



TU Clausthal

Forum Energie

# Herausforderungen der nachhaltigen dezentralen Energieversorgung

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Technische Universität Clausthal



## Agenda

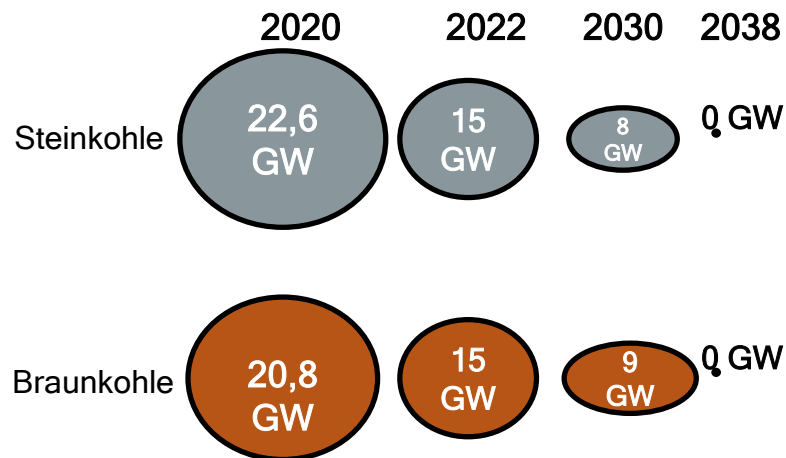
- Motivation
- Herausforderungen der Energiebereitstellung im Kontext
  - der Sektorenkopplung
  - der Integration der Erneuerbaren
- Welche Herausforderungen ergeben sich für das elektrische Versorgungsnetz
- Wärmepumpen als Baustein der Energiewende

## Klimaziele für Deutschland

- 2030 Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissionen um 65% im Vergleich zu 1990
- 2045 CO<sub>2</sub> Neutralität

### ■ Wie erreichen wir das?

- Ausstieg aus der Kohle-  
verstromung
- Ausstieg aus Erdgas
  
- Erneuerbare Energien in  
allen Sektoren



## CO-2 Neutralität in allen Sektoren

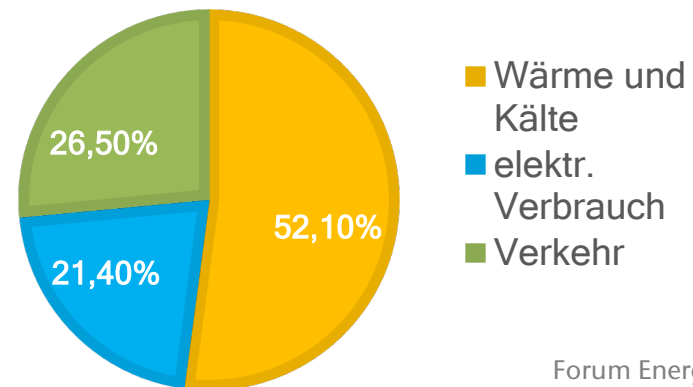
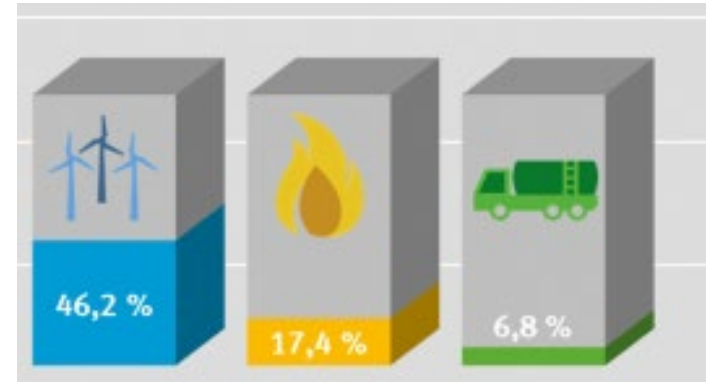
- Anteile der erneuerbaren Erzeugung in Sektor

- elektrische Energie
- Wärme und Kälte
- Verkehr

→ 100%

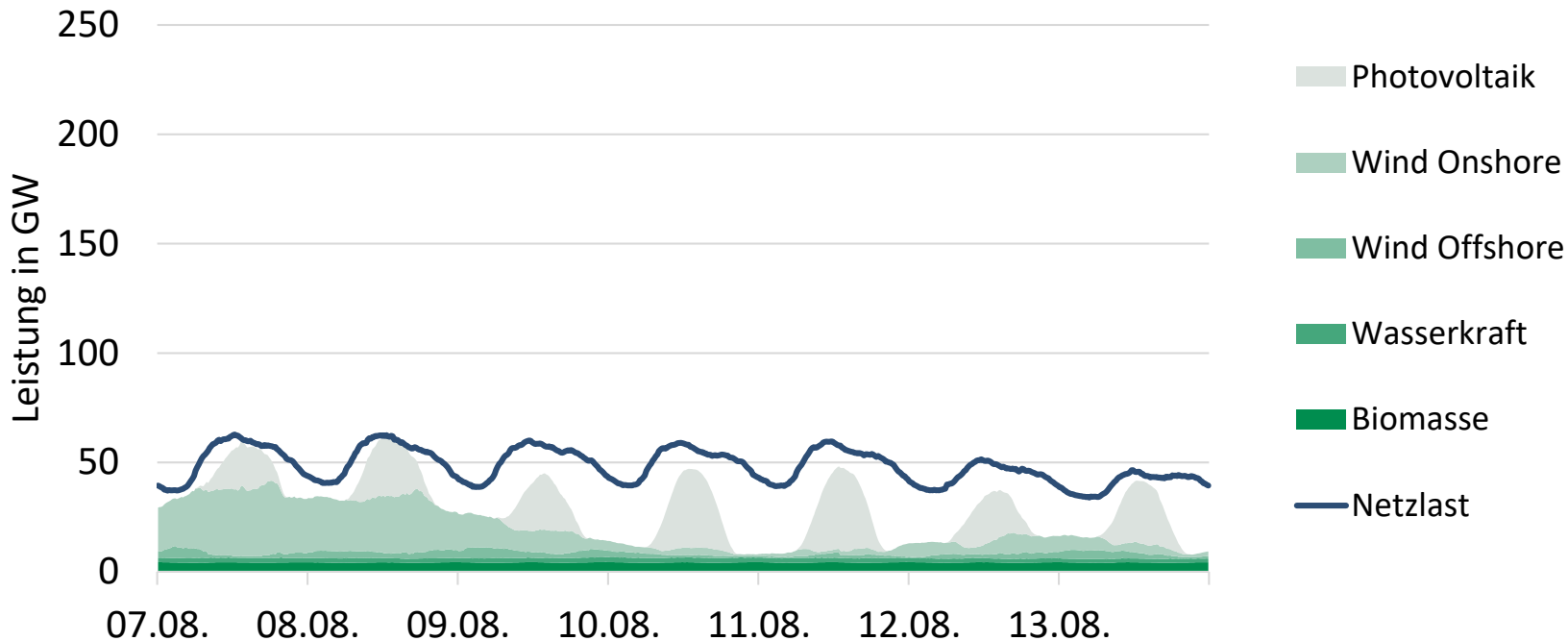
- Anteile der einzelnen Sektoren am Gesamtenergieverbrauch

- Elektrische Energie
- Wärme und Kälte
- Verkehr



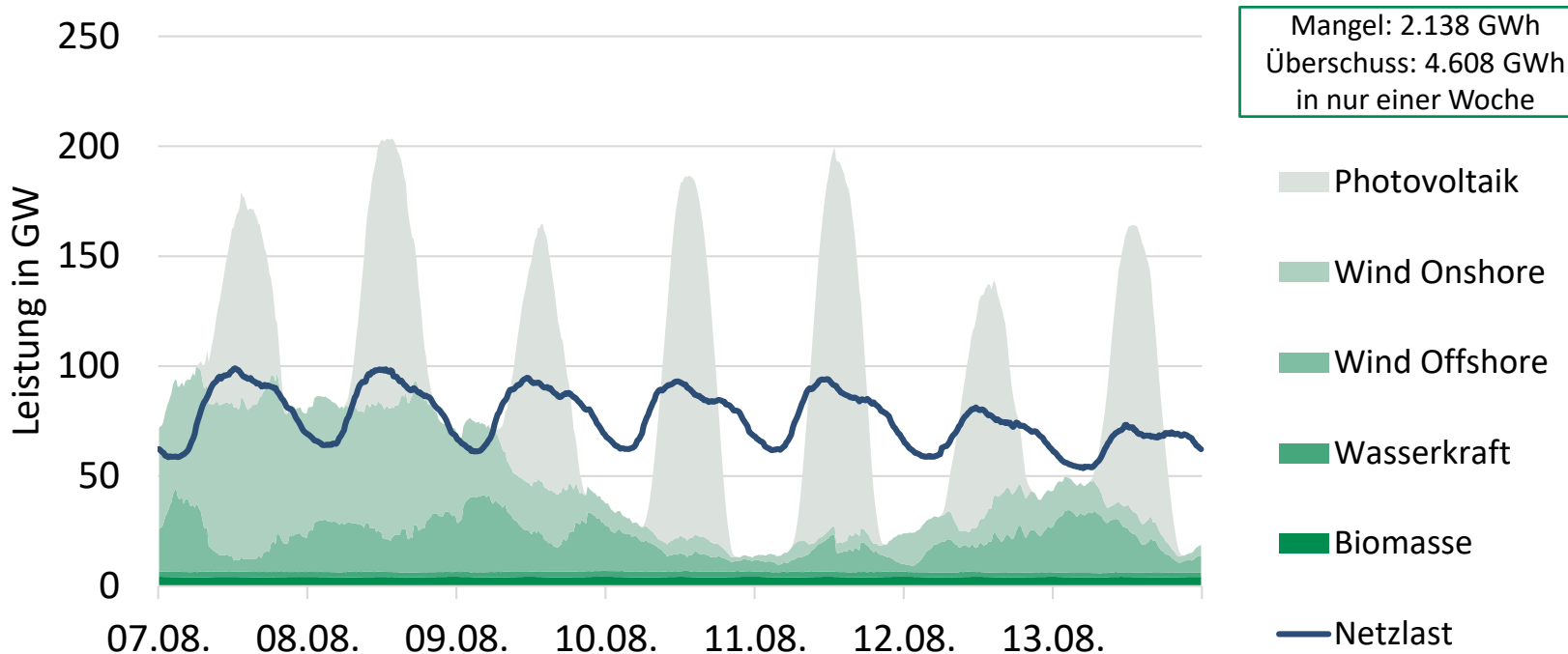
## Entwicklung der erneuerbaren Energien

