

Technologiespektrum und Strategien für resilientere Energiesysteme



Prof. Dr. Fabian Scheller, Dr. Bastian Büttner
Kontakt: fabian.scheller@cae-zero-carbon.de



Dr. Volker Lenz, Dr. Franziska Müller-Langer



Dr. Martin Henke, Dr. Martin Vehse



Dr. Theresa Groß



Prof. Dr. Jörg Matthes, Dr. Volker Stelzer, Dr. Markus Vogelbacher, Max Kollmer



Dr. Peter Schossig, Dr. Jakob Ungerland

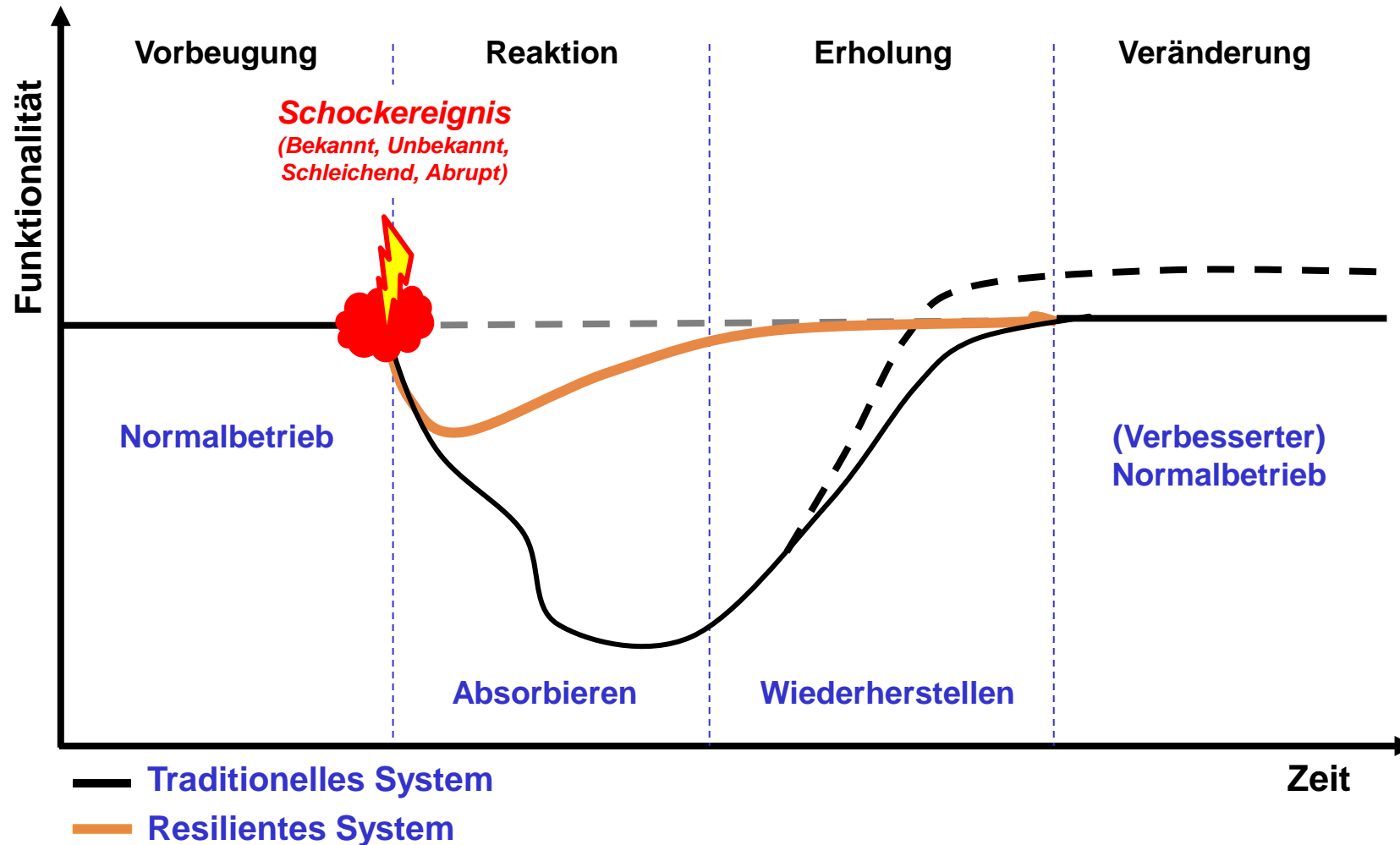


Dr. Manuel Riepl



Norman Gerhardt

Funktionalität von Energiesystemen



- Ziel ist die Sicherung der Systemfunktionalität (u. kürzere Ausfallzeiten) trotz widriger Ereignisse
 - Uneinigkeit über die Definition negativer Ereignisse
 - Resilienz kombiniert Widerstandsfähigkeit mit Regenerationsvermögen und Lernfähigkeit
 - Fokus auf proaktive Systemoptimierung für zukünftige Herausforderungen
- Welche Strategien und Ansätze stärken die Resilienz erneuerbarer Energiesysteme?

Mishra, D. K., Ghadi, M. J., Li, L., Zhang, J., & Hossain, M. J. (2022). Active distribution system resilience quantification and enhancement through multi-microgrid and mobile energy storage. *Applied Energy*, 311, 118665.

Neue Herausforderungen und Anforderungen

Traditionelle (fossile) Energiesysteme



- **Überkapazitäten:** Einsatz von Backup-Kesseln, da Zusatzkosten sekundär sind
- **Langzeitspeicherung:** Heizöllager (1-2 Jahre) bieten Kontinuität
- **Ausfallstoleranz:** Traditionelle Heizungen halten Wärme für einige Stunden auch ohne Strom.
- **Brennstoffabhängigkeit:** Politische Instabilität kann Energieversorgung beeinflussen

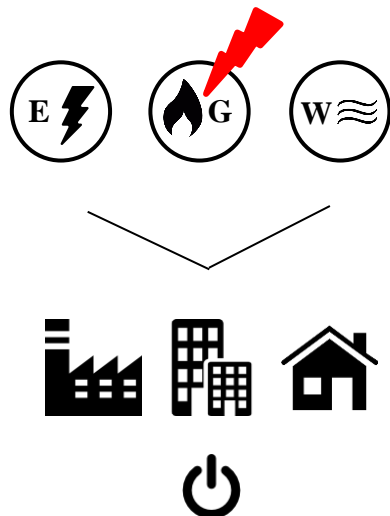
Zukünftige (erneuerbare) Energiesysteme



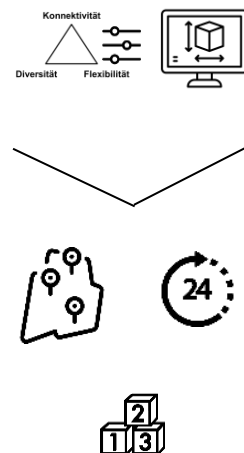
- **Dezentralisierung:** Lokale Erzeugung stärkt Unabhängigkeit und verringert zentrale Risiken
- **Stromabhängigkeit:** Stromausfall beeinträchtigt auch Heizsysteme
- **Hochtemperaturspeicher:** Speicherung von Wärme $>90^{\circ}\text{C}$ ist teuer und herausfordernd
- **Fortschrittlichkeit:** Erneuerbare Technologien verbessern stetig Effizienz und Wirtschaftlichkeit

