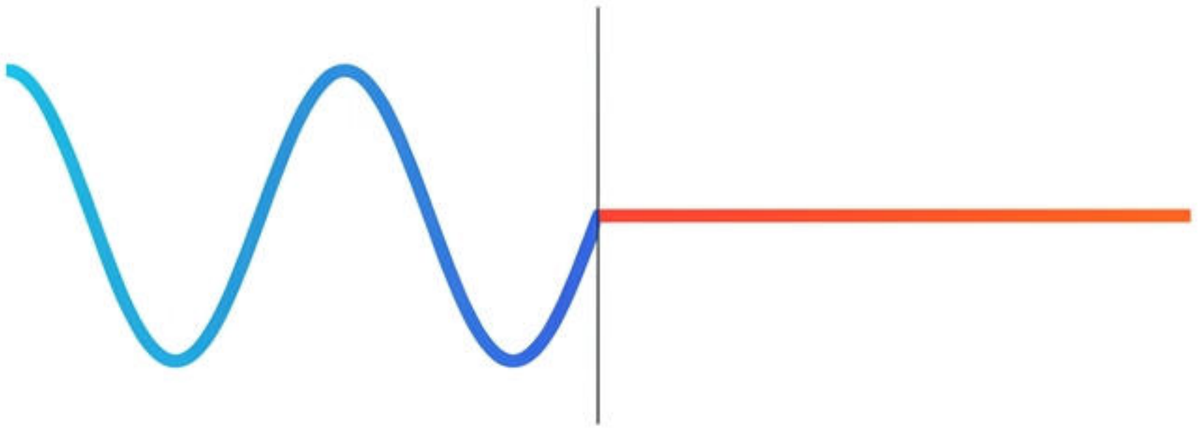
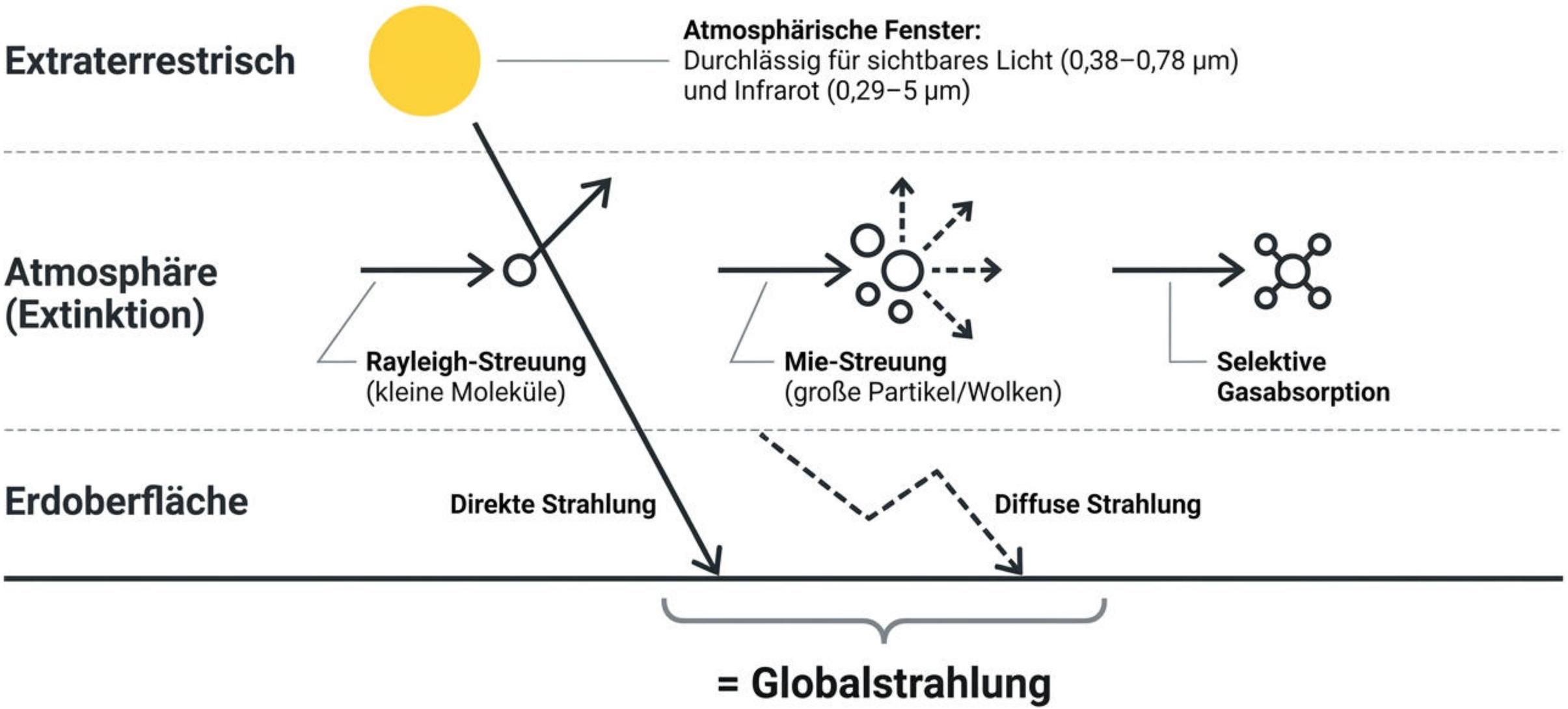


