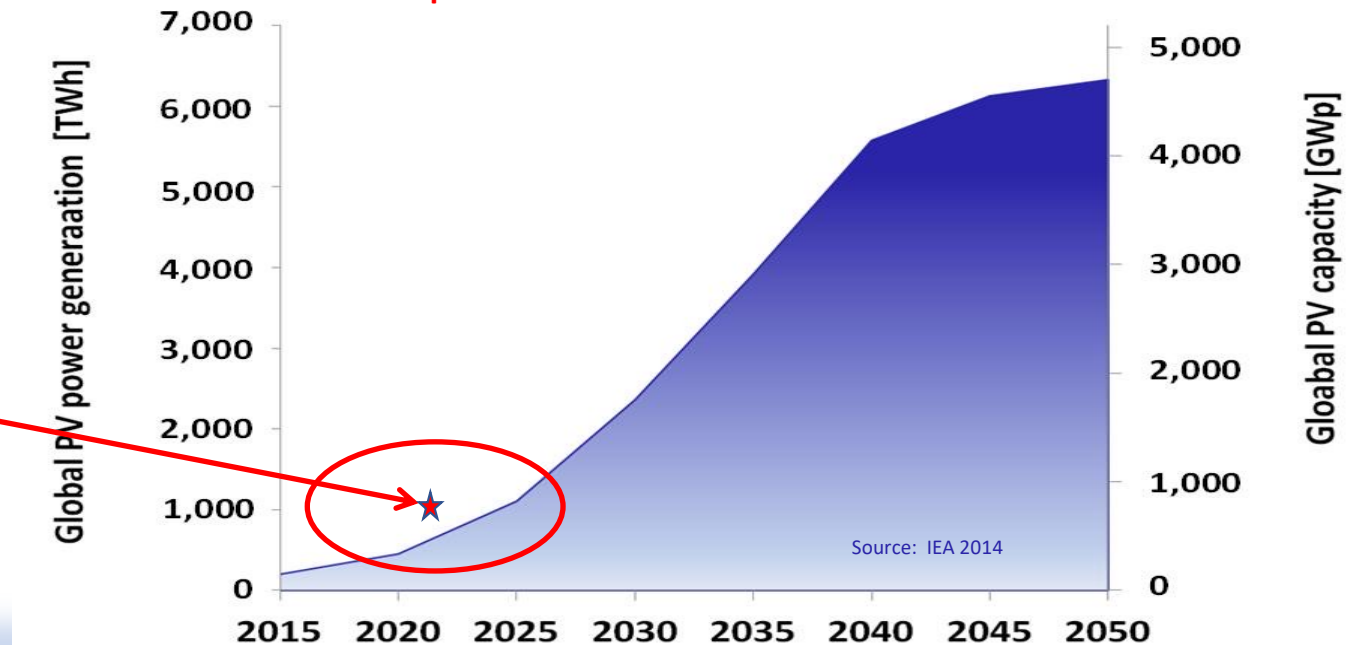
Global Growth of PV Installations 2010 – 2022 CAGR: 25%!



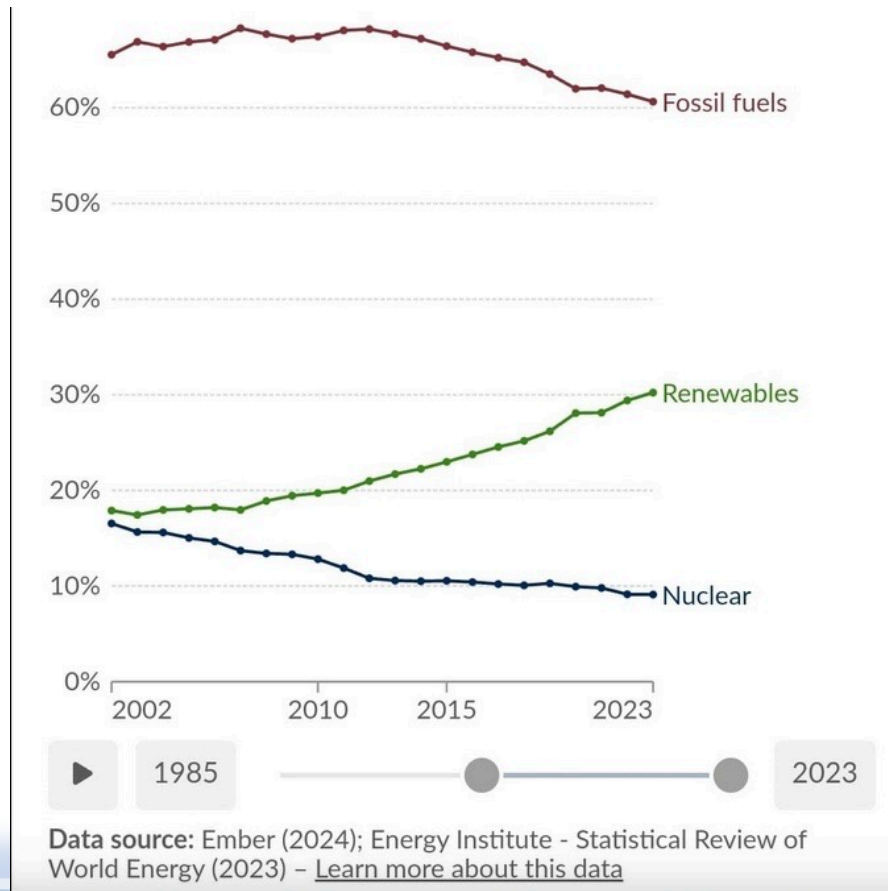
PV Heading into the Terawatt Range – this is a Disruption!

- Rapid introduction of PV globally is fueled by the availability of cost-competitive, distributed energy
- In 2050 or before, much more than 5TW of PV PV will be installed!
- **By March 15, 2022, the first 1,000 GW_p have been installed!**

