



Solarinitiative München Land
München, 06. November 2014

PV-Systeme als Energiequelle für Strom und Wärme – Speicher, Wärmeerzeugung und Lastmanagement

Dr.-Ing. Jann Binder

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung
Baden-Württemberg (ZSW)

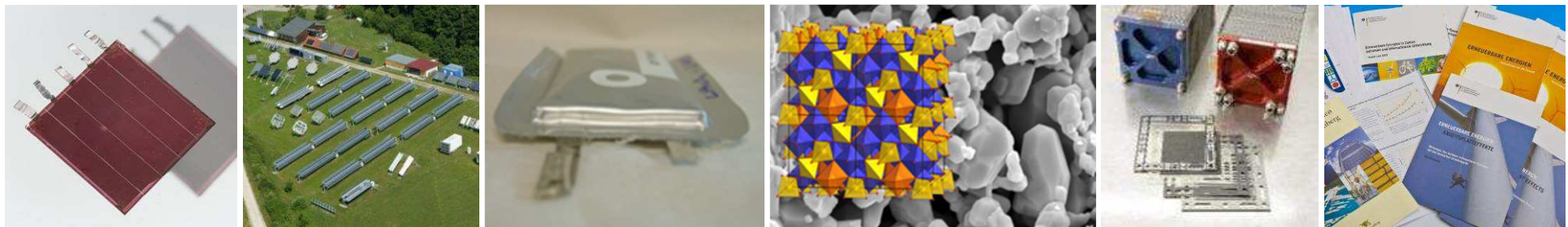
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

ZSW ist eine gemeinnützige Stiftung mit 230 Mitarbeitern

Schwerpunkte

- Photovoltaik: CIGS Fertigung und PV-Systeme
- System Analyse, Consulting und Energiepolitik
- Regenerative Energieträger (Power to Gas)
- Brennstoffzellen
- Elektrochemische Speicherung

Wir arbeiten auf der gesamten Wertschöpfungskette
von den Materialwissenschaften zur Produktion und Produkt Entwicklung



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg



Stuttgart:
Photovoltaik, Energie-
politik, Energieträger,
Power to Gas (Methan),
zentrale Dienste



Ulm: Elektrochemische
Energietechnologien



Widderstall: Solar-Testfeld

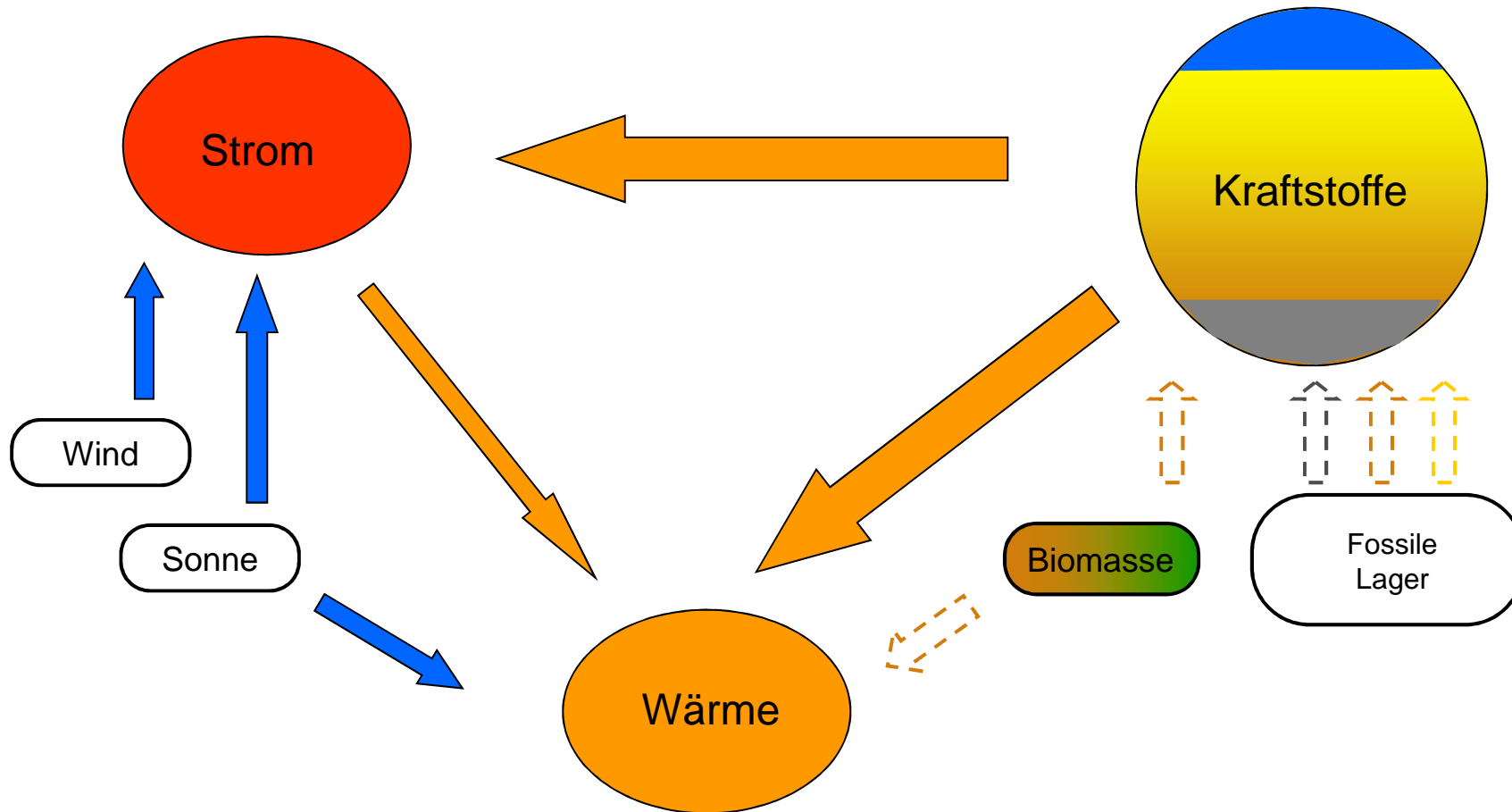


Ulm: ZSW Labor für
Batterietechnologie (eLaB)

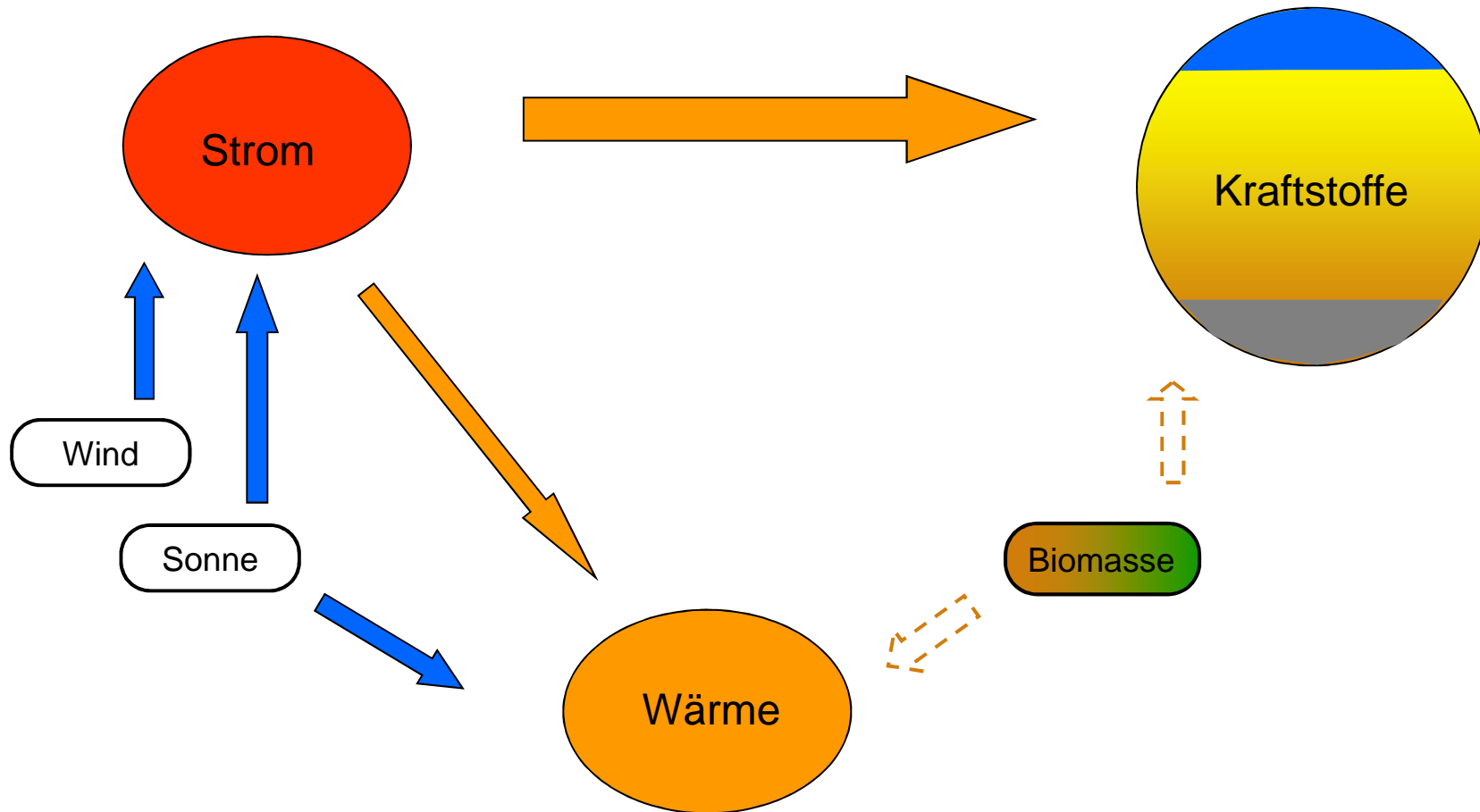
Übersicht

- Strom aus Sonne & Wind - Schlüssel für die Energiewende
- Mein Haus ist mein Kraftwerk
 - Bedarfe von Strom & Wärme
 - Potentiale durch PV und Wärmepumpe
 - Speicher erhöhen Eigenverbrauch und Autarkie
- Kenngrößen und Wirtschaftlichkeit von elektrischen Speichersystemen
- Speichermanagement zur Netzentlastung
- Zusammenfassung

Energieformen Strom, Wärme und Kraftstoffe gespeist bisher aus fossilen Kraftstoffen