Solarenergie: Die Physik des Photons

Wissenschaftliche Übersicht zu Einstrahlung, Photovoltaik, Solarthermie und Systemintegration

Gemini Notebook

Die Reise des Photons (Extraterrestrisch bis Erdoberfläche)



Gemini Notebook

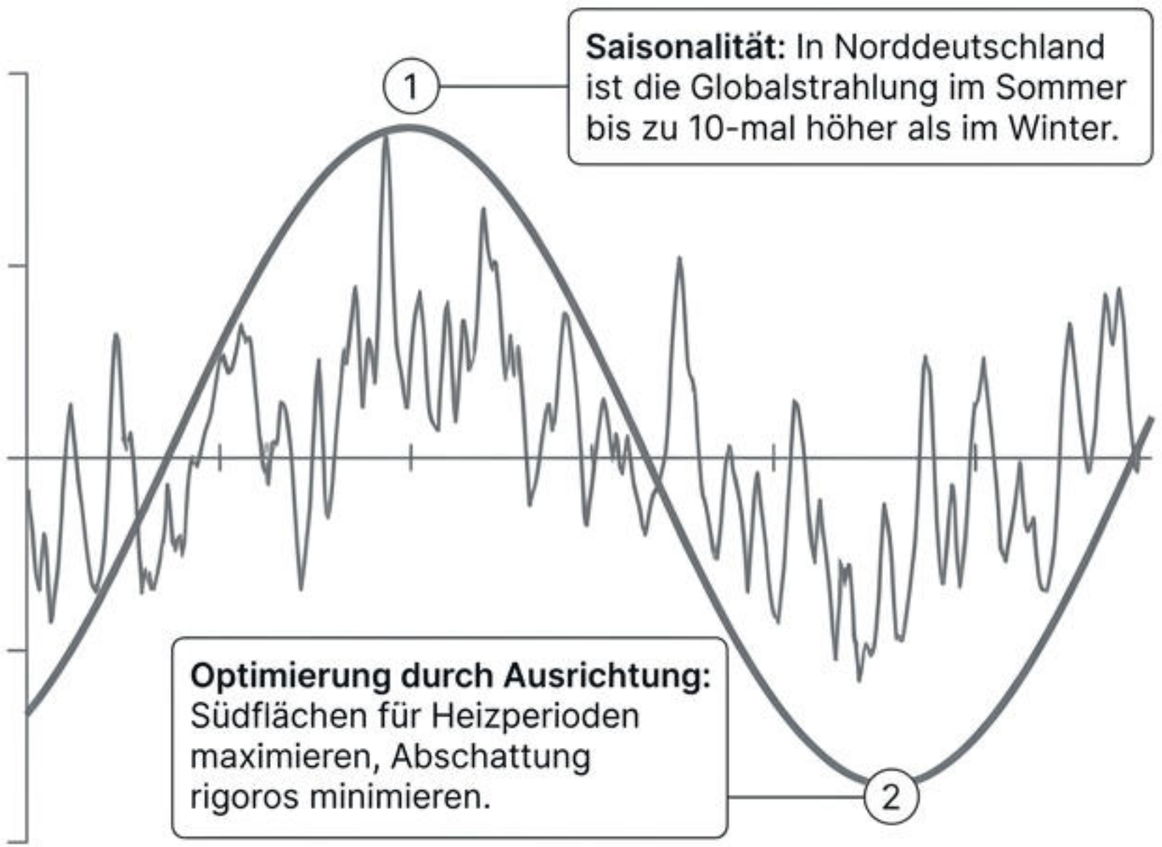
Physikalische Grenzen: Geografie und Zeit

Geografische Verteilung

Wüsten (Nördlich/Südlich der Tropen):
> 2.200 kWh/(m²*a)
Minimale Wolken, maximale Direktstrahlung

Deutschland: 1.000 – 1.200 kWh/(m²*a)
Ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle

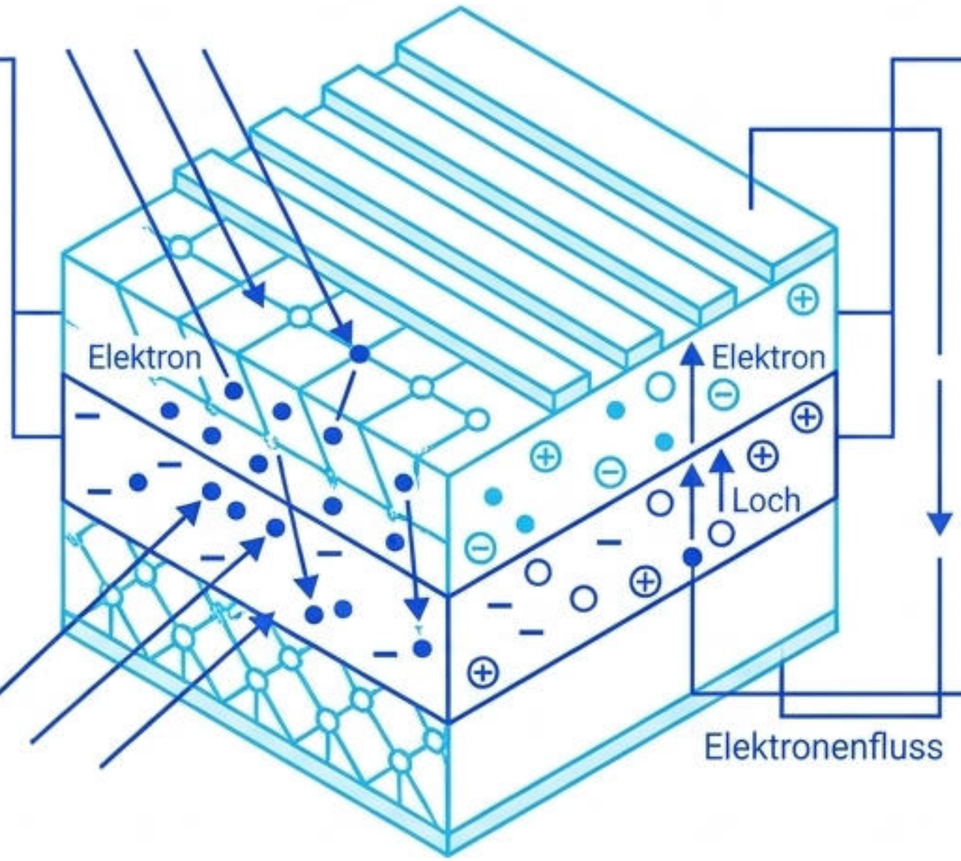
Zeitliche Variation



Gemini Notebook

Weg A – Photovoltaik: Halbleiterphysik

Materialien: Silicium, Germanium, Gallium-Arsenid.



Dotierung: Einbringen von "Fremdatomen" (Störstellen) zur Erzeugung von freien Elektronen und Valenzen (Lücken).

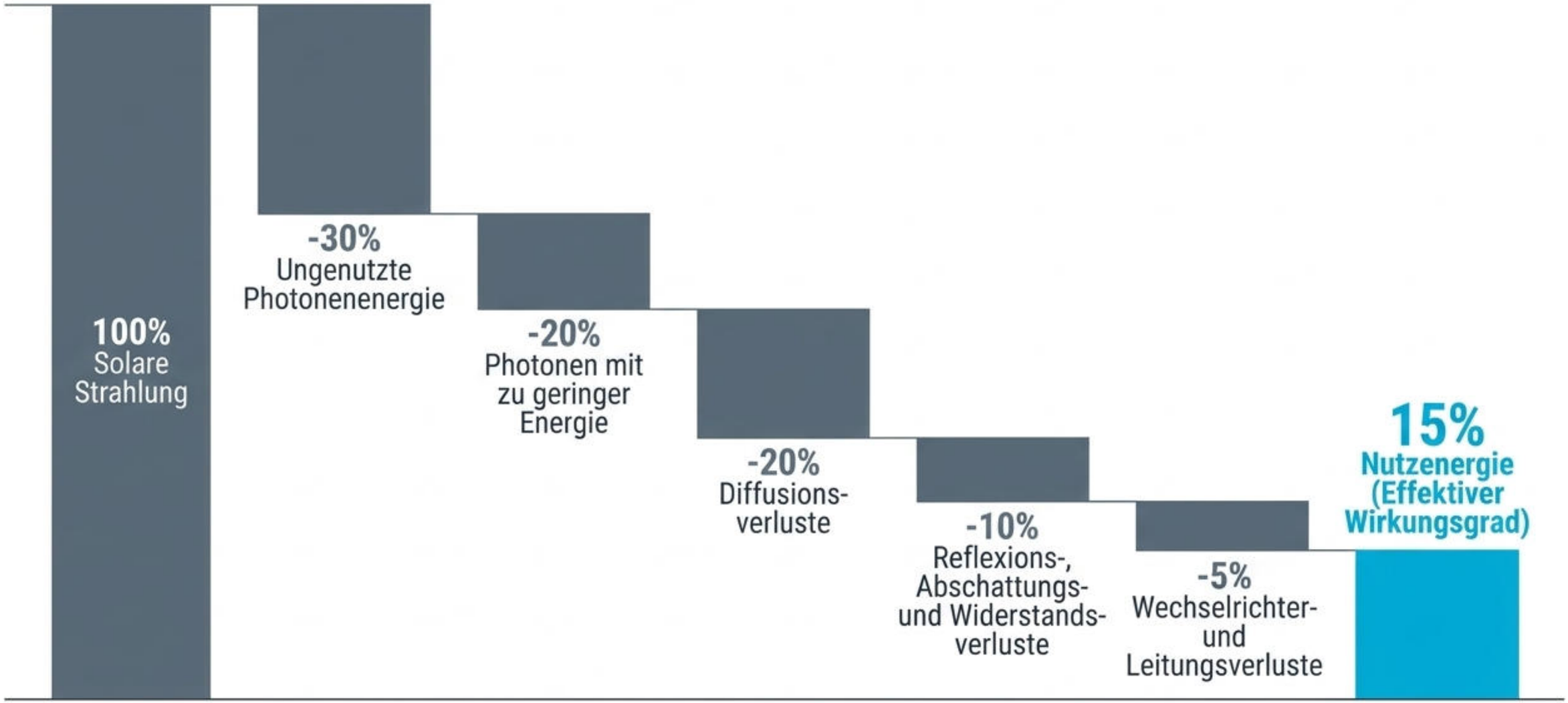
Photonen-Impakt:
Solare Strahlung trifft auf die Zelle, Photonen übertragen übertragen Energie auf Elektronen.

