



Photovoltaik heute und morgen

Dr.-Ing. Martin Jilg
Großalmerode, 26.01.2023

Über mich

Dr.-Ing. Martin Jilg

- **2006 – 2011**
IHK-Ausbildung und Studium der Mechatronik
(B.Braun Melsungen / Universität Kassel)
- **2011 – 2016**
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
FG Regelungs- und Systemtheorie
(Universität Kassel)
- **2016 – heute**
Software Development Engineer bei SMA
(Niestetal)
- **2018 – heute**
Framework Architekt Modellbasierte Software-Entwicklung

Schwerpunkte bei SMA

- Modellbasierte Entwicklung
- Standardisierung von Funktionen
- Erstellung/Export von Modellen für Netzsimulatoren
- Regelung von netzgekoppelten Invertern
- Fault-Ride-Through

Über diesen Vortrag

- Privater Vortrag - geprägt durch SMA, aber keine SMA-Werbeveranstaltung
- Keine Gewähr für technische, steuerrechtliche oder finanzielle Aussagen
- Fragen bitte am Schluss, falls möglich
- Verwendung der gezeigten Inhalte nur für private Zwecke. Weitergabe, Veröffentlichung, kommerzielle Nutzung etc. nur nach Rücksprache!
- Kontakt: martinjilg@web.de

Photovoltaik – Zukunft heute und morgen



Bildquelle: SMA Solar Technology

- 1 Grundlagen** 15 min
Leistung, Energie, Wechselstrom, ...
- 2 Photovoltaik und Autarkie** 15 min
(Wie) hilft mir meine PV-Anlage bei Stromausfall?
- 3 Photovoltaik Speichersysteme** 25 min
Zahlen und Fakten rund um das Thema
Wirtschaftlichkeit von Speichern
- 4 Energiemanagement für Zuhause** 10 min
Funktionsweise und Beispiele
- 5 Photovoltaik-Trends** 10 min
Wie sehen die PV-Anwendungen von morgen aus?

Grundlagen

Grundlagen

- **Unterschied Photovoltaik und Solarthermie**
- Unterschied DC und AC – Wofür benötigt man Wechselrichter?
- Elektrische Energie vs. Elektrische Leistung
- Leistungsbilanz im Stromnetz




- **Solarthermie:** Sonneneinstrahlung → Warmwasser (für Heizung / Brauchwasser)
- Typischer Flächenbedarf 4...10qm (ca. 50% Wirkungsgrad bzw. 500W/qm)

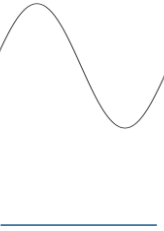


- **Photovoltaik:** Sonneneinstrahlung → Elektrischer Strom
- Typischer Flächebedarf 15...50qm (ca. 20% Wirkungsgrad bzw. 200W/qm)

[Solarthermieanlage Leistung - Wirkungsgrad, Deckungsgrad, Nutzungsgrad \(heizsparer.de\)](http://heizsparer.de)

Grundlagen

- Unterschied Photovoltaik und Solarthermie
 - **Unterschied DC und AC – Wofür benötigt man Wechselrichter?** 
 - Elektrische Energie vs. Elektrische Leistung
 - Leistungsbilanz im Stromnetz
- Das Stromnetz ist als Wechselstromsystem (*Alternating Current, AC*) ausgeführt
 - Strom und Spannung wechseln 50-mal pro Sekunde das Vorzeichen
 - Photovoltaik-Module liefern Gleichstrom (*Direct Current, DC*)
 - Gleichstrom kommt häufig bei batteriebetriebenen Geräten zum Einsatz
 - Ein Wechselrichter wandelt Gleich- in Wechselstrom um. Zusätzlich...
 - ...bestimmt er kontinuierlich den Arbeitspunkt der optimalen Leistungsausbeute der PV-Module (*Maximum Power Point, MPP*)
 - ...gewährleistet er den sicheren Betrieb der PV-Anlage (AFCI, RCD)
 - ...reduziert er bei Bedarf die Leistungsausbeute der PV-Module
 - ...zeichnet er Messdaten auf und kommuniziert mit anderen Systemgeräten



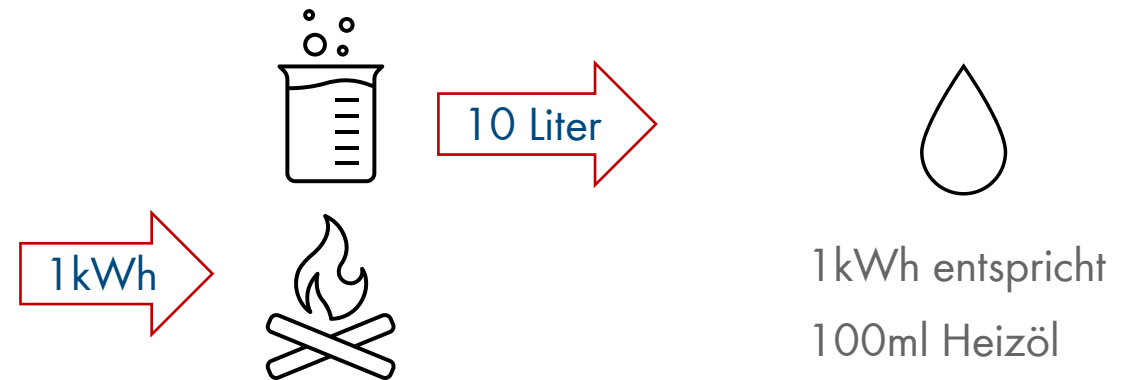
Grundlagen

- Unterschied Photovoltaik und Solarthermie
- Unterschied DC und AC – Wofür benötigt man Wechselrichter?
- **Elektrische Energie vs. Elektrische Leistung**
- Leistungsbilanz im Stromnetz



Energie:

- Wie viele Liter Wasser lassen sich mit 1kWh Energie zum Kochen bringen?



Leistung:

- In welcher Zeit wird das Wasser zum Kochen gebracht?
- 6 Minuten: $1\text{kWh} / (1/10\text{h}) = 10\text{kW}$

[Heizwert und Brennwert von Heizöl \(totalenergies.de\)](http://totalenergies.de)

[Spezifische Wärmekapazität - Wikipedia](https://de.wikipedia.org/wiki/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t)

Grundlagen

- Unterschied Photovoltaik und Solarthermie
- Unterschied DC und AC – Wofür benötigt man Wechselrichter?
- Elektrische Energie vs. Elektrische Leistung
- **Leistungsbilanz im Stromnetz**

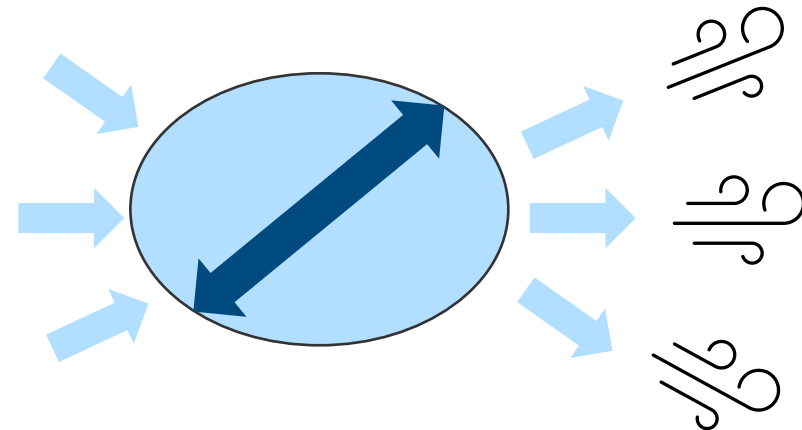


Leistungsbilanz im Stromnetz

- Die Leistungsbilanz im Stromnetz muss stets ausgeglichen sein, d.h.
- Die erzeugte elektrische Leistung muss der verbrauchten Leistung entsprechen

Analogie zur Leistungsbilanz

- Ballon, der über mehrere Einlässe mit Luft gefüllt wird (Erzeuger)
- Gleichzeitig verliert er über mehrere Auslässe Luft (Verbraucher)
- Ziele: Die Ausdehnung des Ballons soll möglichst konstant bleiben





Photovoltaik und Autarkie

Photovoltaik und Autarkie: Not- und Ersatzstromsysteme

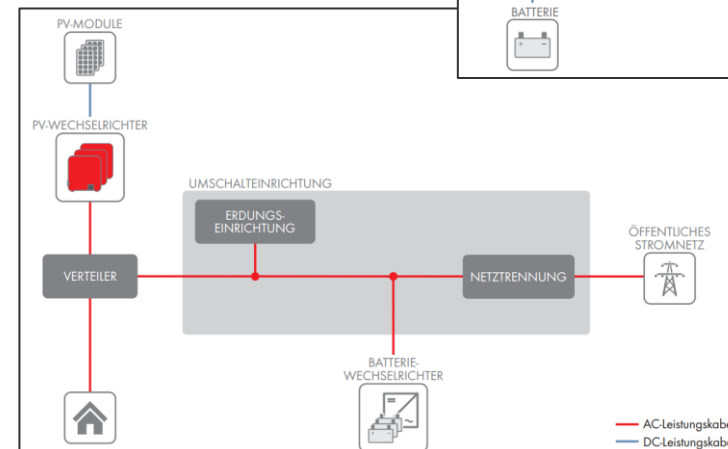
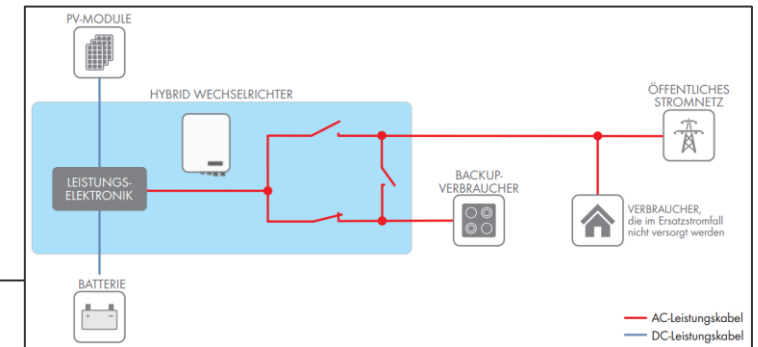
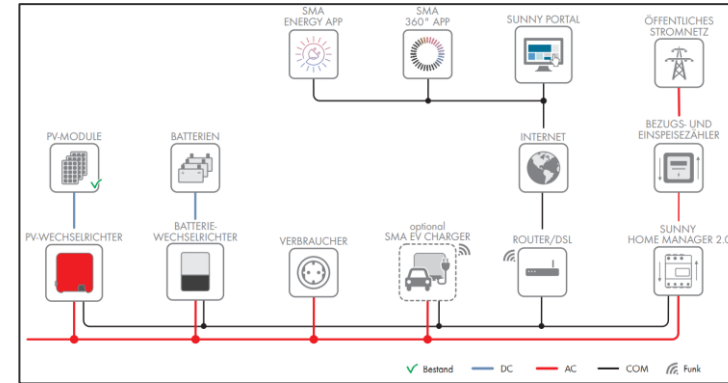
Häufige Frage: Liefert meine PV-Anlage bei Stromausfall weiterhin Strom?