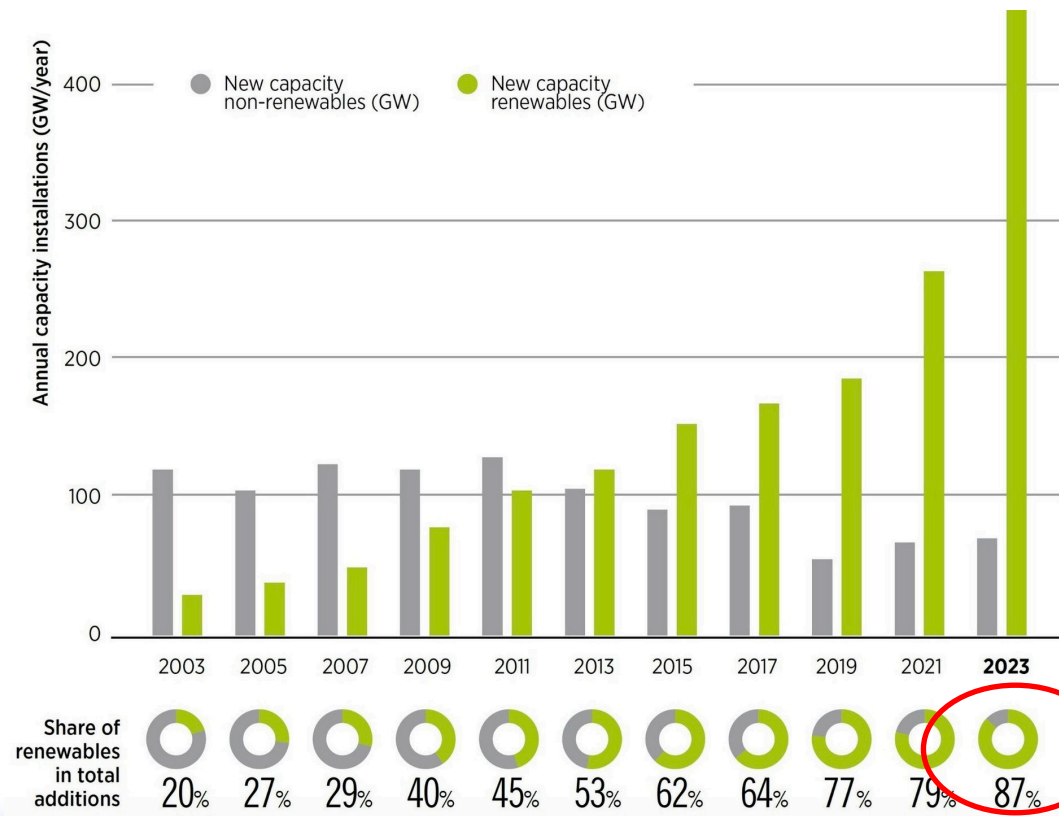
We are just at the beginning of the global growth curve!



Anteil an globaler Stromerzeugung von fossilen, erneuerbaren, nuklearen Quellen



Jährlicher Zubau an Kraftwerkskapazitäten 2003-2023

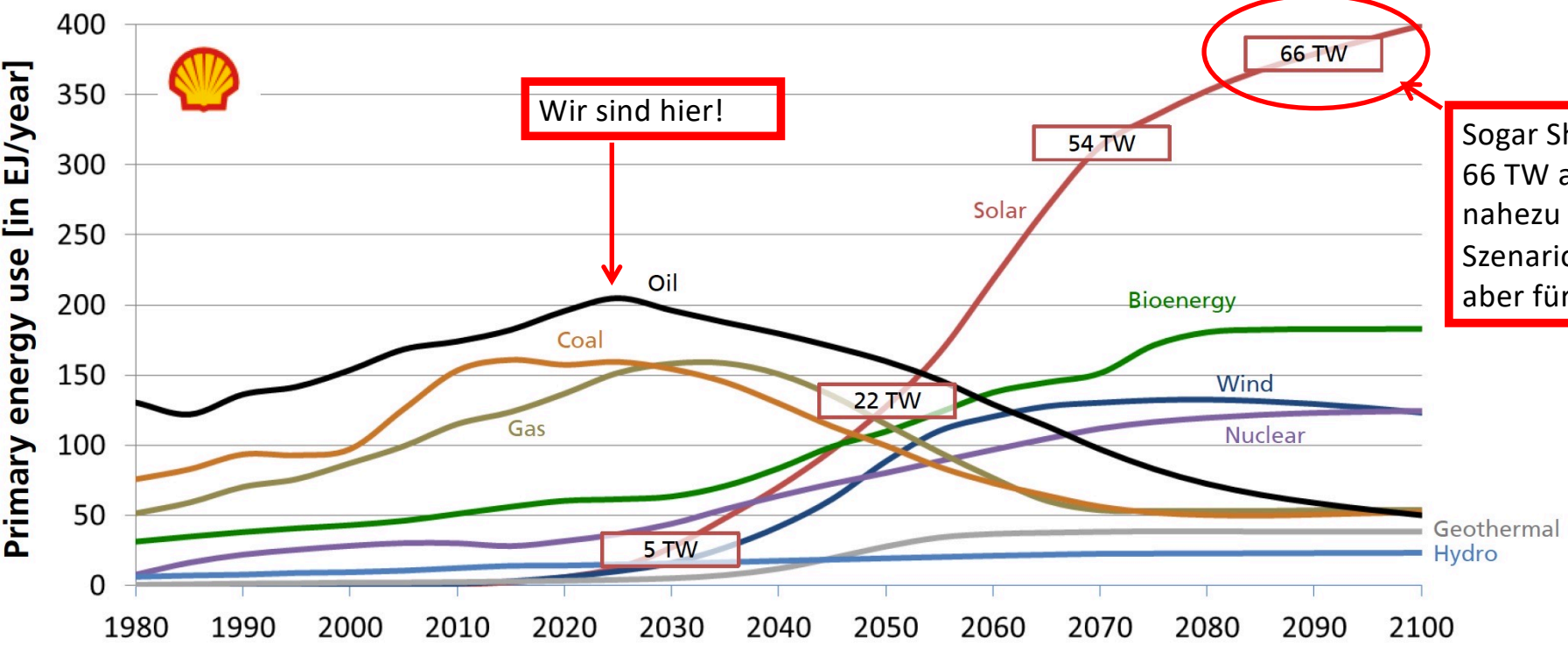


2023:
87% aller neu
installierten Kraftwerks-
kapazitäten besteht aus
erneuerbaren Energien!