Entwicklung von Strategien für resilientere Energiesysteme

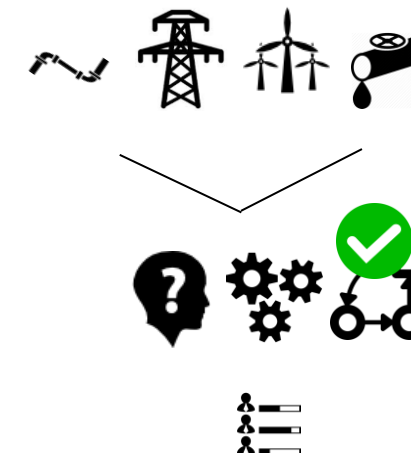
1 Risiken identifizieren



2 Resilienz quantifizieren



3 Resilienz stärken



- Welche Technologien können dazu beitragen, die Resilienz des Energiesystems gegenüber Schockereignissen und den zugehörigen Risiken auf sowohl nationaler als auch kommunaler Ebene zu erhöhen?
- Welche praktischen Beispiele für den Einsatz von Technologien zur Steigerung der Resilienz im Energiesystem existieren, und welche Schlüsselfaktoren für deren Erfolg können identifiziert werden?

Mögliche Risiken im Rahmen von Energiesystemen

Katastrophenunterbrechung



Fehlfunktion Erzeugunganlagen



Unterbrechung Energiequelle



Schwankungen Strompreis



Langfristige Infrastrukturschäden



Fehlentscheidungen



Kriterien zur Resilienzbewertung

Verschiedene Perspektiven der Resilienzbewertung wichtig, um Komplexität vernetzter Systeme gerecht zu werden

Sphären (Mühlemeier et al. 2018)

- Technisch
- Sozial
- Ökologisch

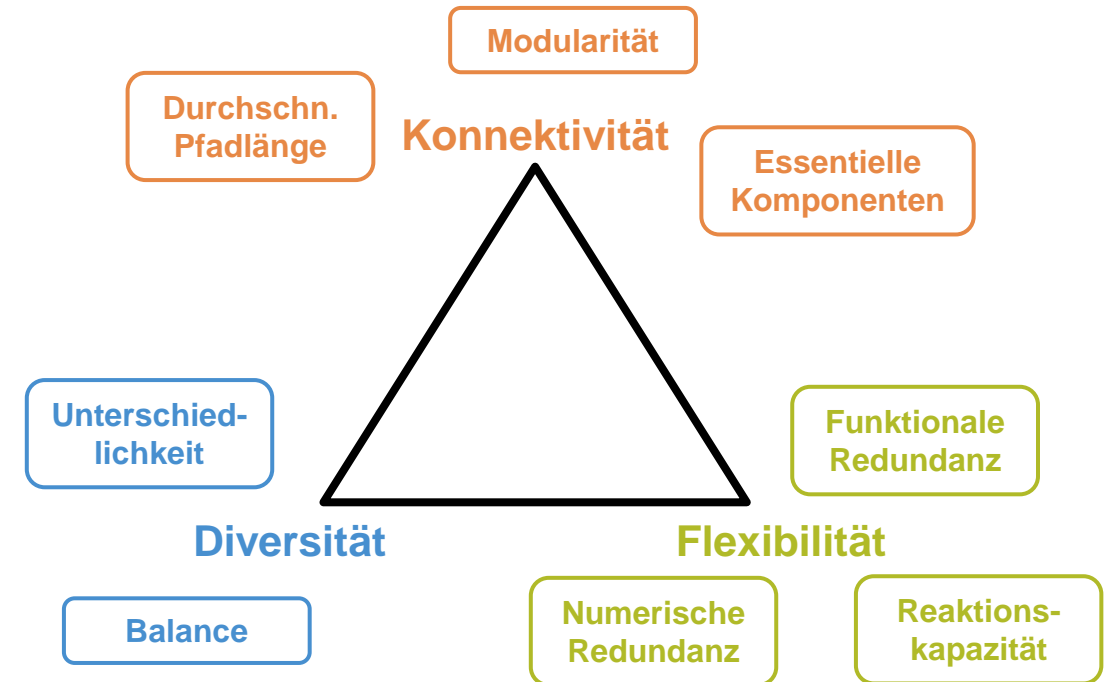
Dimensionen

- Räumlich (national, regional, lokal)
- Zeitlich (langfristig, kurzfristig)
- Sektoral (Strom, Wärme, Transport)
- Systemisch (Erzeugung, Übertragung, Verbrauch)

Kriterien (Sauer 2019)

- Konnektivität (vor allem interne & externe Vernetzung einzelner Systemkomponenten)
- Flexibilität (v.a. Anpassungs- & Handlungsfähigkeit bei ungeplanten Ereignissen)
- Diversität (v.a. Verschiedenartigkeit der Komponenten, die das Gesamtsystem bilden)

Kriteriencluster und Resilienzkriterien (Sauer 2019)