Netzlast und EE-Erzeugung im August 2023 in Deutschland

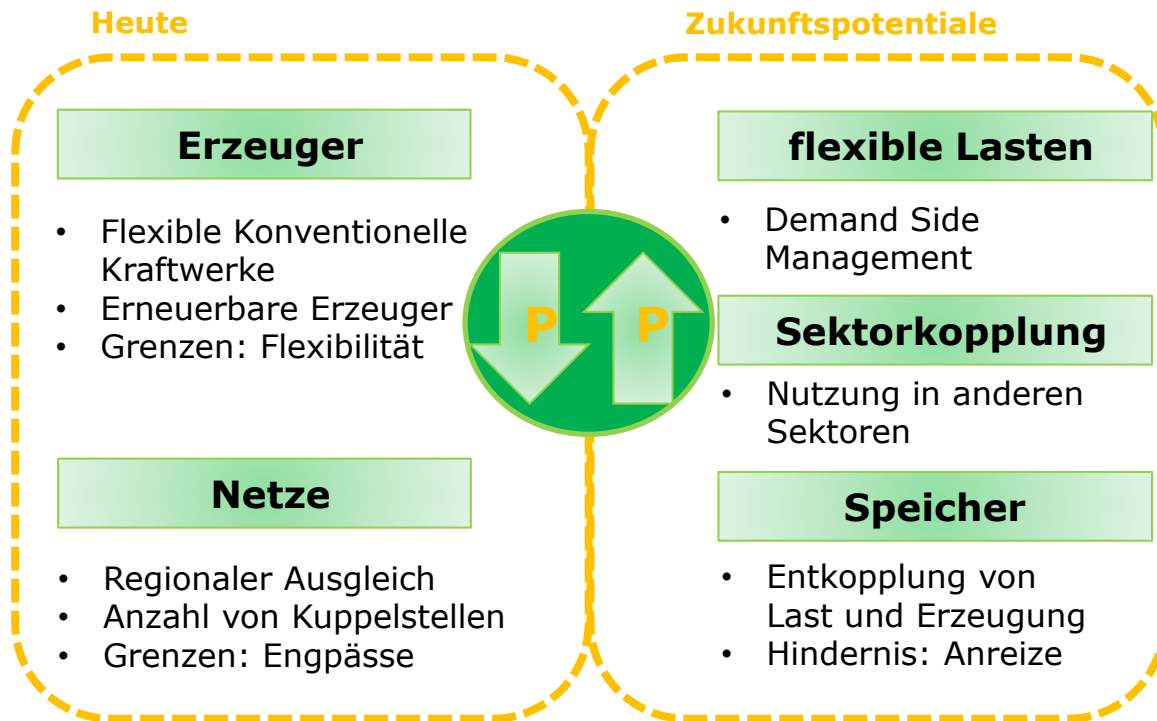


## Entwicklung der erneuerbaren Energien

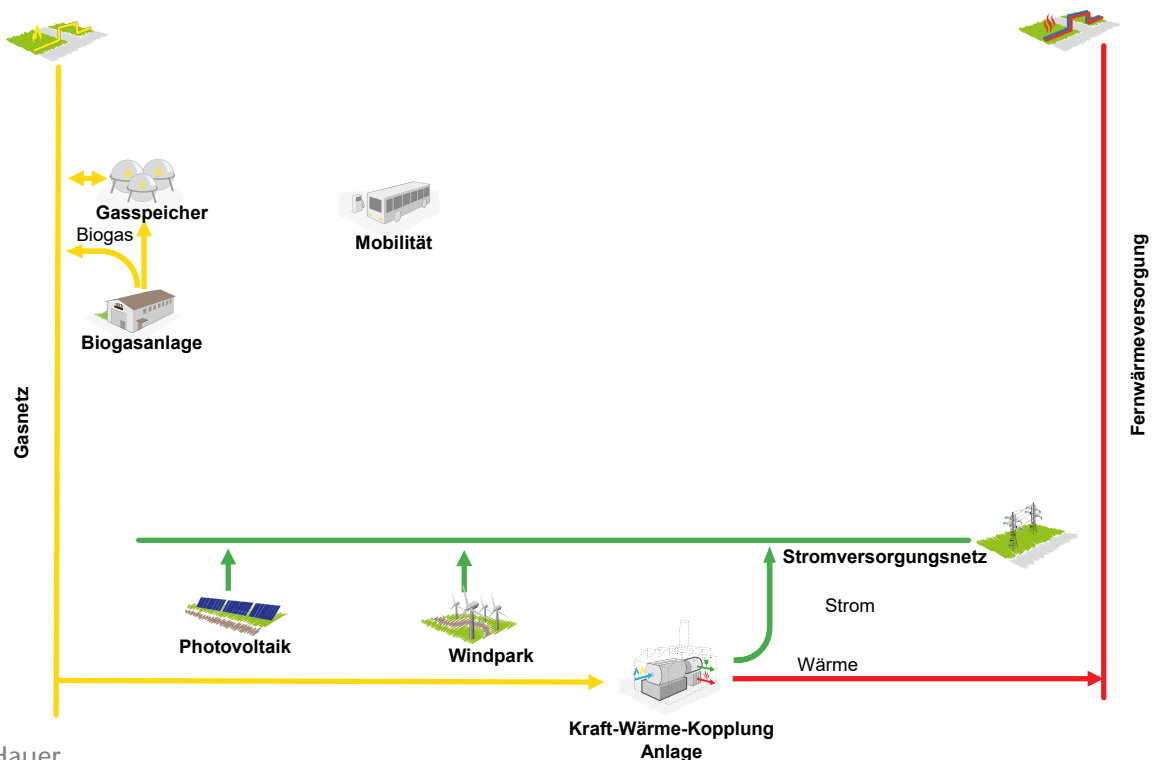
Netzlast und EE-Erzeugung im **August 2045** in Deutschland