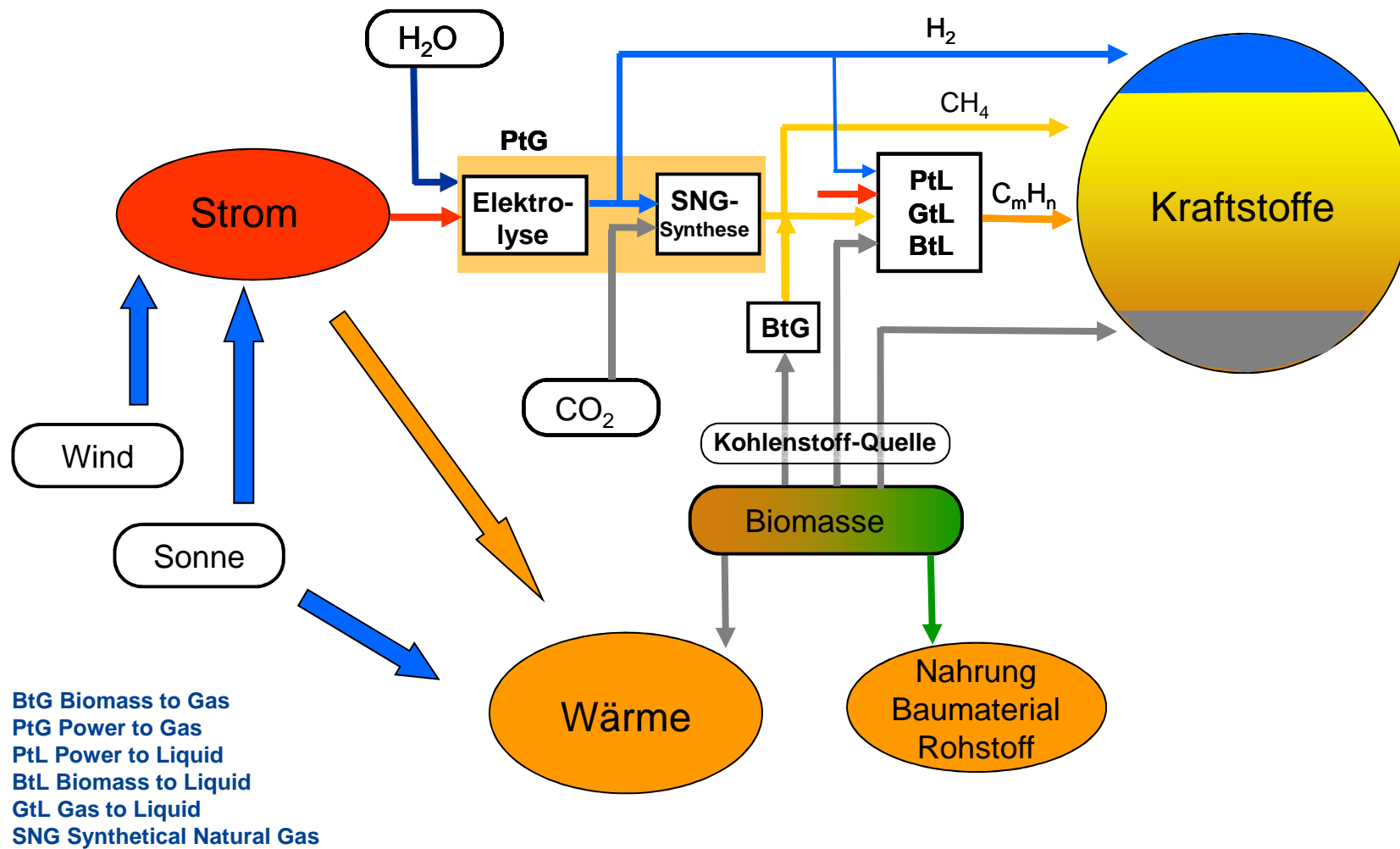


Energieformen Strom, Wärme und Kraftstoffe ohne fossile Quellen - der Weg vom Strom zum Kraftstoff

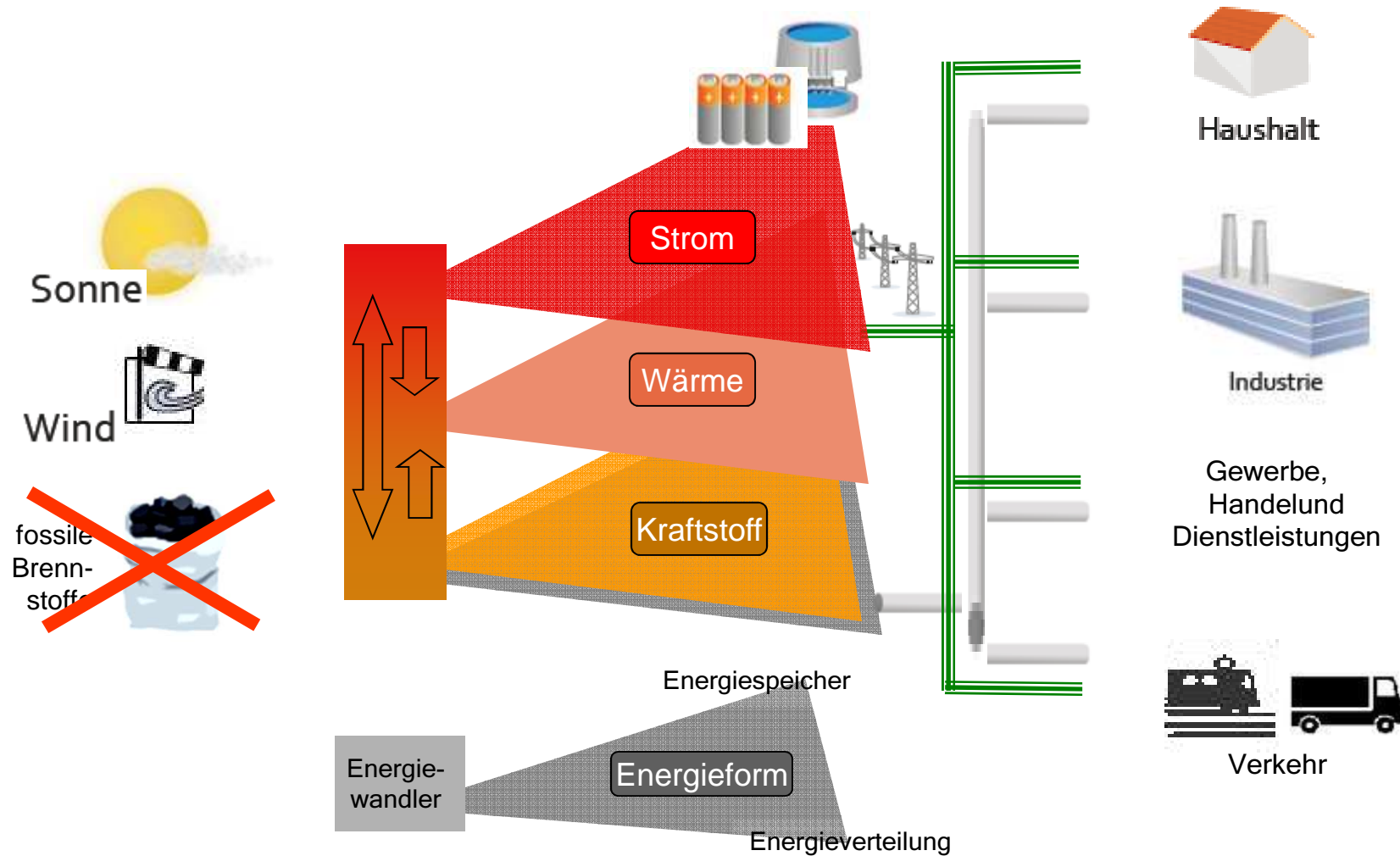


Strom aus Sonne und Wind als zentrale Energiequelle

Vom Strom zum regenerativen Kraftstoff



Energiewandlung, Speicherung und Verteilung Kopplung der 3 Energieformen liefert Lastverschiebung zur Anpassung an die Erzeugung



Strom aus Sonne und Wind wird Primäre Quelle sowie Dreh- und Angelpunkt der Energiebereitstellung

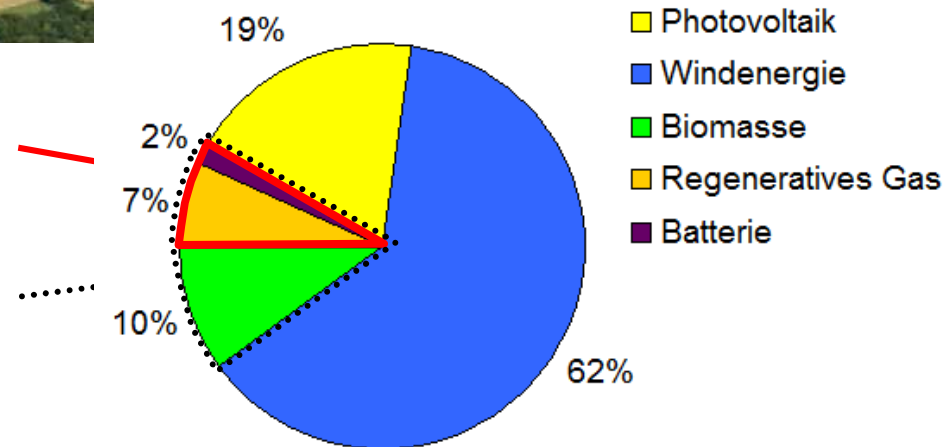
- Durch Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Kraftstoffe / Brennstoffe entsteht das notwendige Lastverschiebungspotential zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch
- Schlüssel sind
 - effiziente Energiewandler (Power-to-Gas, Brennstoffzelle, hocheffiziente Gaskraftwerke)
 - Nutzung des am „einfachsten“ herzustellenden Kraftstoffs zuerst (Wasserstoff, vor Methan, vor flüssigen Kraftstoffen)
 - Speicherung der Energie in angepaßten Speicherformen
 - Kurzzeitspeicher (häufig, hohe Leistung) → Batterie
 - Langzeitspeicher (selten, hoher Energieinhalt) → P-t-G.
- Wärmebereitstellung
 - aus Strom über Wärmepumpen mit thermischen Speichern, wo möglich

Wie hoch ist der Anteil an Solarenergie beim kostenoptimalen Mix für 100% **Stromerzeugung** aus Erneuerbaren Energien? am Beispiel der Region Heubach (10.000 Einwohner; 25 km² in Baden-Württemberg)



Speicherung von Überschüssen aus Photovoltaik- und Windstrom in Batterien und als regeneratives Gas

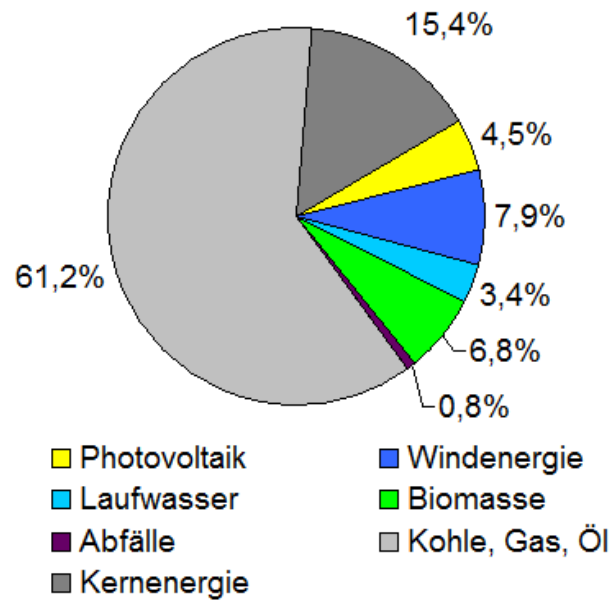
~19% Strom aus Biomasse und gespeichertem Überschuss decken den Bedarf bei zu geringer Sonneneinstrahlung und Windaufkommen