Elektronenfluss:
Herausgelöste Elektronen wandern zur Grenzfläche. Es entsteht eine Diffusionsspannung (0,5 V – 0,7 V pro Zelle).

Kernprinzip: Die erzeugte Stromstärke ist direkt proportional zur Beleuchtungsstärke.

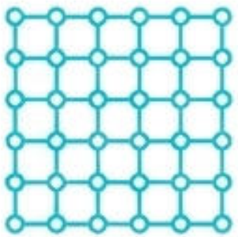
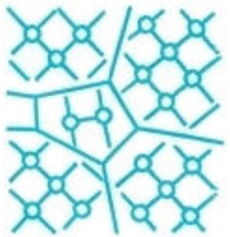
Gemini Notebook

PV-Wirkungsgrad & Die Verlustruktur



Gemini Notebook

Diagnostik: PV-Zelltypen & Technologien

	 Monokristallin (Silizium)	 Polykristallin (Silizium)	 Dünnschicht (CIS / CIGS)
Wirkungsgrad	25,0 % (Labor) | 17 – 20 % (Produktion)	20,4 % (Labor) | 15 – 18 % (Produktion)	17 – 20 % (Labor) | 11 – 14 % (Produktion)
Eigenschaft	Einheitliches Kristallgitter, höchster Flächenertrag.	Unkompliziertes Gießverfahren, geringere Modulkosten.	Geringes Modulgewicht, flexible Traglast.
Anwendung	Limitierte Flächen mit Anspruch auf Maximalertrag.	Großflächige Anlagen (z.B. Freiflächen).	Dächer mit sehr geringer Tragfähigkeit.

Gemini Notebook

Systemertrag: Die Performance Ratio (PR)



Was ist die Performance Ratio?

Verhältnis zwischen tatsächlich erzeugter Strommenge und theoretischem Ertrag unter STC.

> 0,85: Absolute Top-Anlage (gut hinterlüftet, keinerlei Verschattung, wenig Verschmutzung).

0,75 – 0,80: Sehr gute bis durchschnittliche Anlage.