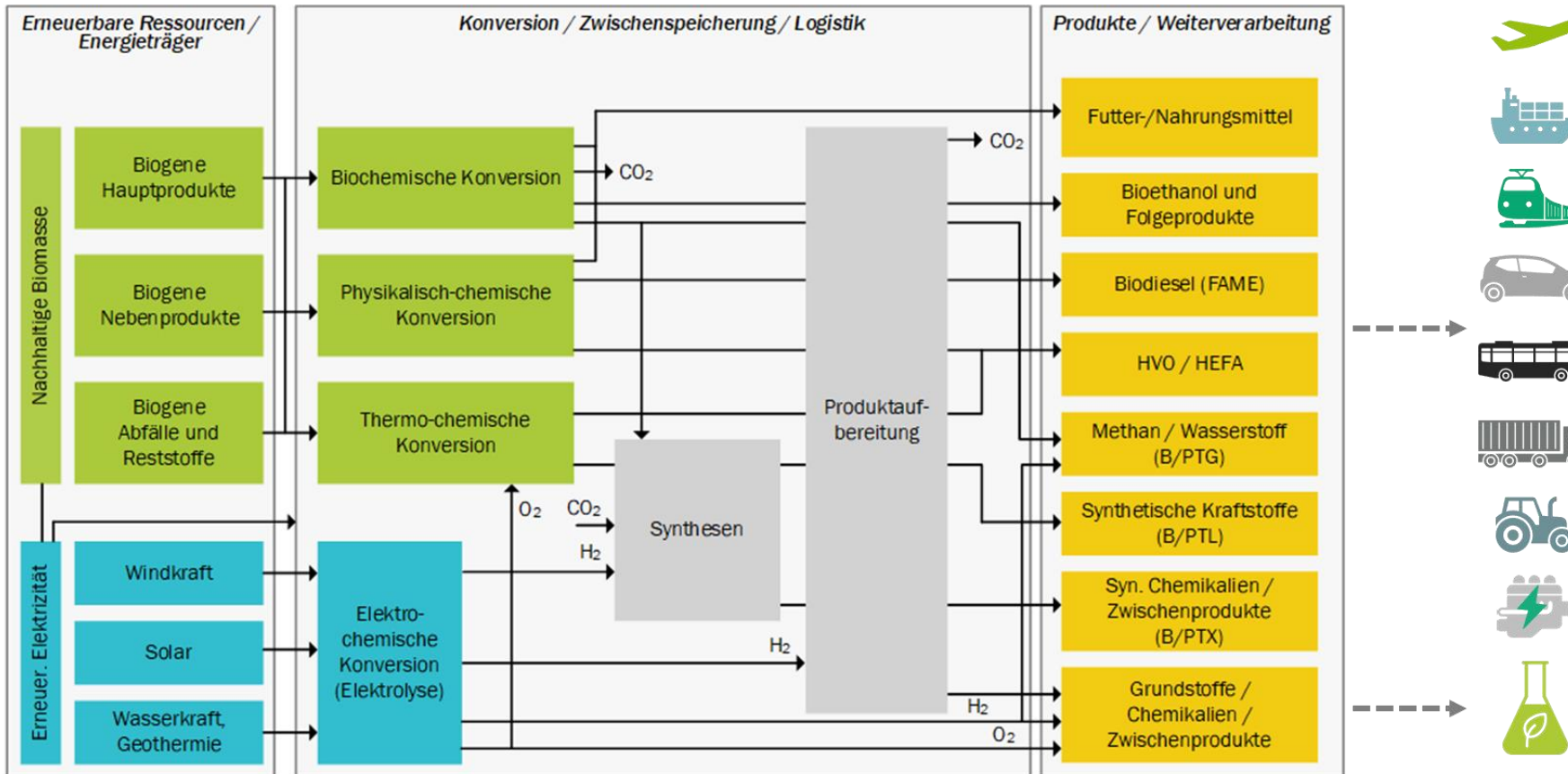


Sauer, E. J. (2019). Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Resilienz von elektrischen Energiesystemen. Masterarbeit. TU München. | Mühlemeier, S., Wyss, R., Binder, C. R. (2018). „Ein indikatorengestützter Ansatz zur Resilienzanalyse von Energiesystemen in Transition,“. Karidi, Schneider, Gutwald: Resilienz Interdisziplinäre Perspektiven zu Wandel und Transformation, Wiesbaden, Springer, 293-327.

Technische Strategien zur Steigerung der Resilienz

	National	Lokal
Konnektivität	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherung und Überwachung der Energie-Netzwerke • Echtzeitsteuerung von Systemkomponenten • Nutzung von Synergien durch vernetzte Wertschöpfung 	<ul style="list-style-type: none"> • Synchronisation von Energieerzeugung und -verbrauch • Unterstützung des Netzes durch bestehende Anlagen • Einführung der Inselfunktionalität für autonome Energieversorgung
Diversität	<ul style="list-style-type: none"> • Vielfalt von Brennstoffen und Energiequellen • Multiproduktanlagen für erneuerbare Produkte • Diverse Technologiewege und Produktarten • Förderung eines vielseitigen Technologie-Mix 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Wärmeversorgungsoptionen • Flexibilität in Brennstoffauswahl • Hochtemperatur-Lösungen für spezielle Anwendungen • Kombination diverser Energiequellen und Technologien
Flexibilität	<ul style="list-style-type: none"> • Verdopplung von Hauptstromkabel • Überbrücken von Dunkelflauten / Versorgungslücken • Netzdienliche Industrieprozesse • Anpassung an schwankende Energiepreise und -angebote 	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung an Schwankungen erneuerbarer Energien • Redundante Gestaltung lokaler Stromnetzverbindungen • Flexible Produktionsstrategien • Reaktion auf Fluktuationen bei erneuerbarer Erzeugung

#DBFZ | Erneuerbare Raffinerien / Multiproduktanlagen: vielfältige Technologierouten, Synergien und Wertschöpfungen



- Raffinerien als Multiproduktanlagen: Diversität bezogen auf Ressourcen, Technologien, Produkte und deren Anwendungen
 - Flexibilität im Hinblick auf Demand-Side-Management
 - Regionale Wertschöpfungsketten sind oft widerstandsfähiger und flexibler hinsichtlich der Energieversorgung und Bereitstellung weiterer Produkte, insbesondere in volatilen Marktsituationen
- Bsp. Vielfalt an Kraftstoffe für Verkehr und kritische Infrastruktur, zusätzlich Nahrungs- und Futtermittel sowie multifunktionale Produkte bzw. Intermediate für andere Sektoren (z.B. Methan, Wasserstoff, Alkohole, Syngase, Naphtha, CO₂)

SynBioPTx ©DBFZ 03/2023 (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) | B/PTG – Biomass-/Power-to-Gas, B/PTL – Biomass-/Power-to-Liquids
 FAME – Fettsäuremethylester, HVO / HEFA – Hydroprozessiertes Pflanzenöl / Ester und Fettsäuren

Ausführliche Darstellung der Technologierouten unter <https://www.dbfz.de/monitoring-ee-im-verkehr/technologien>

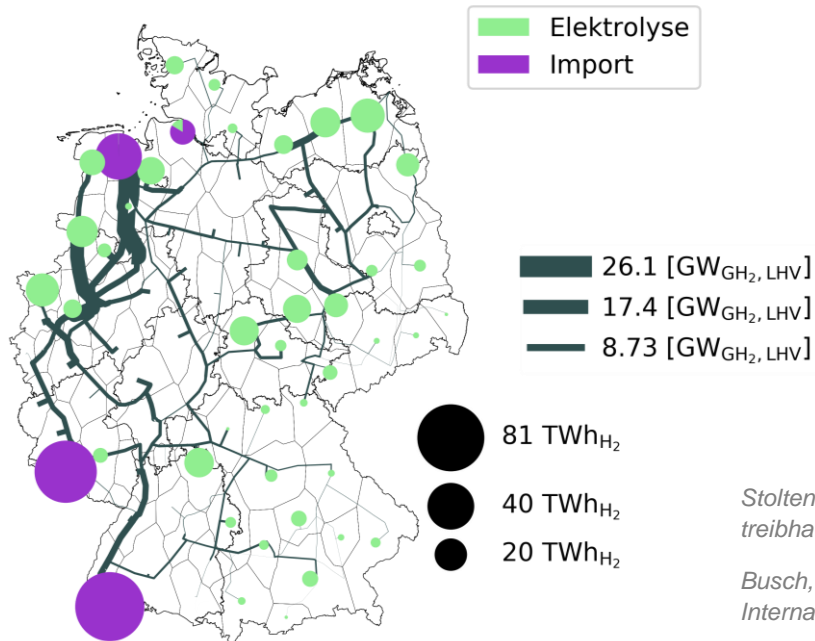


#FZJ | Wasserstoffspeicher: Langzeitspeicher zur Überbrückung von Dunkelflauten (oder anderer Energiequellen, die gerade nicht verfügbar sind)