Anteile an der Bruttostromerzeugung in Deutschland

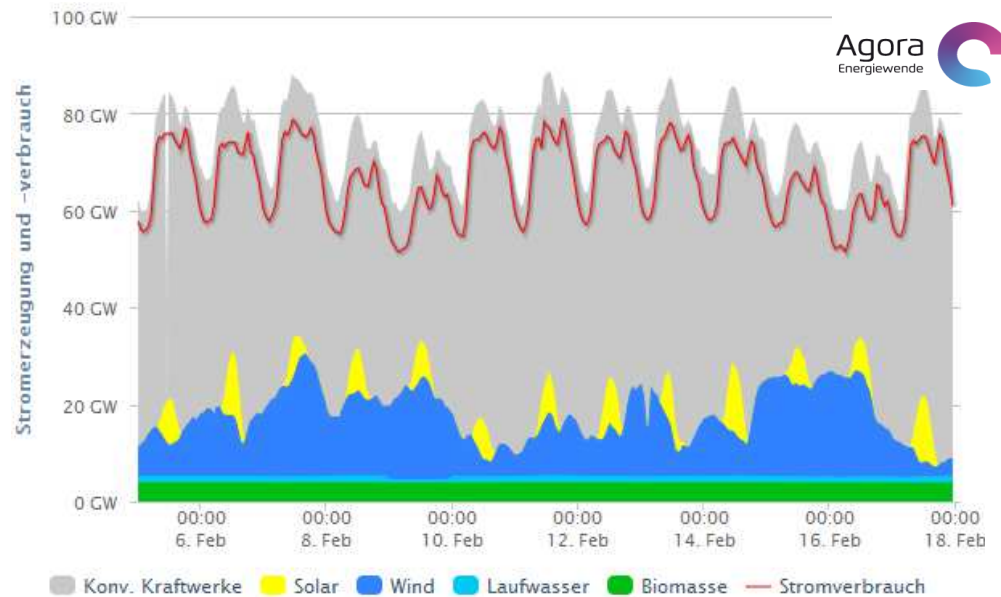
23,4% Anteil an Erneuerbare Energien

Deutschland - Summen für 2013:
Bruttostromerzeugung 629 TWh



Quelle: BDEW, AG Energiebilanzen Stand 01/2014

2 Wochen im Februar 2014:
aktuelle Stromerzeugung und Verbrauch

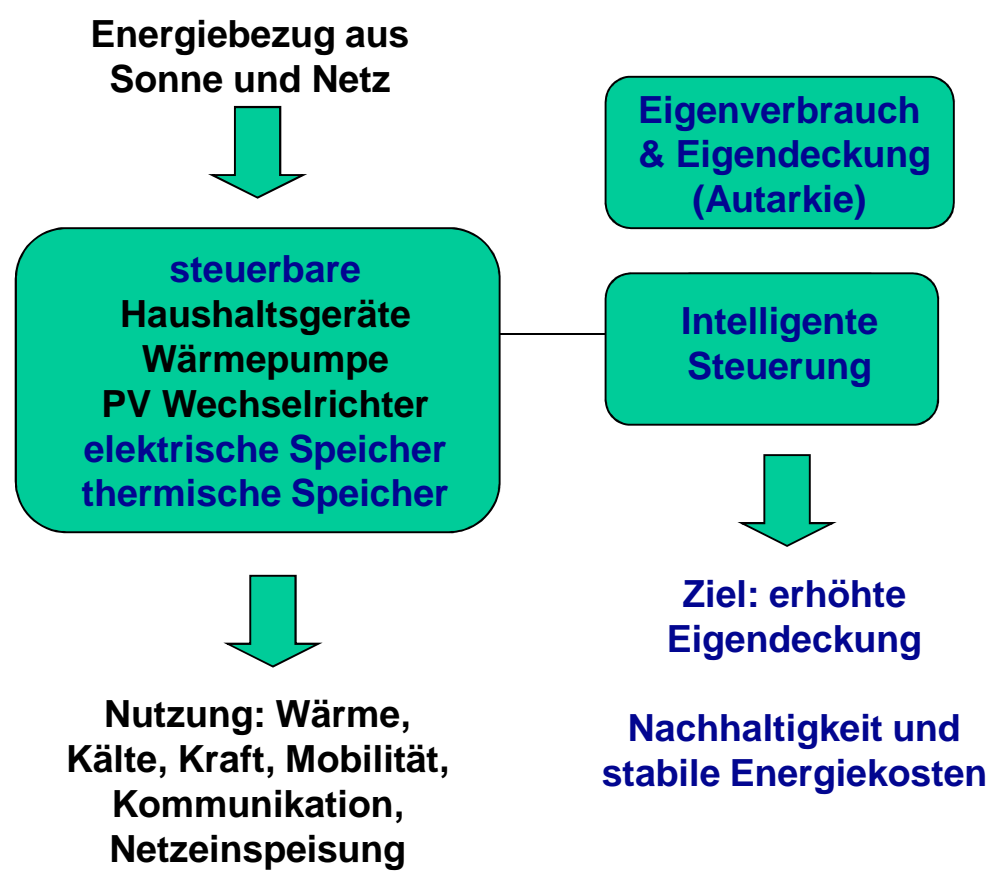
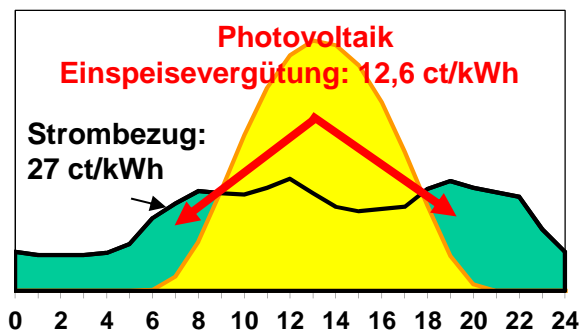
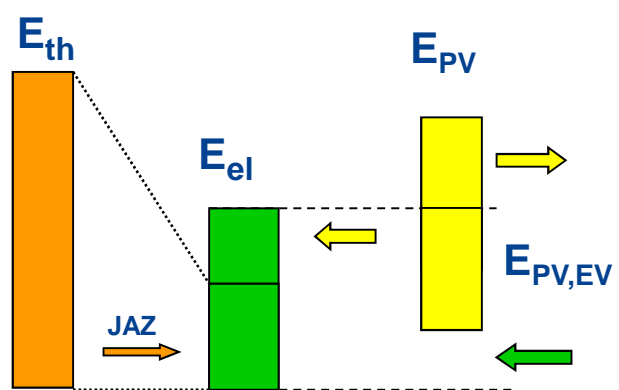
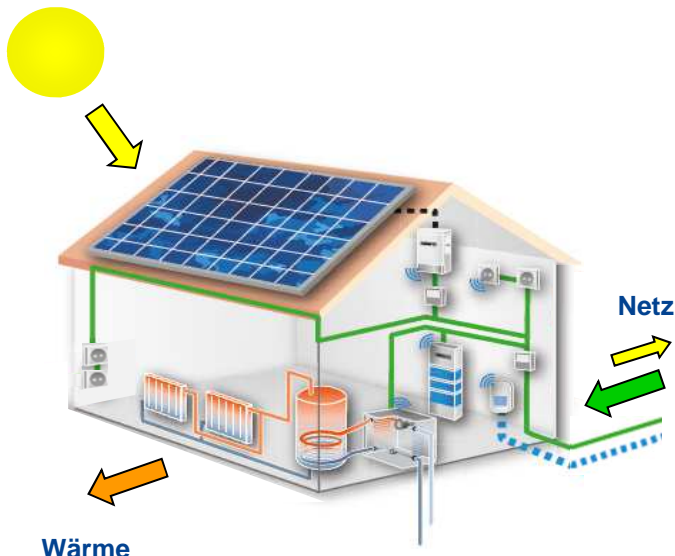


Quelle: <http://www.agora-energiewende.de/service/aktuelle-stromdaten...> Abruf vom 18.02.2013

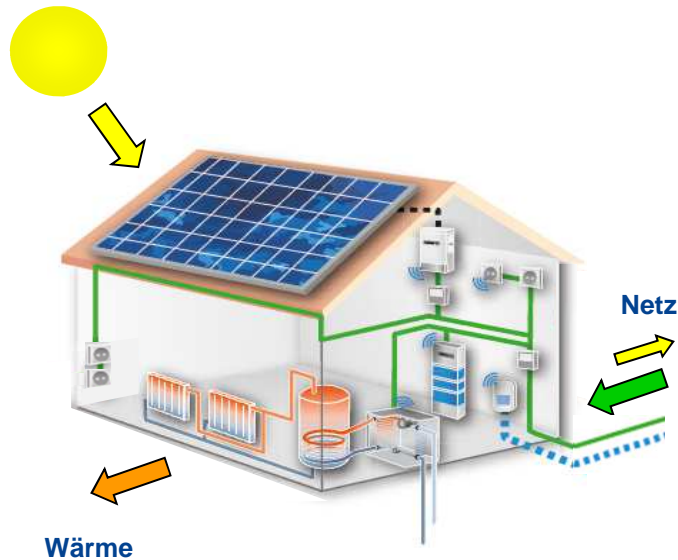
Übersicht

- Strom aus Sonne & Wind - Schlüssel für die Energiewende
- Mein Haus ist mein Kraftwerk
 - Bedarfe von Strom & Wärme
 - Potentiale durch PV und Wärmepumpe
 - Speicher erhöhen Eigenverbrauch und Autarkie
- Kenngrößen und Wirtschaftlichkeit von elektrischen Speichersystemen
- Speichermanagement zur Netzentlastung
- Zusammenfassung

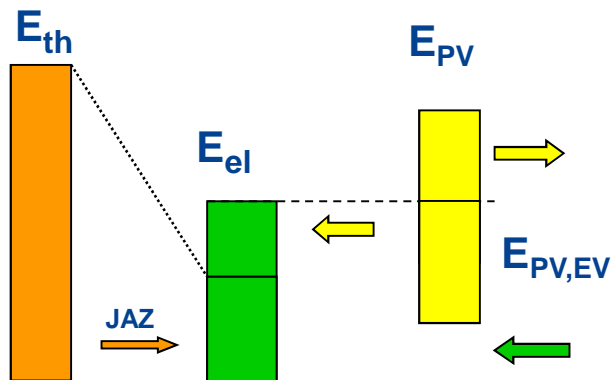
Mein Haus ist mein Kraftwerk



Photovoltaik mit lokalen Strom- und Wärmespeichern: Definition der Bilanzielle Eigendeckung, Autarkie und Eigenverbrauch



Wärme



Solarer Eigenverbrauch (EV) (Self Consumption)

- Welchen Anteil des Solarstroms verbrache ich selbst

$$\frac{E_{PV,EV}}{E_{PV}}$$

Autarkie

- Welchen Anteil des Gesamtenergiebedarfs erzeuge ich **zeitgleich** zum Verbrauch

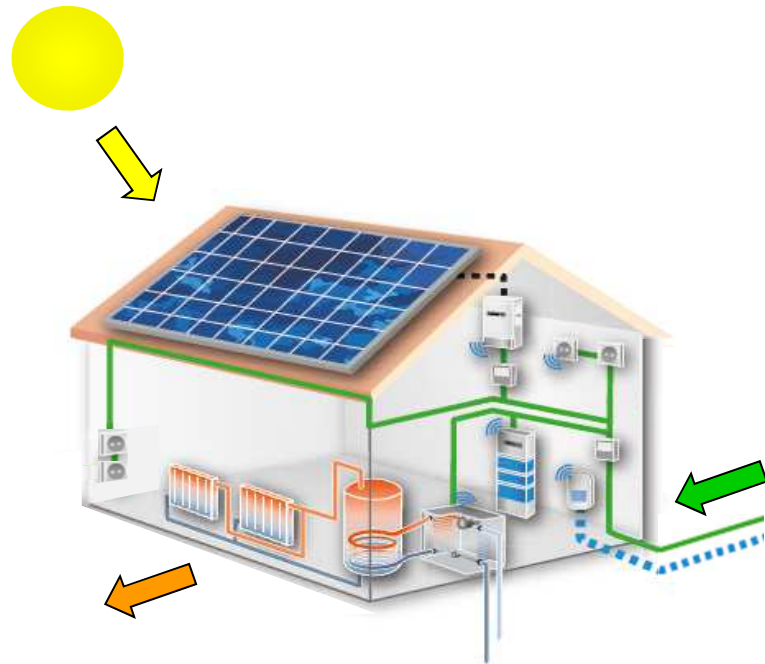
$$\frac{E_{PV,EV}}{E_{el}}$$

Bilanzielle Eigendeckung:

- Verhältnis der Jahressummen von lokal erzeugter elektrischer Energie aus Photovoltaik und Gesamtenergiebedarf

$$\frac{E_{PV}}{E_{el}}$$

Ansatz: Berechnung der Energiebilanz



Wärmebedarf

- proportional zum Temperaturgefälle
- umgekehrt proportional zur Dämmung
- zuzüglich Warmwasserbedarf
- abzüglich solarer Einstrahlung und Abwärme der Haushaltsgeräte