## Flexibilitätstechnologien

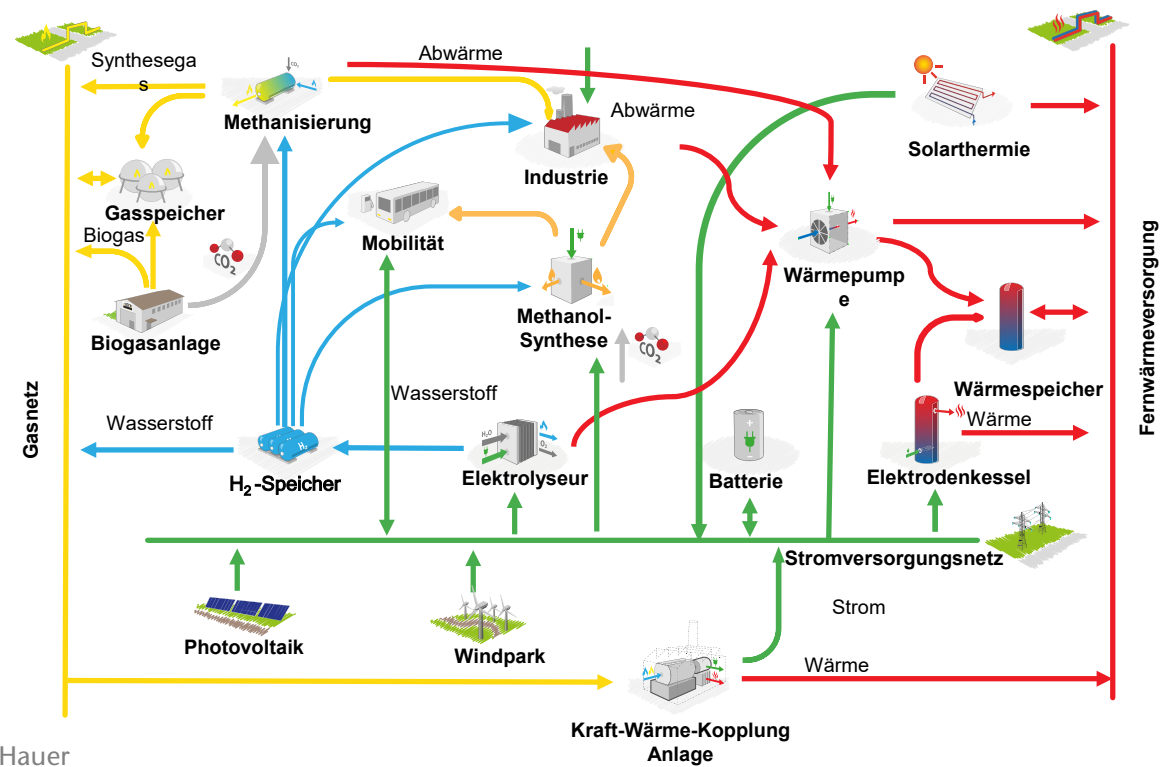


## Stand der Technik: drei entkoppelte Systeme



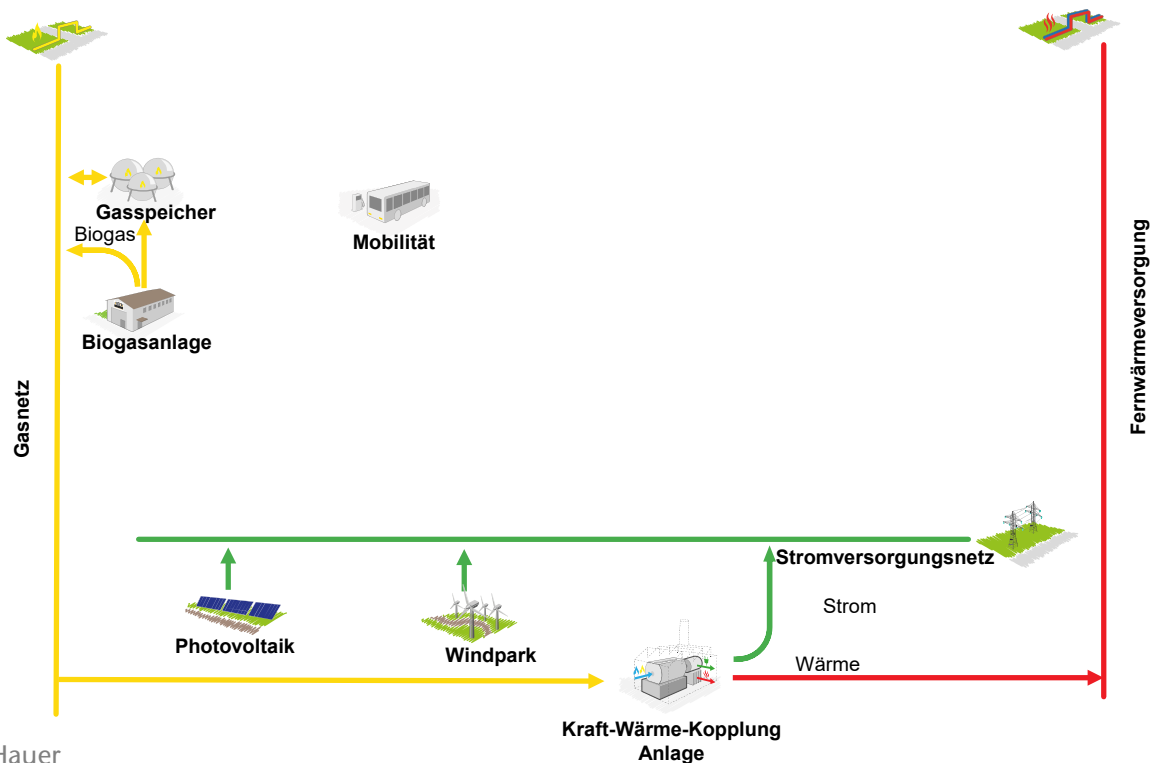


## Zukunft: Drei gekoppelte Systeme



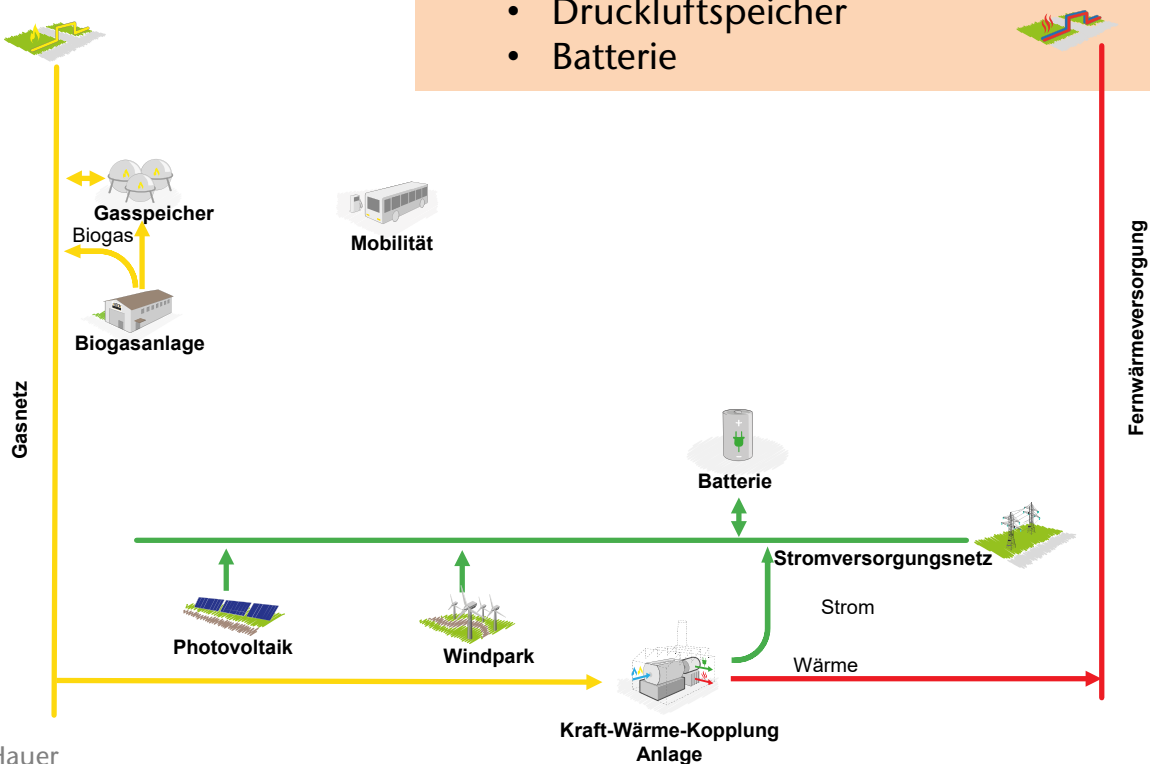
## Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

- Strom- und Wärmeerzeugung
- Gas, Kohle oder Holz als Eingangsstoffe
- Beispiel : Wasserstoff, der als Eingangsstoff für Brennstoffzelle dient.



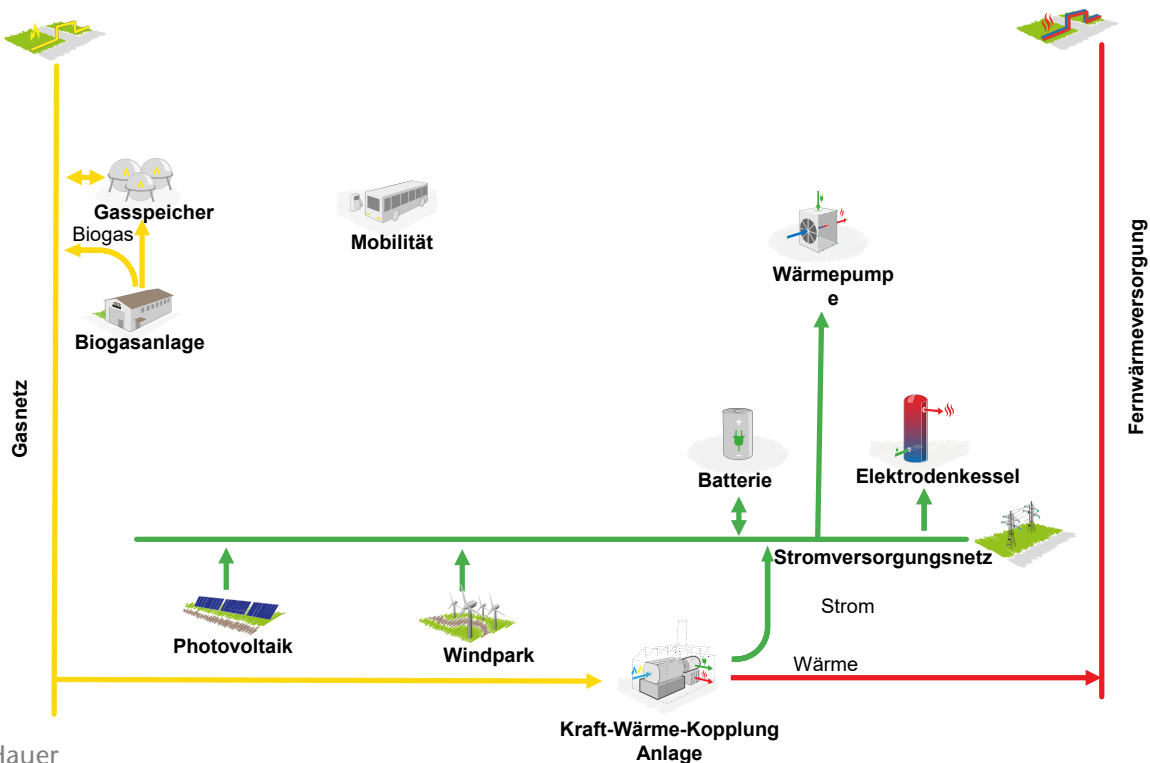
## Batterie and andere Speichersysteme:

- Ausgleich von Last und Erzeugung
- Verlagerung von Energie von Zeitfenstern mit hoher Erzeugung zu Zeitfenstern mit hoher Lastnachfrage
  - Pumpspeicher
  - Druckluftspeicher
  - Batterie



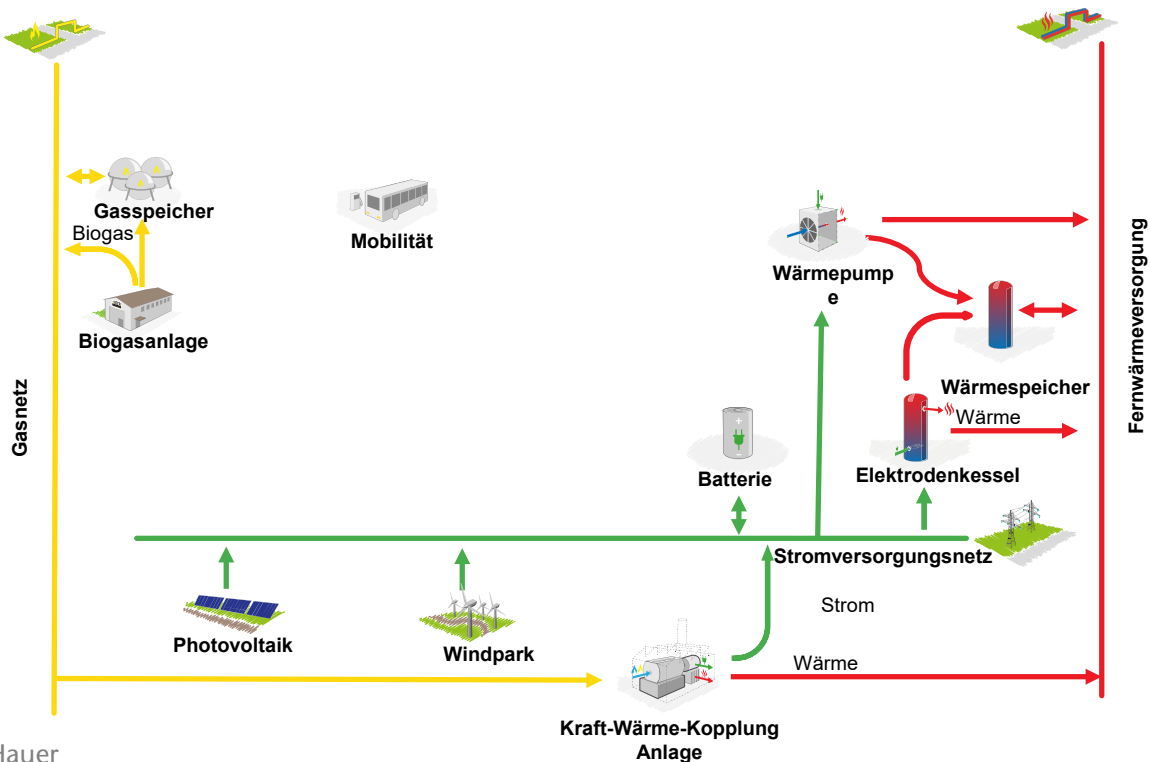
## Power 2 Heat

- Strom wird verwendet um Wärme zu erzeugen.
  - Wärmepumpe
  - Elektrodenkessel



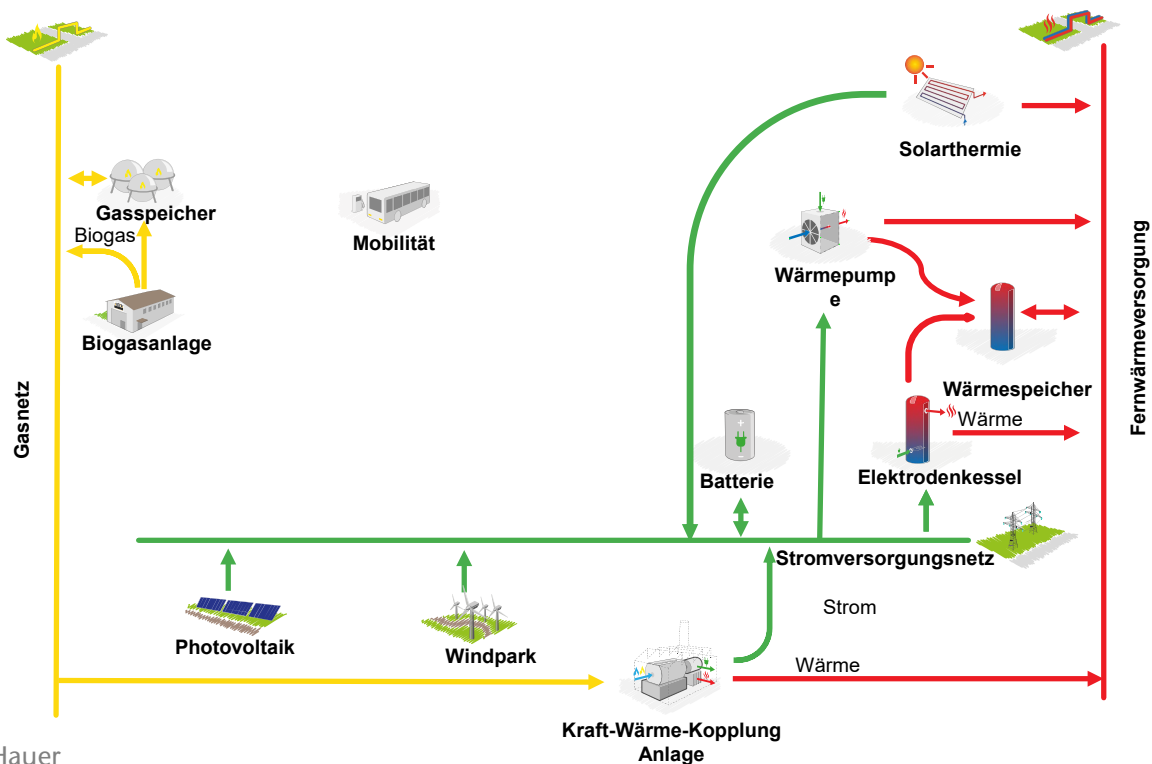
## Wärmespeicherung

- Wärme kann zwischengespeichert werden
  - sensible Wärmespeicher
  - Phasenwechselspeicher
  - geothermische Speicher