Source: Bloomberg 2023

Global energy scenario of Shell

Dominating role of photovoltaic in the future

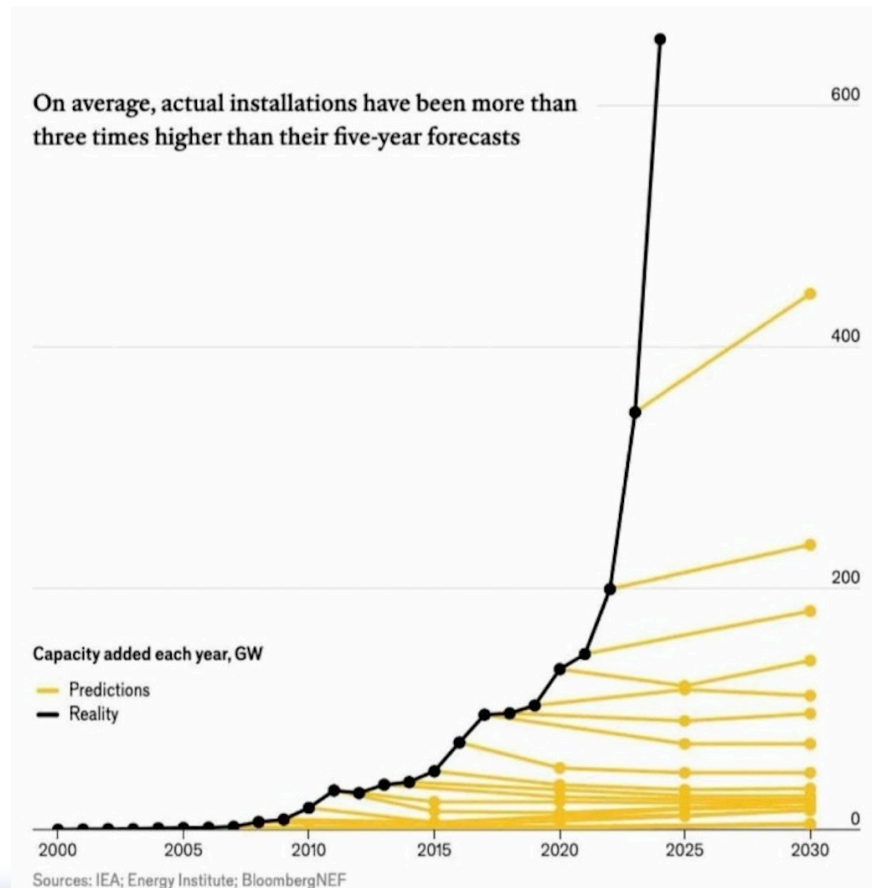


Sogar Shell sagt nun 66 TW an PV für ein nahezu 100% RE Szenario voraus – aber für 2090!

Slide courtesy Hans-Martin Henning, Fraunhofer ISE

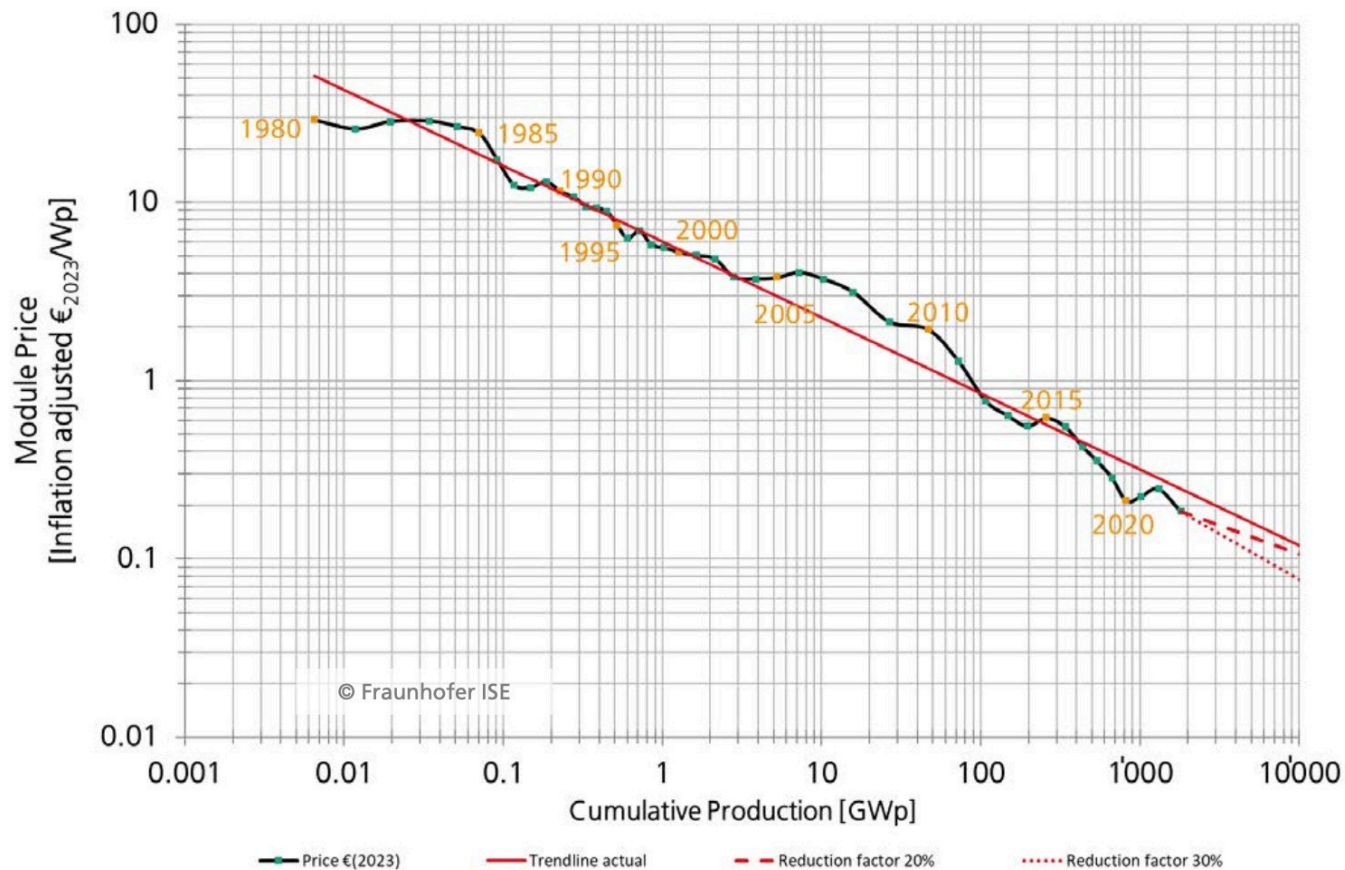
<https://www.carbonbrief.org/in-depth-is-shells-new-climate-scenario-as-radical-as-it-says>

Wachstum der PV viel rascher als Vorhersagen!



Voraussagen der IEA und Anderer zum zukünftigen Wachstum der PV Produktion haben das exponentielle Wachstum ins Terawatt Zeitalter dramatisch unterschätzt!

PV Modul Peiserfahrungskurve 1980 - 2025



1976: \$100/W_p
2025: unter \$0.10/W_p
13% jährliche Preisreduction!