**Kopplung zum elektrischen Energiebedarf
über den COP der Wärmepumpe**

Energieeintrag

- Solare Einstrahlung
 - PV Ertrag
 - Wärmeeintrag über Fenster
- Strombezug vom Netz

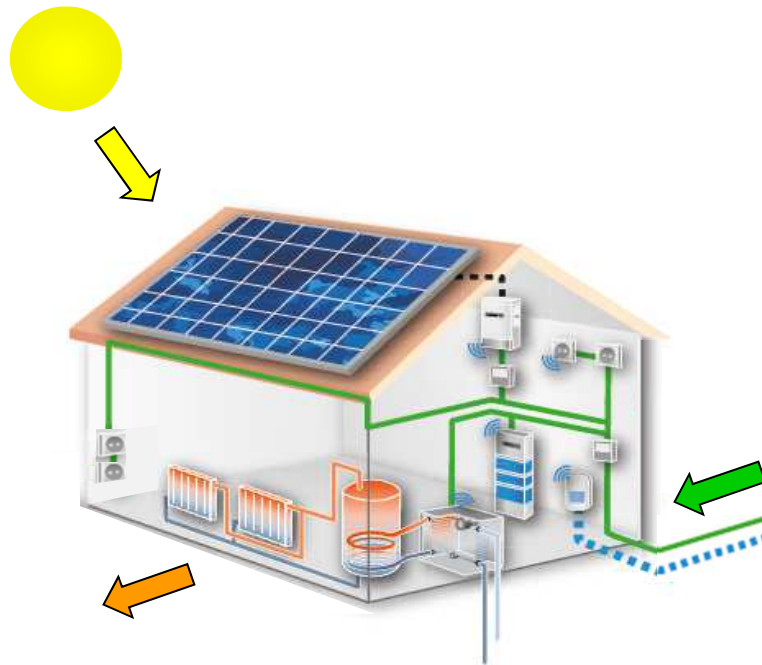
Energieverbrauch

- Strom für Haushaltsgeräte
- Strom für Wärmepumpe
 - Warmwasser
 - Heizung

Speicher

- Batteriespeicher
- Thermischer Speicher

Berechnung der Energiebilanz - Jahreszeitreihen



Eingangswerte als Jahreszeitreihen

- Solare Einstrahlung
- Außentemperatur
- Profil des Strombedarf für Haushaltgeräte (Jahressumme 3.900 kWh/a)
- Profil des Warmwasserbedarfs

Weitere Eingangsparameter

- Größe der PV Anlage
- Hausstandard – angegeben als spez. Jahreswärmebedarf
- Hausgröße $A_N = 140 \text{ m}^2$, 4 Bewohner
- Wärmepumpe ($\eta_{WP} = 40\%$, $T_{\text{quelle}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Batteriespeicherkapazität
- Speichervolumen
- Temperaturen im Speicher ($35^\circ\text{C} / 50^\circ\text{C}$)
- Algorithmus zur Speichersteuerung (Überschuss an PV heizt bis 53°C)

Ergebnis Jahresenergiebedarf

($A_N=140 \text{ m}^2$)	Einheit	Passivhaus (Zero Energy)	Gebäude- standard 2009	Gebäude standard 1995	Gebäude standard 1975
standardisierte Heizlast	kW	2,5	5,0	7,3	11,5
spezifischer Heizwärmebedarf	kWh/m ² a	30	75	120	200
jährlicher Wärmebedarf	kWh _{th} /a	4.300	10.500	16.800	28.000
Elektrische Energie für die Wärmepumpe	kWh _{el} /a	1.400	3.200	5.100	8.700
Jahresarbeitszahl (JAZ)		3,1	3,3	3,3	3,2

Elektrische Energie für Haushaltsgeräte	kWh _{el} /a	3.900
--	----------------------	-------

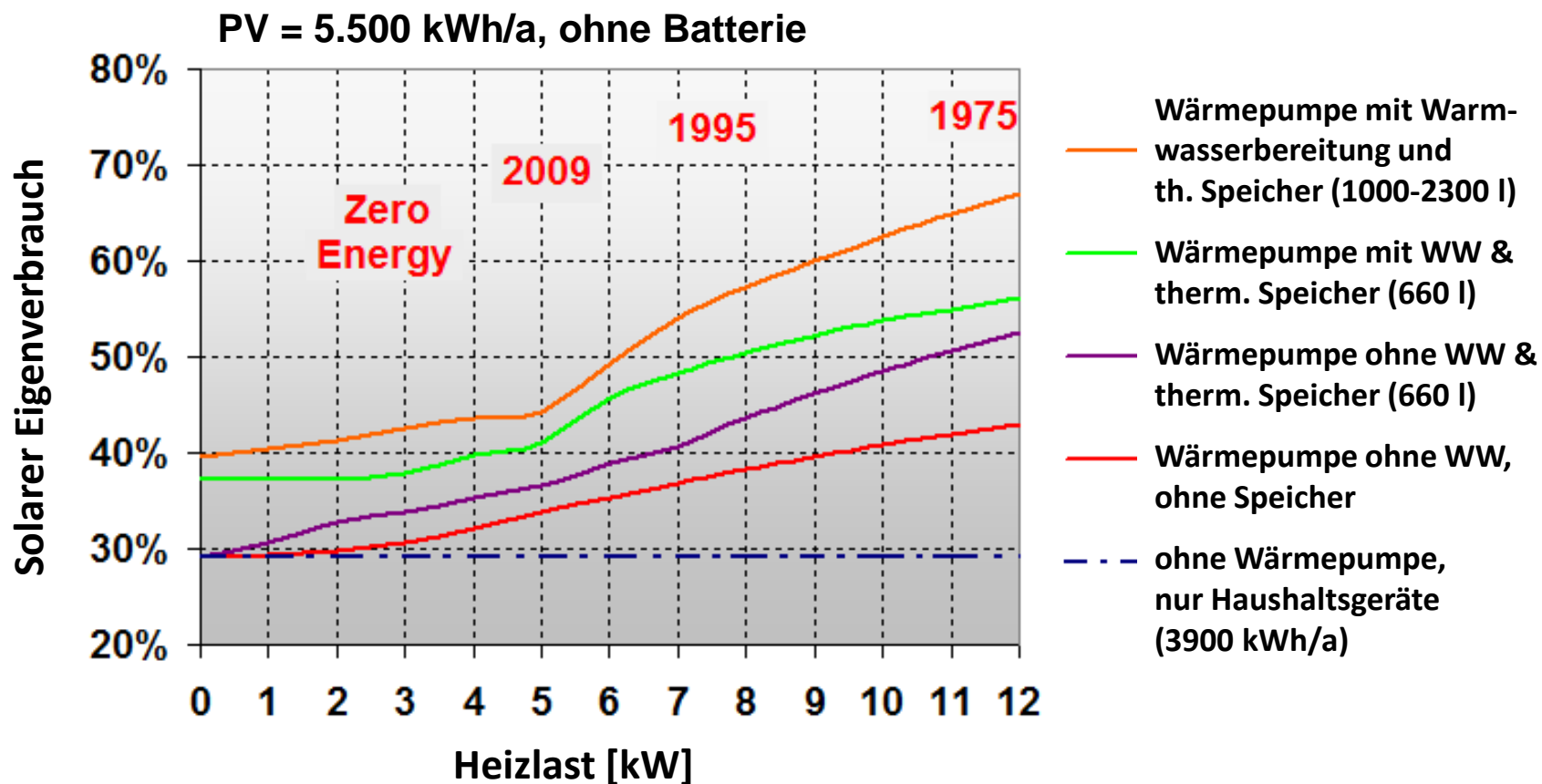
160 kWh/m²a



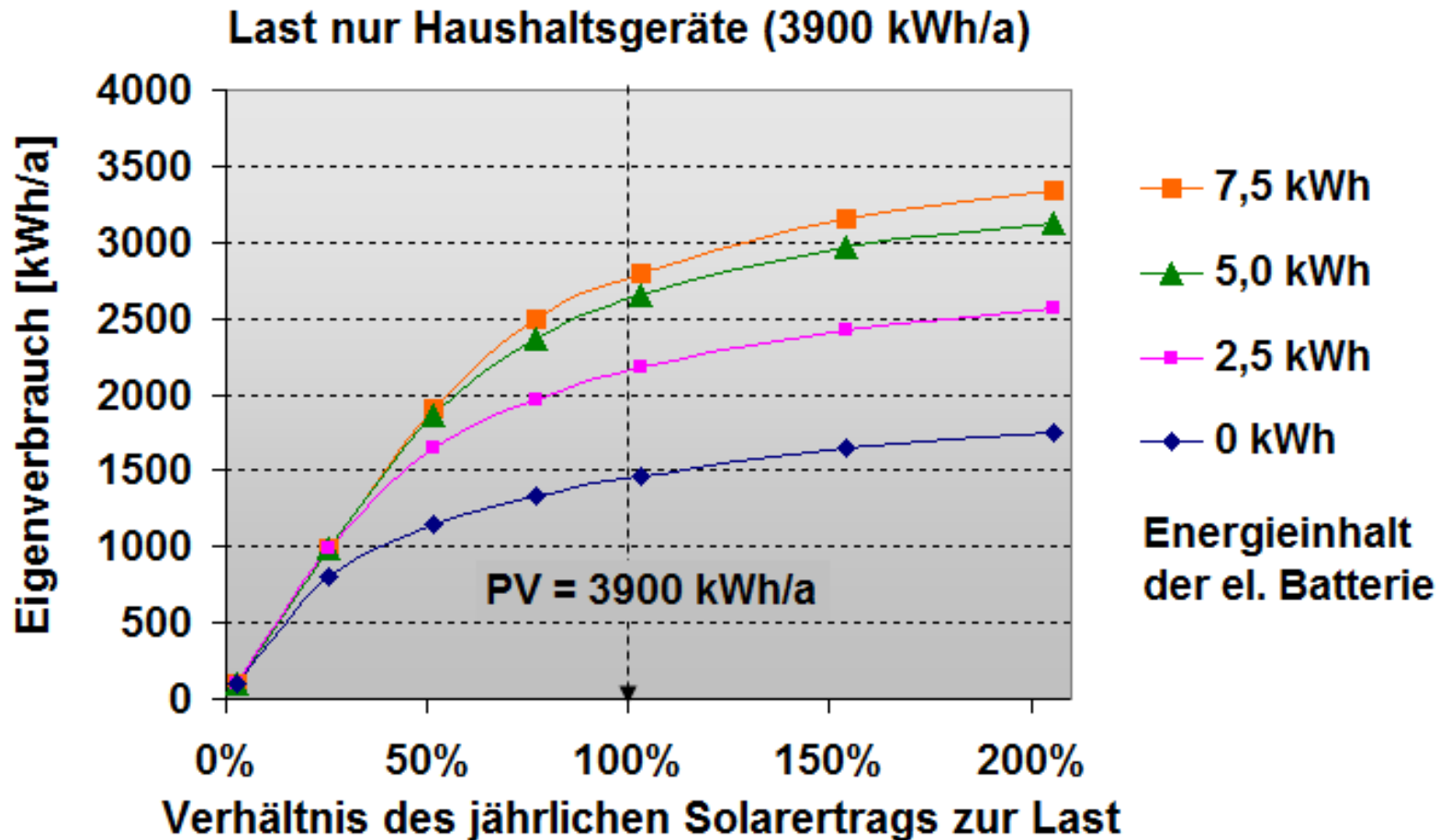
**Durchschnitt des
Gebäudebestands
in 2012**