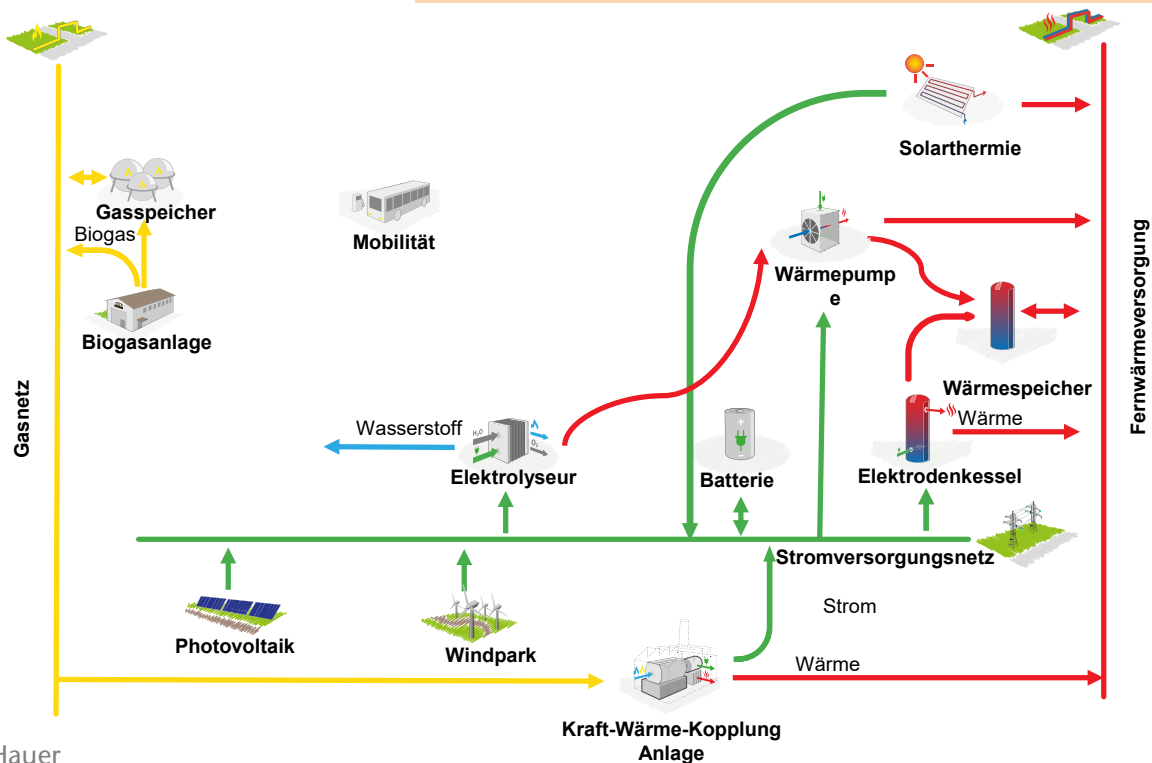
## Solarthermie

- Sonnenstrahlungen werden zur Wärmeerzeugung genutzt.
- Solarkollektoren konzentrieren Sonnenstrahlungen, um die für die Stromerzeugung benötigte Hochtemperaturwärme zu erzeugen



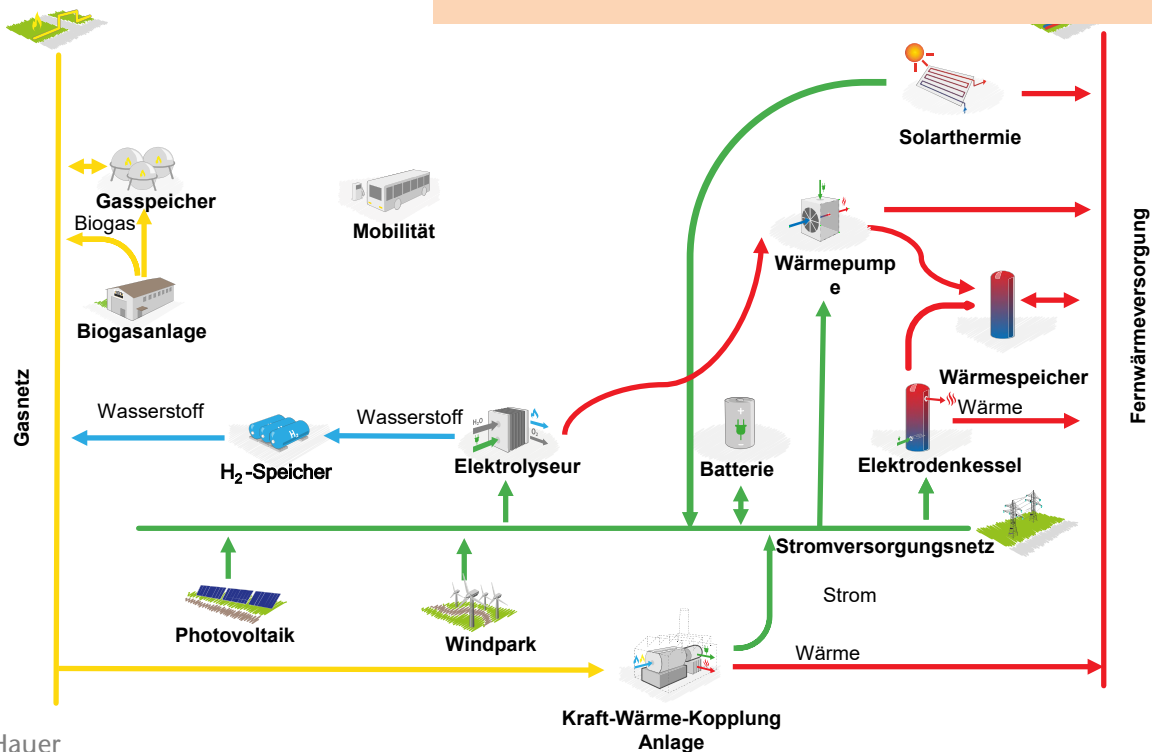
## Elektrolyse

- Mithilfe von Strom werden Wassermoleküle in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten.
- Die durch die ohmschen Verlusten erzeugte Wärme kann im Wärmesektor verwendet werden.



## Wasserstoffspeicher

- langfristige, übersaisonale Speichermöglichkeit
- dezentral und mobil
- zentral in Salzkavernen



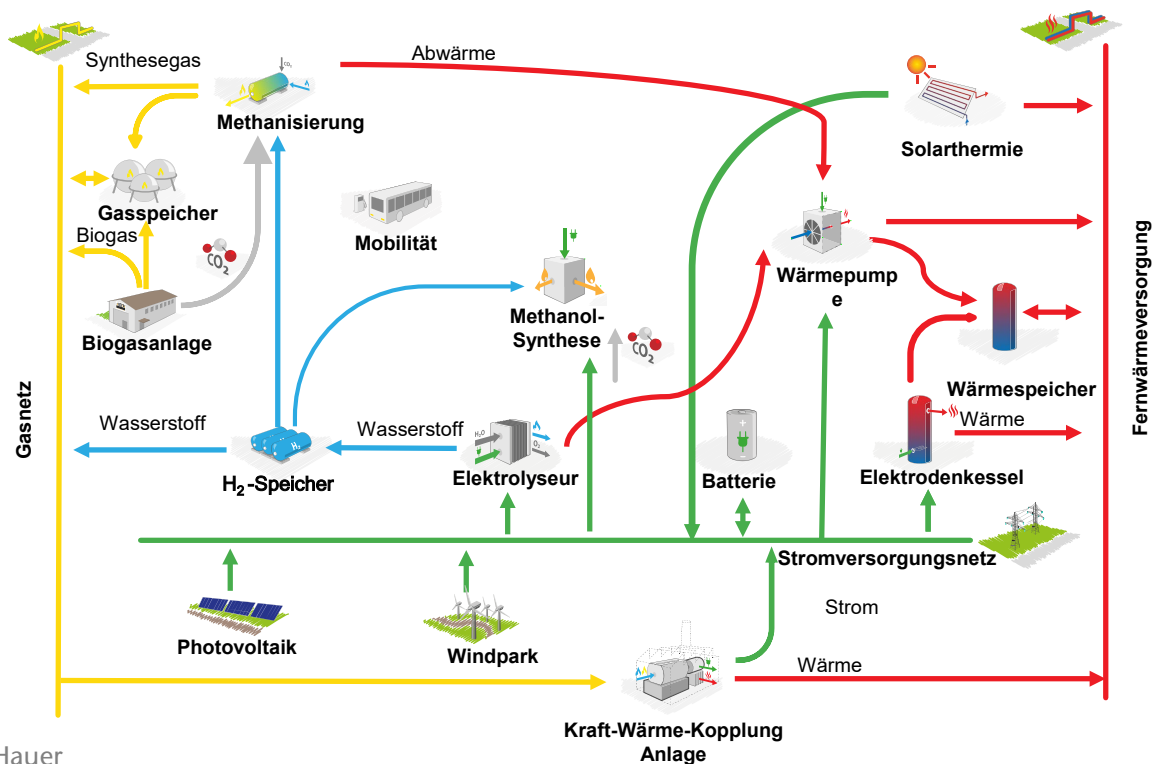


## Methanolsynthese

- Verwendung von CO und H<sub>2</sub> zu Herstellung von Methanol.