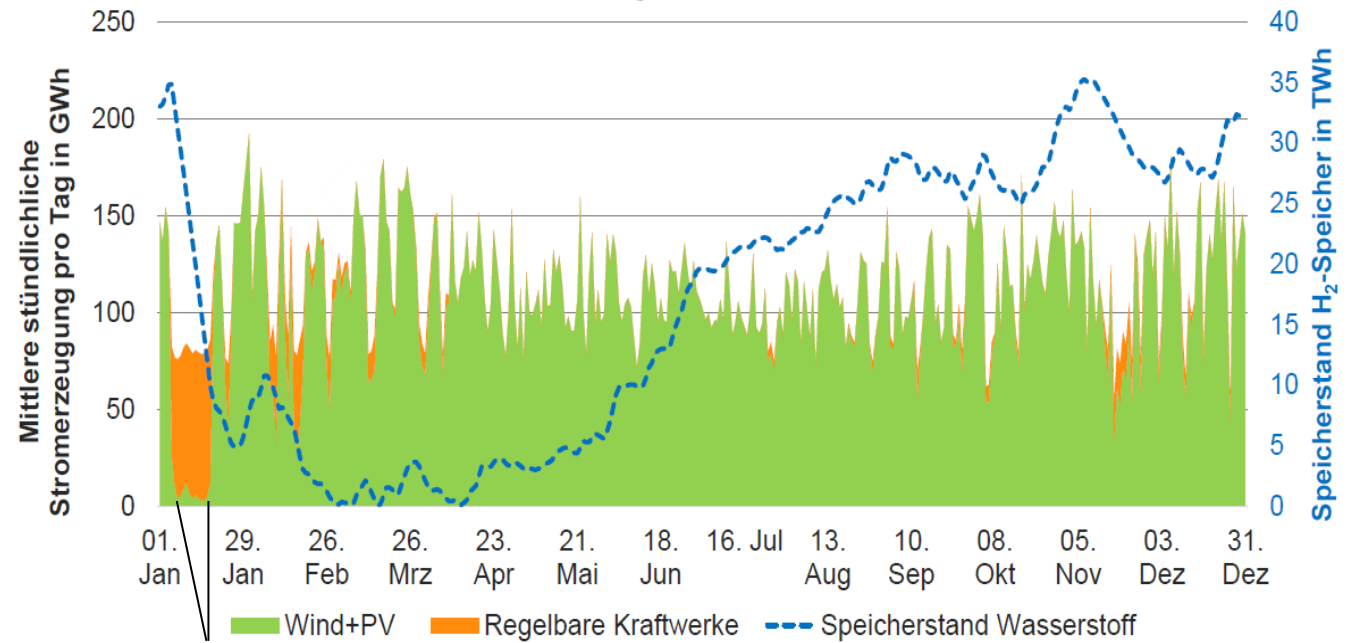
- Integrierte Systemanalyse (Stolten et al. 2022, Busch et al 2023):
 - Nutzung existierender Infrastrukturen
 - Offenhaltung verschiedener Importoptionen
 - Entlastung der Infrastrukturen bei Engpässen

→ Wasserstoffspeicher als Langzeitspeicher zur Überbrückung von Dunkelflauten nutzen (Diversität bzw. Flexibilität)

Wasserstoffbereitstellung 2045 (Stolten et al. 2022)



Wasserstoffspeicherung 2045 (Stolten et al. 2022)



Dunkelflaute

Stolten, D., Markewitz, P., Kraus, S., Franzmann, D., Schöb, T., Grube, T., ... & Triesch, T. (2022). Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045 (No. FZJ-2022-02577). Technoökonomische Systemanalyse.

Busch, T., Groß, T., Linßen, J., & Stolten, D. (2023). The role of liquid hydrogen in integrated energy systems—A case study for Germany. International Journal of Hydrogen Energy.

#ISE | Resilienz-Monitor: Echtzeit-Steuerung einzelner Systemkomponenten

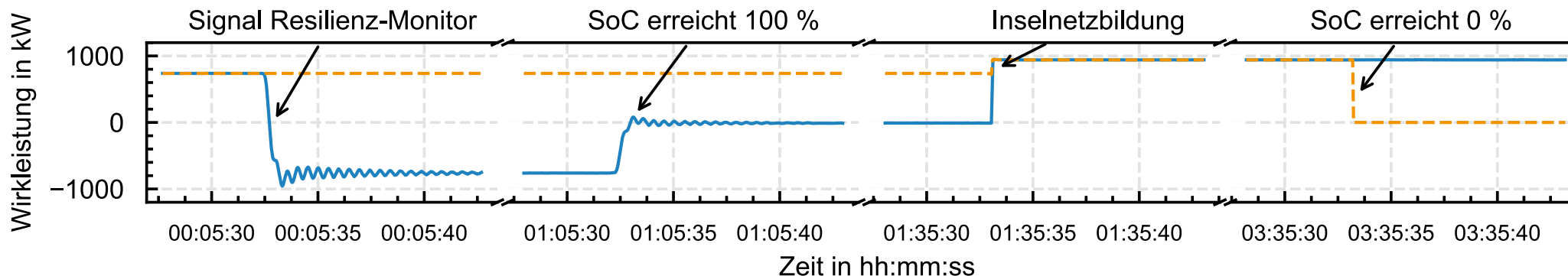
- Entwicklung eines Resilienz-Monitors im Projekt RESIST
- Echtzeit-Berechnung der Systemresilienz basierend auf Key Performance Indicators (KPIs)
- KPI Berechnung anhand von Stromnetzmessungen und Wettervorhersagen
- Handlungsanweisungen an Komponenten basierend auf berechneter Systemresilienz

Konnektivität

- Monitoring
- Netzunterstützung
- Inselnetzbildung

Beispiel:

- Wetterwarnung verringert die Systemresilienz
- Handlungsanweisung an netzbildenden Batterie-Umrichter zum Laden der Batterie
- Im Falle eines Kurzschlusses aufgrund zerstörter Freileitungen:
Netzbildende Batterie-Umrichter kann Netzgebiet aufgrund geladener Batterie länger in der Insel halten