- Für den Großteil der PV-Anlagen im Heimbereich (auch mit Speicher) gilt: **Nein!**
- Grund: Die meisten PV-Anlagen sind **netzgeführt**

Drei Kategorien von PV-Anlagen:

- **Netzgeführt:** Anlage läuft nur bei vorhandener Netzspannung.
- **Notstromfähig:** Separate Steckdose oder einzelne Verbraucher funktionieren auch ohne Netzspannung. Speicher ist optional.
- **Ersatzstromfähig:** Versorgung eines kompletten (Teil-)Gebäudes unabhängig vom Stromnetz. Erfordert fast immer einen Speicher.

→ Not- und ersatzstromfähige PV-Anlagen können **netzbildend** arbeiten. Dafür müssen sie bei Stromausfall vom Stromnetz getrennt werden.



Bildquelle: SMA Solar Technology

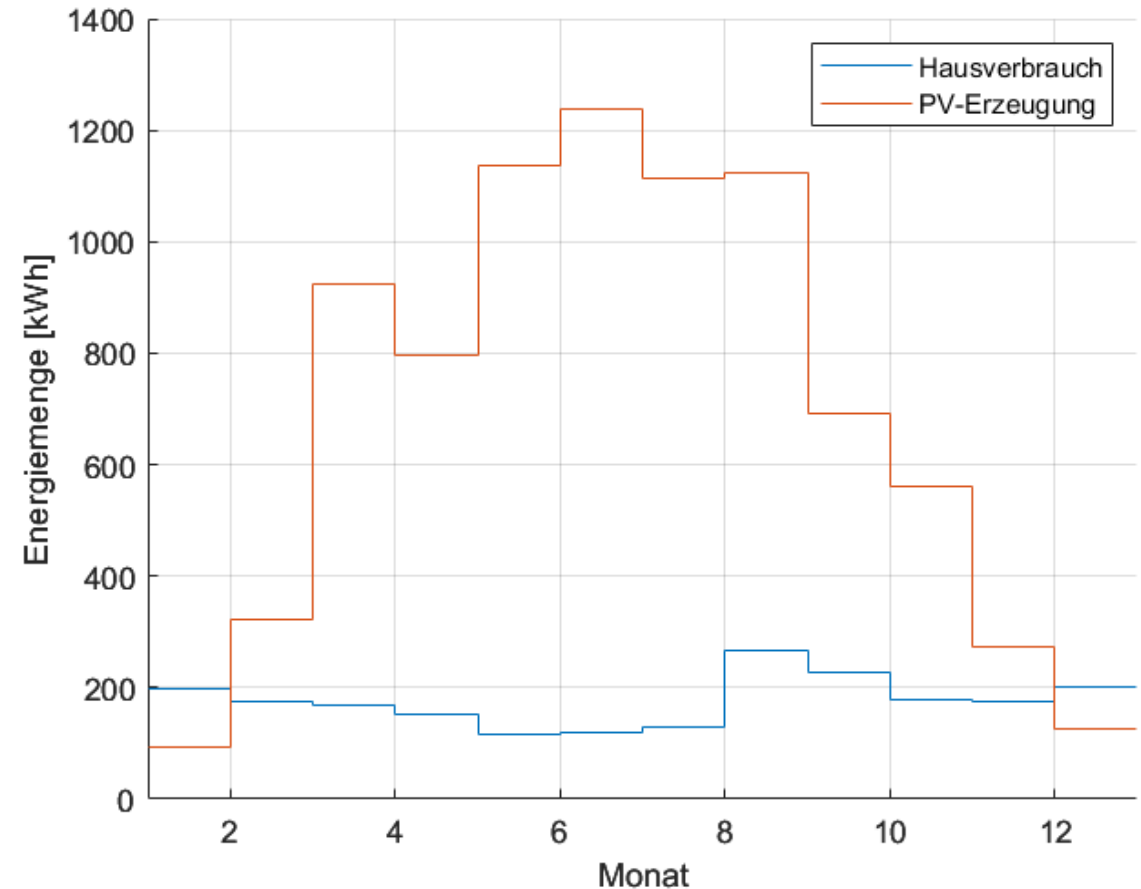
Photovoltaik und Autarkie

Netzgeführte PV-Anlage: Keine Unabhängigkeit vom Stromnetz, aber finanziell lohnenswerte Unabhängigkeit vom Strompreis!

- Mit einer typischen PV-Anlage im Heimbereich kann man:
 - Über 300% des jährlichen Energiebedarfs* selbst erzeugen
Jährliche Energiebilanz
 - Über 50% des jährlichen Energiebedarfs aus selbst erzeugter Energie beziehen
Energetische Autarkie
 - Über 35 % der Zeit eines Jahres den Energiebedarf mit selbst erzeugter Energie decken
Zeitliche Autarkie

Zur weiteren Steigerung der energetischen und zeitlichen Autarkie muss die von der PV-Anlage gewonnene Energie gespeichert werden!

*Reine elektrische Energie ohne Heizenergie

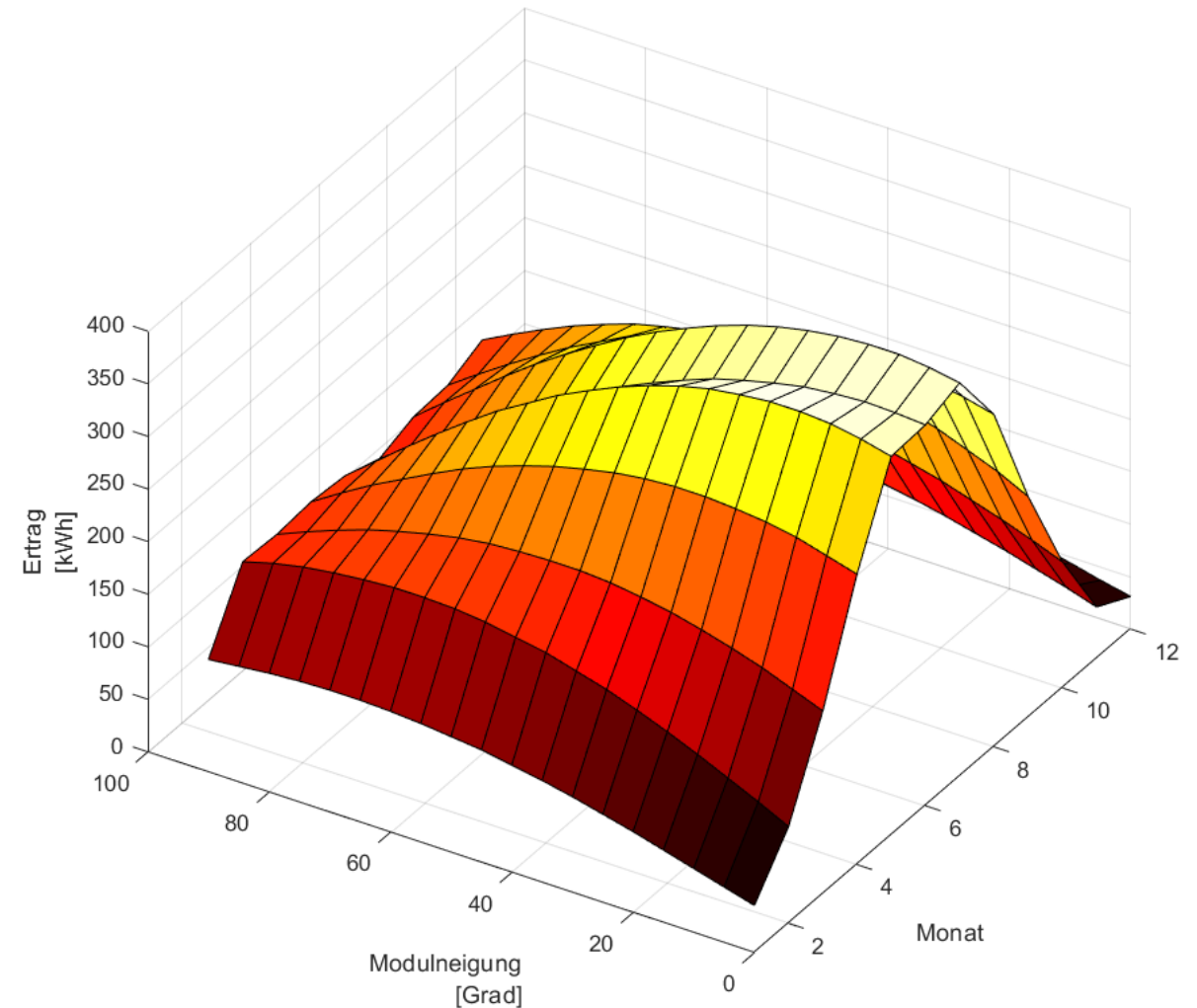


Photovoltaik und Autarkie

Praxisbeispiele zeigen, dass zeitliche und energetische Autarkie mit Photovoltaik samt Speicher möglich ist (Fam. Delzer in Lörrach)

- Auslegung in Abhängigkeit des tatsächlichen Bedarfs anstatt Auslegung auf jährlichen Maximalertrag
- 25qm Solarbaum mit zweiachsiger Nachführung und Wandmodule (kein Schnee, weniger Schmutz) anstatt feste Aufdachanlage (3.6kWp)
- Photovoltaik-Speicher mit 24V Batterien
- Diesel-Generator mit Kraft-Wärmekopplung für den Notfall (wird ca. 50 bis 100 Stunden im Jahr benötigt)
- Heizen mit Holz und direkter Sonneneinstrahlung

[30 Jahre ohne Strom vom Netz - Eine Familie lebt autark | deutschlandfunk.de](http://deutschlandfunk.de)
[Wie auf der Insel: Zweifamilienhaus in Lörrach ist seit 30 Jahren unabhängig vom Stromnetz - pv magazine Deutschland \(pv-magazine.de\)](http://pv-magazine.de)





Photovoltaik- Speicher

Photovoltaik-Speicher: Wirtschaftlichkeit

Direkte Einflussgrößen

- Anschaffungskosten
 - Spezifische Kosten des Speichers (Euro/kWh)
 - Zubehör (Wechselrichter, Energy-Meter, Kabel, ...)
 - Installationsaufwand
- Speicherkapazität
- Maximale Lade-/Entladeleistung
- Wirkungsgrad
- Lebensdauer

Indirekte Einflussgrößen

- Strompreis(-entwicklung) für den Netzbezug
- Höhe der PV-Einspeisevergütung
- Umsatzsteuer auf den Eigenverbrauch
- Energieerzeugungsprofil
- Energieverbrauchsprofil
- Energiemanagementsystem

Photovoltaik-Speicher: Simulation

Simulation einer virtuellen Batterie

- Basierend auf Ertrags- und Verbrauchsmessungen (10 Min Takt)
- Wie wirken sich die Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit aus?