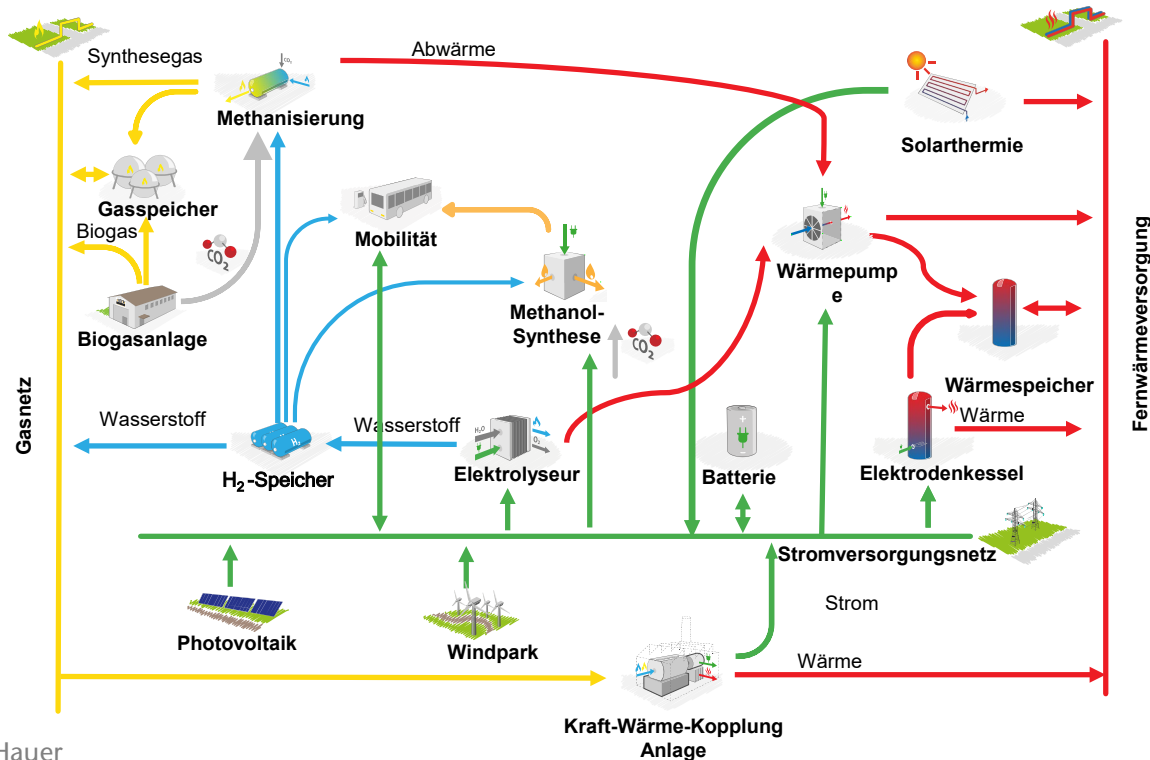
## Methanisierung

- Reaktion von H<sub>2</sub> mit CO zur Herstellung von Synthesegas.



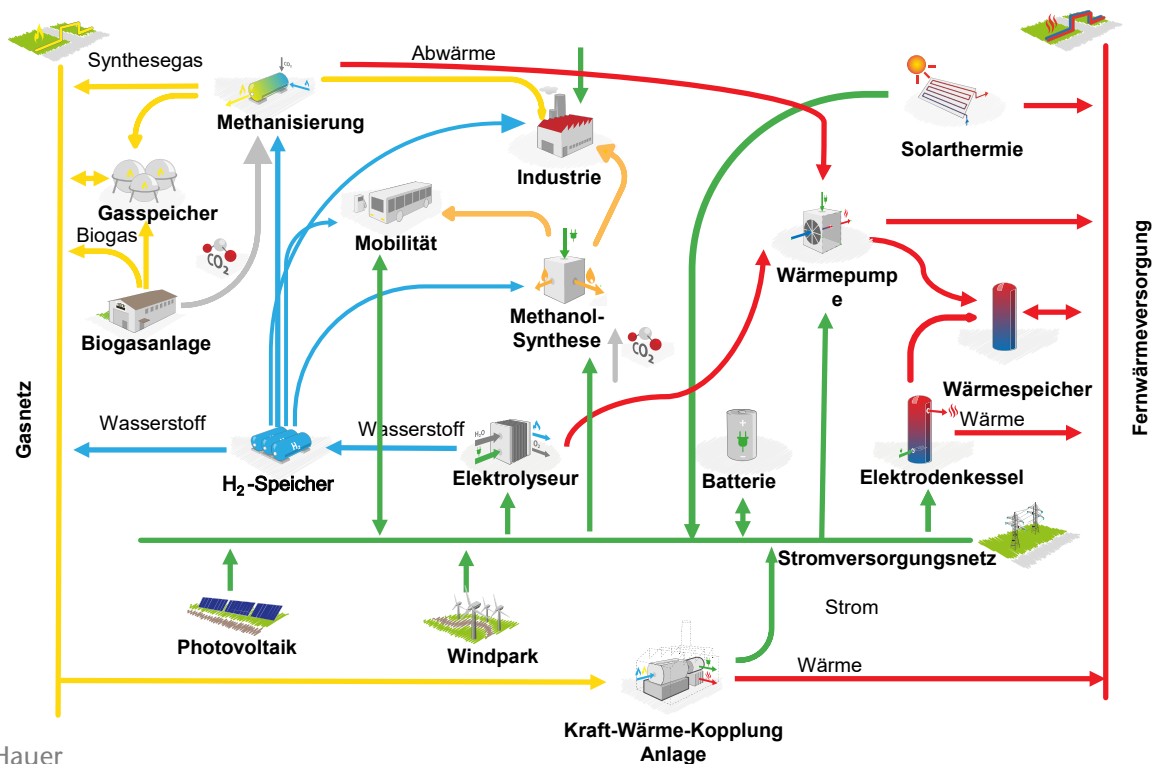
## Kopplung im Verkehrssektor

- Brennstoffzellen-Pkw, -Busse, -Lkw
- Methanolantrieb-Autos
- Batterieelektrische Fahrzeuge (mobile Energiespeicher)
- Hybride batterieelektrische Fahrzeuge



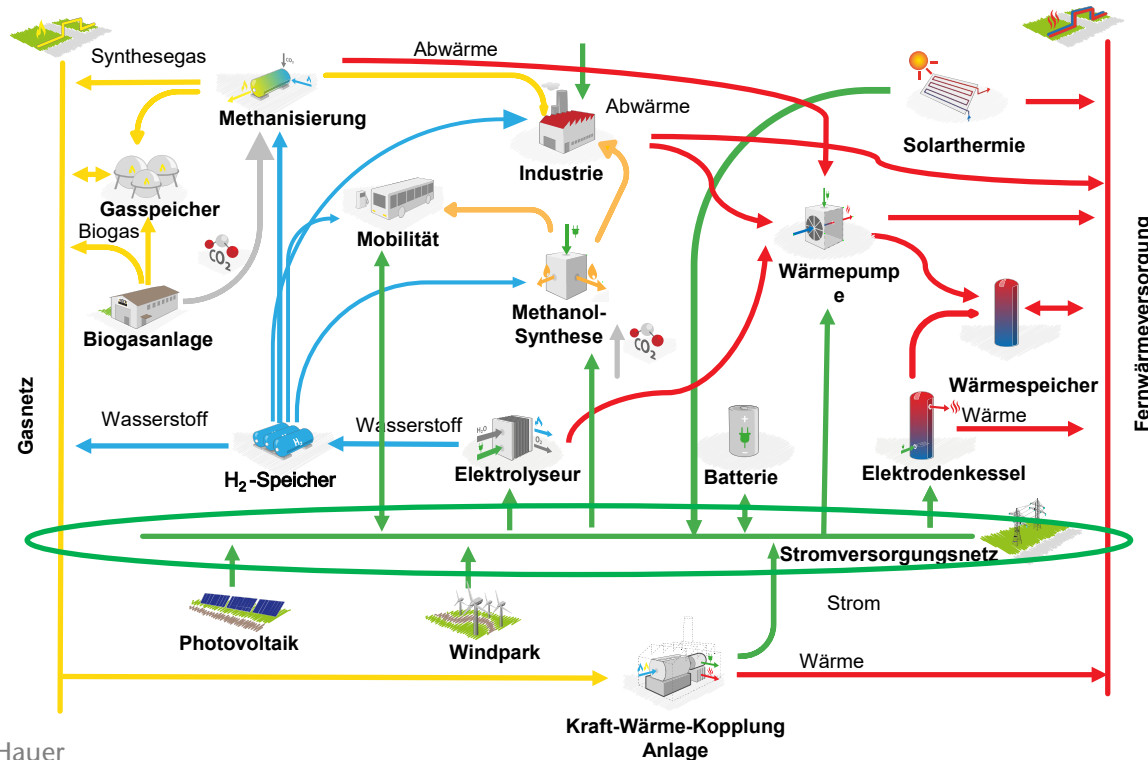
## Industrie

- Prozesswärme
- Strombedarf



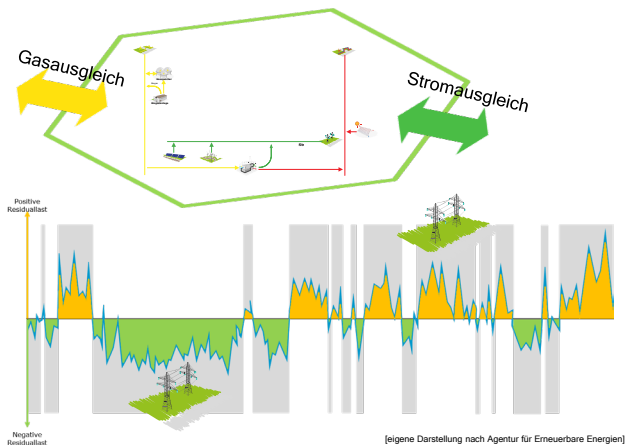
## Industrie

- Prozesswärme
- Strombedarf
- Sektorkopplung
- Beispiel: Salcos-Projekt bei der Stahlerzeugung