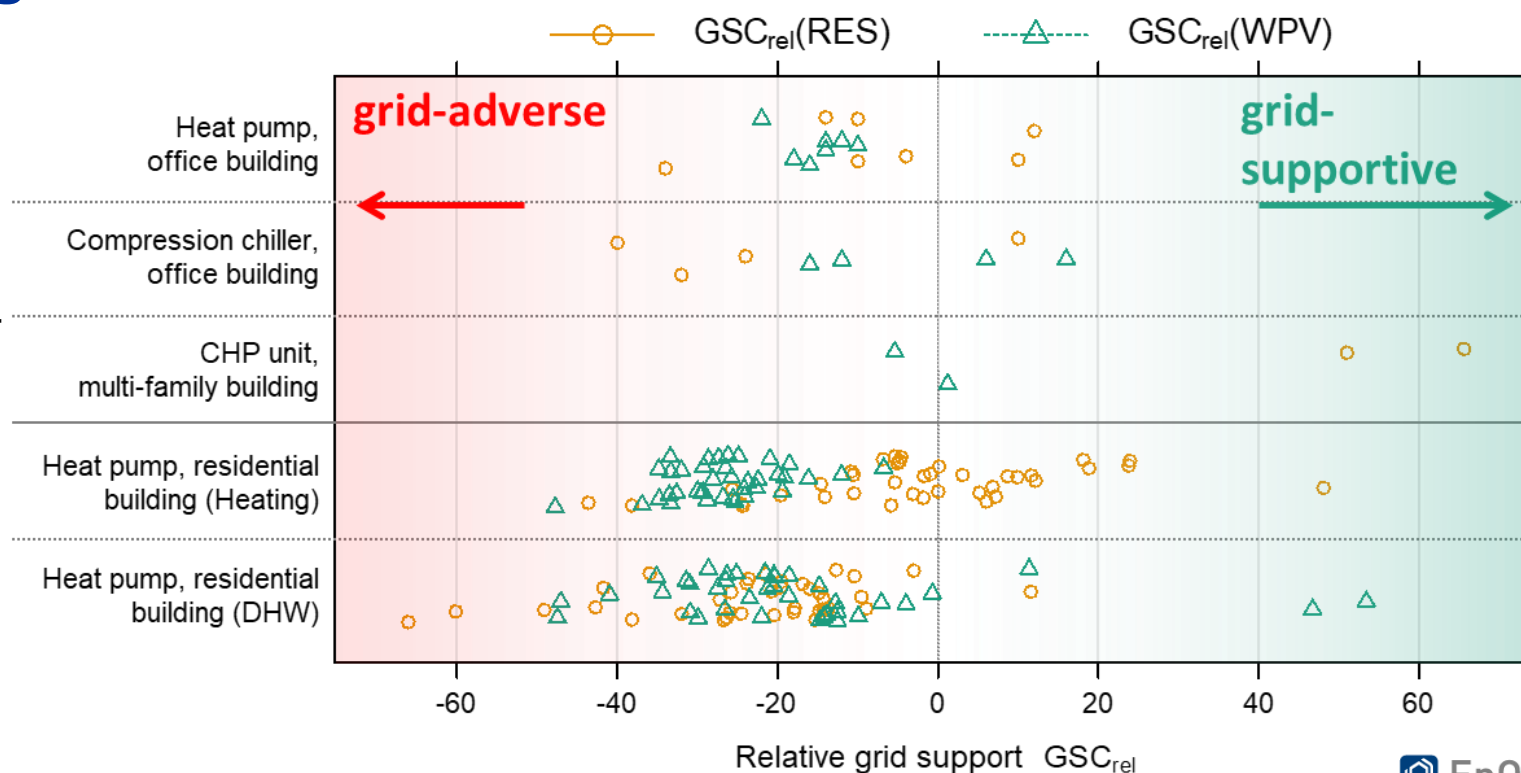


- Szenario 1: Netzbildender Batterie-Umrichter ohne Resilienz-Monitor
- Szenario 2: Netzbildender Batterie-Umrichter mit Resilienz-Monitor



#ISE | Optimale Netzintegration: Untersuchung aktueller Steuerungsstrategien von Energieanlagen

- Langzeit-Feldüberwachungsdaten von 52 Anlagen
 - 8 Wärmepumpen in Bürogebäuden (4,5 – 58 kWel)
 - 4 Kühlanlagen in Bürogebäuden (14,9 – 29 kWel)
 - 2 BHKW-Einheiten in Mehrfamilienhäusern (5,5 kWel)
 - 38 Wärmepumpen in Einfamilienhäusern (1,3 – 6,1 kWel)
- Betriebsjahre: 2011 und 2012
- Zeitauflösung: 1 bis 5 Minuten



- Mehrheit der analysierten Anlagen verhalten sich „netzneutral“ oder nicht unbedingt netzdienlich
- Hohe Netzunterstützung in realen Gebäuden ist erreichbar
- Positive Beispiel zeigen, dass mit richtiger Regelstrategie eine hohe Netzdienlichkeit erreichbar ist
- Erfolgsfaktoren: thermisches Lastprofil und implementierte Steuerungsstrategie (z.B. nächtlicher Heizbetrieb)



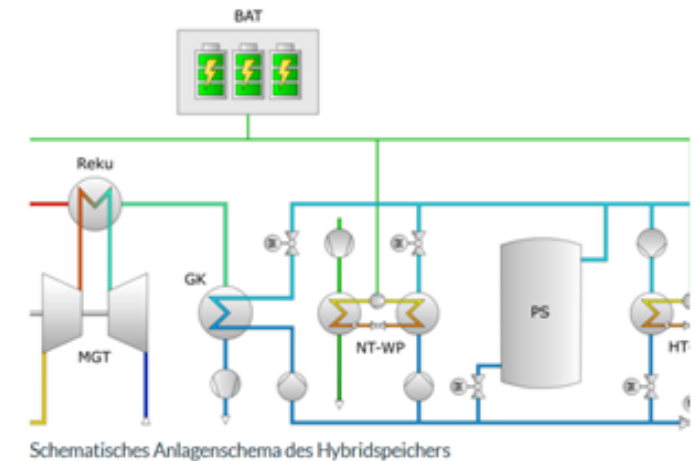
#KIT | Hybridspeicher: Netzdienstliches Neubau-Quartier mit Zentralen

Problemlage

- Erhöhter Energieverbrauch in Quartieren aufgrund von Elektrifizierung (z.B. Elektromobilität und Wärmepumpen)
- Energieerzeugung durch PV und Solarthermie direkt in städtischen Gebieten
- Diskrepanz zwischen Energieerzeugung und –verbrauch (Gleichzeitigkeit)

Lösungsansatz

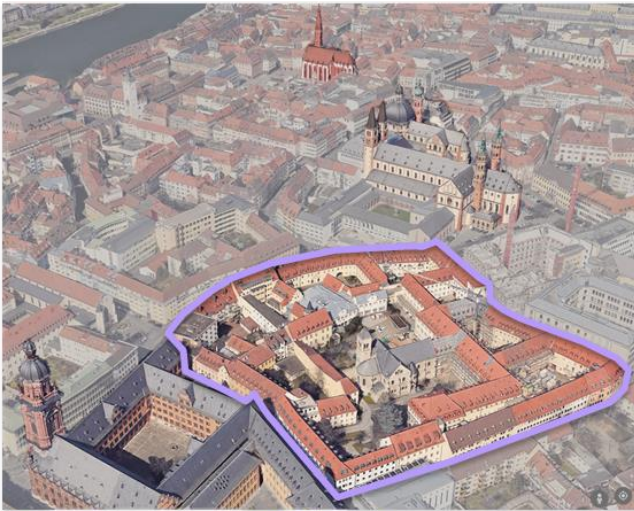
- Notwendigkeit lokaler Ausgleich von temporären Ungleichheiten aus Gründen wie:
 - Lokale Wertschöpfung
 - Schutz von Leitungen
 - Energieeffizienz
- Hybridspeicher für die Quartiersversorgung
 - Einsatz von elektrochemischen Speichern sowie Wärmespeichern („Quartiersenergiezentralen“) als primäre Lösung (Speicherung von Überschüssen)
 - Ergänzung durch Elektrolyseur, H₂-Speicher, Brennstoffzelle bei Bedarf
 - Umnutzung bestehender Energieinfrastrukturen (z.B. Kraftwerksgebäude, Kühltürme, Stollen, Leitungen) für neue Energiesysteme