Szenario: Einfamilienhaus mit PV-Aufdachanlage

- PV-Generator 1: Süd-Ost 4340 Wp
- PV-Generator 2: Süd-West 3100 Wp
- Dachneigung 25 Grad
- Elektrischer Energiebedarf (2022): 2108 kWh
- PV-Energieertrag (2022): 8398 kWh

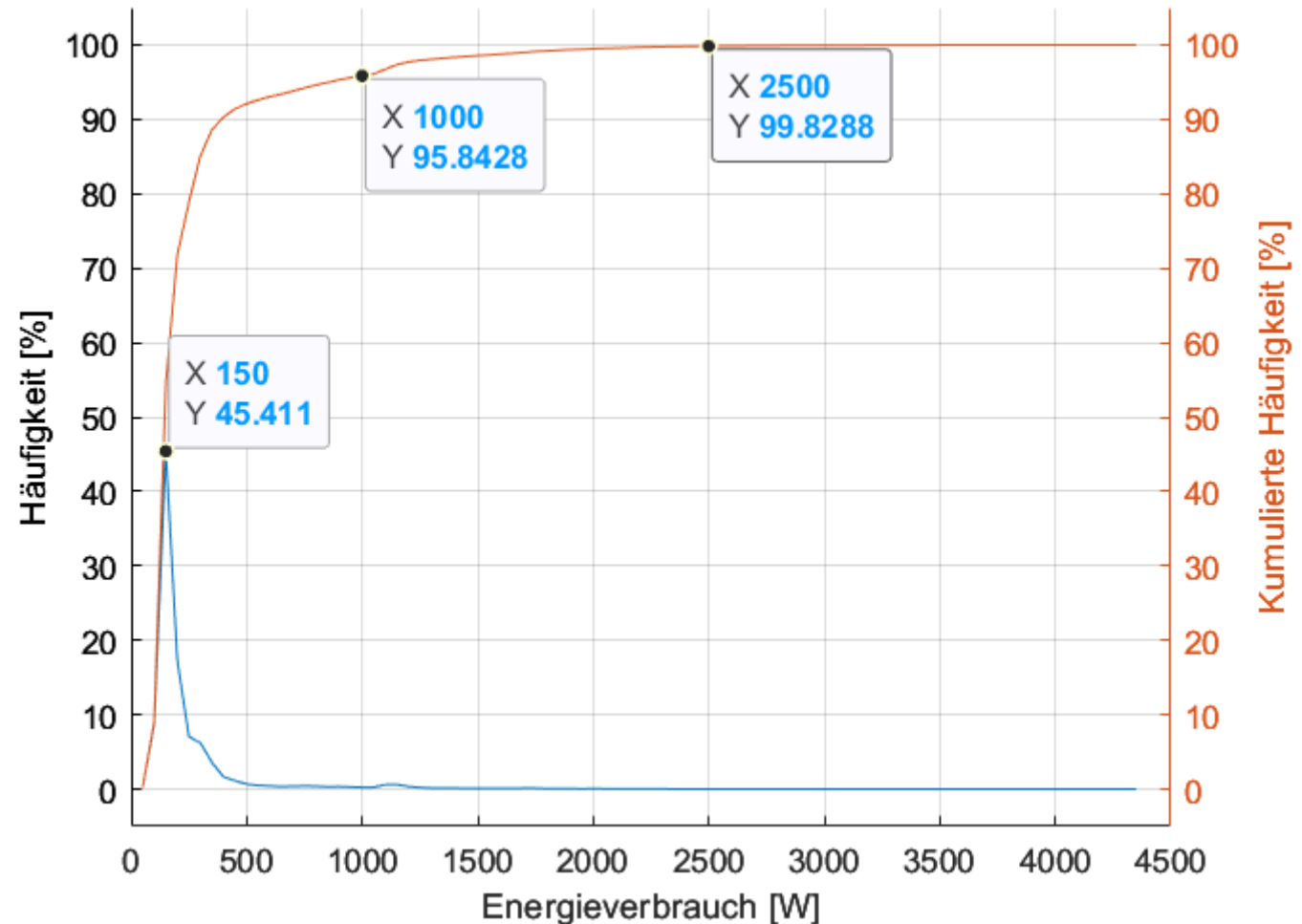


Bildquelle: Google Maps

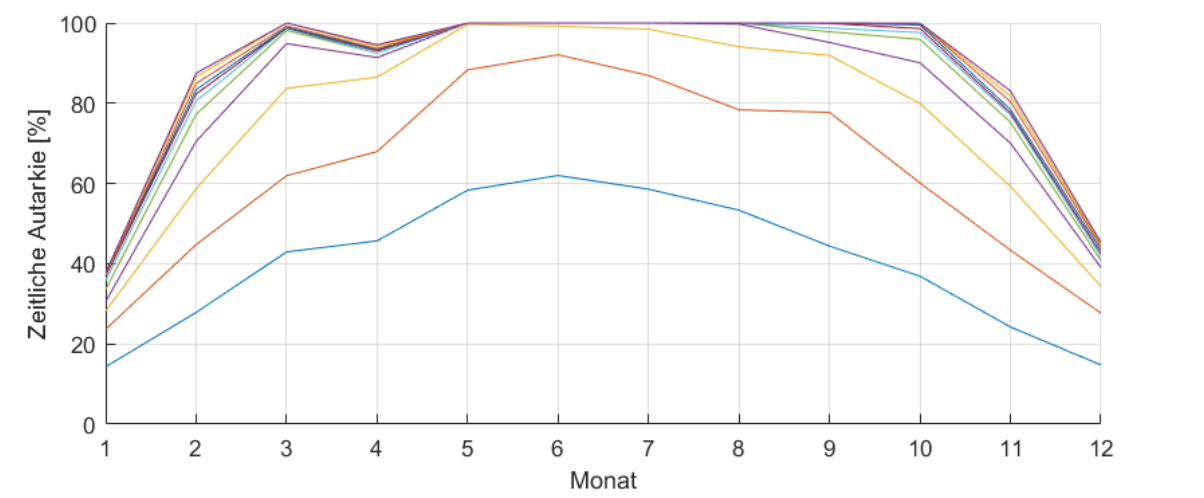
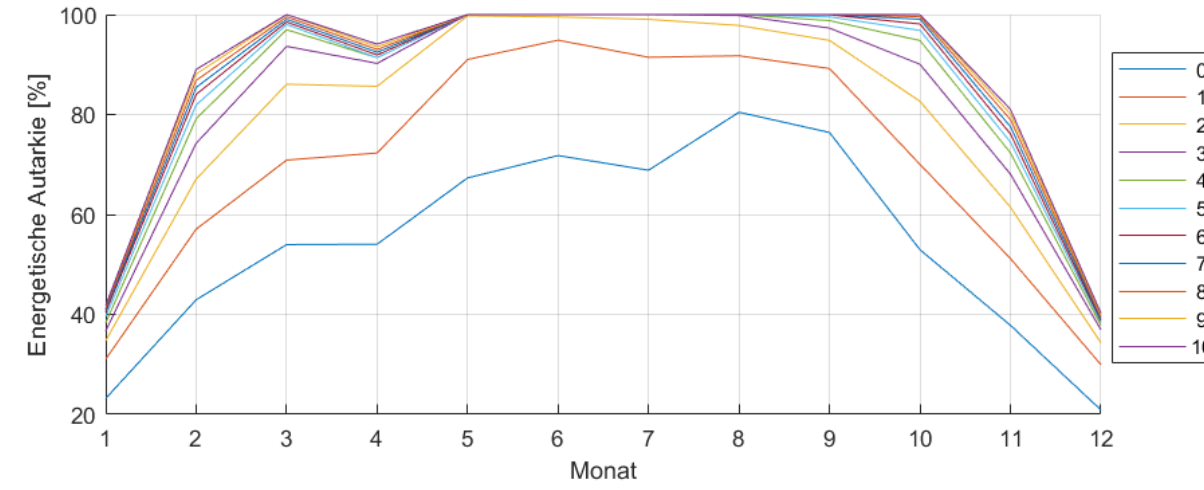
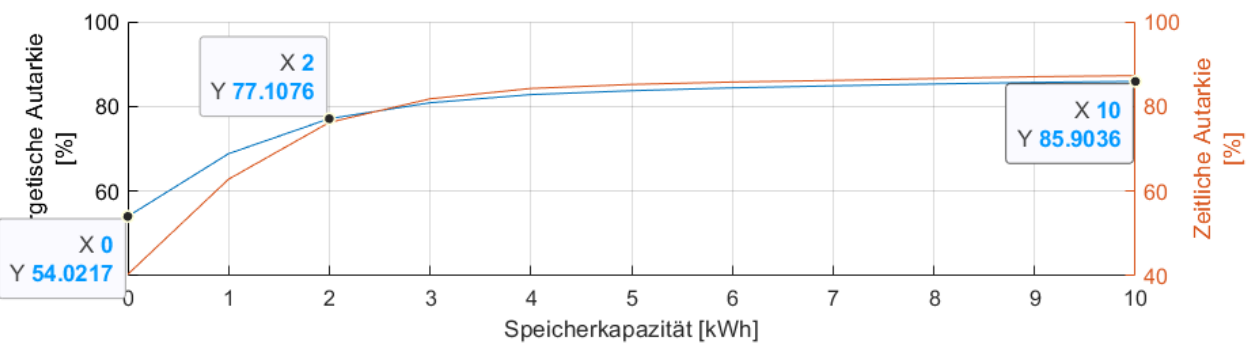
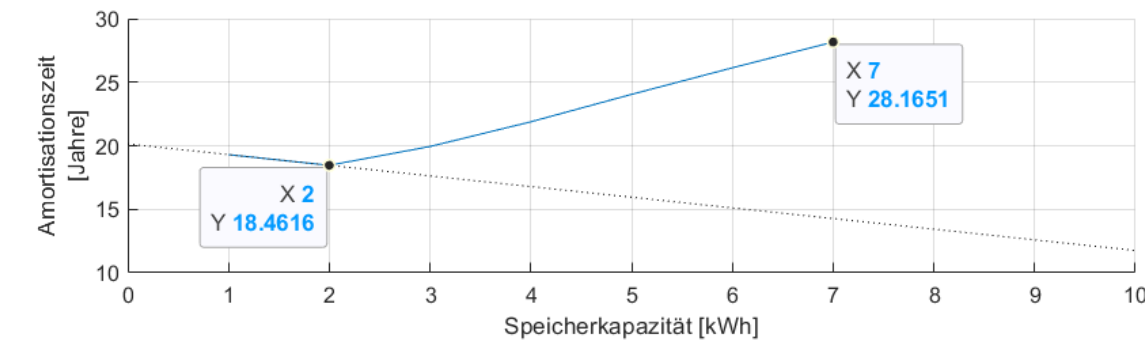
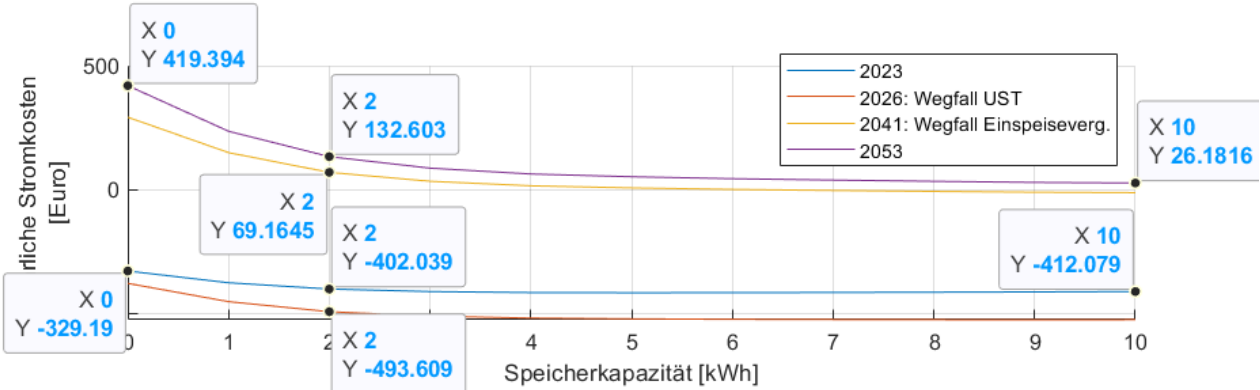
Photovoltaik-Speicher: Simulation