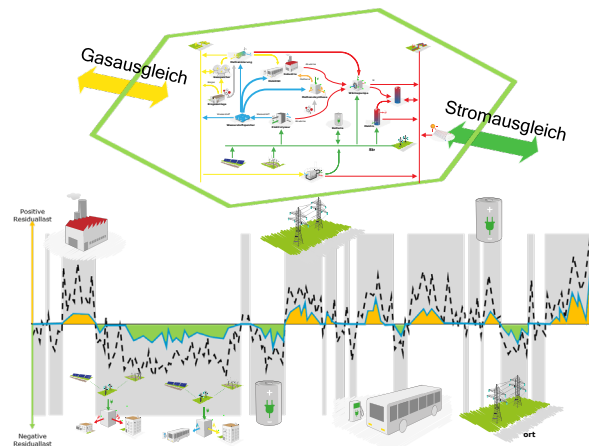


## Einfluss der Sektorenkopplung

### Konventionelles Energiesystem

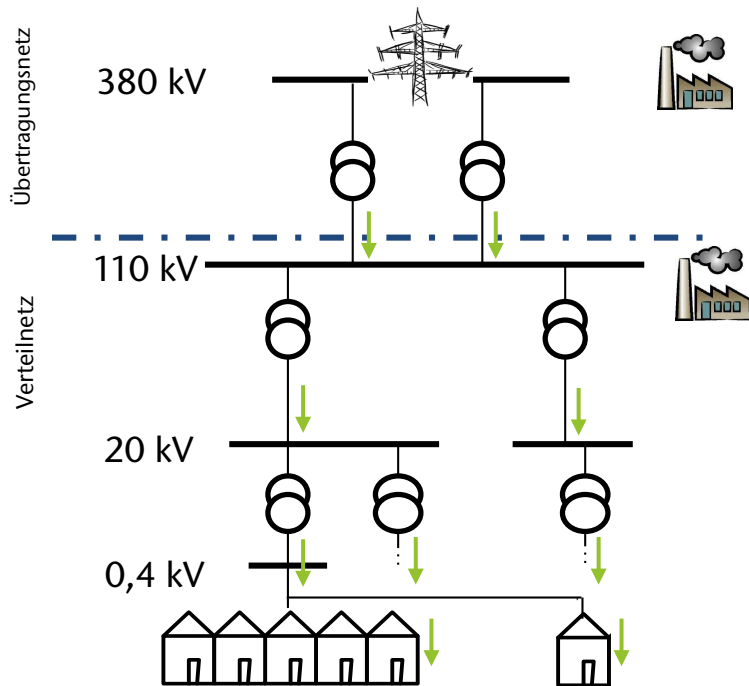


### Integriertes Energiesystem



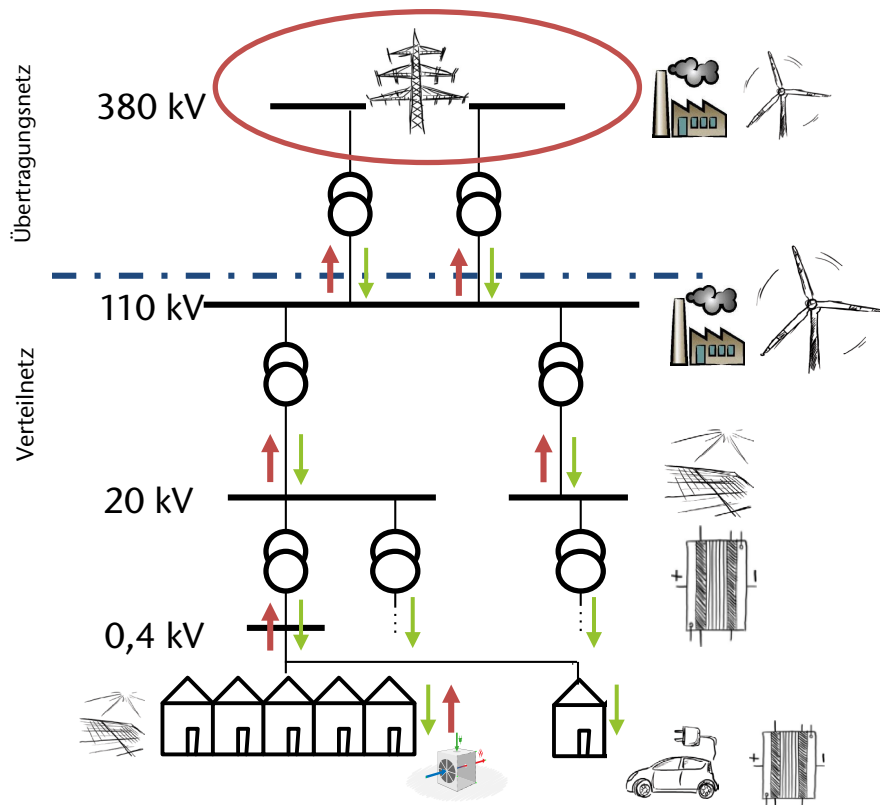
Residuallast = elektrischer Bedarf – elektrische Energieerzeugung

## Herausforderungen für das elektrische Netz



### Historisch:

- Erzeuger sind in der Hoch- und Höchstspannung angeschlossen
- unidirektionaler Leistungsfluss



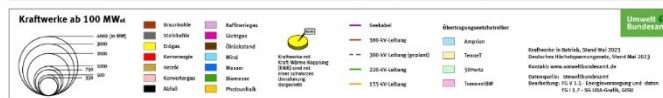
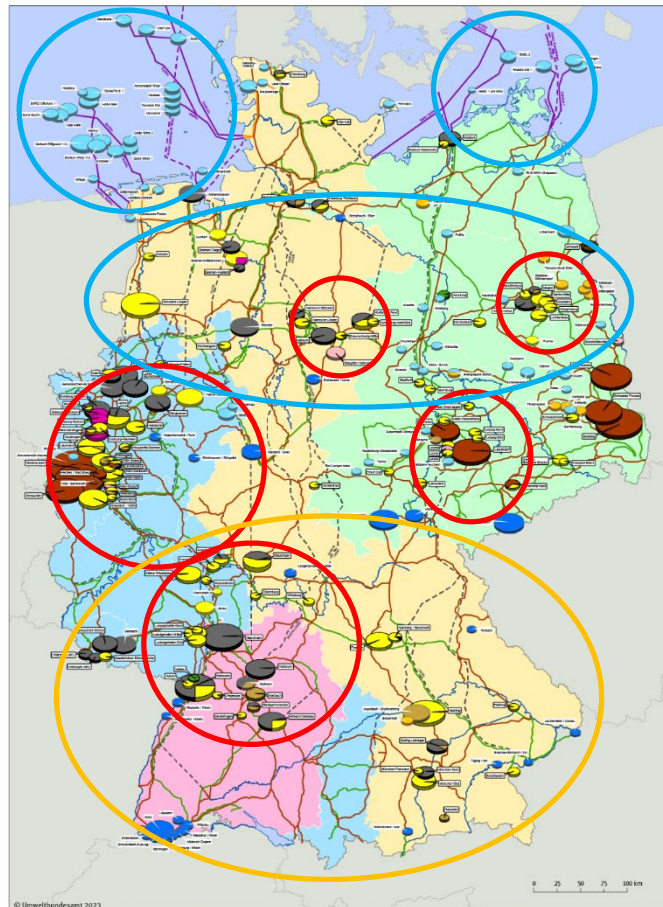
## In Zukunft:

- Bidirektionale Lastflüsse
- Systemdienstleistung aus alternativen Technologien

## Herausforderungen für das elektrische Netz

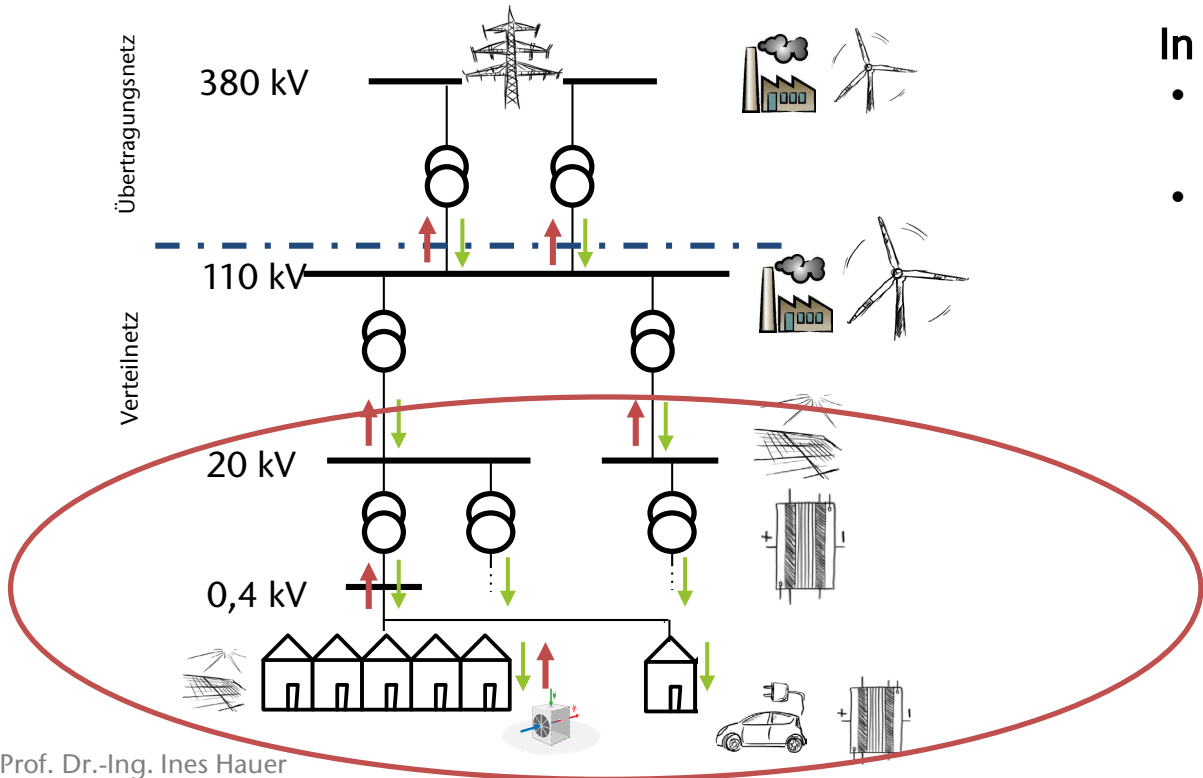
- **Konventionelle Kraftwerke sind nahe an Lastzentren**
- Große Windparks werden im Norden Deutschlands angeschlossen
- Große Photovoltaikanlagen erreichen im Süden höhere Erträge
- Photovoltaik Aufdachanlagen sind in ganz Deutschland verteilt
- Folge:
  - Unzureichende Leitungskapazitäten
  - Netzausbau (AC,DC)

<https://www.umweltbundesamt.de/bild/kraftwerke-verbundnetze-in-deutschland>





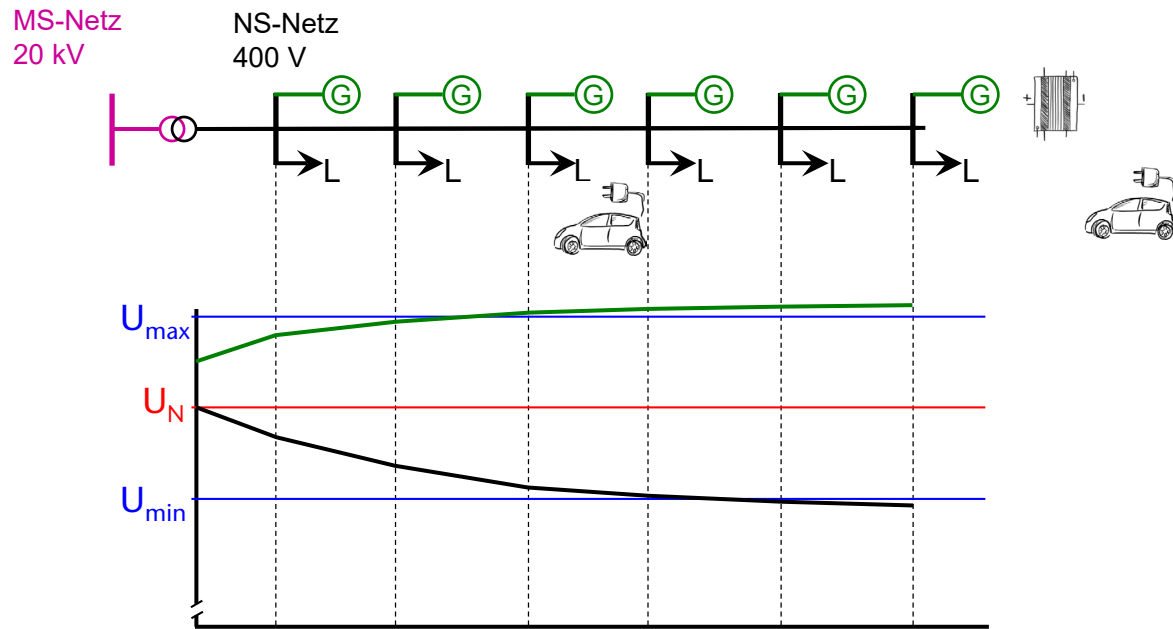
## Herausforderungen für das elektrische Netz