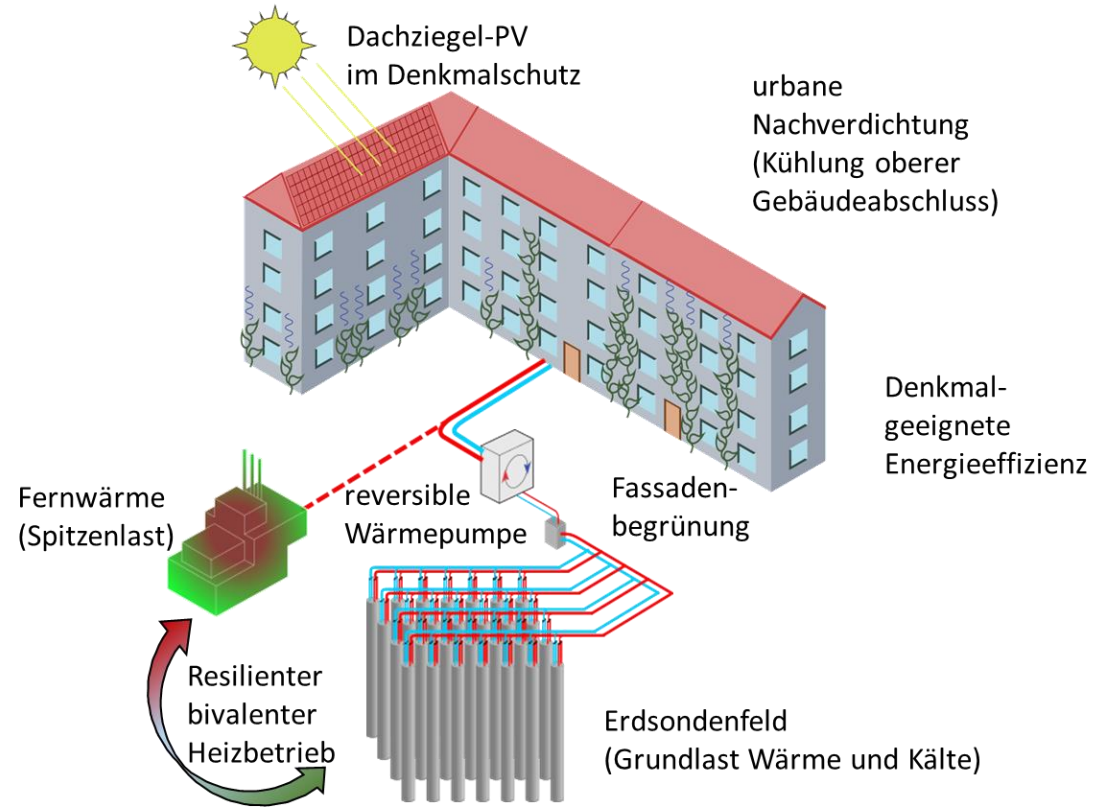
https://www.energiewendebauen.de/projekt/flex_quartier

#CAE | Erdsonden und Fernwärme: Hybride bivalente und resiliente Wärmeversorgung im dichten Stadtgebiet

Denkmalgeschütztes Innenstadtquartier

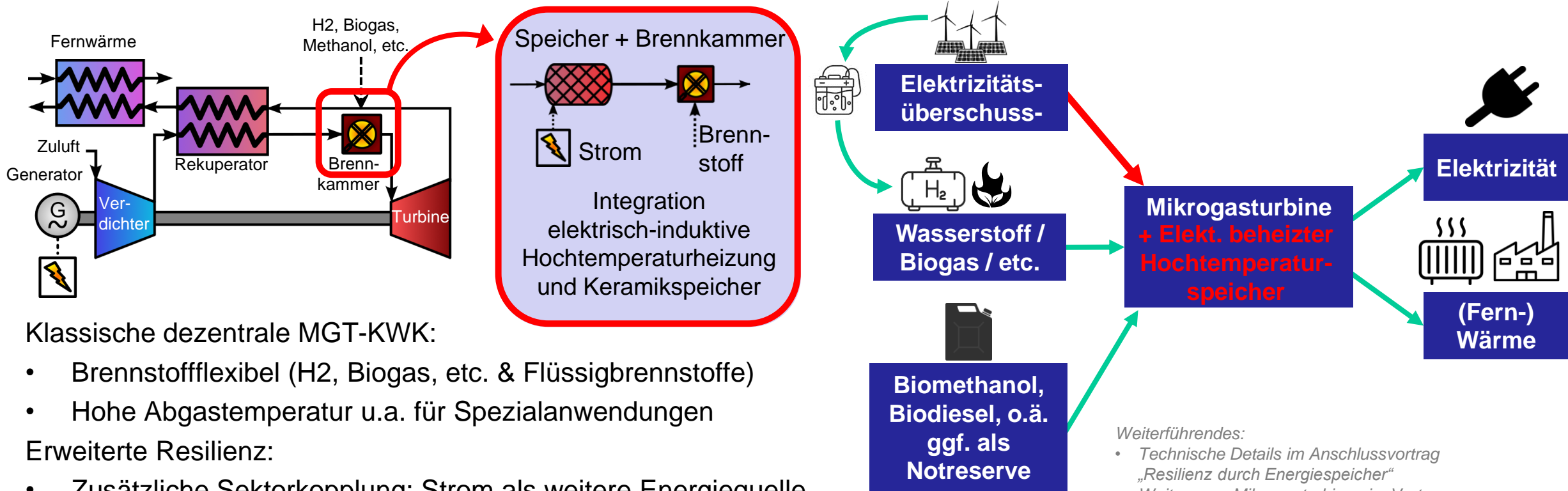


Dachintegrierte PV-Ziegel



- Bekämpfung des „Urban Heat Island Effekts“ / Nutzung städtischer Umweltwärmepotentiale
- Installation von Erdsonden ermöglicht eine ausbalancierte Wärmez- und -abfuhr (vollständige Regeneration) und schafft auch zusätzliche Kühlmöglichkeiten

#DLR | Mikrogasturbinen-Kraft-Wärme-Kopplung mit integriertem strombeheizten Hochtemperaturspeicher (MGT-KWK + integrierter HTS)



Klassische dezentrale MGT-KWK:

- Brennstoffflexibel (H2, Biogas, etc. & Flüssigbrennstoffe)
- Hohe Abgastemperatur u.a. für Spezialanwendungen

Erweiterte Resilienz:

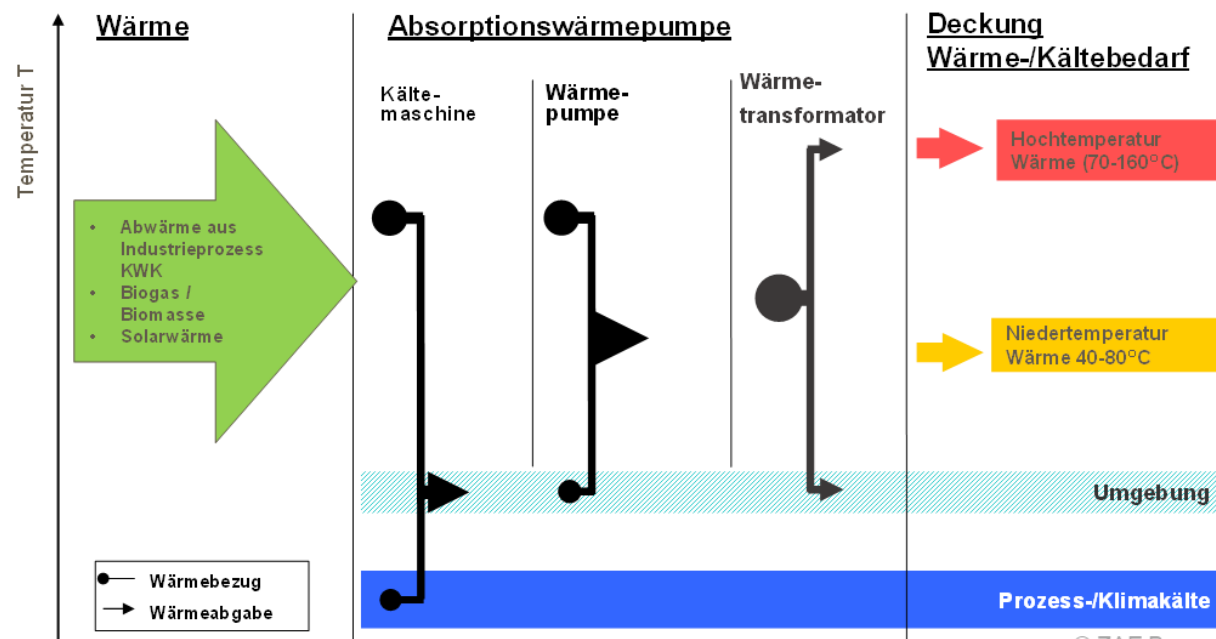
- Zusätzliche Sektorkopplung: Strom als weitere Energiequelle
- Erhöhte Netzunterstützung/Inselfunktionalität:
 - Hohe P2Heat2P Effizienz (Gleicht Tagesschwankungen aus)
 - Wärme oder Strom auch separat erzeugbar
 - Dynamischer Stromabnehmer (negative Regelenergie)

Weiterführendes:

- Technische Details im Anschlussvortrag „Resilienz durch Energiespeicher“
- Weiteres zu Mikrogasturbinen im Vortrag „Resilienz im Quartier“
- Paper zur Technologie: Agelidou E., et.al. “The Heat-Storing Micro Gas Turbine—Process Analysis and Experimental Investigation of Effects on Combustion” Energies, 2022, 15. Jg., Nr. 17, S. 6289 doi: 10.3390/en15176289

#ZAE | Absorptionswärmepumpen: Thermisch getriebene Wärmepumpen zur Diversifizierung in der Wärme- und Kälteversorgung

- Absorptionswärmepumpen (und –kältemaschinen) verwenden thermische Energie zum Antrieb, benötigen keinen elektrischen Strom zum Antrieb = Netzentlastende Wärme- und Kälteerzeuger
 - Ideale Verwerter von Abfallwärme
 - Verwenden natürliche unbedenkliche Kältemittel
- Resilienzbeispiel 1: Absorptionswärmepumpe zur Steigerung der Effizienz von BHKW (Projekt eQBooster):
 - Bezieht ohnehin vorhandene Abwärme des BHKW zum Antrieb der Wärmepumpe, steigern den Wärmeoutput des BHKW um bis zu 25%
 - Stärken den Einsatz von BHKW, die Brennstoffflexibilität aufweisen (Biogas, Wasserstoff, Flüssiggas)
- Resilienzbeispiel 2: Biomasse gefeuerte Absorptionswärmepumpe (Projekt BioWrap):
 - Halbiert den Brennstoffbedarf für Heizung
 - Stromnetzunabhängige hocheffiziente Bereitstellung von Wärme und Kälte



© ZAE Bayern

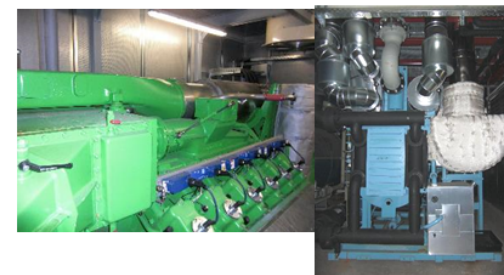
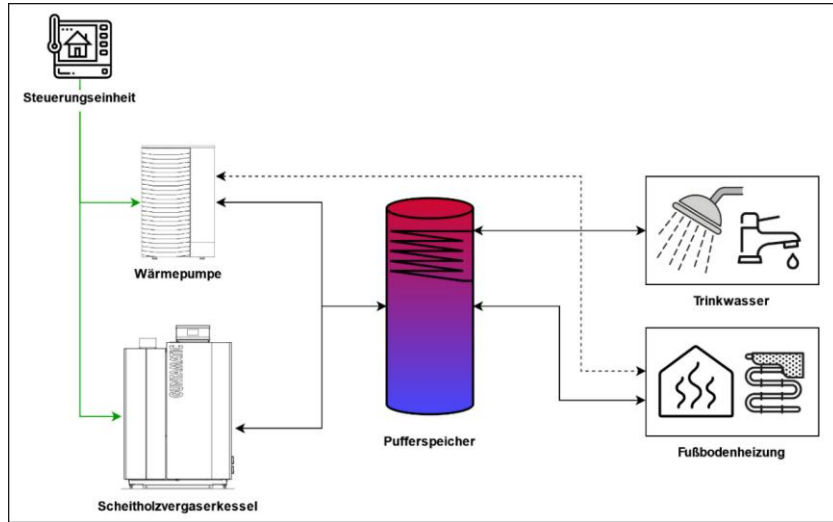