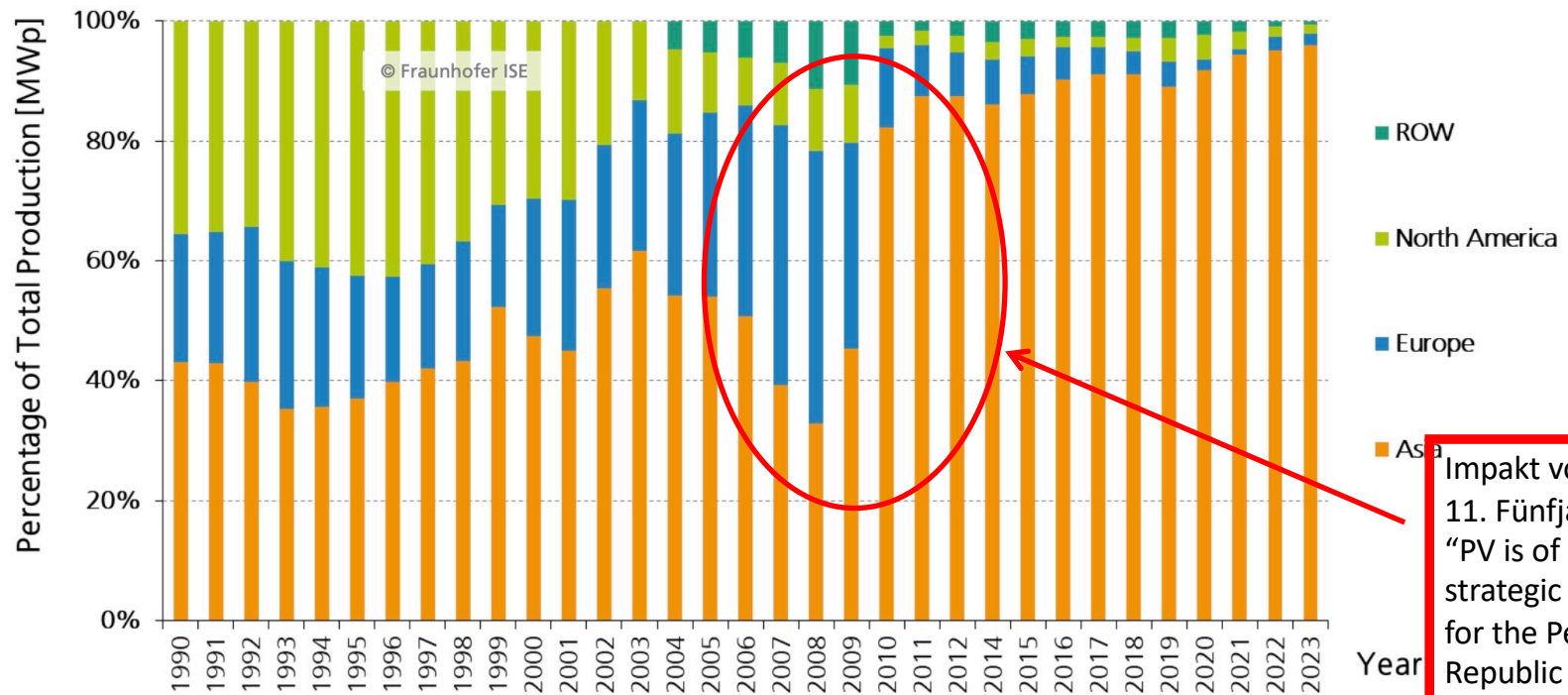
Seit 1980:
24% Preisreduction für jede Verdopplung des global installierten Volumens!

2025: PV Strom steht in sonnenreichen Gegenden für fast 1 ct/kWh zur Verfügung!

Data: from 1980 to 2010 estimation from different sources: Strategies Unlimited, Navigant Consulting, EUPD, pvXchange; from 2011: IHS Markit; from 2022: ISE; Graph: PSE Projects GmbH 2024

PV Modul Produktion nach Region 1990-2023

Anteil an MWp der produzierten Module basierend auf Si Wafer Solarzellen



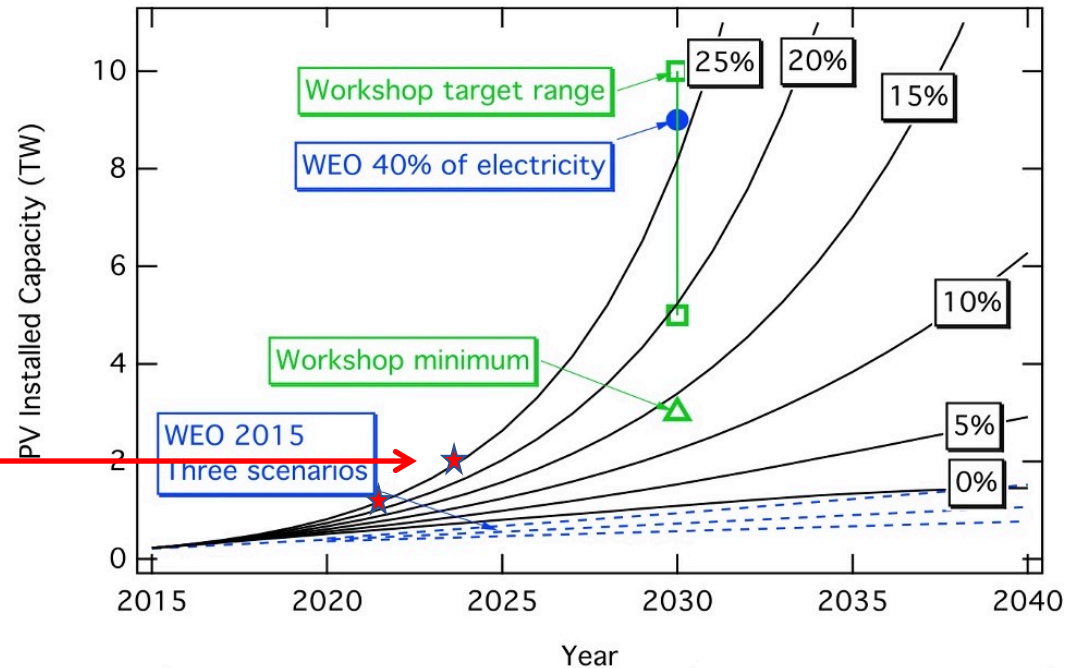
Impakt von China's 11. Fünfjahresplan: "PV is of key strategic importance for the People's Republic of China" – gefolgt vom Aufbau der GW-skaligen PV Produktion!

Data: from 2000 to 2009: Navigant; from 2010 to 2021 IHS Markit; from 2022 estimates based on IEA and other sources. Graph: PSE Projects GmbH 2024 . Date of data: 04/2024



Projections from 1st TW-scale PV workshop, Freiburg 2016

9 years later:
1 TW installed in 2022,
2 TW installed in 2024,
We follow the most
optimistic growth curve!



Using simple assumptions, we can project that just maintaining the 2015 deployment rate would reach 1-TW deployment before 2030.

A 25% annual growth rate would reach 5-10 TW by 2030!

