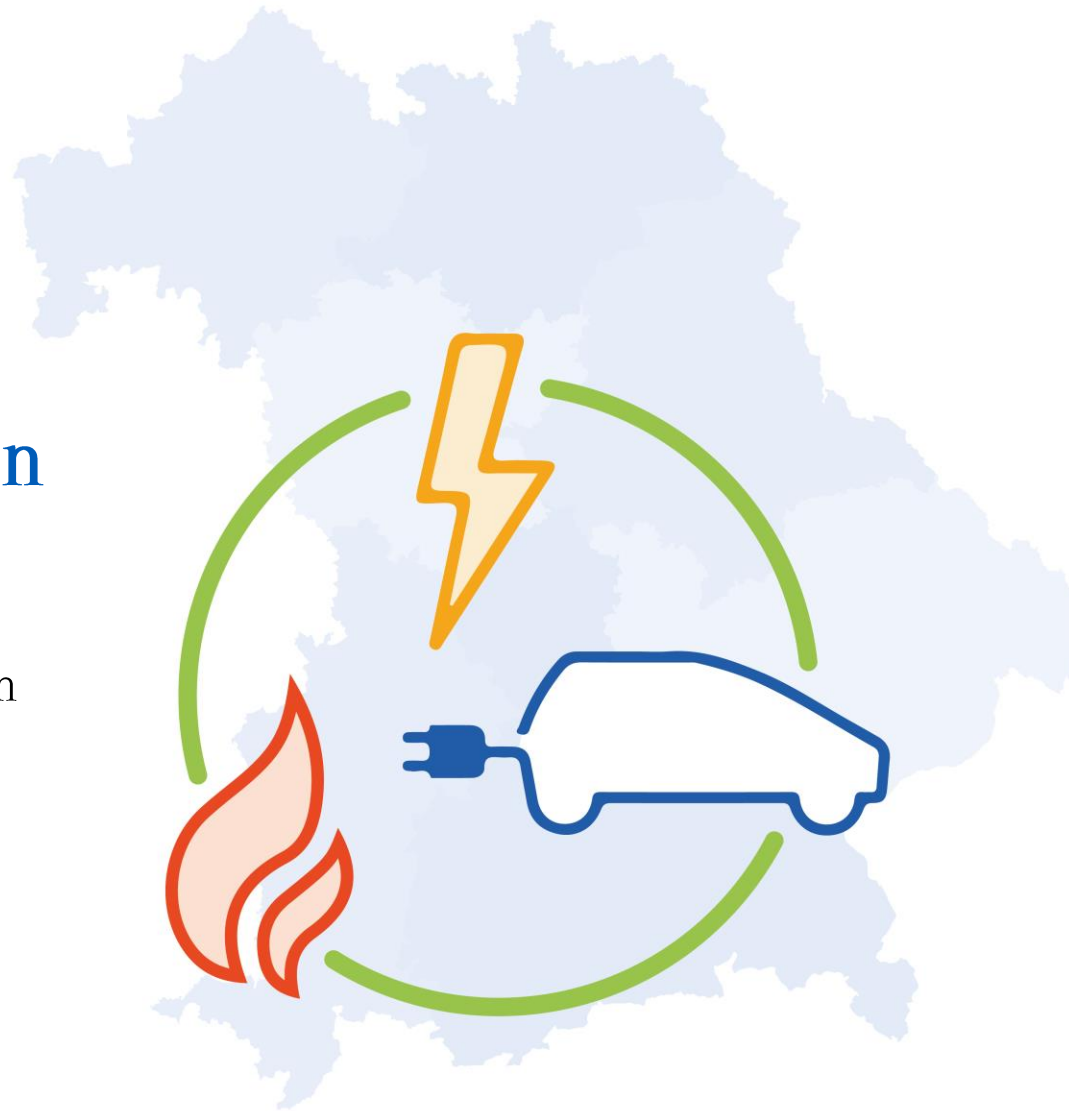


100 % erneuerbare Energien für Bayern

Potentiale und Strukturen
einer Vollversorgung in den Sektoren
Strom, Wärme und Mobilität



Zitieren Sie bitte die Bayernstudie, die Sie unter <https://www.mw.tum.de/es/publikationen/bayernstudie> finden.