Solarer Eigenverbrauch

abhängig von Heizlast und thermischem Speichervolumen

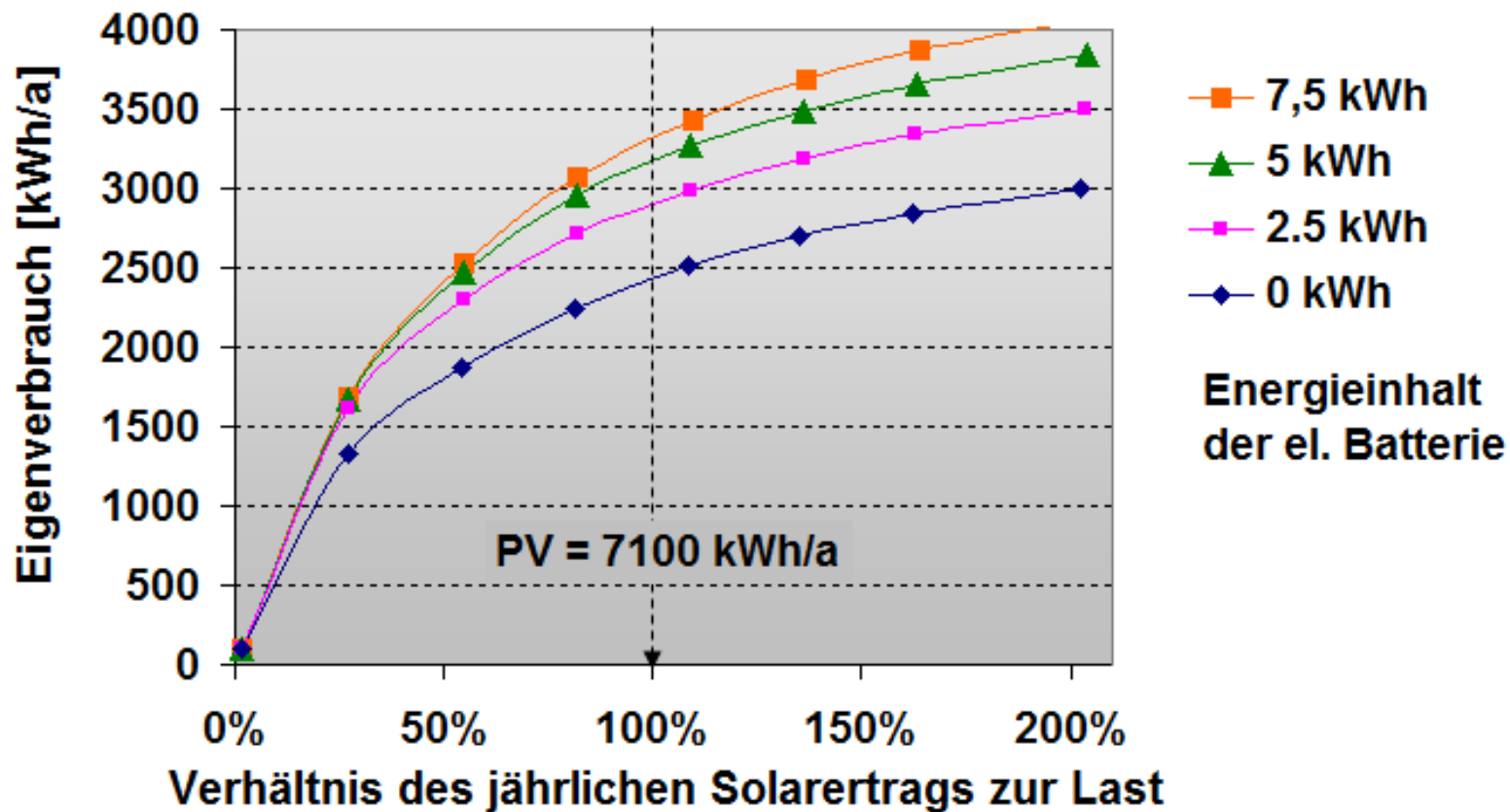


Potentiale des solaren Eigenverbrauchs ohne Wärmeerzeugung, mit elektrischem Speicher

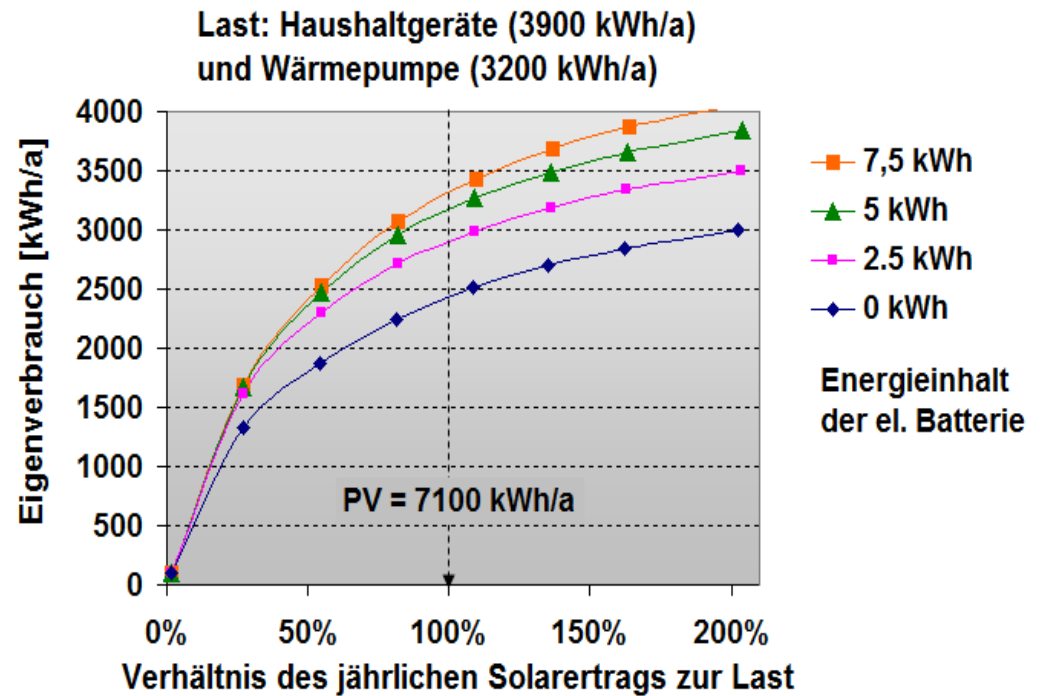
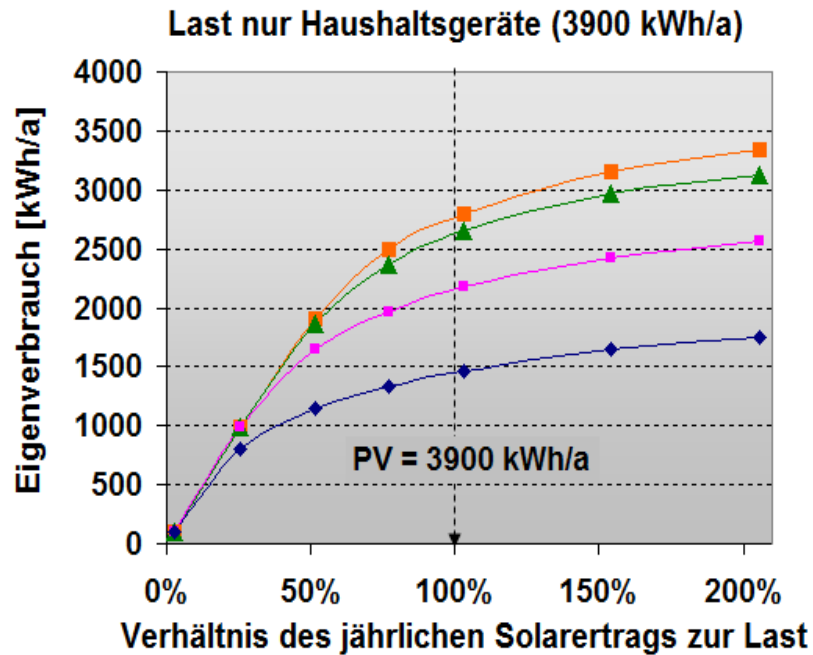


Potentiale des solaren Eigenverbrauchs mit Wärmepumpe, elektrischem und thermischem Speicher

Last: Haushaltgeräte (3900 kWh/a)
und Wärmepumpe (3200 kWh/a)



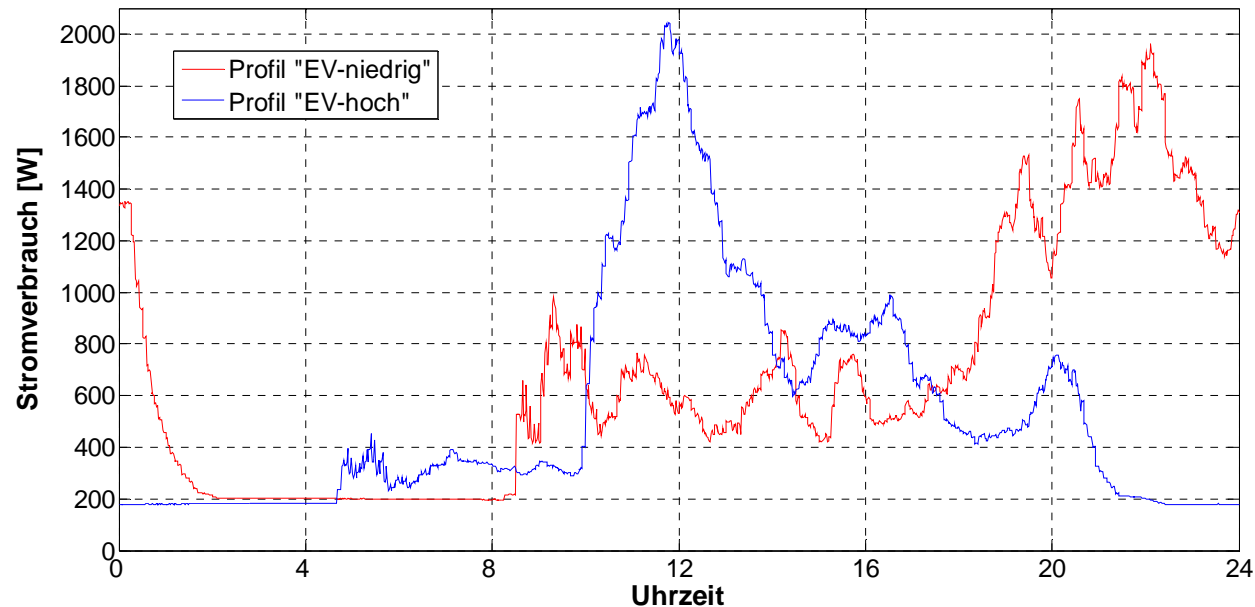
Potentiale der Eigendeckung (Autarkiegrad) durch Photovoltaik und Speicher



- Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf für Haushaltsgeräte und Heizung ist für ein modernes Gebäude (KfW 75) ein Autarkiegrad von 35% ohne Batterie und 40-50% mit elektrischer Batterie erreichbar.
- Voraussetzung: Wärmeerzeugung durch Wärmepumpe und intelligente Steuerung der Wärmepumpe (jeweils bei bilanzielle Eigendeckung = 100%, d.h. PV Anlagenauslegung so, daß Jahresertrag = Jahresbedarf)

Einfluss des Lastprofils (Nutzung elektrischer Geräte) auf Eigenverbrauch bzw. Autarkiegrad