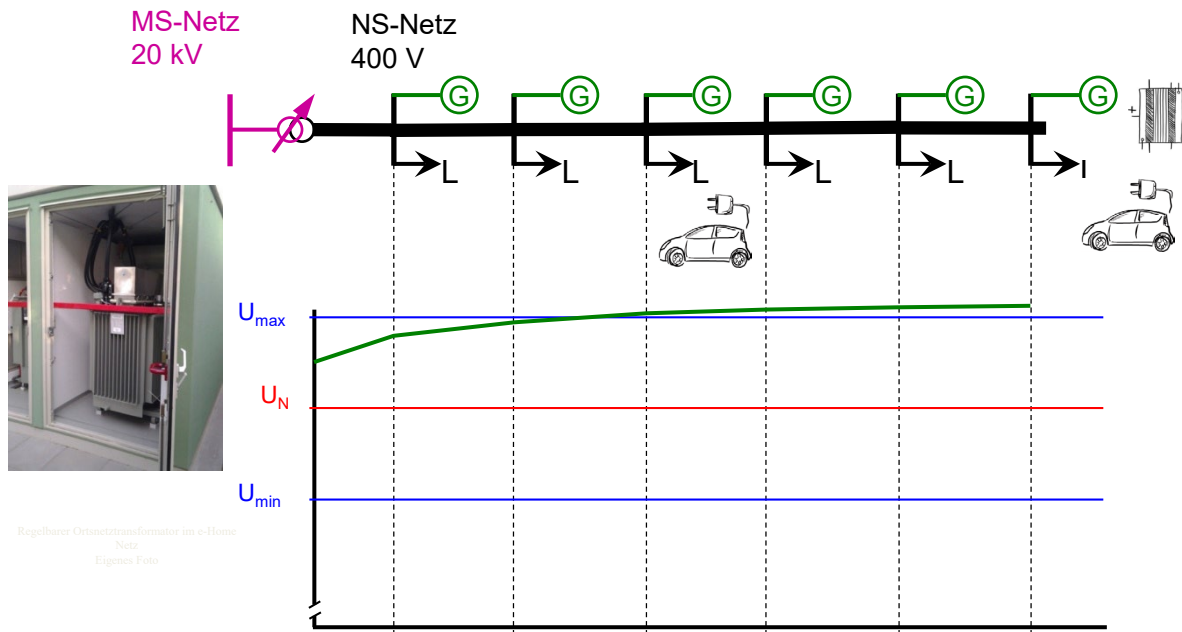
In Zukunft:

- Bidirektionale Lastflüsse
- Systemdienstleistung aus alternativen Technologien

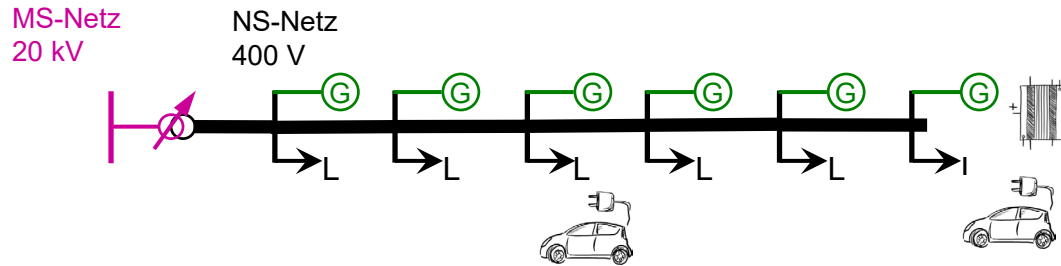
## Spannungshaltung in der Niederspannung



## Spannungshaltung in der Niederspannung

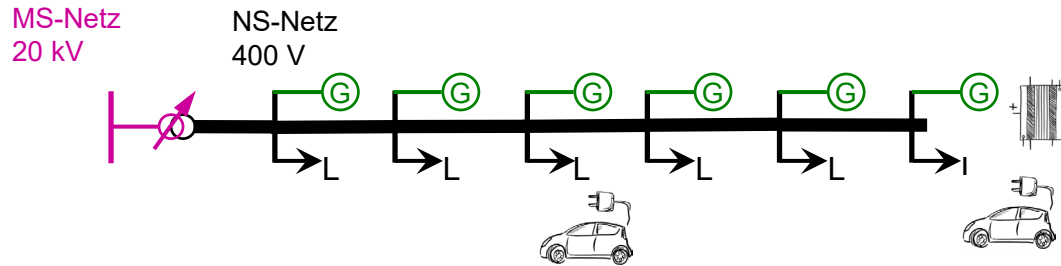


## Herausforderungen im Niederspannungsnetz



- Zukünftige Netzplanung im Verteilnetz – Ausbau für das letzte kW oder unter Berücksichtigung von Flexibilisierung nach §14a EnWG?
- Welche Flexibilitätspotentiale gibt es im Verteilnetz und mit welchen Mitteln können die Potentiale ausgeschöpft werden?

## Herausforderungen im Niederspannungsnetz



- Wie können Flexibilitätsoptionen aktiviert und betrieben werden?
  - Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur notwendig?
  - dezentrale intelligente Entscheidung vs. Entscheidung aus der Leitwarte
  - Nutzung von Vehicle2Grid Anwendungen
  - Wie erfolgt die Verarbeitung vieler Daten?
  - Berücksichtigung Resilienzanforderungen?

## § 14a EnWG – Entwurf der BNetzA

- „Netzorientierte Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen“
- Ziel: Schutz der Verbraucher vor
  - Ablehnung von Netzanschlüssen oder
  - massiver Abschaltung bestehender Anlagen
- Grundansatz:
  - Netzbetreiber: Keine Ablehnung eines Netzanschlusses wegen möglicher Überlastungen im Verteilnetz zulässig
  - Verbraucher: Inkaufnahme erforderlicher Komforteinschränkungen durch Schaltmaßnahmen

## Wen betrifft § 14a EnWG?

### Steuerbare Verbrauchseinrichtungen (SteuVE)

Nicht-öffentlich zugängliche Ladepunkte  
für Elektromobile

Wärmepumpenheizungen  
(inkl. Zusatzheizung)

Anlagen zur Erzeugung  
von Kälte

Stromspeicher  
(Bezugsrichtung)

Leistungs-  
-bezug

( $P_{\max}$ )

> 4,2 kW

Anschluss

Nieder-  
spannung

In-  
betrieb-  
nahme ab  
1.1.2024

## § 14a – Vorgehen

Anspruch auf **sofortigen** Netzanschluss

Allg. Pflicht d. Netzbetreibers zur **bedarfsgerechten** Netzertüchtigung, § 11 Abs. 1 EnWG

Durchführung Steuerungsmaßnahmen + mit weiteren Maßnahmen zu rechnen → Netzbetreiber muss spätestens dann **Netzausbauplanung** für diesen Bereich anpassen

Dokumentationspflicht d. Netzbetreibers





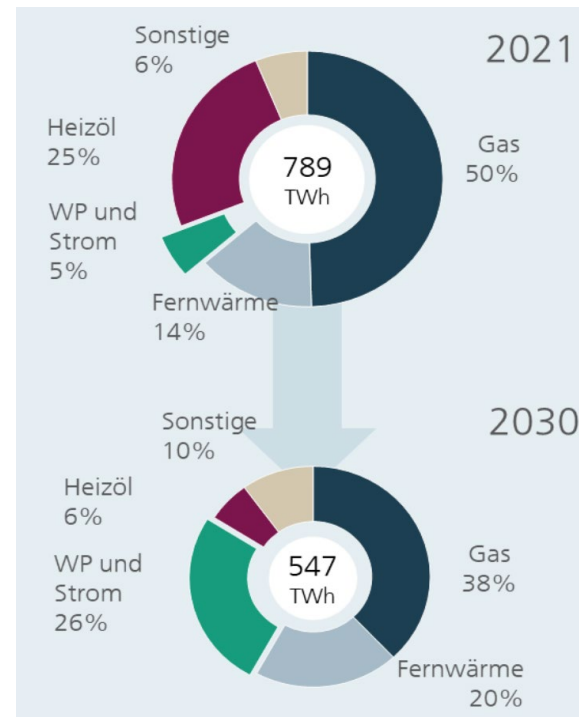
# **FLEXIBLE WÄRMEPUMPEN ALS BAUSTEIN DER ENERGIEWENDE**

## Wärmewende

- Raumwärme:
  - 2021: 28 % des deutschlandweiten Endenergieverbrauchs
  - Nur 17,4 % aus erneuerbaren Energien

**Energiewende nicht ohne  
Wärmewende!**

- Schlüsseltechnologien:
  - Wärmepumpen
  - Nahwärmenetze



[[https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user\\_upload/Kurzstudie\\_FlexWP.pdf](https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/Kurzstudie_FlexWP.pdf)]

## Nachhaltige Wärmeversorgung

### Konventionelle Konzepte

- Luft-Luft-Wärmepumpen
  - Dezentrale Wärmepumpen
  - Wärmequelle: Luft
- Nahwärmenetz
  - Zentrale Wärmegewinnung
  - Mögliche Wärmequellen:
    - Abwärme
    - Geothermie
  - Ggf. zentrale Großwärmepumpe

### Neues Konzept

- Kaltes Nahwärmenetz:
  - Nahwärmenetz mit 10 ... 25 °C
  - Dezentrale Wärmepumpen in Haushalten

# Luft-Luft-Wärmepumpe

## Vorteile

- Unabhängig von Wärmequellen
- Unabhängig von Nahwärmenetz  
→ besser in ländlichen Regionen
- Vergleichsweise geringe Anfangsinvestition

## Nachteile

- Schlechte Effizienz bei niedrigen Außentemperaturen
- Belastung des lokalen Verteilnetzes
- Lärmemissionen

## Nahwärmenetz

### Vorteile

- Nutzung verschiedener Wärmequellen (z.B. Abwärme)
- Skalierbar für Siedlungen und Stadtviertel
- Keine Belastung für das Niederspannungsnetz
- Keine Geräuschemissionen an Gebäuden

### Nachteile

- Hohe Investitionskosten
- Verfügbarkeit und Qualität einer Wärmequelle
- Wärmeverluste in Rohrleitungen
- Nicht im ländlichen Raum

# Kaltes Nahwärmenetz

## Vorteile

- Wärmequellen mit niedriger Temperatur nutzbar
- Potenziell höhere Effizienz als herkömmliche Nahwärme
- Weniger Wärmeverluste in Rohrleitungen
- Keine Geräuschemissionen an Gebäuden

## Nachteile

- Hohe Investitionskosten
- Nicht im ländlichen Raum
- Belastung des lokalen Verteilnetzes

## Entlastung der lokalen Verteilnetze

- Lokale Netzüberlastungen durch:
  - Wärmepumpen
  - Photovoltaik-Anlagen
  - E-Autos / Wallboxen
- Netzausbau teuer und langwierig
  - Alternative zur Netzentlastung erforderlich!
- Entlastung durch zeitlich flexiblen Betrieb der Verbraucher:
  - Wärmepumpen
  - Elektroautos