ZAE Bayern – Mission und Vision



ZAE BAYERN

Wissenschaftliche Bereiche

ENERGIESPEICHERUNG (ES)

Standort
Garching

Vorstand: Dr. Hauer

ENERGIEEFFIZIENZ (EF)

Standort
Würzburg

Vorstand: Dr. Ebert



Seit 1991 betreibt das ZAE:

- Forschung,
- Umsetzung in die Praxis,
- Aus-, Fort- und Weiterbildung und
- Beratung und Information

auf bedeutsamen Gebieten der Energietechnik.

Ziel:

CO₂-neutrale **Energieversorgung**
durch Einsatz von **Erneuerbaren Energien** und
Steigerung der **Energieeffizienz**

ZAE Bayern - Energiespeicherung (ES)

~ 85 Mitarbeiter
~ 5,5 Mio. € F&E Mittel/Jahr
~ 3500 m² Forschungsfläche

Bereich ES Energie- speicherung

Flexibilität für
Strom und Wärme



Lehrstuhl für
Energiesysteme



Lehrstuhl für
Technische Elektrochemie



EES
Lehrstuhl für
Elektrische Energiespeichertechnik



System
Engineering
Energiekonzepte
Studien & Szenarien

Solarthermie &
Geothermie
Solare Nahwärme
Geothermie

Thermische
Energiespeicher
Kälte und Wärme
Speichermaterialien

Elektrische
Energiespeicher
Redox-Flow-Batterien
Elektrolyse

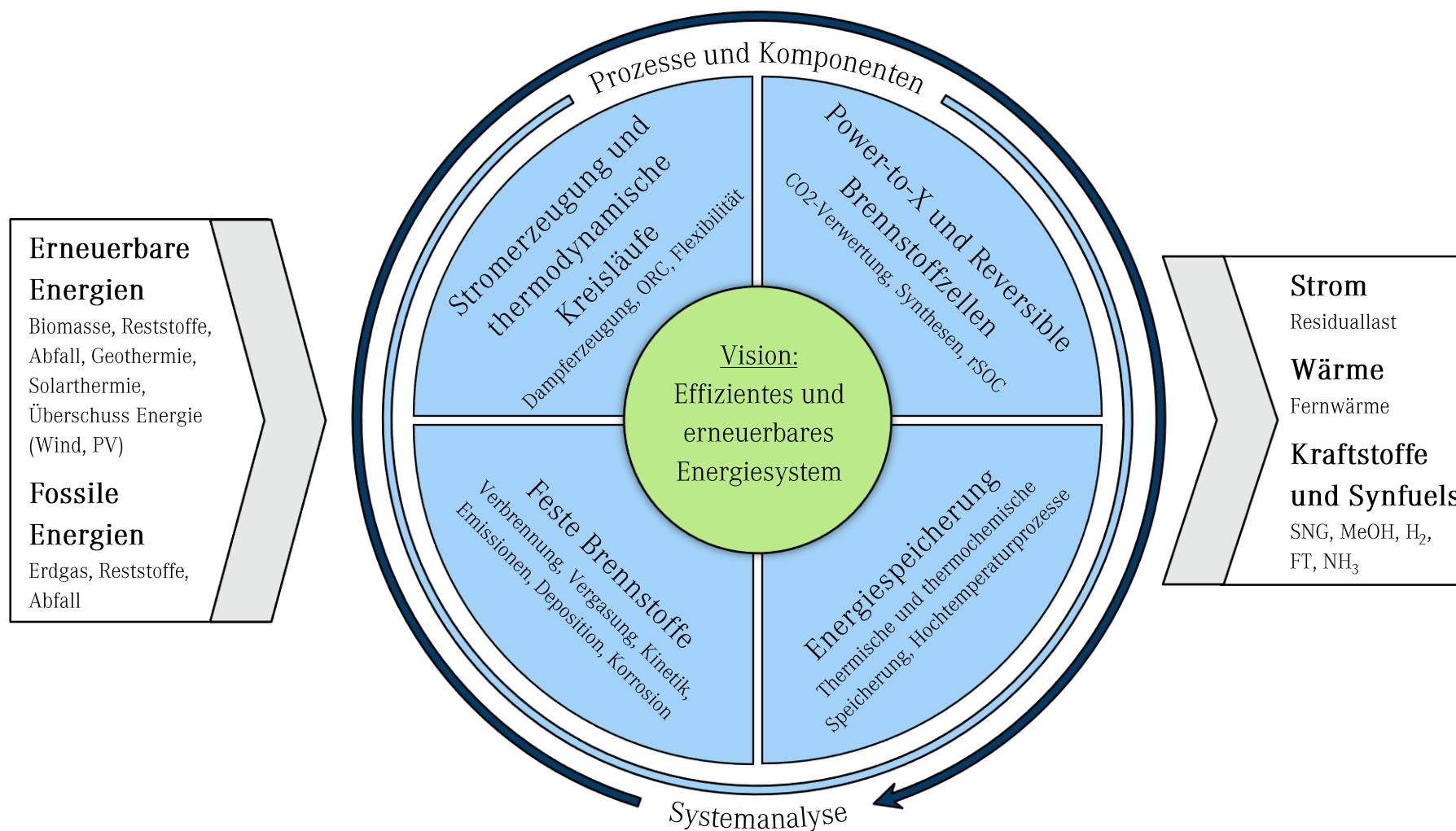
Wärme-
transformation
Wärmepumpen
Kältemaschinen