Randbedingungen

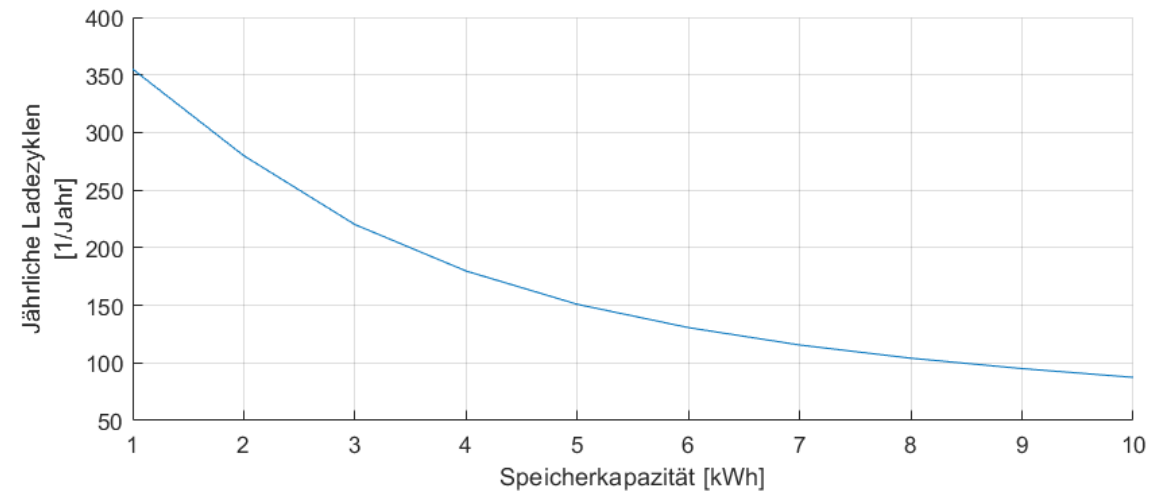
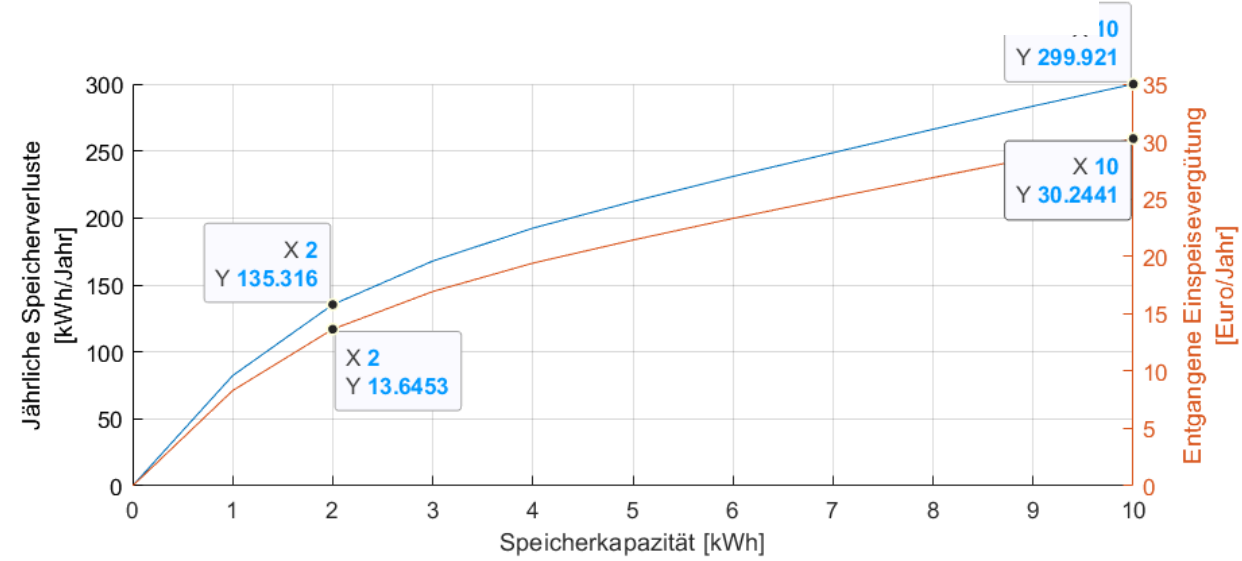
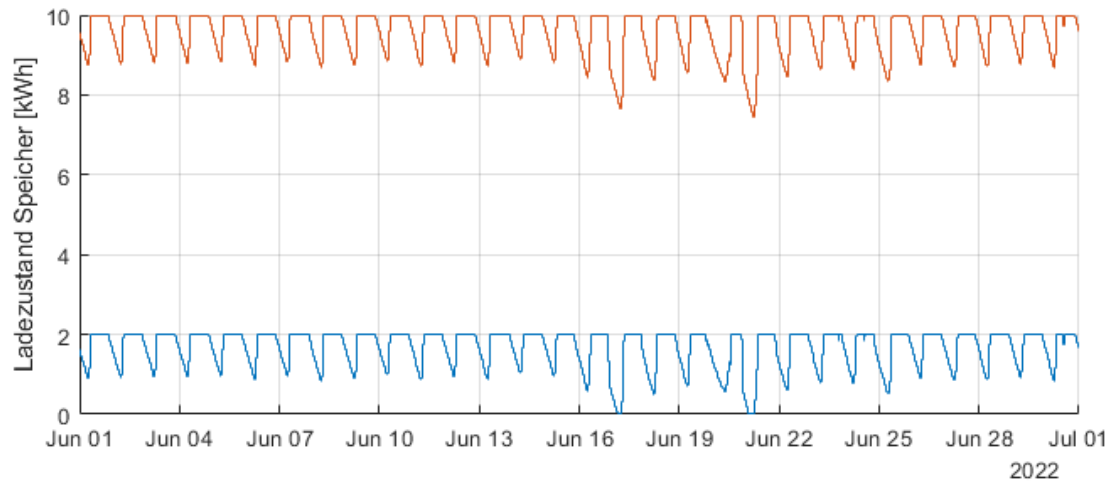
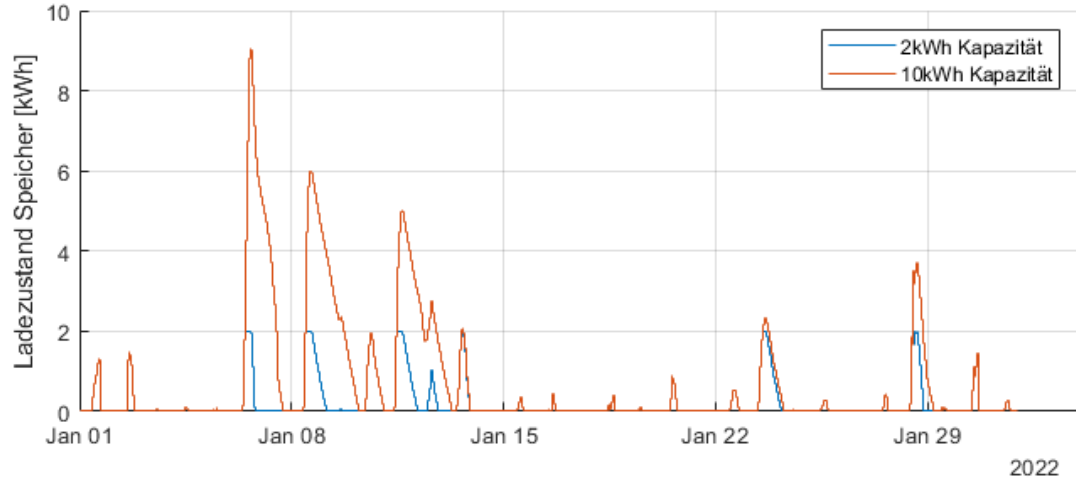
- Strombezugspreis: 35 Ct/kWh + 2% p.a.
- Einspeisevergütung: 10,08 Ct/kWh (17 Jahre)
- UST Eigenverbrauch: 19% des Strombezugspreises (2 Jahre)
- Anschaffungskosten: 800€/kWh (DC-gekoppelter Speicher) plus 1000€ Einmalkosten
- Wirkungsgrad Lade-/Entladevorgang: 90% / 90%
- Selbstentladung: 4% pro Monat (Quelle: [Umweltbundesamt](#))
- Lade-/Entladeleistung: 2500W / 2500W