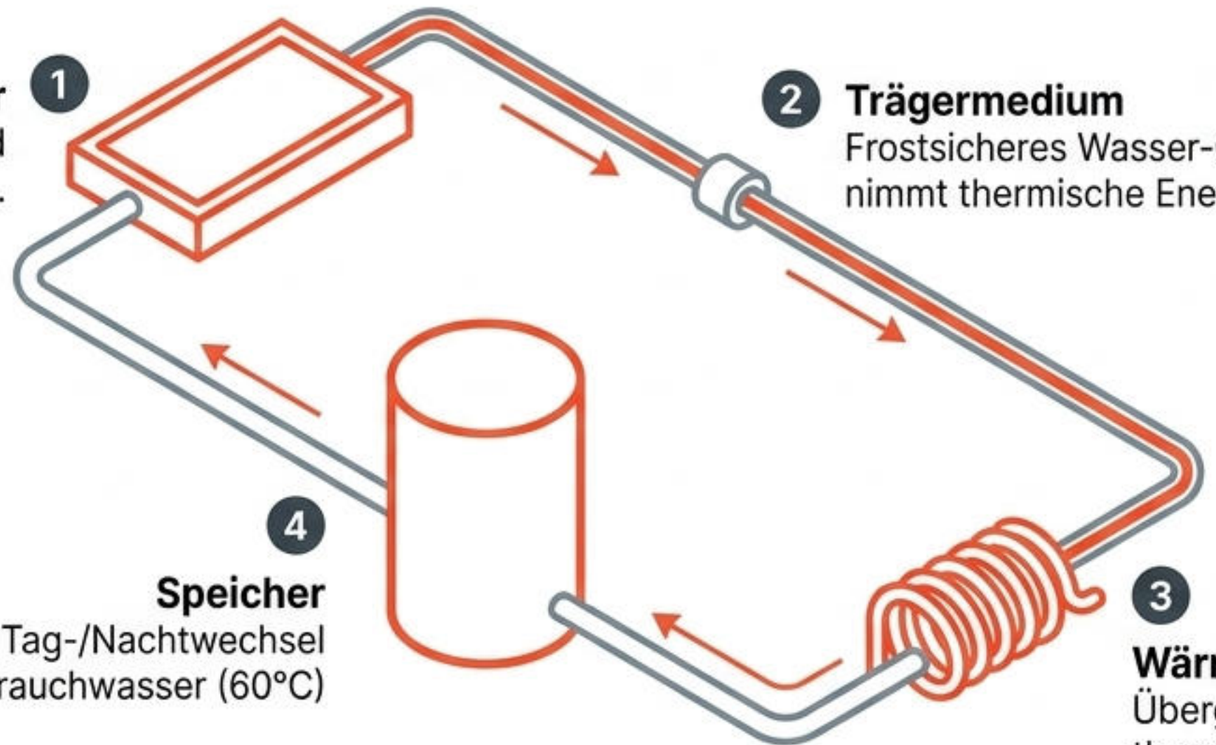
< 0,60: Starke Verluste (erhebliche Verschattung oder Anlagenausfälle).

Standard-Testbedingungen (STC)

Herstellerangaben basieren auf Idealwerten: 1000 W/m² Einstrahlung, 25°C Zelltemperatur, definiertes Lichtspektrum. Reale Wirkungsgrade weichen physikalisch ab.

Gemini Notebook

Weg B – Solarthermie: Thermodynamik



1 Absorber
Solare Strahlung wird in Wärme gewandelt.

2 Trägermedium
Frostsicheres Wasser-Glykol-Gemisch nimmt thermische Energie auf.

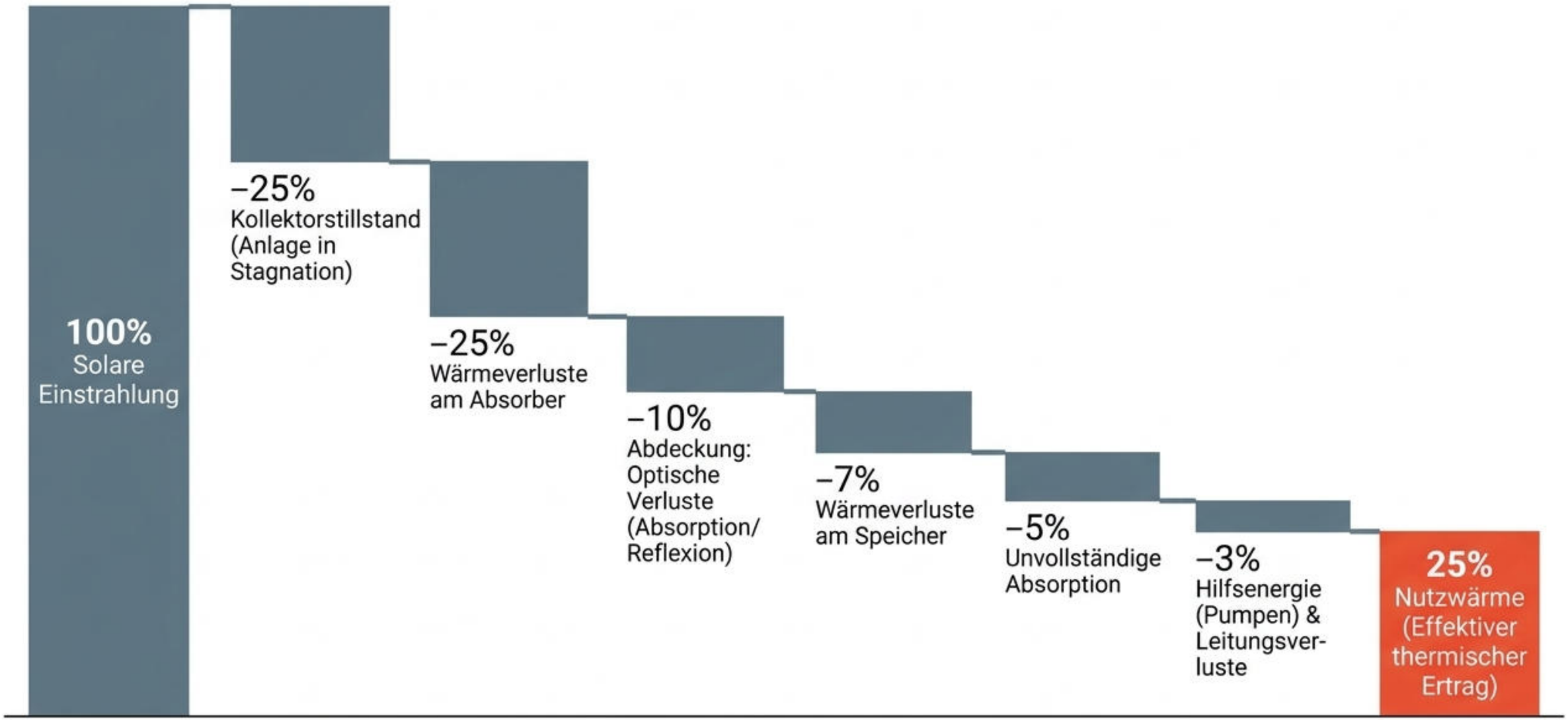
3 Wärmeübertrager
Übergabe der Energie an den thermischen Speicher.