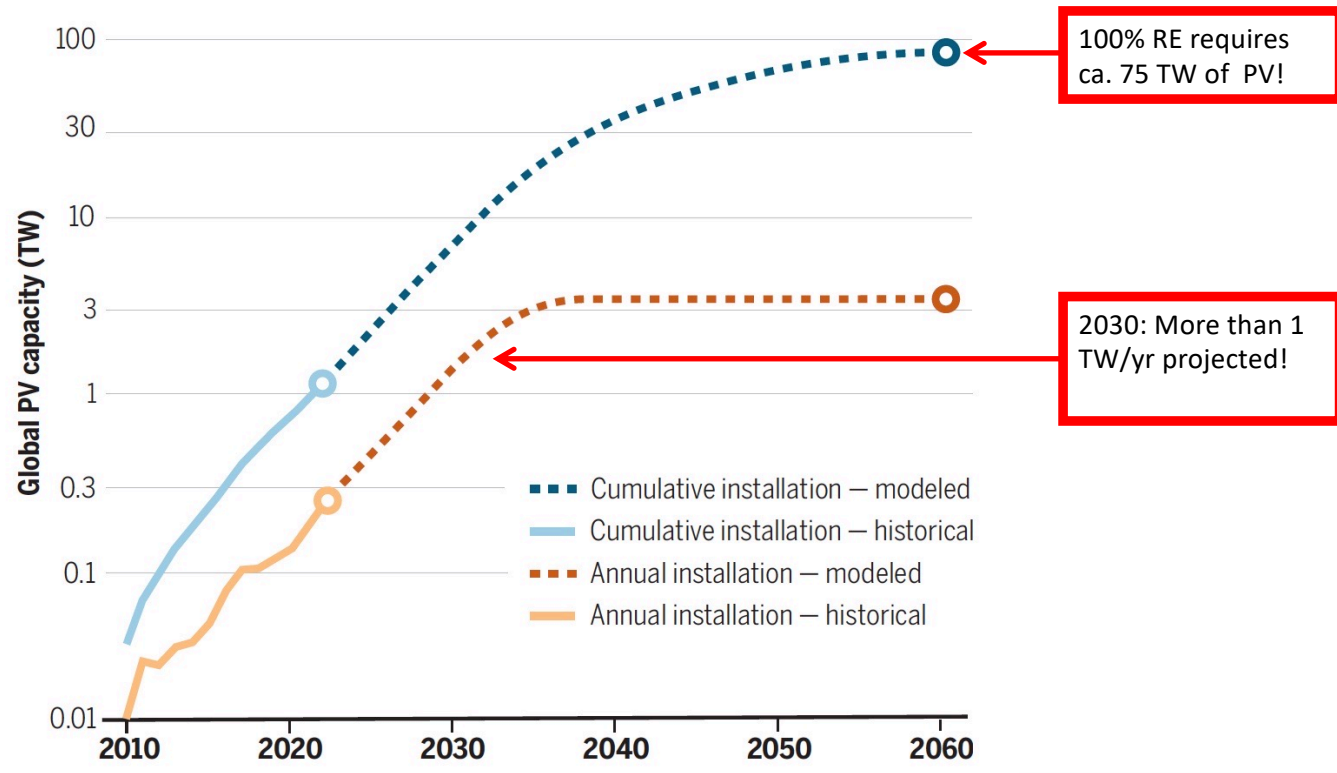
Source: Nancy M. Haegel et al, *Science* 356, 141 (2017)

Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option

25% annual PV growth is possible over the next decade

By Nancy M. Haegel, Pierre Verlinden, Marta Victoria, Pietro Altermatt, Harry Atwater, Teresa Barnes, Christian Breyer, Chris Case, Stefaan De Wolf, Chris Deline, Marwan Dharmrin, Bernhard Dimmler, Markus Gloeckler, Jan Christoph Goldschmidt, Brett Hallam, Sophia Haussener, Burkhard Holder, Ulrich Jaeger, Arnulf Jaeger-Waldau, Izumi Kaizuka, Hiroshi Kikusato, Benjamin Kroposki, Sarah Kurtz, Koji Matsubara, Stefan Nowak, Kazuhiko Ogimoto, Christian Peter, Ian Marius Peters, Simon Philipps, Michael Powalla, Uwe Rau, Thomas Reindl, Maria Roumpani, Keiichiro Sakurai, Christian Schorn, Peter Schossig, Rutger Schlatmann, Ron Sinton, Abdelilah Slaoui, Brittany L. Smith, Peter Schneidewind, BJ Stanbery, Marko Topic, William Tumas, Juzer Vasi, Matthias Vetter, Eicke Weber, A. W. Weeber, Anke Weidlich, Dirk Weiss, Andreas W. Bett

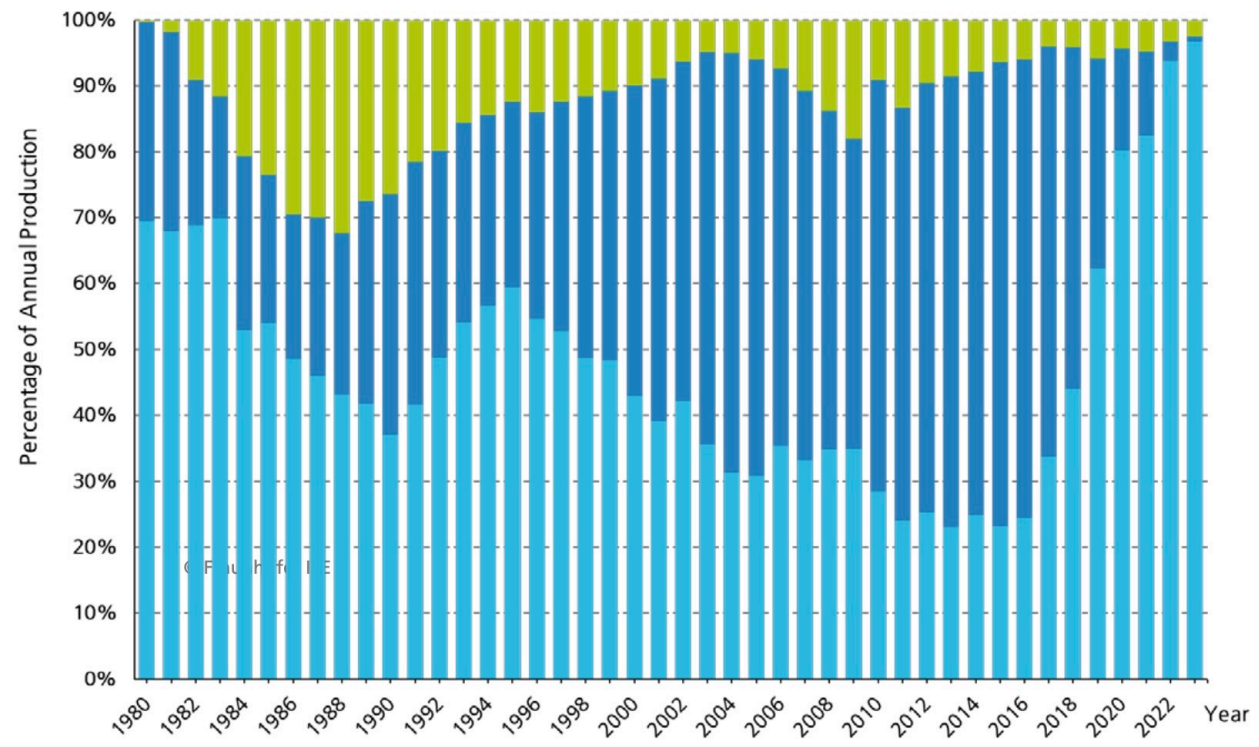
Prognose des Terawatt-Workshops Freiburg 2022 Entwicklung des Globalen PV Marktes