Photovoltaik-Speicher: Simulation



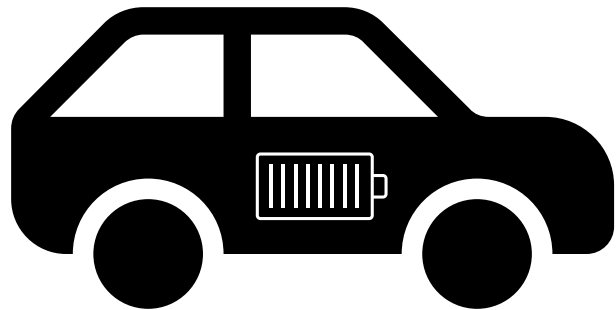
Photovoltaik-Speicher: Simulation



Photovoltaik-Speicher: Simulation (E-Auto)

Angenommene Eckdaten Elektroauto

- Stromverbrauch im Fahrbetrieb: 16kWh / 100km (inkl. Ladeverluste)
- Batteriekapazität: 70kWh
- Reichweite: 437km
- Maximale Ladeleistung im Eigenheim: 3680W



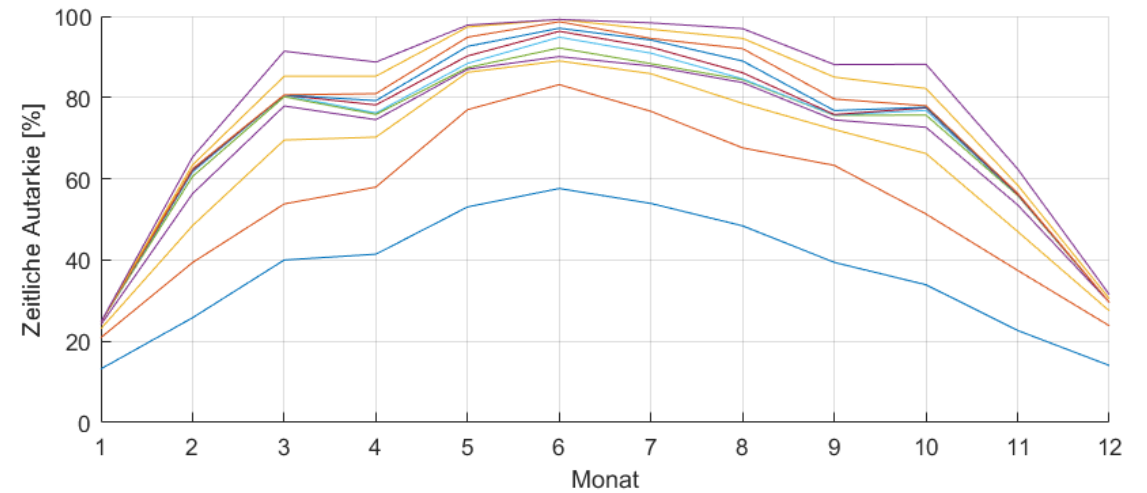
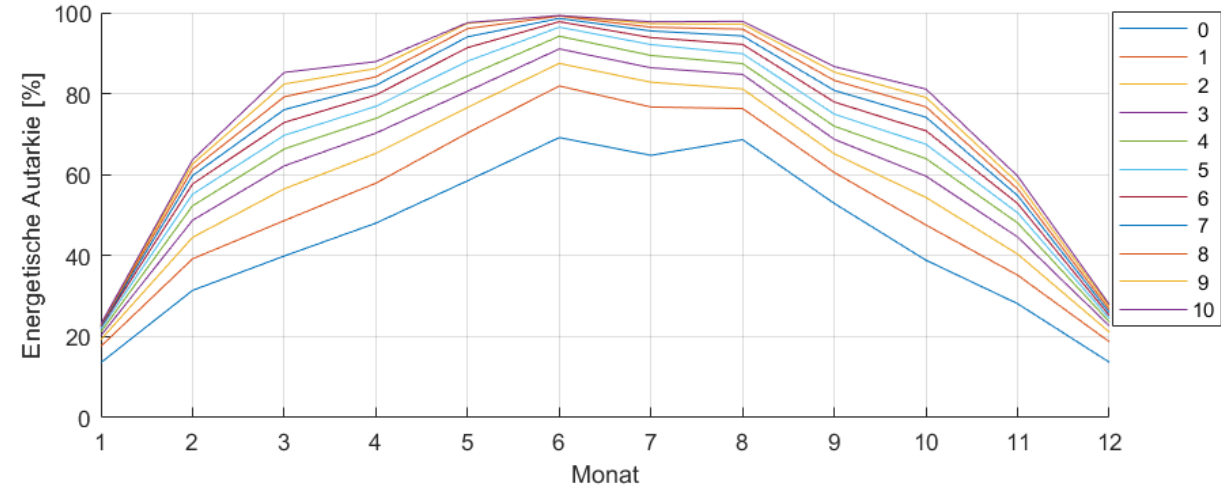
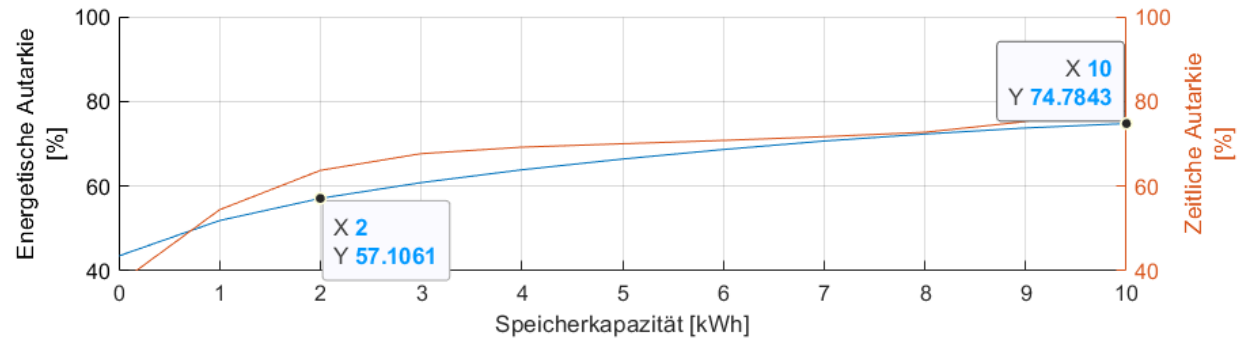
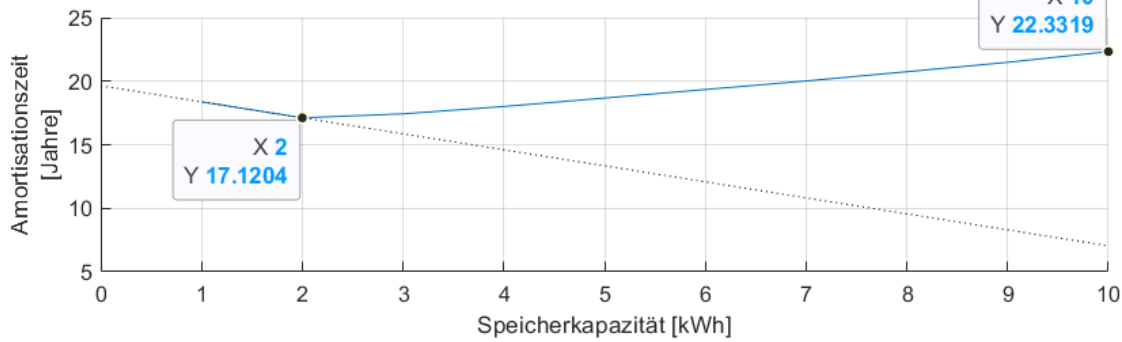
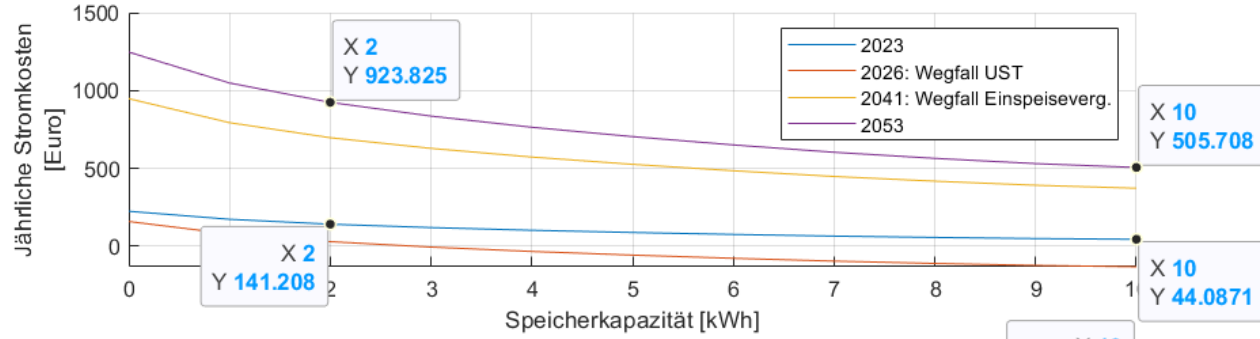
Wöchentliches Ladeprofil