4 Speicher
Puffer für Tag-/Nachtwechsel und Brauchwasser (60°C)

Kritischer Zustand: Kollektorstillstand
Bei fehlender Wärmeabnahme (Speicher voll) steigt die Temperatur rasant. Es kommt zur Verdampfung des Mediums; Pumpen schalten zum Anlagenschutz ab.

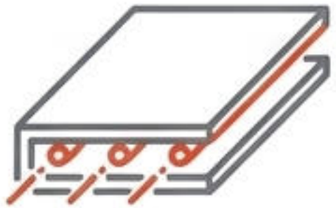
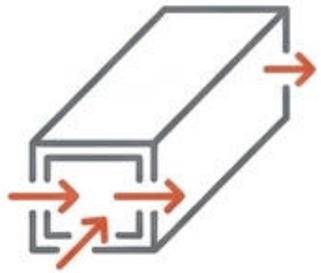
Gemini Notebook

Solarthermische Verluststruktur



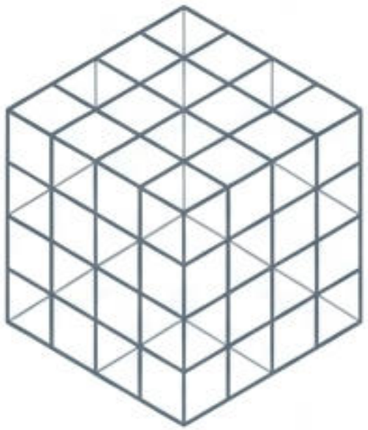
Gemini Notebook

Matrix: Solarthermische Kollektoren

				
	Parabolrinne	**Flachkollektor**	**Vakuumröhre**	**Luftkollektor**
Prinzip	Konzentriert Strahlung auf Absorberrohr.	Flächige Absorption, benötigt Puffer-Puffer-Speicher.	Vakuum-Isolierung minimiert Wärmeverlust.	Umgebungsluft zirkuliert direkt durch Kollektorkanäle.
Kosten (Richtwert)	~4.000 €/kWth	600 – 1.000 €/kWth	800 – 1.100 €/kWth	900 – 1.000 €/kWth
Ideale Anwendung	Großkraftwerke (Hochtemperatur).	Standard für Bestandsgebäude.	Bestandsgebäude (Hohe Effizienz).	Niedrigenergie- und Passivhäuser.

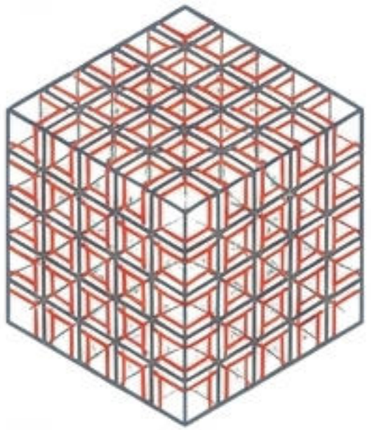
Gemini Notebook

Thermische Speichersysteme



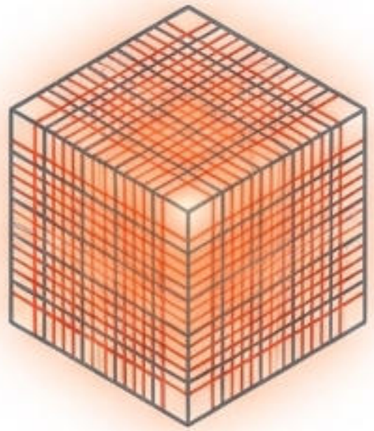
Sensibel (Fühlbar)

Prinzip: Direkte Erwärmung (fest/flüssig). Temperaturzunahme ist messbar.
Medium: Wasser, Beton, Erdreich.
Kapazität: **~60 kWh/m³.**
Charakteristik: Etabliert, günstig, aber hohe Wärmeverluste (Kurzzeitspeicher).