Lehrstuhl für Energiesysteme I

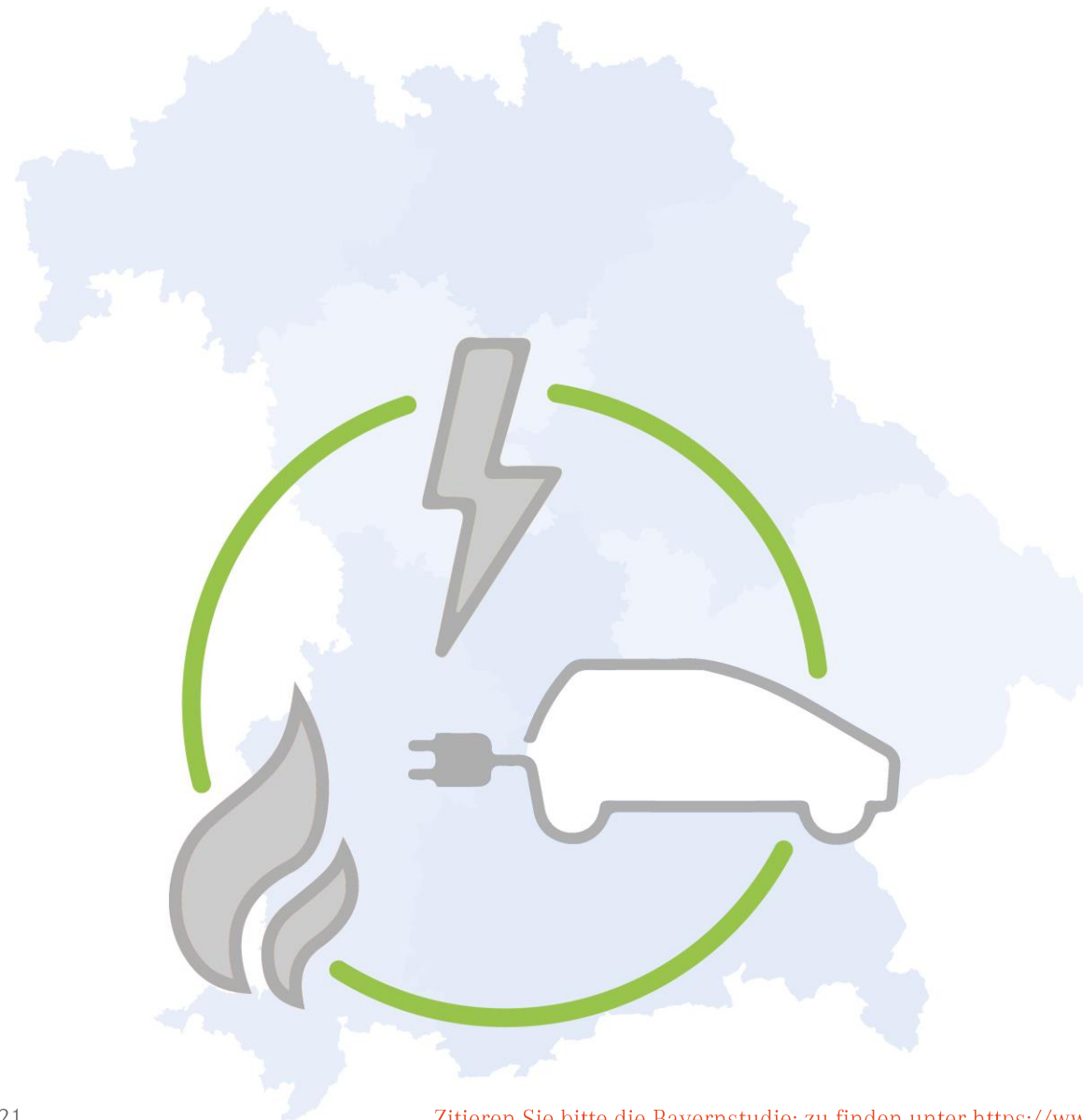
- Standort auf dem TUM Campus Garching, nördlich von München
- Campus Garching: über 3.500 Mitarbeiter und 15.000 Studierende
- Fakultät für Maschinenwesen
- Mitarbeiter: ca. 54 Mitarbeiter (ca. 33 Doktoranden, 5 Postdocs)
- Aufgabe: Entwicklung von Technologien für zukünftige Energiesysteme