Source: Nancy M. Haegel et al, *Science* 380, 6640 (April7, 2023)



PV Production by Technology: Percentage of Global Annual Production



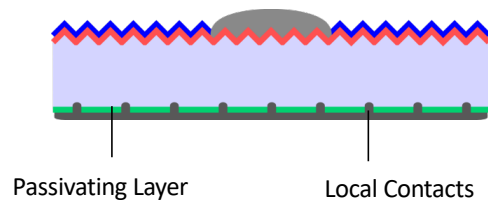
Production 2023* (GWp)	
Thin film	13
Multi-Si	4
Mono-Si	485
Total	502 (ITRPV)

*estimated numbers

Data: from 2000 to 2009: Navigant; from 2010 to 2021 IHS Markit; from 2022 estimates based on IEA and other sources. Graph: PSE Projects GmbH 2024 . Date of data: 04/2024

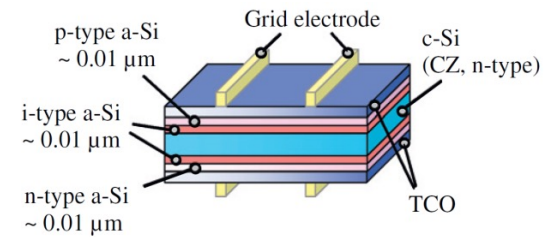
Advanced c-Si PV Cell Technologies

Passivated Emitter and Rear PERC¹

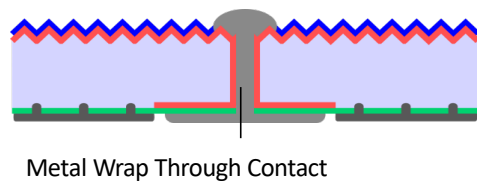


¹Blakers et al., Appl. Phys. Lett. 55, pp. 1363-5, 1989

Heterojunction Technology HJT³

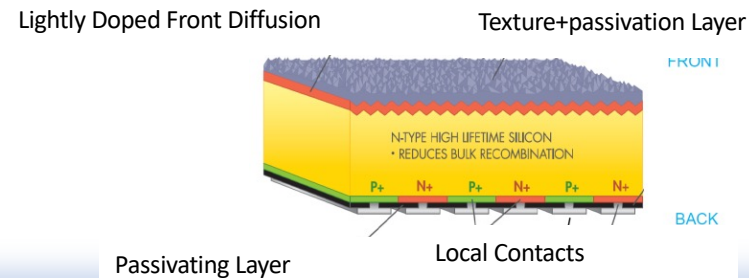


Metal Wrap-Through MWT-PERC²



²Dross et al., Proc. 4th WCPEC, 2006, pp. 1291-4

Interdigitated Back Contact/Junction IBC-BJ⁴



³Sanyo/Panasonic ⁴Sunpower

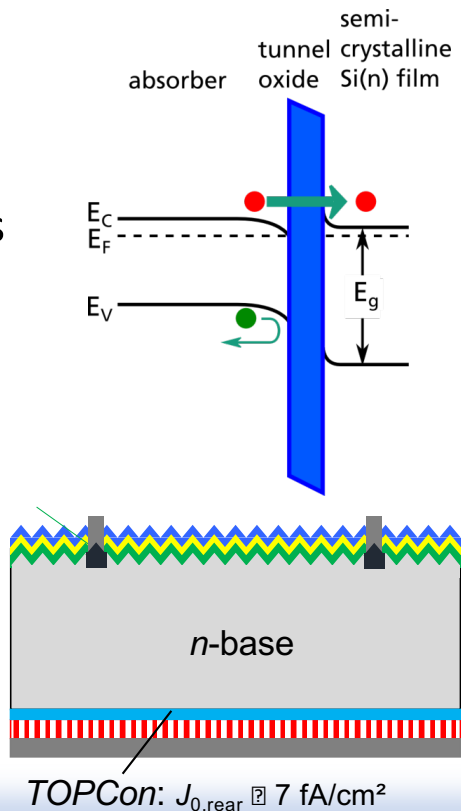


Advanced Cell Technologies

Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)

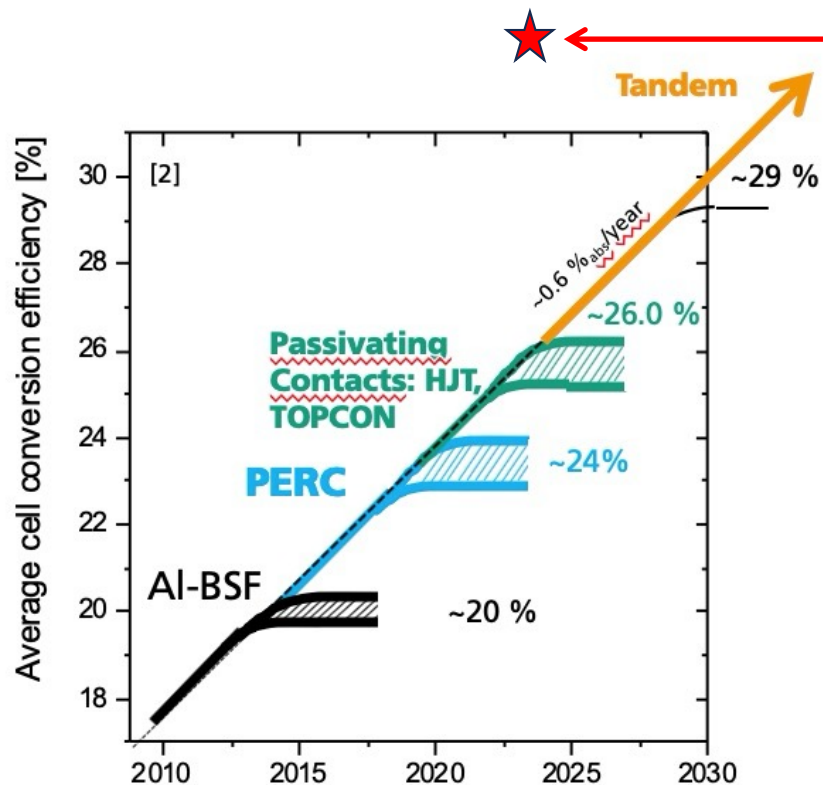
■ TOPCon enables:

- Excellent carrier-selectivity
- High tolerance to high-temperature processes
- Very high V_{oc} and FF achieved due to
 - Excellent surface passivation
 - 1D carrier flow pattern in base



Beyond the Shockley-Queisser Limit: Further Innovations in PV Cell Technology!