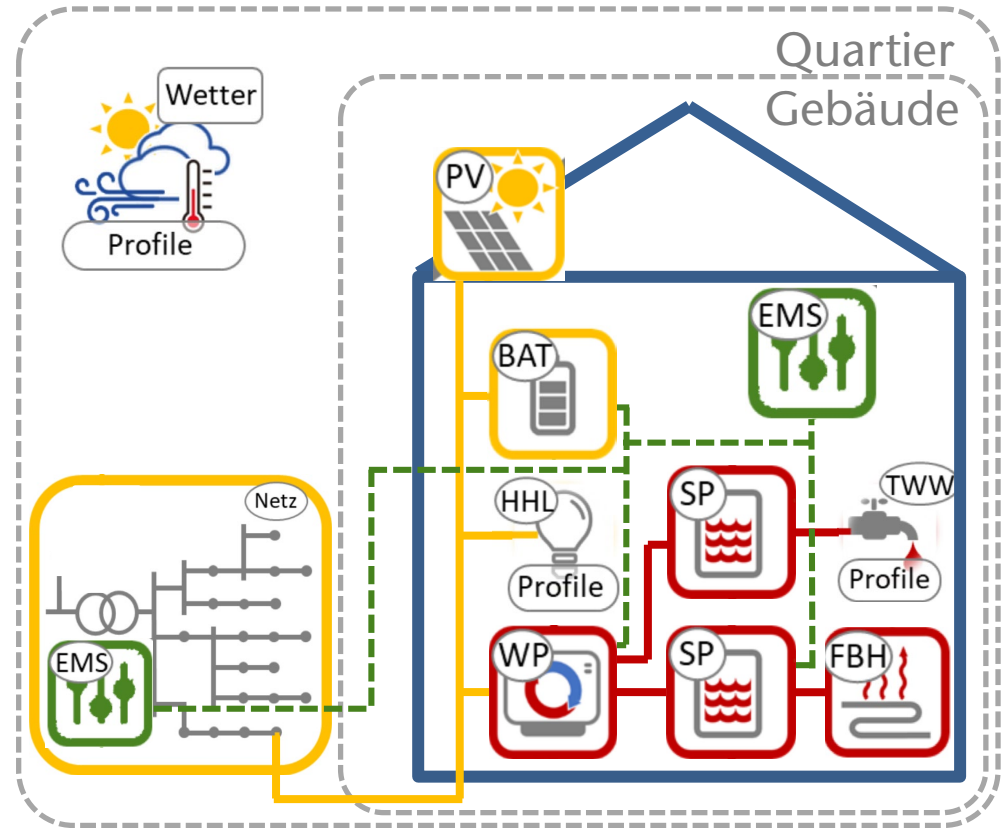
# Forschungsfrage

Können Wärmepumpen, wenn sie zeitlich flexibel betrieben werden, der Netzentlastung dienen?



## Simulationsmodell

- Simulation von Gebäuden und Niederspannungsnetz für Quartier
- Energiemanagementsysteme (EMS) ermöglichen Implementierung Steuerung der Komponenten
- Quartier-EMS ermöglicht zentral koordinierten Betrieb der Wärmepumpen und Speicher

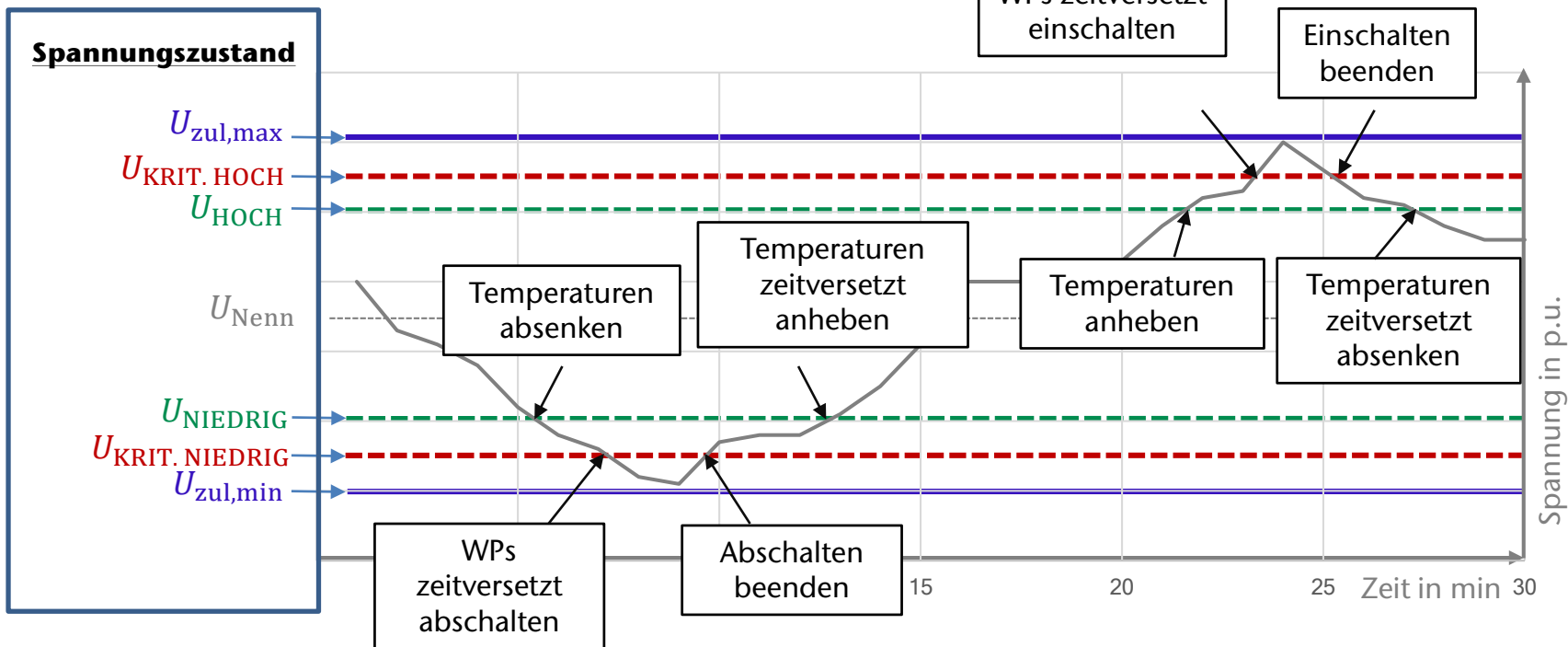


[<https://isfh.de/wind-solar-waermepumpen-quartier/>]

## Netzentlastung: Konzept

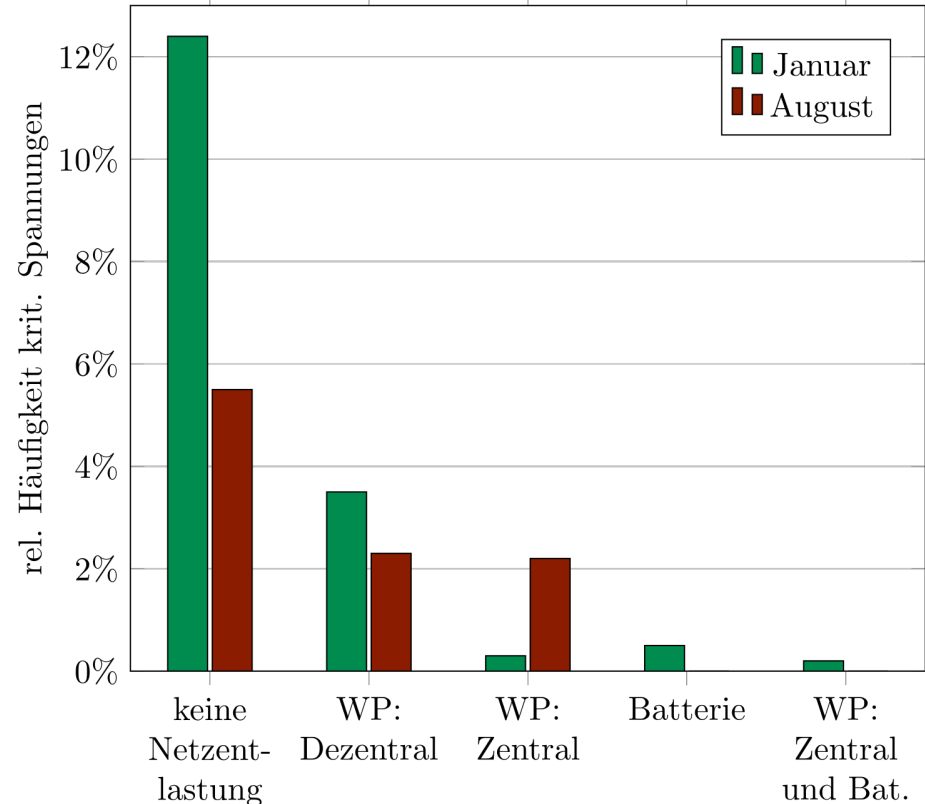
- Grundstruktur:
  - Wärmebedarfsorientiert
  - Solltemperatur-Bereich für thermische Speicher
- Flexibilität durch:
  - Verschieben der Solltemperatur-Bereiche
  - Aktives Schalten der Wärmepumpen
- Auslöser der Flexibilität:
  - Unter- / Überschreitung von Spannungsgrenzen

## 2.1 Netzentlastung: Konzept



## Vergleich der Betriebsstrategien

- Anhand von Beispielsiedlung
- Spannungsgrenzen, Speicher- & Batteriegröße wurden optimiert
- Erkenntnisse:
  - Kritische Spannungszustände können deutlich reduziert werden
  - Informationsaustausch verbessert Netzentlastung deutlich





## Vermeidung unzulässiger Unterspannungen

- Netzentlastung mit allen Strategien möglich
- WP-Zentral besser als Batteriespeicher
  - Bessere Entlastung
  - Keine zusätzliche Investition, abgesehen von der Kommunikation
  - Wärmebereitstellung ohne Einschränkung möglich
- Netzentlastung mit Batteriespeichern:
  - Sehr große Batteriespeicher notwendig
  - 20 kWh, 8 kW pro Haushalt



## Vermeidung unzulässiger Überspannungen

- Nur mit Batteriespeichern ausreichend
- Überspannungen durch PV / im Sommer
  - Heizbedarf / Flexibilitätspotenzial von WP im Sommer klein
- Netzentlastung mit Batterie & zusätzlich mit WP (zentral):
  - Kleinere Batterien notwendig als ohne WP (10 kWh statt 14 kWh)



# Zusammenfassung

- Die elektrischen Netz stehen vor sehr vielen Herausforderungen
- Lösung erfordern interdisziplinäre Ansätze:
  - Berücksichtigung der Kommunikation
  - Intelligente Datenverarbeitung
  - Flexibilisierung in allen Bereichen
- Lösungen erfordern aber auch ein Umdenken der Gesellschaft
- Lösungen erfordern eine sehr gute Nachwuchsausbildung



# Wir haben die **Energie** zur **Wende!**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Für Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

[Ines.hauer@tu-clausthal.de](mailto:Ines.hauer@tu-clausthal.de)