- 3x Wöchentlich, insgesamt 11 Stunden
- Davon 2x wöchentlich 18 - 21 Uhr
- Einmal wöchentlich 9 - 14 Uhr

Jahreswerte

- Strombedarf: 1920kWh
- Laufleistung: 12.000km
- Ladezyklen pro Jahr: 27,5

Photovoltaik-Speicher: Simulation (E-Auto)



Vergleich mit einem Online-Rechner

Ergebnisse der eigenen Simulation:

- Speicherkapazität mit der kürzesten Amortisationszeit: 2kWh
- (Energetischer) Autarkiegrad: 77,1%
- Eigenverbrauchsanteil:
 - $77,1\% * 2108\text{kWh} / 8398\text{kWh} = 19,35\%$

Jahresstromverbrauch ⓘ

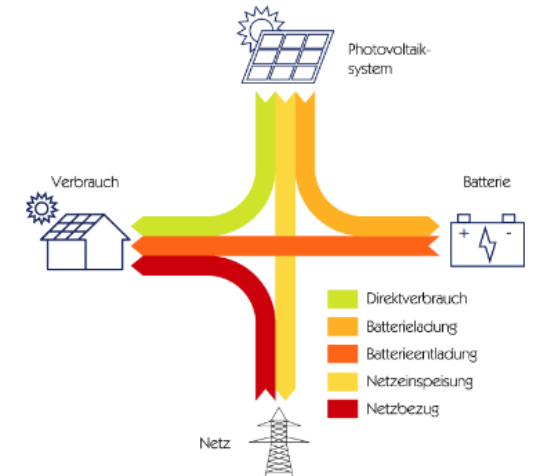
2100 kWh

Photovoltaikleistung ⓘ

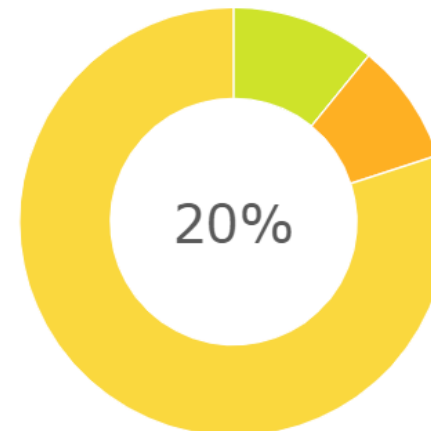
7.4 kWp

Nutzbare Speicherkapazität ⓘ

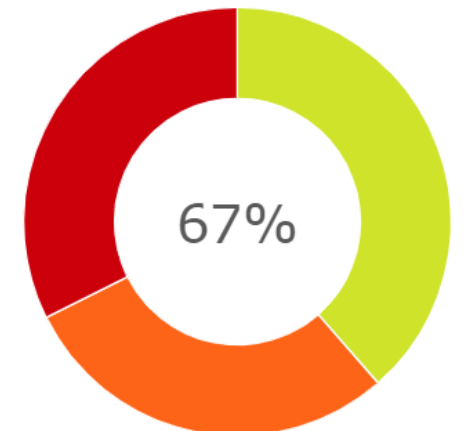
2 kWh



Eigenverbrauchsanteil ⓘ



Autarkiegrad ⓘ

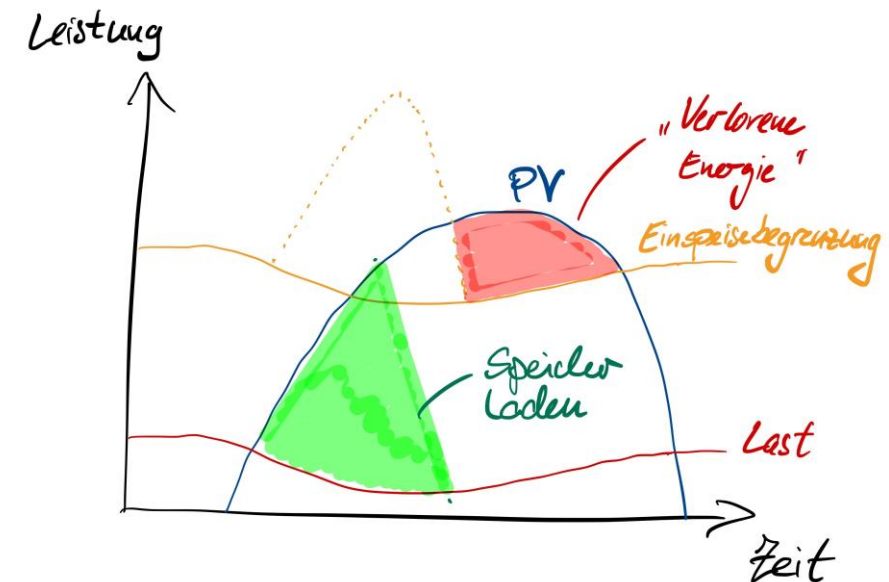
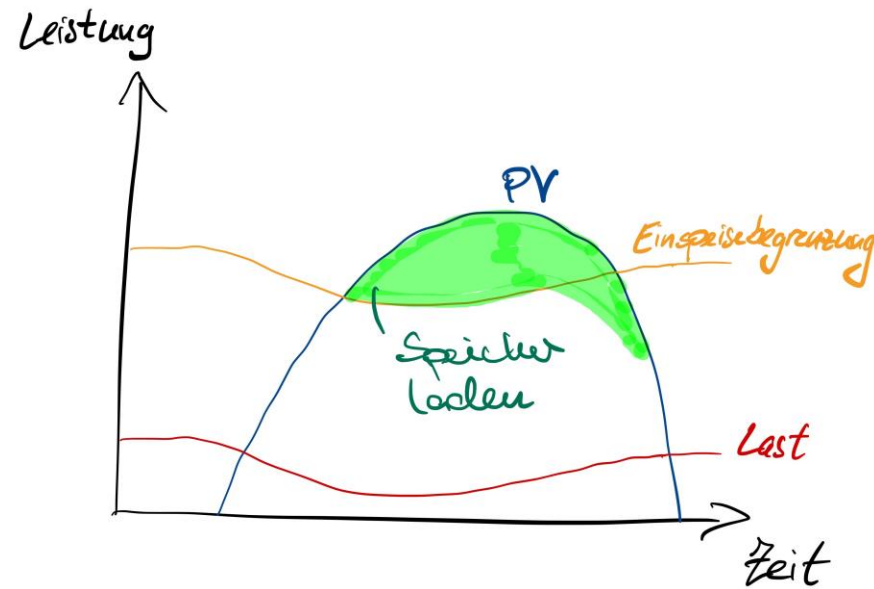




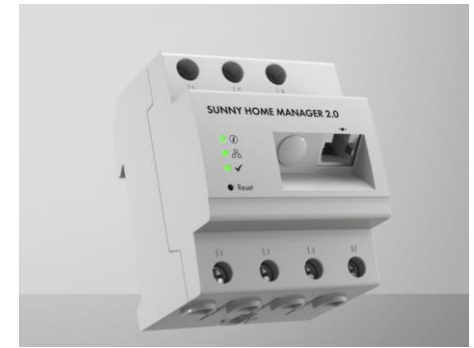
Energie- management

Energiemanagement: Was bedeutet das?

- Automatisierte Abstimmung des Energiebedarfs auf das Energieangebot
- Verbraucher einschalten, wenn genügend PV-Energie vorhanden ist
- Verbraucher ausschalten, wenn zu wenig PV-Energie vorhanden ist
- PV-Energie speichern, wenn ein Überschuss vorhanden ist (Ideal: Gewinnung nicht nutzbarer PV-Energie durch Speicherung)
- Gespeicherte PV-Energie abrufen, wenn diese benötigt wird
- Ziele:
 - Minimierung der laufenden Energiekosten
 - Möglichst wenig Einschränkungen beim gewohnten „Komfort“

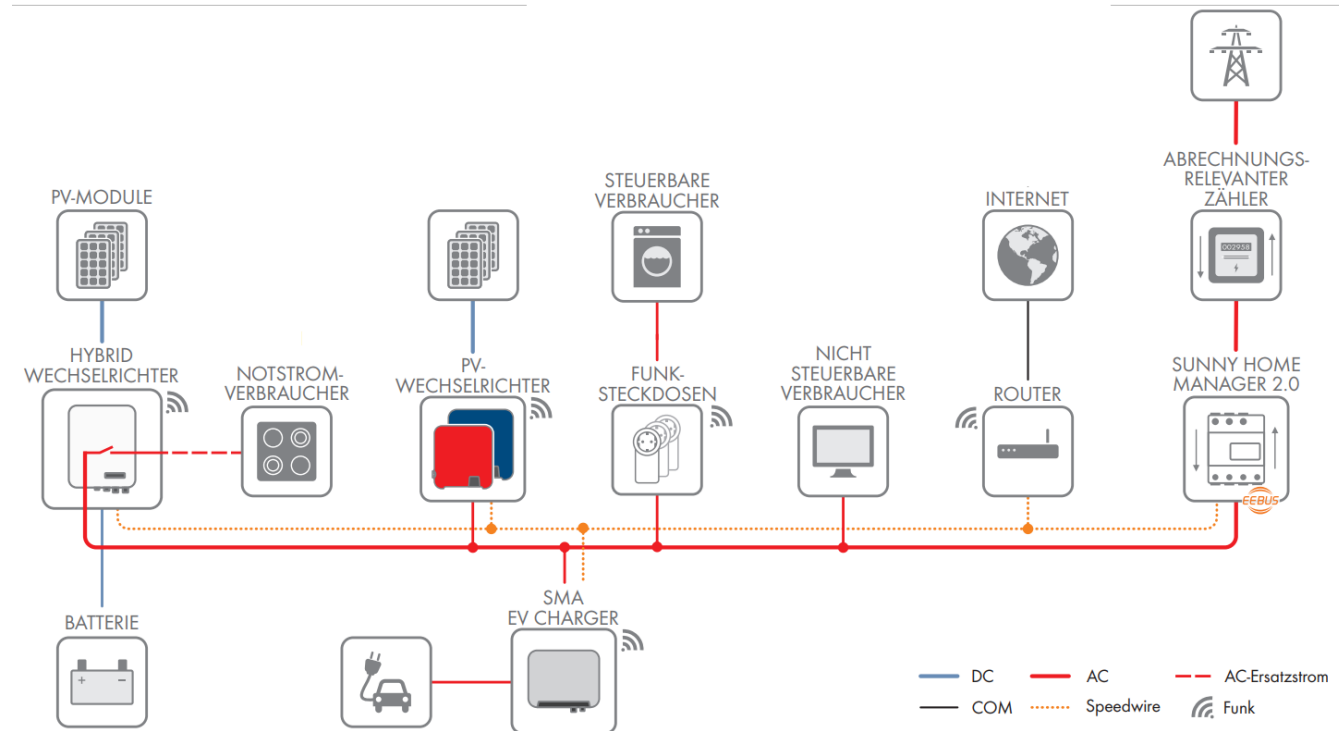


Energiemanagement: Sunny Home Manager



SUNNY HOME MANAGER 2.0 (sma.de)