Foto: ZAE Bayern

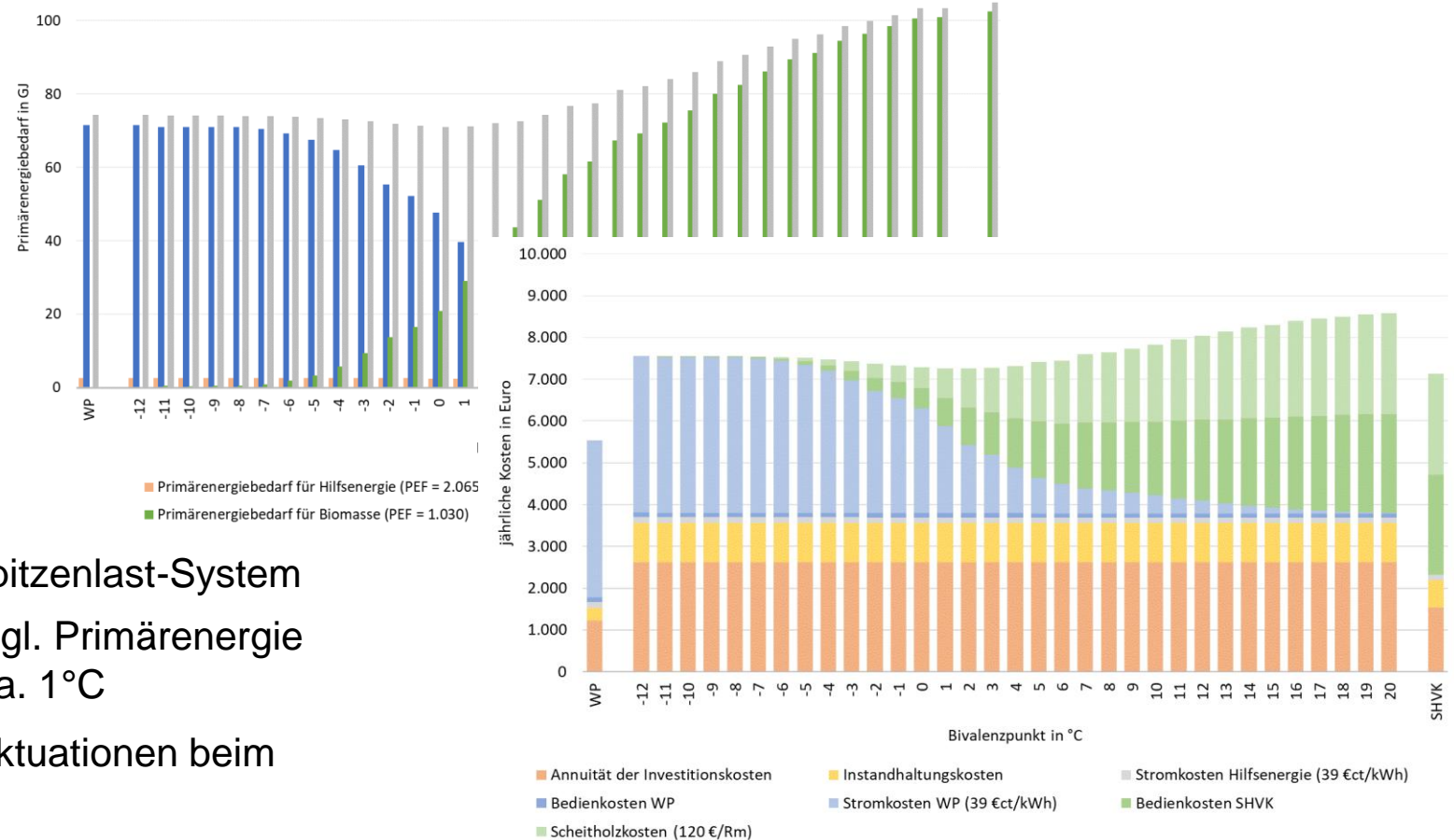
DBU-Projekt eQBooster 37813/01: <https://www.dbu.de/projektdatenbank/37813-01/> | BKWK-Projekt BioWap FKZ 03KB127 <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/BioWap-549>

#DBFZ | Luft-Wasser-WP und Scheitholzvergaserkessel: Flexibilität in der erneuerbaren Raumwärmebereitstellung



Quelle: Masterarbeit 2023 Jan Böttner, DBFZ, TUHH

- Kombination von Hauptwärmequelle und Spitzenlast-System
 - TRNSYS-Simulation zeigt Bivalenzpunkt bzgl. Primärenergie und Kosten in gewählter Konstellation bei ca. 1°C
- Mittels intelligenter Regelung kann auf Fluktuationen beim erneuerbaren Strom reagiert werden
- Durch Ankopplung an PV-System mit Akkumulator kann Wärmeversorgung für wenige Tage im Notbetrieb auch komplett stromnetzunabhängig erfolgen

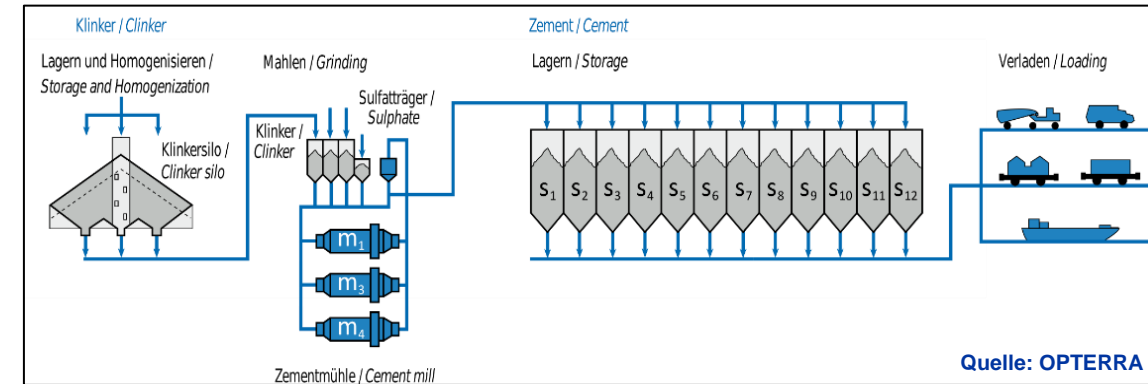


Ausführliche Darstellung der Technologierouten unter <https://www.dbfz.de/monitoring-ee-im-verkehr/technologien>

#KIT | Lastmanagement: Netzdienlicher Betrieb energieintensiver industrieller Prozesse

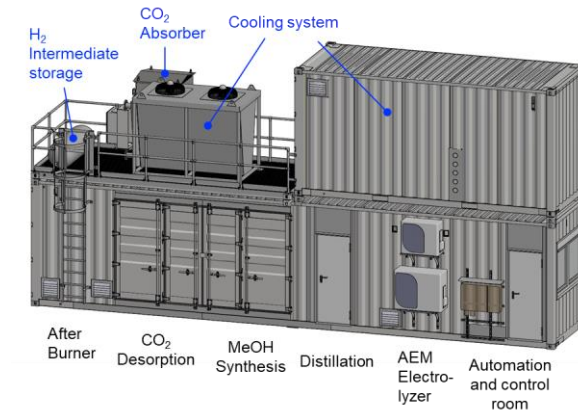
Netzdienstliches Lastmanagement /Scheduling von Zementmühlen

- Endverarbeitung von Zementklinker und Zusatzmaterialien in Zementmühlen zu verschiedenen Zementsorten
 - Lagerung in Silos ermöglicht flexible Planung der Produktion unter Einhaltung von Tages-/Wochenzielen
 - Mathematische Aufgabenstellung als Mixed-Integer Linear Programm formuliert
- Planung der Mühlenbetriebszeiten basierend auf Wochenprognosen des Stromangebots



Optimierter Betrieb neuartiger dezentraler Power-to-Methanol-Anlagen

- Innovatives Anlagenkonzept zur Methanolproduktion mit simultaner CO₂-Abscheidung aus CO₂-haltigen Abgasen (z.B. Biogas aus Klärwerken)
 - Prozessinhärente Speicher ermöglichen flexiblen Betriebsmodus
- Entwicklung und prototypische Implementierung von Methoden für den flexiblen und netzdienstlichen Betrieb von PtX-Prozessen



Zusammenfassung

Strategien, die auf erhöhte **Konnektivität**, **Diversität** und **Flexibilität** abzielen, stärken die Resilienz von Energiesystemen:

- **Diversifizierung der Energiequellen:** Integration einer Vielzahl von Energiequellen zur Verringerung des Risikos von Versorgungsunterbrechungen
- **Integrierte Technologie-Kopplung:** Kombination und Synchronisation verschiedener Technologien und Energiequellen zur Maximierung der Effizienz und Flexibilität
- **Adaptive Steuerung und Regelung:** Dynamische Anpassung und Optimierung des Systems basierend auf Echtzeitdaten und zukünftigen Prognosen, um den Betrieb in verschiedenen Szenarien zu gewährleisten
- **Multilevel-Speichersysteme:** Verwendung von Speichertechnologien auf verschiedenen Ebenen, von kurz- bis langfristigen Lösungen, um die Verfügbarkeit und Reaktionsfähigkeit zu erhöhen