Lehrstuhl für Energiesysteme II



Überblick



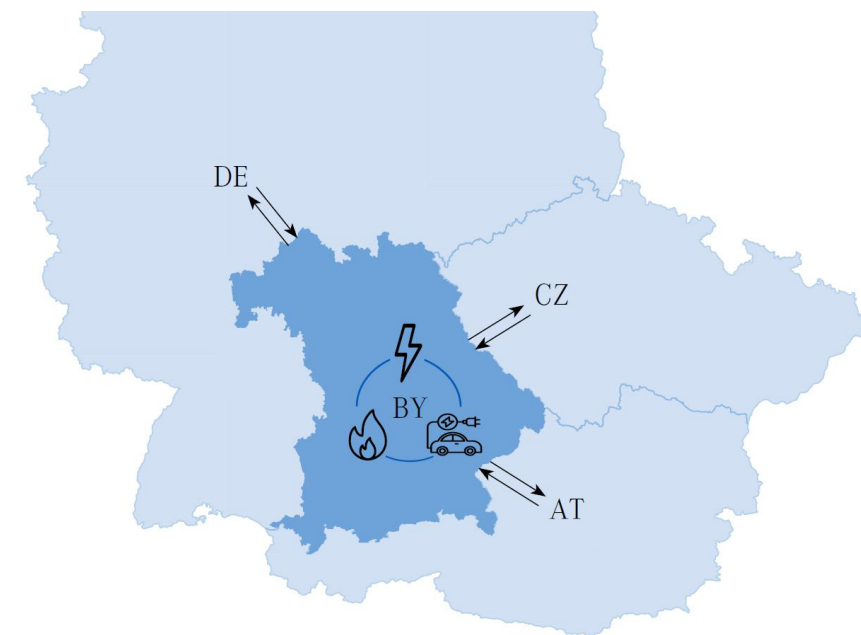
Das Energiesystem-Modell I

Ziel:

- vollständig erneuerbare Energieversorgung Bayerns in 2040

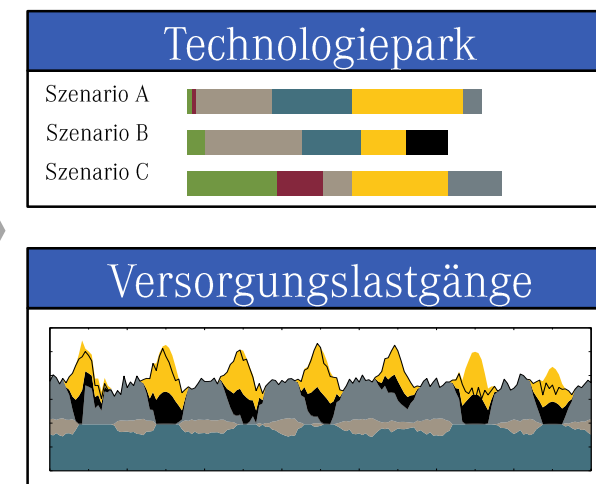
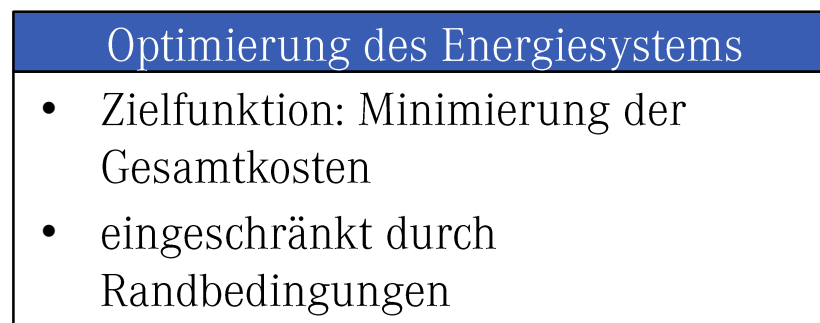
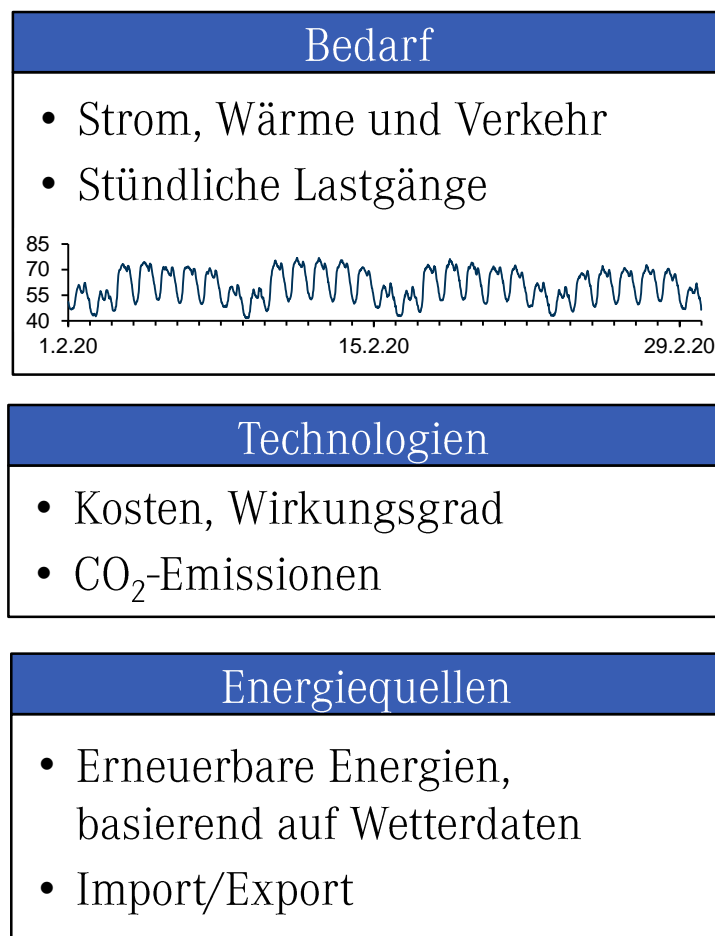
Vorgehen:

- Mathematisches Modell mit stündlicher Auflösung des bayerischen Energiesystems und der direkten Nachbarregionen
- Annahmen zu den Kosten, Technologien und Energienachfragen für 2040
- Berechnung verschiedener Szenarien



Betrachtete Sektoren		Annahme für 2040
Strom	Konventionelle Anwendungen	-50 %
Mobilität		Konstant
Wärme	Raumheizung/Brauchwarmwasser	-54 %
	Prozesswärme	-52 %

Das Energiesystem-Modell II

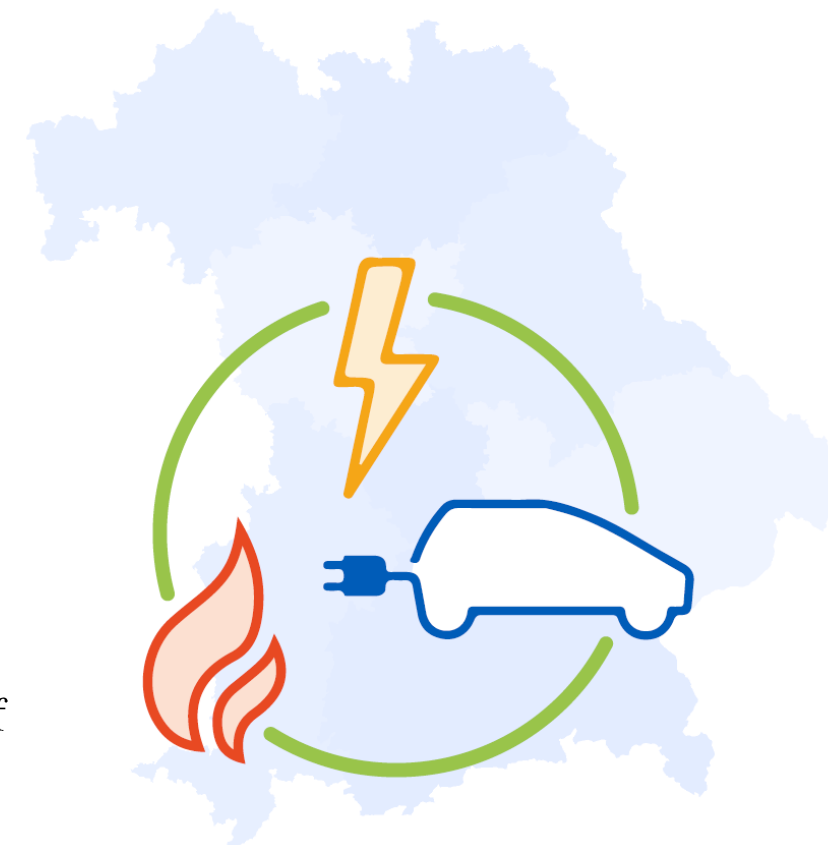


Betrachtete Szenarien

	Basis	Nachbarn konventionell	Inselsystem	Windlimit 15 GW	Synthetische Kraftstoffe
Bayern vollständig erneuerbar versorgt	X	X	X	X	X
EE-Anteil in benachbarten Energiesystemen	80 %	50 %	Kein Stromaustausch	80 %	80 %
Stromaustausch mit Nachbarn bilanziell ausgeglichen und gedeckelt	X	X	Kein Stromaustausch	X	X
Begrenzte installierbare Leistung an Windkraft				15 GW	
Verkehrssektor	Vollelektrisch	Vollelektrisch	Vollelektrisch	Vollelektrisch	Var. Anteil synth. Kraftstoffe

Kernaussagen

- Eine Eigenversorgung Bayerns ist anspruchsvoll
- Ein starker Zubau von Photovoltaik, Windkraft und Batteriespeichern ist notwendig
- Entscheidend für die Versorgungssicherheit sind Import und Export von Strom, Kraft-Wärme-Kopplung, Energiespeicher und Power-to-Gas
- Mobilität und Wärmeversorgung werden zu großen Stromverbrauchern
- Der zukünftige Wärmesektor wird, abhängig von lokalen Gegebenheiten, auf eine Vielzahl von Technologien zurückgreifen