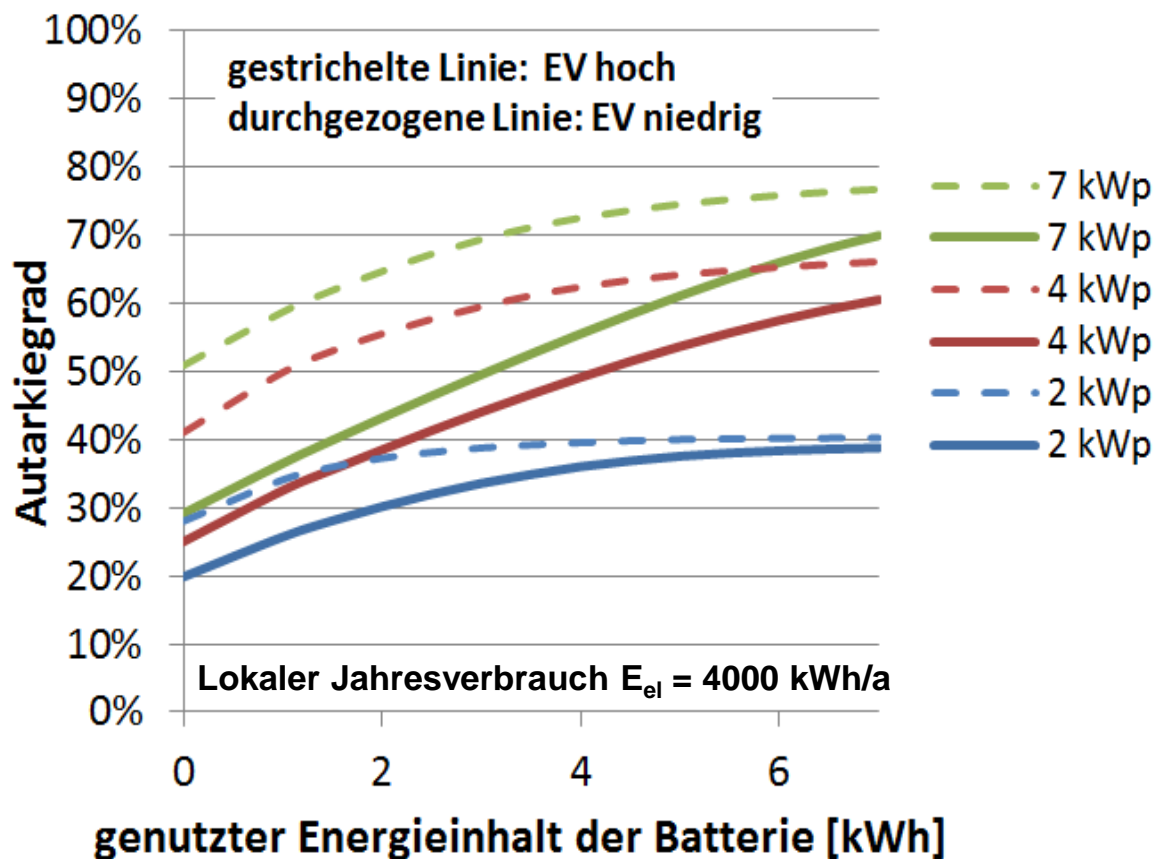
Beispiel – Haushalt ohne Wärmeversorgung



Im folgenden werden Ergebnisse gezeigt für die Profile mit höchstem und niedrigstem Jahreseigenverbrauch – skaliert auf Jahresverbrauch 4000 kWh/a:

- (a) Profil „EV hoch“ mit hohem EV - hohe Last am Mittag
- (b) Profil „EV niedrig“ mit niedrigem EV - hohe Last am Abend

Autarkiegrad in Abhängigkeit der Batteriekapazität, bei zwei „extremen“ Lastprofilen (ohne Wärmeversorgung)



- das Profil „EV niedrig“ verbraucht wenig Energie über Mittag
- daher werden auch große Batterien regelmäßig geladen, mit großem Gewinn für den Autarkiegrad
- große PV Anlagen begünstigen den Gewinn durch die Batterie

Autarkiegrad

$$\frac{E_{PV,EV}}{E_{el}}$$

Übersicht

- Strom aus Sonne & Wind - Schlüssel für die Energiewende
- Mein Haus ist mein Kraftwerk
 - Bedarfe (Strom & Wärme)
 - Potentiale durch PV mit Wärmepumpe
 - Speicher erhöhen Eigenverbrauch und Autarkie
- **Kenngößen und Wirtschaftlichkeit von elektrischen Speichersystemen**
- Chancen für Netzentlastung
- Zusammenfassung

Elektrische Speicher - Definitionen

Nominelle Batteriekapazität (C)

- Theoretischer Wert, der aus Rücksicht auf die Batterielebensdauer meist nicht ausgenutzt wird.
- Einheit wie in der Batterieindustrie: Ah
Energieinhalt $C \times U_{\text{Batt}}$ kWh

Ladezustand, State of Charge (SOC)

- Bsp. für neue Li-Ion Batterie: Zustand entladen SOC = 20% ($\text{SOC}_{\text{dyn}} = 0\%$)
- Bsp. für neue Li-Ion Batterie: Zustand geladen SOC = 80% ($\text{SOC}_{\text{dyn}} = 100\%$)

Entladetiefe, Depth of Discharge (DOD)

- $\text{DOD} = (\text{SOC}_{\text{voll}} - \text{SOC}_{\text{leer}})$
- im Bsp: für vollständigen Zyklen $\text{DOD} = 60\%$
- Entladetiefe bezogen auf die nominelle Batteriekapazität

dynamisch genutzter Energieinhalt einer Batterie

- Kleiner als nominelle Batteriekapazität
- $(\text{SOC}_{\text{voll}} - \text{SOC}_{\text{leer}}) \times C \times U_{\text{Batt}}$
- mögliche Herstellerstrategie: SOC_{dyn} über die Lebensdauer eines Energiespeichers konstant zu halten; Reserven werden später genutzt

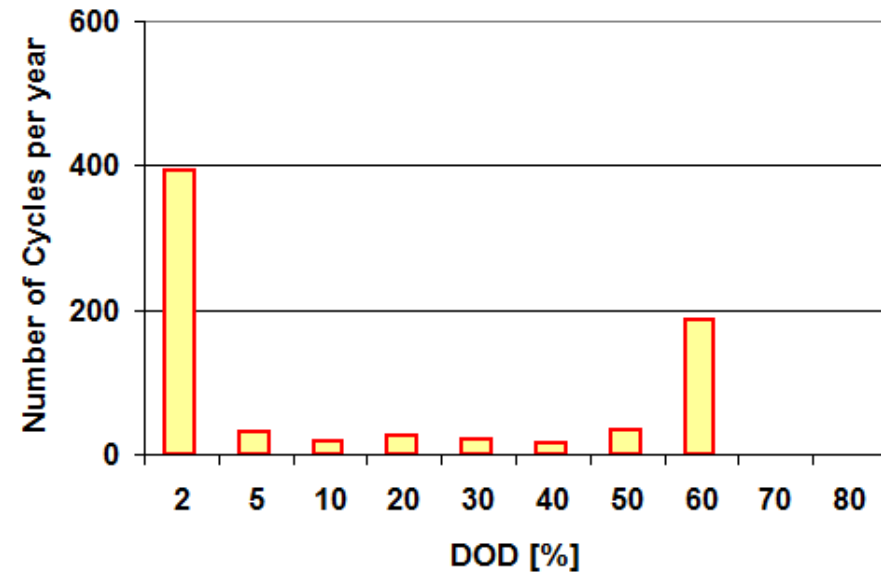
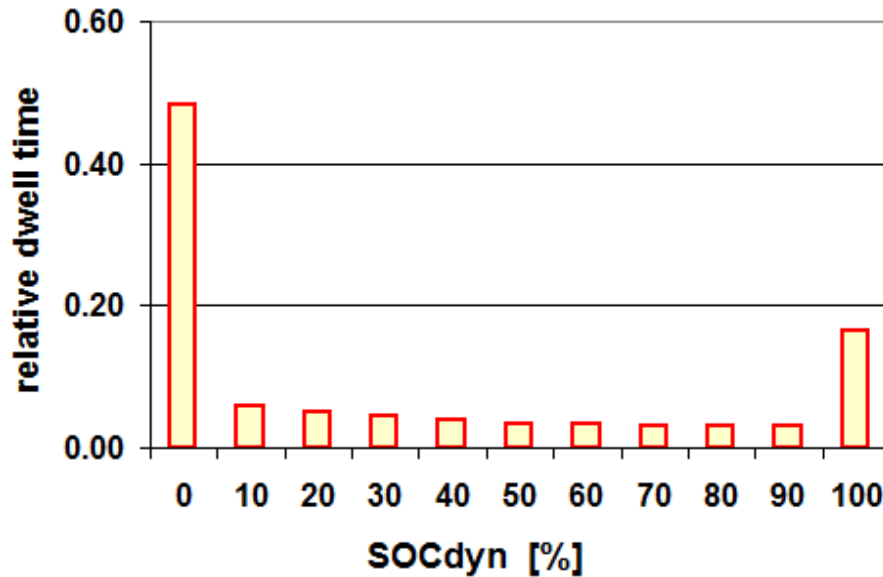
Statistik Batterie-Zyklisierung

- Aus Zeitreihen von SOC-Niveaus über ein Jahr
 - Aufsummieren der Verweilzeiten bei den verschiedenen SOC-Niveaus
 - Berechnen der Zyklenzahl und kategorisieren nach Entladetiefe (DOD)

Beachte

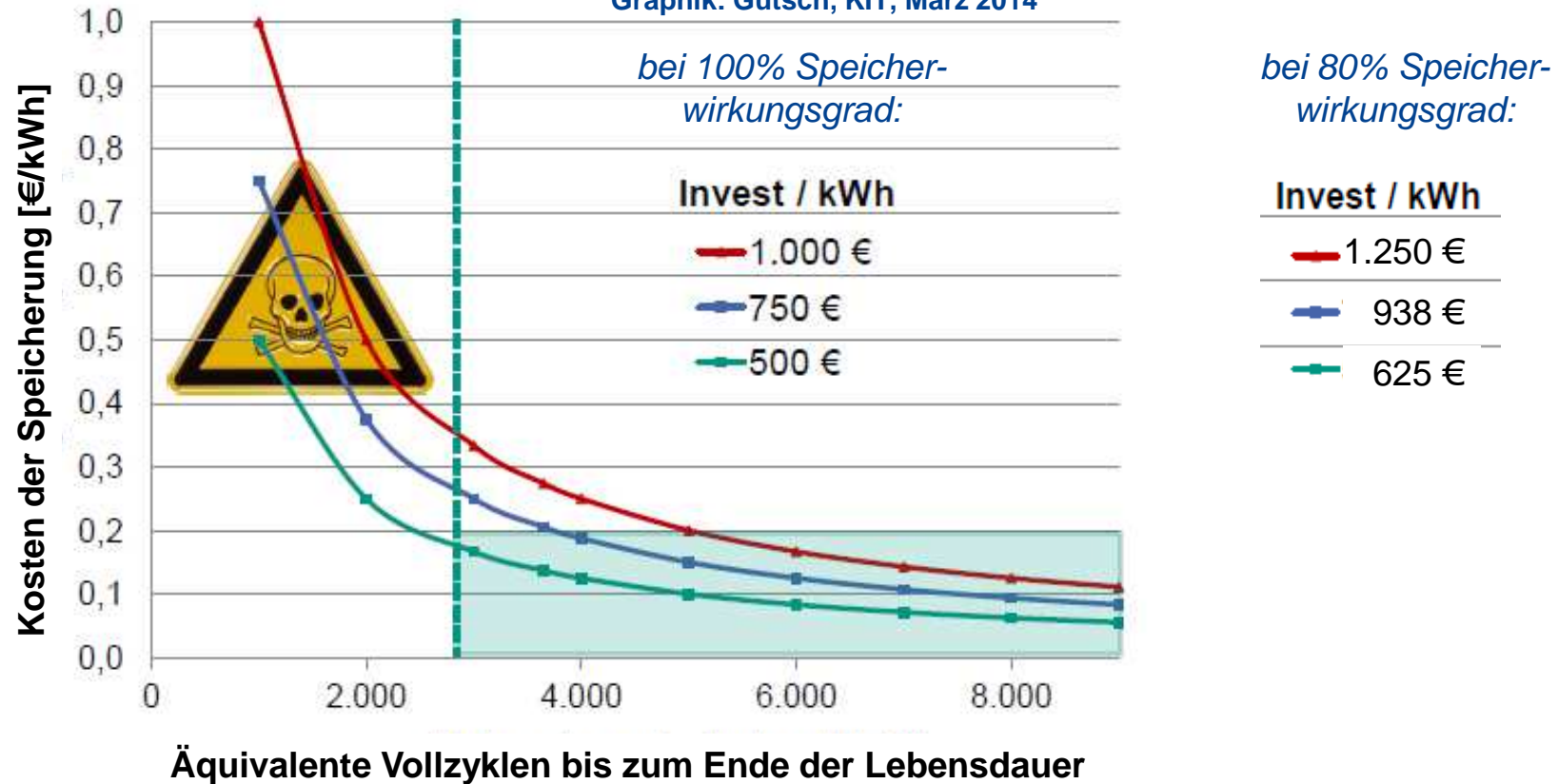
- Der Wechsel von $SOC_{dyn} = 100\%$ zu $SOC_{dyn} = 0\%$ liefert 60% der nominellen Batteriekapazität, der Rest ist Alterungsreserve