Tandem Solar Cells on Silicon

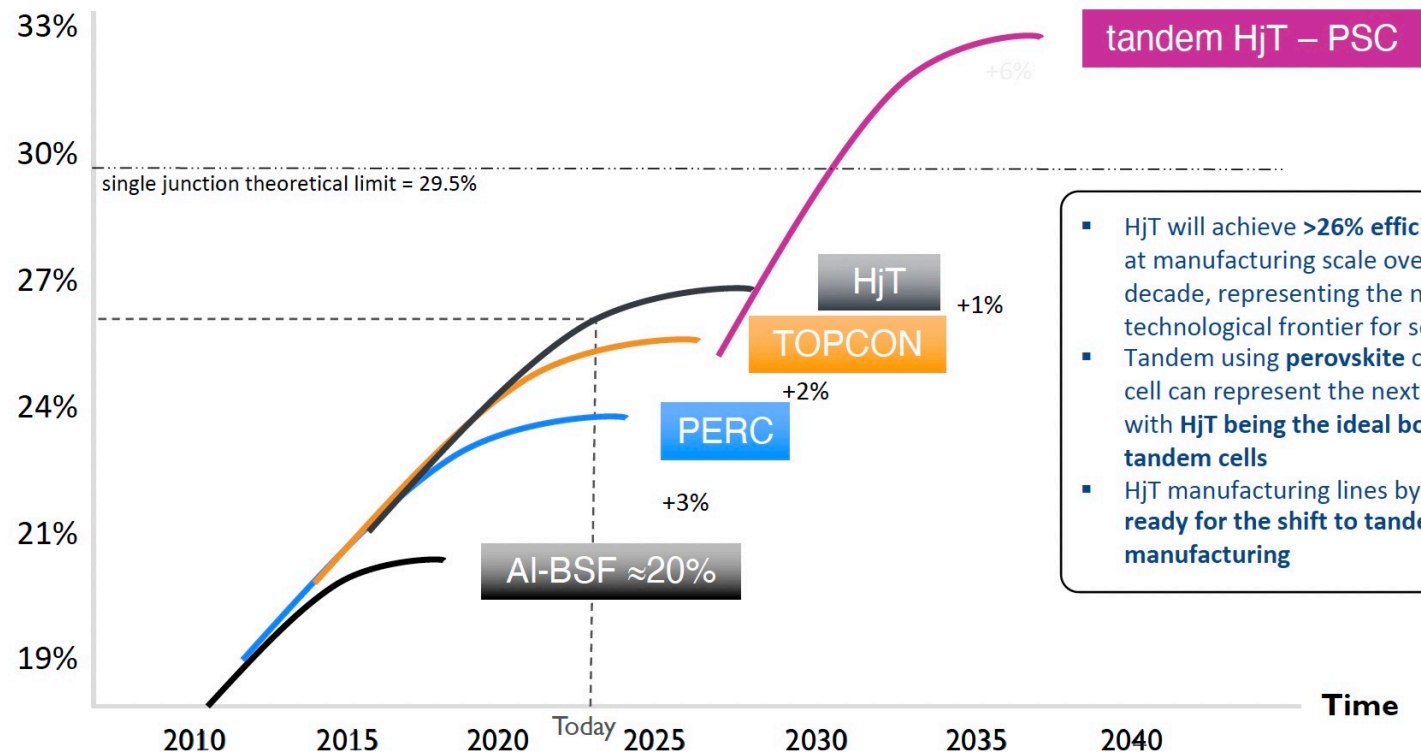


Slide courtesy A. Bett, Fraunhofer ISE 2020



On November 3, 2023, LONGi announced a world record of 33.9% efficiency of crystalline silicon-perovskite tandem solar cells at 19th CSPV.

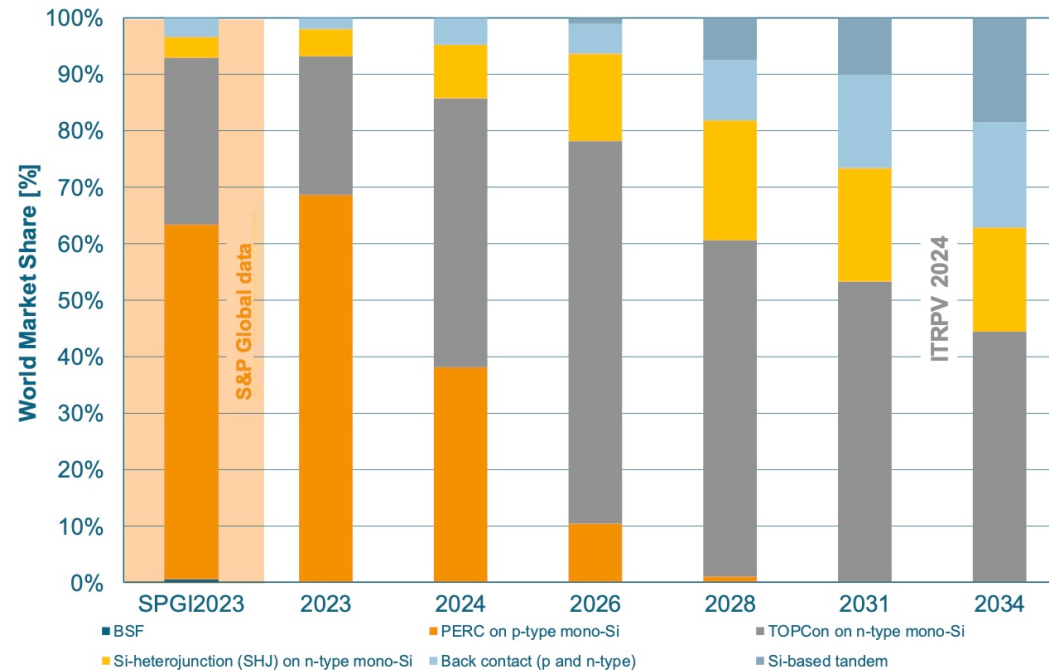
HjT, tandem structures are the next frontier in solar cell manufacturing



- HjT will achieve **>26% efficiency levels** at manufacturing scale over the next decade, representing the next technological frontier for solar PV
- Tandem using **perovskite** or other top cell can represent the next evolution, with **HjT being the ideal bottom cell for tandem cells**
- HjT manufacturing lines by nature **ready for the shift to tandem cell manufacturing**

Solar Cell technologies

Data only from GW-scale manufacturers



2025:
A dynamic development
in PV technologies:
TOPCON has replaced
PERC as leading
technology,
HjT, Back Contact,
Tandem technologies
are just starting!