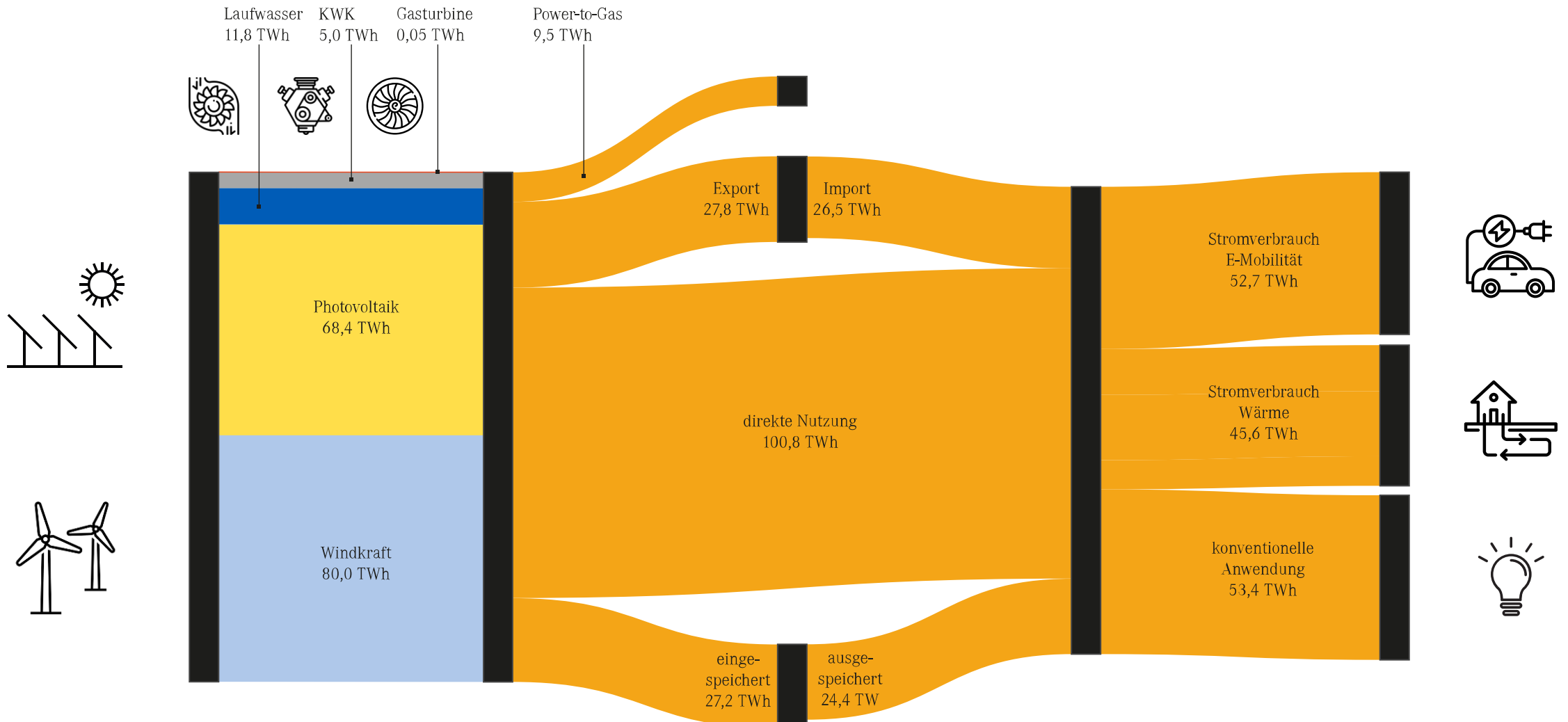


Bayern 100 % erneuerbar ist technisch möglich,
stellt allerdings eine große Herausforderung dar!