- Kompaktes Hutschienengerät – Montage im Zählerkasten
- Messung der Leistung am Netzanschlusspunkt
- Kombination aus Leistungsmessgerät, Energiezähler und Energie-Manager
- Erstellt Prognosen für
 - Erwarteten Photovoltaik-Ertrag
 - Optimale Batterienutzung für die nächsten 48 Stunden
- Ansteuerung von einfachen Verbrauchern über Funksteckdosen
- Ansteuerung von intelligenten Verbrauchern über SEMP oder EEBUS Protokoll
- Priorisierung von Verbrauchern
- Festlegung von Regeln für die Nutzung von Verbrauchern



Energiemanagement: Verbrauchertypen

- **Geschaltete Verbraucher**

- **Programmgesteuerte Verbraucher**

- Durchläuft ein festes Programm, welches nicht unterbrochen werden darf
 - Auswahl und Start des Programms durch den Benutzer
 - Beispiele: Waschmaschine, Geschirrspülmaschine
 - Voraussetzung für SHM: Programm muss nach einmaliger Unterbrechung an der entsprechenden Stelle weiterlaufen

- **Nicht-programmgesteuerte Verbraucher**

- Beliebig ein- und ausschaltbarer Verbraucher
 - Flexibler Einschaltzeitpunkt
 - Beispiele: Warmwasser Heizstab, Elektroheizung, Elektroauto-Ladestation

- **Direkt kommunizierender Verbraucher**

- Datenaustausch mit SHM über EEBUS oder SEMP Protokoll
 - Verbrauchertyp
 - Energiebedarf
 - Gewünschter Betriebszeitraum
 - Daten können sich mehrfach am Tag ändern
 - Anschluss über LAN oder WLAN
 - Beispiele: SMA EV-Charger, Wärmepumpe mit EEBUS Schnittstelle



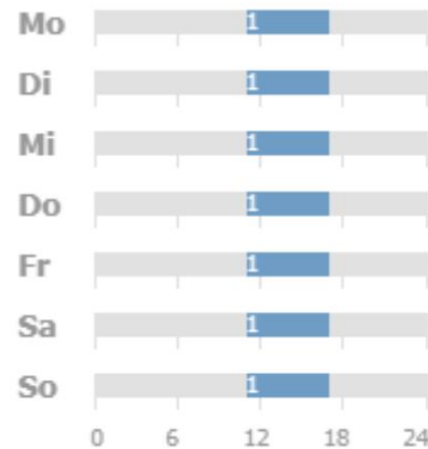
Energiemanagement: Beispielkonfiguration

Verwerfen

Zeitfenster konfigurieren (Anzahl: 1)

Übernehmen

Zeitfensterübersicht



Verbrauchername:

Selbst konfiguriert



Zeitfenster hinzufügen

(1) Verbraucher läuft:

täglich

Nur an folgenden Wochentagen

Verfügbares Zeitfenster für den Betrieb des Verbrauchers (Länge des Zeitfensters: 6h)

11 : 00 Uhr bis - 17 : 00 Uhr

Betriebsdauer des Verbrauchers im Zeitfenster: 355 Minuten

Verbraucher MUSS laufen **i**

Verbraucher KANN laufen **i**

Verbraucher wird eingeschaltet abhängig von:

Anteil der PV-Energie

Maximal erlaubte Energiekosten



-- Begrenzung der Wirkleistungseinspeisung

Netzbezug:

0 %

PV-Erzeugung:

97 %

Überschüssige PV-Energie:

3 %



Photovoltaik- Trends

Photovoltaik-Trends: Agri-PV



Bildquelle: SMA Solar Technology

Agri-PV:

Kombination von Photovoltaik
und landwirtschaftlicher Nutzfläche

Doppelnutzung einer Fläche
 $80\% \text{ Strom} + 85\% \text{ Ernte} = 165\% \text{ Ertrag}$

Photovoltaik-Trends: Agri-PV

- Module schützen Pflanzen und Menschen vor Wetterextremen (Sonne, Regen, Hagel, Frost, Wind)
- Auffangen von Regenwasser und gezielte Beregung unterhalb der Module
- Geringerer Wasserbedarf durch Beschattung
- Steuerbare Module um Einstrahlung gezielt an Reifephasen anzupassen



Bildquelle: SMA Solar Technology



Photovoltaik-Trends: Floatovoltaics



Floatovoltaics:

Schwimmende Photovoltaikmodule oder
Überbauung von Gewässern mit PV-
Modulen

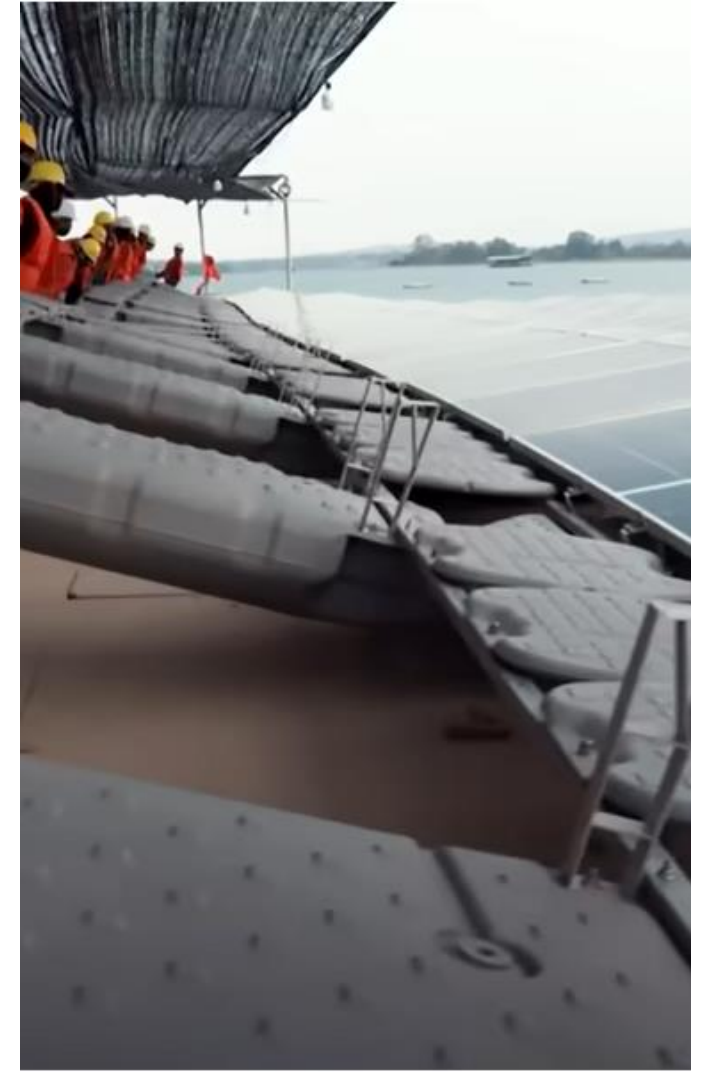
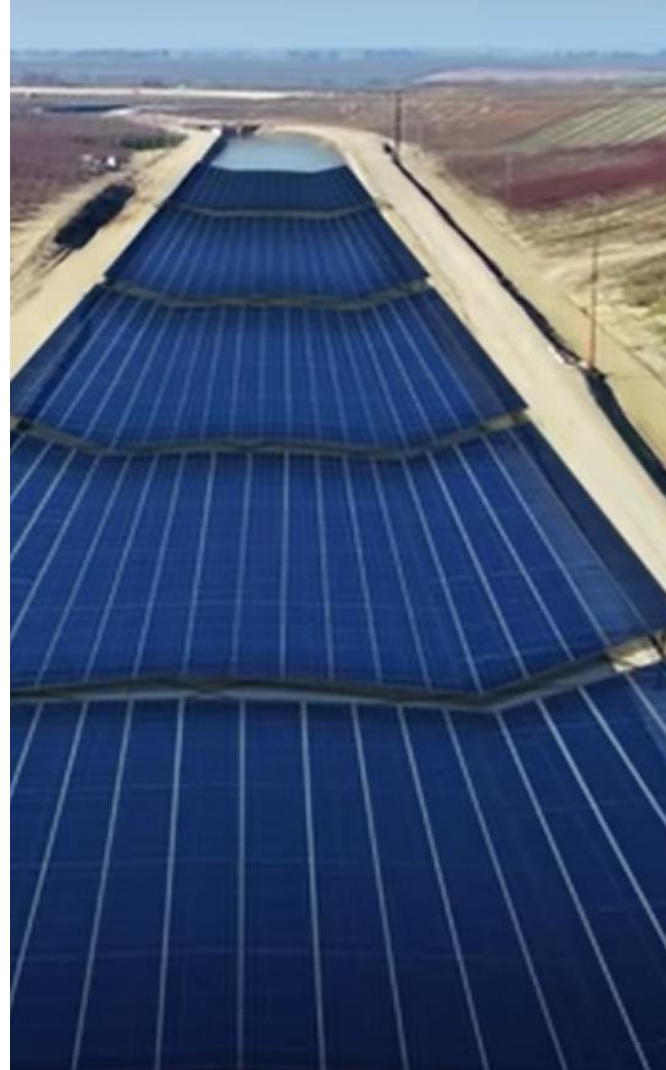
Schutz vor Austrocknung
und bessere Kühlung der Module

Youtube: [DW Planet A: Why we should be putting solar panels on our fields and lakes](#)

Youtube: [How Solar Panels Can Help Solve California's Drought - YouTube](#)