Latent (Phasenwechsel)

Prinzip: Speicherung durch Zustandsänderung (z.B. fest zu flüssig) bei konstanter Temperatur.
Medium: Paraffin, Salzhydrate.
Kapazität: **~240 kWh/m³.**
Charakteristik: Geringer Platzbedarf, träger Wärmetransport.



Thermochemisch (Reaktion)

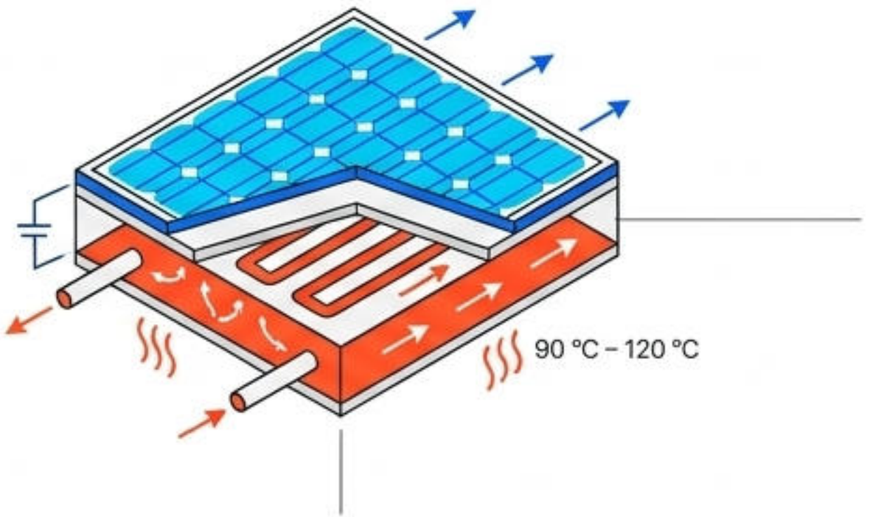
Prinzip: Speicherung durch reversible chemische Sorptions- oder Reaktionswärme.
Medium: Silicagele, Zeolithe.
Kapazität: **~300 kWh/m³.**
Charakteristik: Höchste Dichte (Langzeitspeicher), aber noch Forschungsbedarf.

Gemini Notebook

Symbiose: PVT-Hybridsysteme

Vorteile

- Höherer Flächenertrag gesamt.
- Optisch einheitliches Erscheinungsbild.
- Ideale Symbiose für begrenzte Dachflächen.



Das PVT-Prinzip: Solarzelle (oben) generiert Gleichspannung. Absorber (Rückseite, flüssigkeitsgekühlt) fängt Abwärme auf.

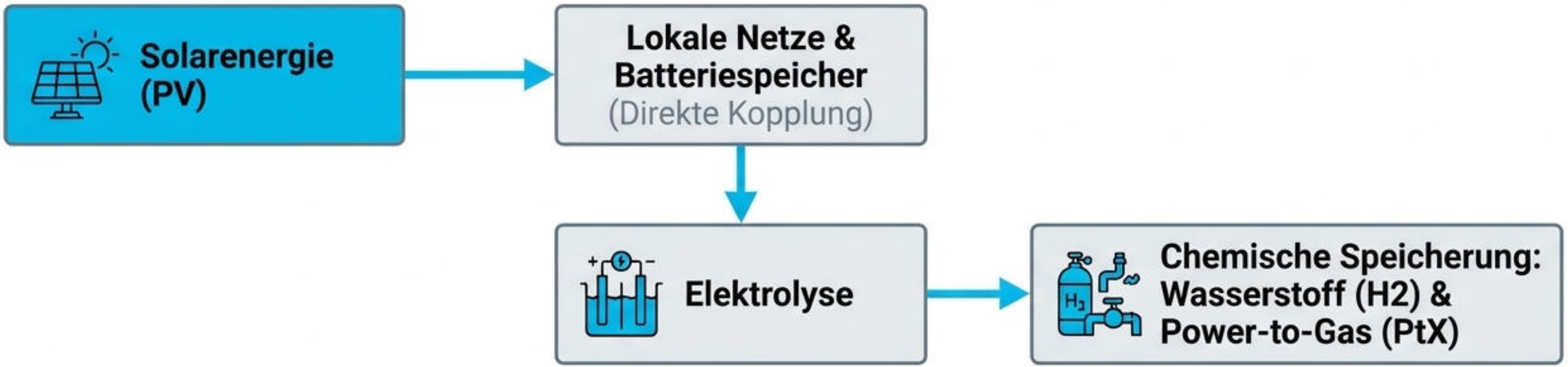
Effekt: Kühlung steigert den elektrischen Wirkungsgrad; erzeugt gleichzeitig Niedertemperaturwärme (90 °C – 120 °C) ohne Dampfbildung.