ITRPV 2024

PV Wafer Technologies: Kerfless wafers for mass production: Nexwafe

Key differentiators

- ❖ In-line process and equipment for creating weak layer for mass production in contrast to slow single wafer processing
- ❖ High-throughput patent-protected silicon deposition tool and process
- ❖ Free-standing silicon wafer – no need for temporary substrates in subsequent cell processing steps
- ❖ Low cost, high efficiency “EpiWafer”
- ❖ True drop-in replacement for Cz silicon wafers

Release layer

re-usable Si wafer

Epitaxy

Epitaxially grown Si wafer

re-usable Si wafer

Detachment

Epitaxially grown Si wafer

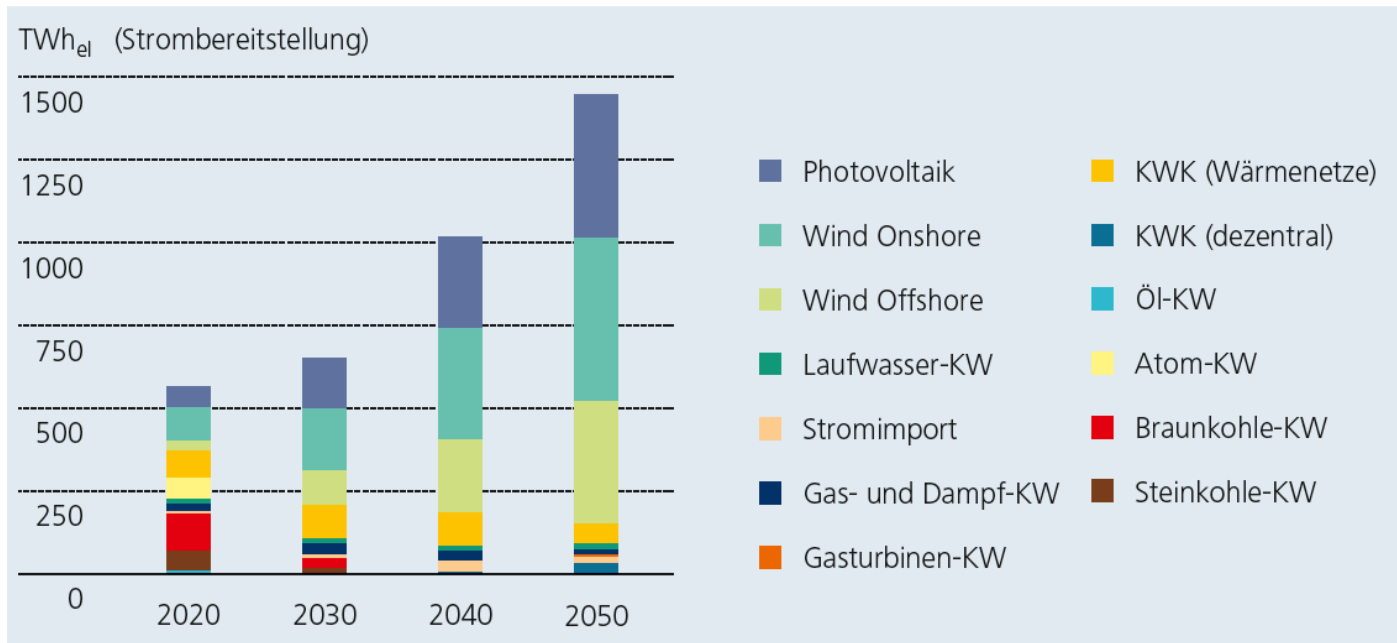
re-usable Si wafer

Kerfless Si wafer

Monocrystalline “EpiWafer”

ReMoD-D: Fh-ISE Modellierung des Energiebedarfs bis 2050

Entwicklung der Strombereitstellung



A
E
S
S

Quelle: Fh-ISE Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem, Februar 2020



Die Photovoltaische Konversion der Kernfusionsenergie der Sonne in Strom auf der Erde kommt ins Multi-Terawatt Zeitalter: Globale Chancen und Herausforderungen

- Das immer deutlicher werdende Problem der **Gefahr von Klimakatastrophen**, ausgelöst durch die menschengemachte Veränderung unserer Erdatmosphäre (Gehalt an CO₂ und anderen klimaschädlichen Gasen) hat die Dringlichkeit **der Transformation auf eine emissions-freie globale Wirtschaft** ins Bewusstsein gebracht.
- Dazu kommt die Erkenntnis dass diese **Transformation des Energiesystems in Richtung 100% RE** (regenerative Energie) auch **wirtschaftlich von großem Vorteil** sein wird!
- China ist führend in **zentralen RE Technologien**, wie **Photovoltaik, E-Mobilität, Batterien, Elektrolyseuren...**
- Wer glaubt dass die chinesische Regierung **die überzeugtesten Klimaschützer der Welt** sind?
- Nein, China hat **die großen Chancen einer raschen Transformation in Richtung 100% RE** verstanden!



Die Photovoltaische Konversion der Kernfusionsenergie der Sonne in Strom auf der Erde kommt ins Multi-Terawatt Zeitalter: Globale Chancen und Herausforderungen

- Unsere zentrale Aufgaben sind die **disruptive Umstellung auf erneuerbare Energien** in allen Bereichen, verbunden mit dem Einsatz von **Energiespeichern**, einem **intelligenten Netz**, sowie **Last-Management**.
- Das *Verbrennen* von fossilen wie auch nachhaltigen Treibstoffen ist *unwirtschaftlich*, daher wird **erneuerbar bereitzustellender Strom** einen zunehmenden Anteil unseres Energiebedarfs decken.
- **Sonne** und **Wind**, ergänzt durch **Wasserstoff** und andere **Speicher**, werden die zentralen Säulen unseres Energiesystems bilden.
- **Kernenergie** bietet keine Alternative, da das künftige Stromssystem keine Grundlastkraftwerke braucht!



Die Photovoltaische Konversion der Kernfusionsenergie der Sonne in Strom auf der Erde kommt ins Multi-Terawatt Zeitalter: Globale Chancen und Herausforderungen

- Die Energiewende - die raschest mögliche Transformation unseres Energiesystems hin zu schliesslich 100% erneuerbaren Energien – **ist technisch möglich und finanziell attraktiv!**
- Es gibt sicher **starke inhaltende Kräfte** gegen eine rasche Energiewende
- Aber: Staaten, welche die Energiewende **rasch in Angriff nehmen** werden profitieren durch Investitionen und Exportmöglichkeiten
- Zum Beispiel erwarten wir dass der globale PV Markt **bis 2030 1.000 Gigawatt**, 1 Terawatt, oder mehr **jährlich installiert!**
- Ziel werden **weltweit 50-70 TW** sein, die wir bis 2035/50 benötigen, selbst **100TW** werden genannt !
- **Der globale PV Markt wird im Marktvolumen ca. 2030 die Automobilbranche (ca. €/ \$ 800 Mrd) überholen!**
- Eine Energiewende bis **2030 für 100% RE-Strom**, bis **2045 für die Gesamtenergie** ist möglich!