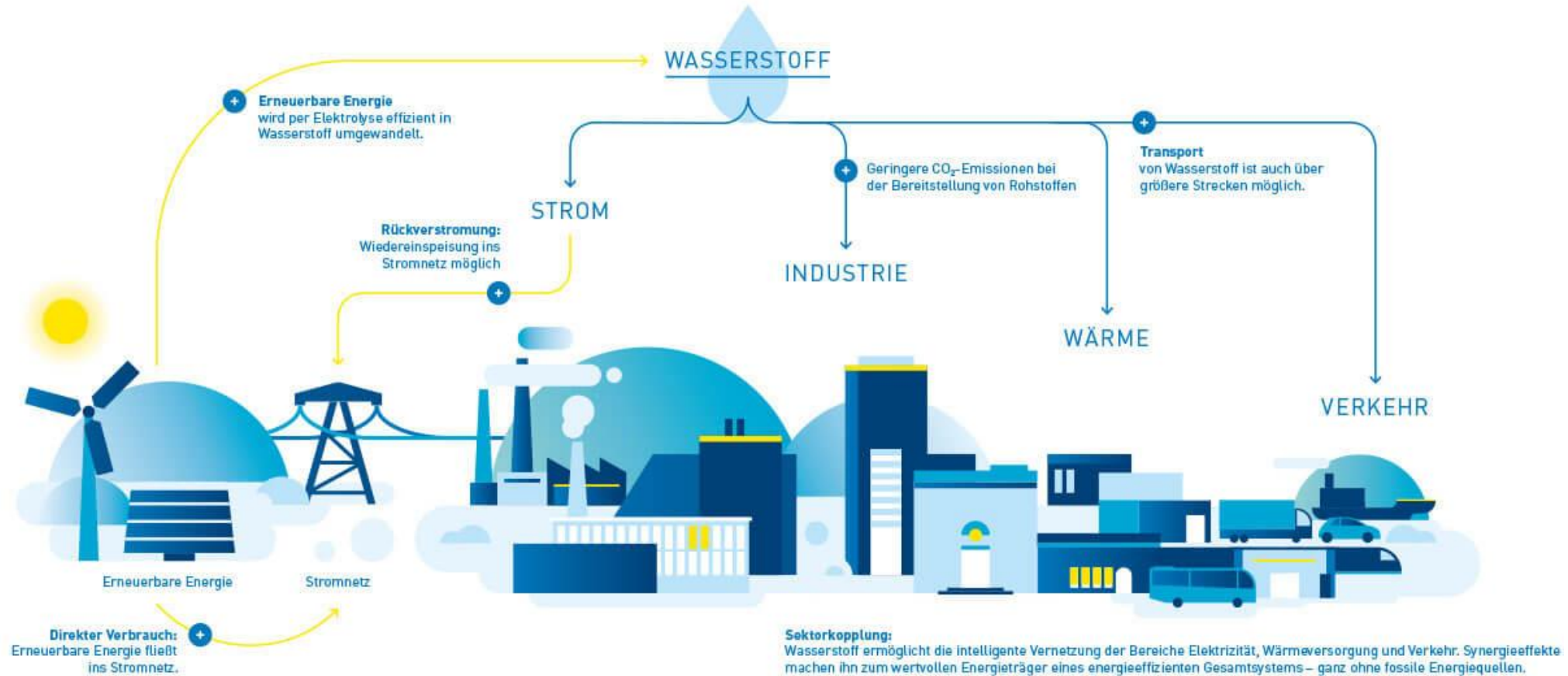
Photovoltaik-Trends: Floatovoltaics

- Tendenziell ruhige Gewässer (Seen, Reservoirs, Flüsse)
- Ideal in Verbindung mit Pumpspeicherkraftwerken
- Reduktion von Algenwachstum
- Wasserqualität: Überwiegend positive Studienergebnisse



Youtube: DW Planet A: Why we should be putting solar panels on our fields and lakes
[Youtube: How Solar Panels Can Help Solve California's Drought - YouTube](#)

Photovoltaik-Trends: Grüner Wasserstoff



Photovoltaik-Trends: Grüner Wasserstoff

Vorteile

- Speicherung großer Energiemengen über lange Zeiträume möglich
- Gut skalierbar
- Transportabel
- Vielseitige Verwendung
 - Rückverstromung (Brennstoffzelle)
 - Verwendung in vielen chemischen (Vor-)Prozessen (z.B. Herstellung von Düngemitteln, Kunststoffen, synthetischen Kraftstoffen)
 - Direkte Verbrennung (z.B. für Stahl- und Zementherstellung)

Nachteile

- Herausforderung: Sichere Lagerung und Transport
- Zusätzlicher Energieaufwand für Verdichtung / Verflüssigung
- Niedriger Gesamtwirkungsgrad von 25 bis 35% bei Rückverstromung
 - Strom → Wasserstoff: 70%
 - Wasserstoff → Strom: 35 bis 50%
- Laut Meinung vieler Experten zu teuer für Heim- und PKW-Anwendungen

Weitere Referenzen und Empfehlungen

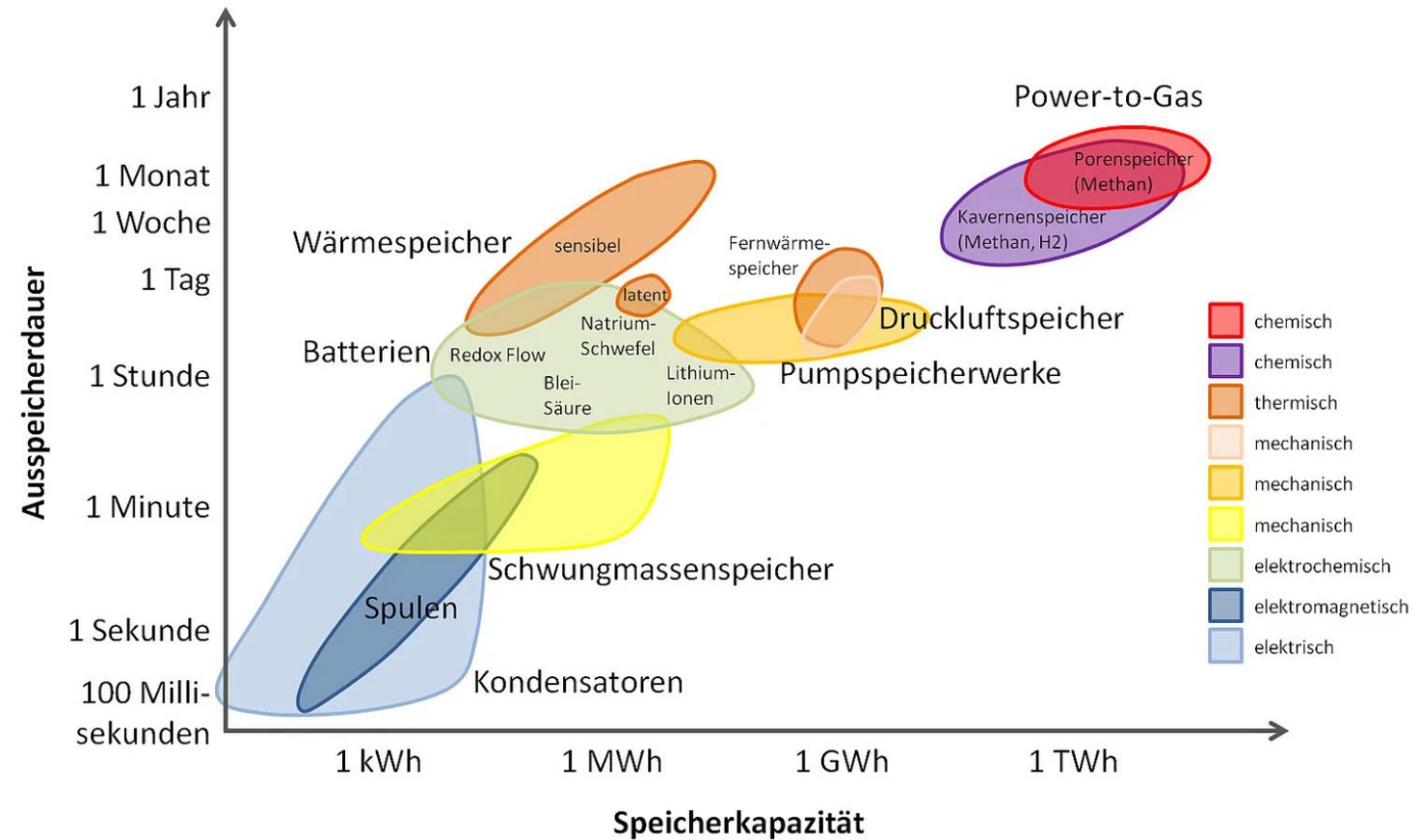
- Agri-PV
 - <https://www.sma-sunny.com/agri-pv-vereint-solarstromproduktion-und-landwirtschaft/>
 - <https://sonnenallee.sma.de/new/gemuese-unter-strom/>
- Floatovoltaics
 - Youtube: DW Planet A: Why we should be putting solar panels on our fields and lakes
- Grüner Wasserstoff
 - <https://sonnenallee.sma.de/green-culture/wasserstoff-energietraeger-neben-wind-und-sonne/>
- Youtube-Kanäle
 - Andreas Schmitz – Der Akku-Doktor
 - Bonotos
 - Breaking Lab
 - DW Planet A
 - Gewaltig nachhaltig
- Jahresbericht des BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft)
- Sunny Design: Auslegung und Wirtschaftlichkeitsberechnung von PV-Anlagen mit und ohne Speicher
- Autarkierechner der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
<https://www.amperios.de/autarkierechner>

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Photovoltaik-Speicher: Technologien

- Nicht alle Speichertechnologien erlauben eine Rückgewinnung der Energie in Form von elektrischem Strom
- Wesentliche Auswahlfaktoren je nach Einsatzzweck
 - Benötigte Speicherkapazität (kWh)
 - (Ent-)Ladeleistung (kW; Grafik: „Ausspeicherdauer“)
 - Spezifische Kosten (Euro pro kWh)
 - Energiedichte (kWh pro Kubikmeter oder Kilogramm)
 - Lebensdauer (Vollzyklen)
 - Wirkungsgrad / Speicherverluste
- Heimbereich dominiert durch Batteriespeicher
 - Lithium-Ionen-, Blei-, und Salzbatterien



Bildquelle: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/oekostrom/energiespeicher>

Photovoltaik-Speicher: Simulation (doppelter Verbrauch)