Herausforderungen

- Komplexes Wärmemanagement (Wärmeübergang Absorber/Zelle).
- Aktuell fehlende Massenproduktion (hohe Kosten).
- Erfordert Installation durch zwei getrennte Gewerke (Elektrik + Sanitär).

Gemini Notebook

Sektorenkopplung & Power-to-X (PtX)

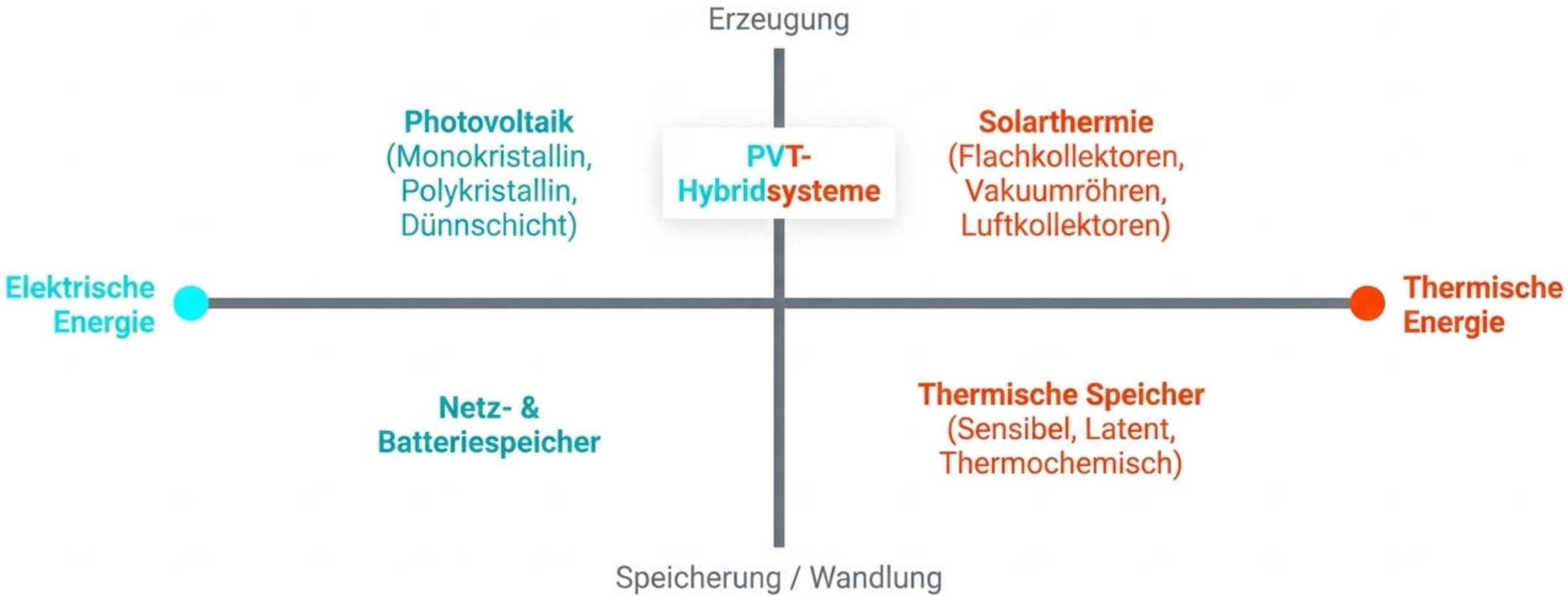


Das Grundlast-Dilemma

- **Die physikalische Grenze:** Solare Einstrahlung unterliegt unumgänglichen Tag-/Nacht- und Jahreszeiten-Zyklen.
- **Die Konsequenz:** PV liefert standortspezifisch nur eine Grundlastfähigkeit von 8 % bis 15 % (ca. 2500 – 3000 Volllaststunden).
- **Die Lösung:** Isolierter PtX-Betrieb ist ineffizient; erfordert zwingend die Integration von PV in "virtuelle Kraftwerke" (Verbund mit anderen Erneuerbaren).

Gemini Notebook

Die Solare Wertschöpfungskette



Sektorenkopplung & Power-to-X

Solarenergie erfordert ein integratives Systemverständnis – von der Quantenphysik des Photons bis zur makroökonomischen Sektorenkopplung.

Gemini Notebook