→ im Haushalt: etwa 220 Vollzyklen pro Jahr



Kosten der Speicherung (ohne PV, Zins und Wartung)

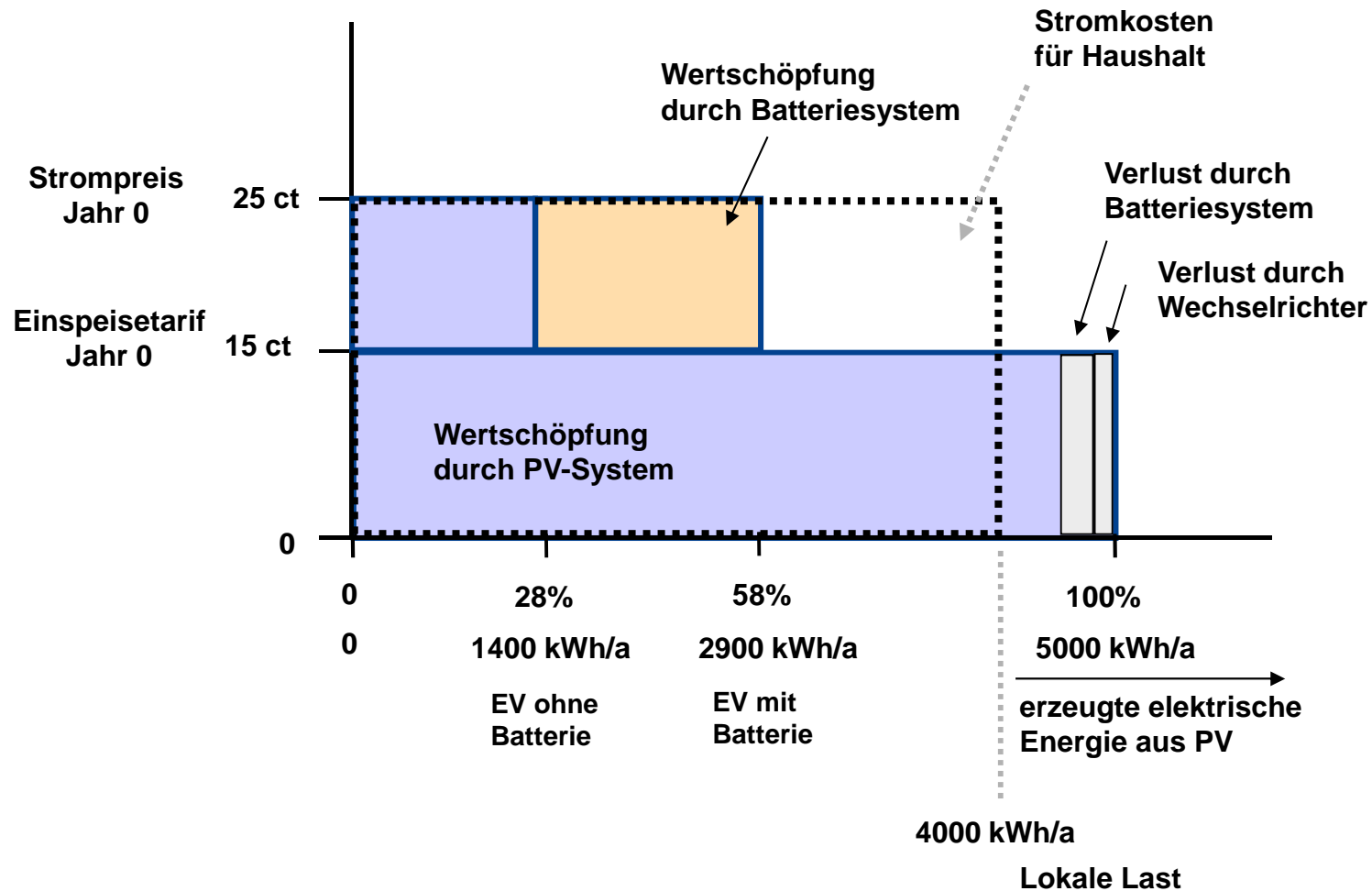
Graphik: Gutsch, KIT, März 2014



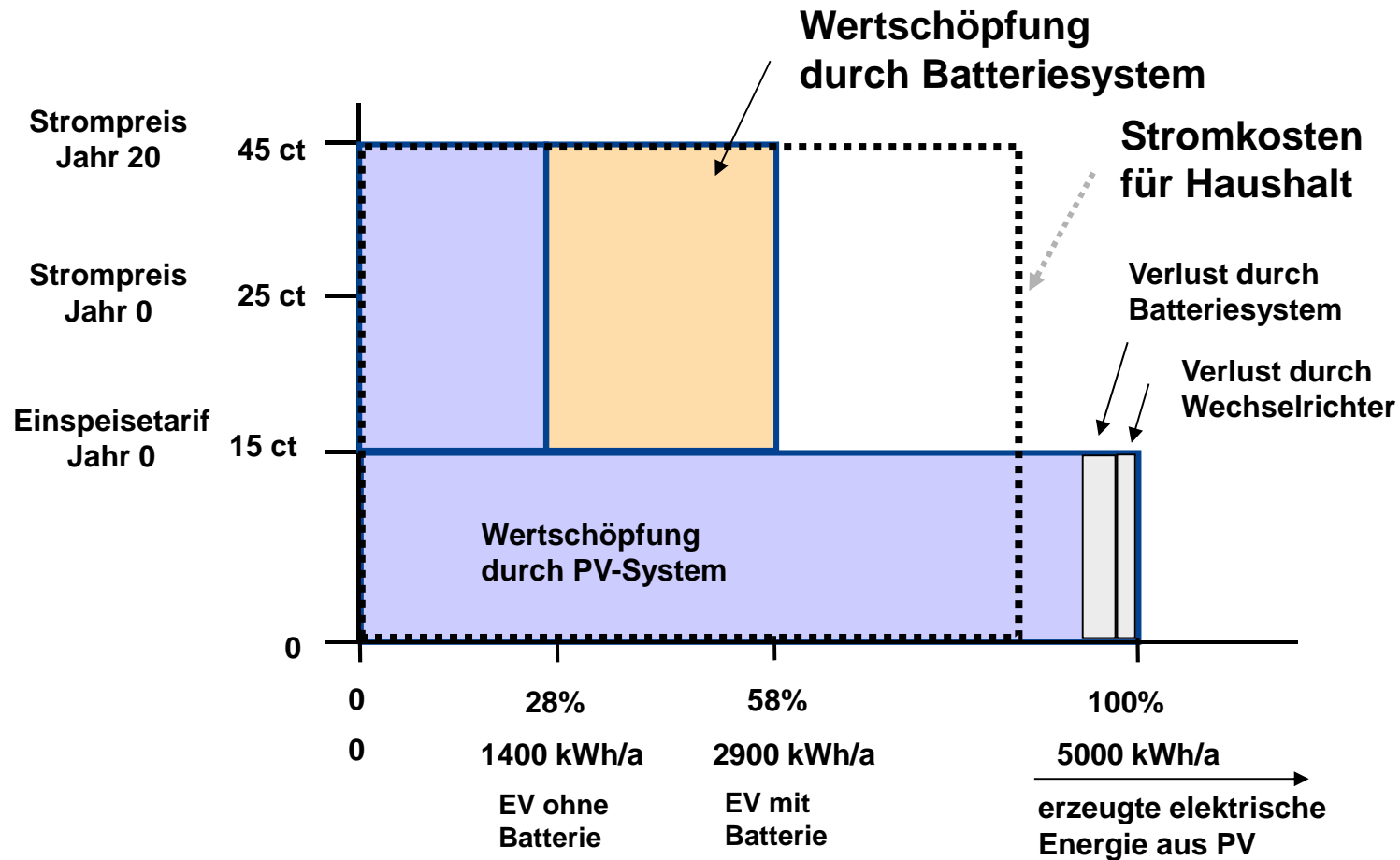
→ im Haushalt: etwa 220 Vollzyklen pro Jahr

- typischer Werte bei 1,5 kWp PV und 1kWh Batterie pro 1000 kWh Jahresverbrauch
- Wer steigt bis ~300 Vollzyklen pro Jahr bei größerer PV Anlage und kleinerer Batterie

Amortisation



Amortisation



Nettobarwert der Wertschöpfung
des Batteriesystems über 20 Jahre

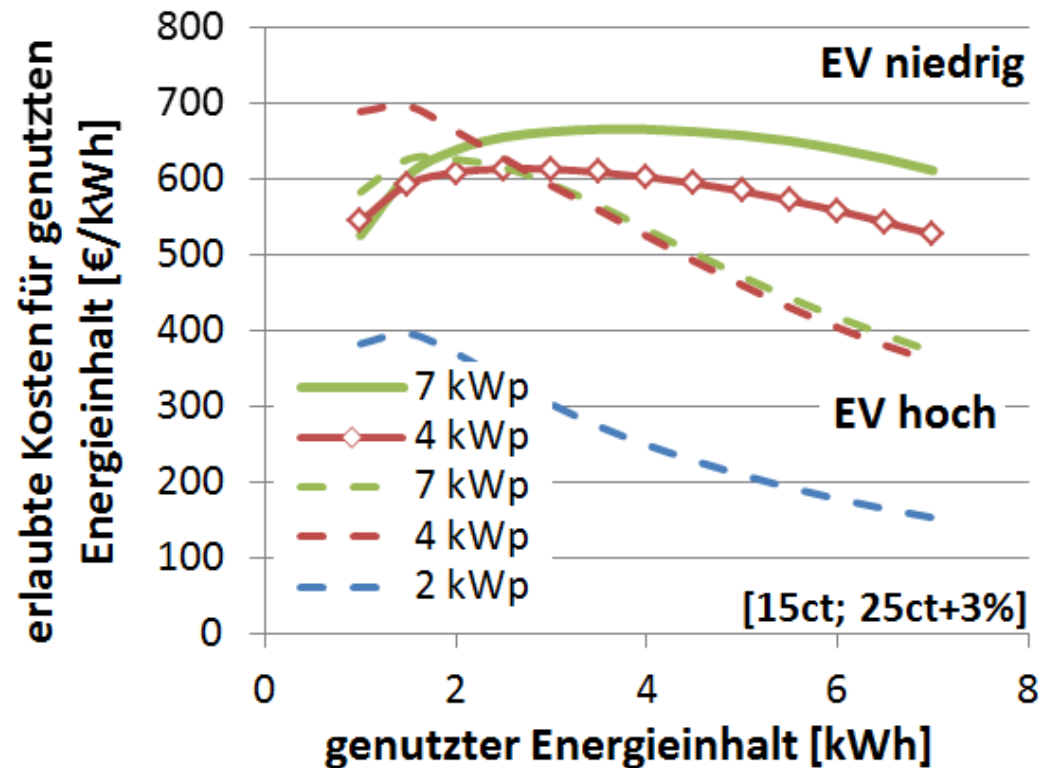
$$\sim (\text{Strompreis} - \text{Einspeisetarif}) * \Delta \text{EV}$$

$$= \text{erlaubte Kosten des Batteriesystems}$$

[Nettobarwert aller Batterieinvestitionen]

Wirtschaftlichkeit – erlaubte Kosten für Batterie

basierend auf „Gewinn“ durch erhöhten Eigenverbrauch über 20 Jahre



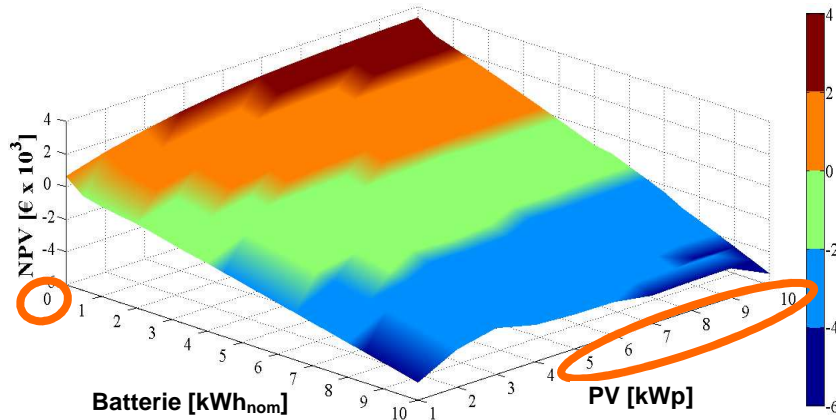
- für das Lastprofil „EV niedrig“ sind die erlaubten Kosten der Batterie rund 600 €/kWh_{genutzt}
- bei „EV hoch“ erzielt nur eine Batterie unter 4 kWh eine hinreichend gute EV-Erhöhung, um die die erlaubten Kosten über 500 €/kWh_{genutzt} zu halten.
- Der PV-Ertrag muss über oder gleich dem Jahresbedarf (hier 4000 kWh/a) liegen, um die Batterie gut zu nützen.

Berechnung für 2 Lastprofile (15 min-Werte) mit identischem jährlichem Energiebedarf von 4000 kWh pro Jahr

- Lastprofil „EV hoch“ mit sehr hohem Verbrauch über Tag (und relativ wenig am Abend)
- Lastprofil „EV niedrig“ mit sehr niedrigem Verbrauch über Tag.
- Fall [15ct; 25ct+3%]: Einspeisetarif 15 ct sowie 25 ct anfänglichen Stromkosten mit 3% jährlicher Steigerung - 2% Rendite

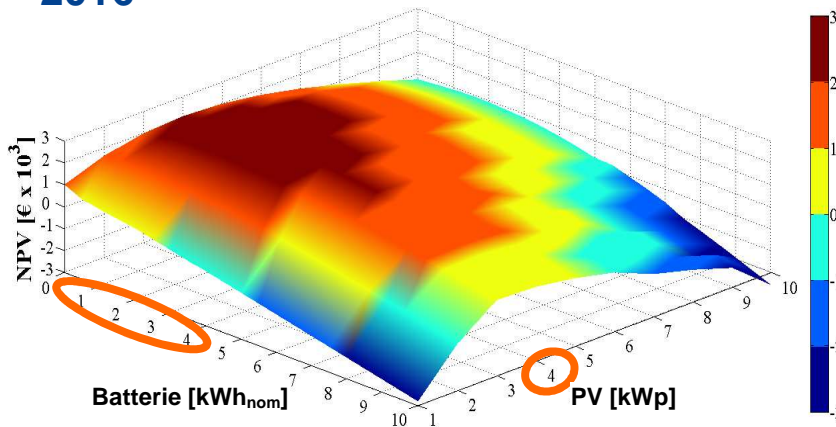
Amortisation von PV Speichersystemen

Ende 2012

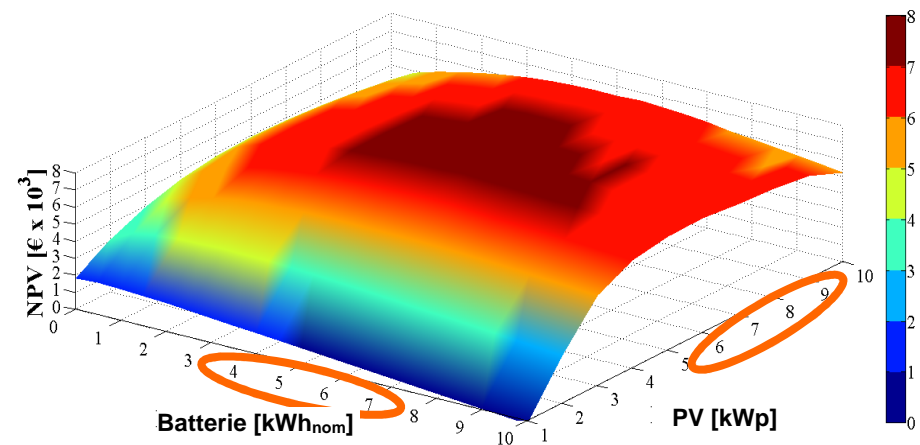


- **2012:** PV Anlagen ohne Speicher amortisieren sich über den Einspeisetarif und geringen Eigenverbrauch
- **2016:** der Einspeisetarif allein ist zu gering für die PV-Anlagenamortisation; genaue Auslegung für optimierten Eigenverbrauch ist notwendig; eine kleine Batterie hilft der Amortisation des Gesamtsystems.
- **2020:** eine relativ große Batterie verbesserte die PV Anlagenamortisation über den Eigenverbrauch; relativ große PV Anlagen sind wirtschaftlich.

2016



2020



NPV: Net present value (Nettobarwert)

Zusammenfassung: PV mit Wärmepumpe und Speicher Eigenverbrauch, Autarkiegrad und Netzentlastung



- Einfamilienhaus, 4 Personen, PV-Anlage 5500 kWh
 - Eigenverbrauch ~ 30%
- Eigenverbrauchserhöhung durch WP – ohne Batterie
 - von 30% auf 40% bei hohem Gebäudestandard
 - thermisches Speichervolumen von ≥ 1000 L sinnvoll
- Eigenverbrauch und Autarkiegrad mit genutztem Energieinhalt der Batterie von 5 kWh, jeweils erhöht um
 - ~ 30% für reinen Betrieb elektrischer Haushaltsgeräte
 - ~ 10% mit Wärmepumpe und thermischem Speicher
- Wärmepumpen erlauben wirkungsvolles Lastmanagement

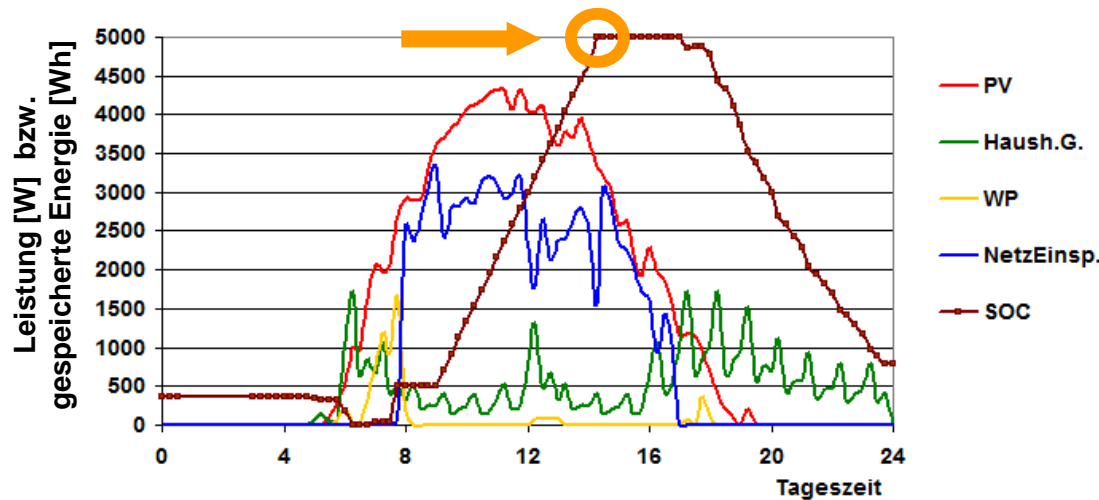
Zusammenfassung: PV mit Wärmepumpe und Speicher Eigenverbrauch, Autarkiegrad und Netzentlastung



- **Vorteil für den Eigentümer und lokalen Nutzer**
 - Erhöhung von Eigenverbrauch und Autonomie bei Netzparität (Grid-Parity)
 - Ersatz steigender Energiebezugskosten durch Investitionskosten
- Höhe der Investitionskosten
 - Wärmepumpe im Rahmen einer Neu- oder Ersatzinvestition → geringer zusätzlicher Invest
 - thermischen Speicher größer auslegen → geringer Invest
 - Batteriespeicher → noch hoher Invest
- Batterieamortisation [2% Rendite] durch Eigenverbrauchserhöhung
 - erlaubte Kosten pro genutzten kWh rund 650 € in 2014
 - erlaubten Kosten pro nominaler kWh rund 450 € in 2014 bei einem Nutzungsgrad von 60% für Lithium-Ionen Batterie

Ausblick: Netzentlastung durch gesteuerte Batterieladung

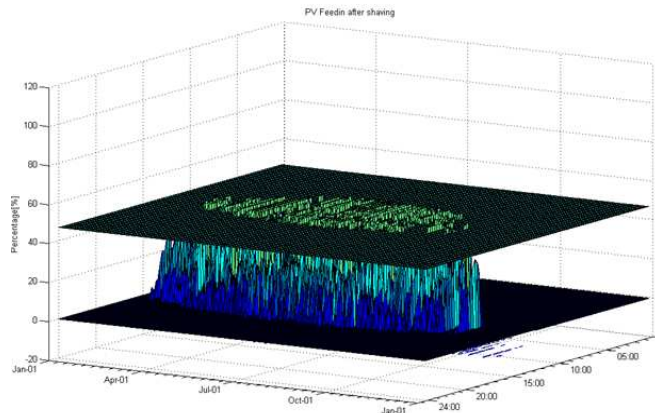
- **Batterieladekurve**



Beispiel:

Der maximal erlaubte Ladezustand der Batterie wird von 9.00 Uhr bis 14.00 Uhr linear erhöht

- **Verbleibende Einspeiseleistung ins Netz**



Netzentlastung durch Begrenzung der Einspeisung:
55% der Maximaleinspeisung erreicht durch einfachen Algorithmus für Batterie- und thermische Speicherbeladung.

Vorteil für den Verteilnetzbetreiber:

- intelligente Speicherbeladung reduziert Einspeisespitzen
- durch Speicher variable Bezugszeiten für Netzstrom
- **Beteiligung an Speicherkosten / Anreize durch Tarife!?**

// Energie mit Zukunft

// Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-
Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

jann.binder@zsw-bw.de



Stuttgart:
Photovoltaik (mit Solab),
Energiepolitik und
Energieträger, Zentralbereich
Finanzen, Personal & Recht



Solar-Testfelder:
Widderstall und Girona (ES)



Ulm:
Elektrochemische Energietechnologien mit eLaB