Stromsektor



Übersicht über die Strombereitstellung



Wichtigste Technologien und Stromverbrauch

Wichtigste Technologien

	Installiert	Spezifisch
Windkraft	32,3 GW	1335 $\frac{\text{Einwohner}}{\text{Windanlage}}$
Photovoltaik	66,6 GW	5,1 $\frac{\text{kW}}{\text{Einwohner}}$
Batteriespeicher	105 GWh	8,1 $\frac{\text{kWh}}{\text{Einwohner}}$

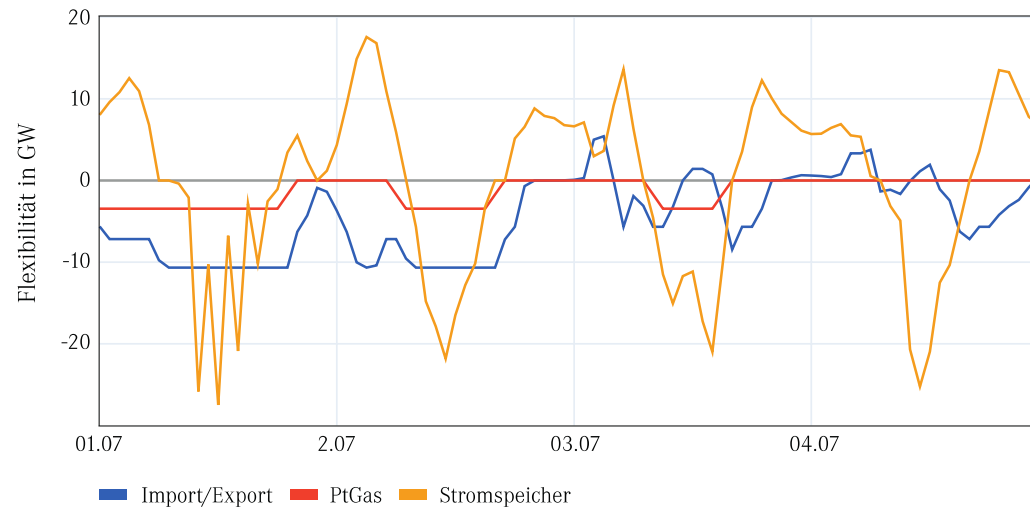
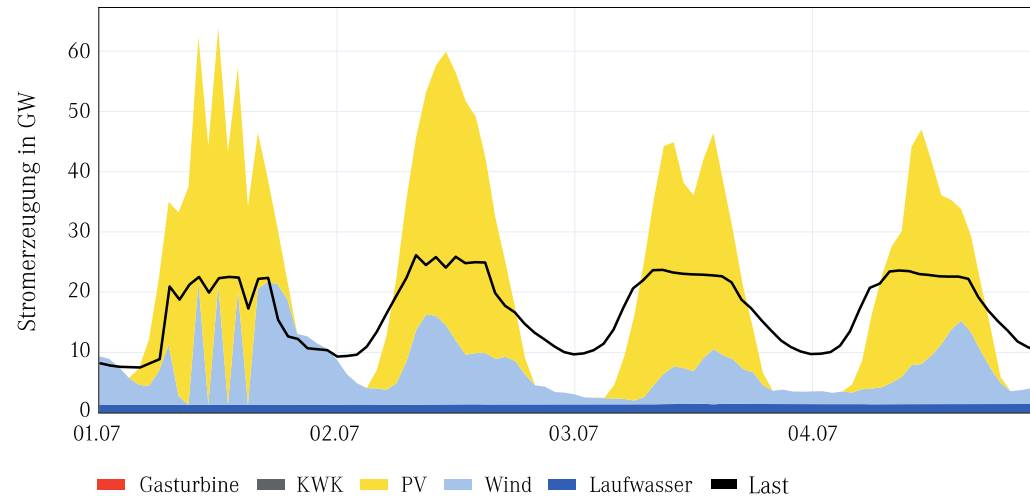
Sonstige Erzeugungstechnologien

	Installiert
Biomasse-KWK	1,15 GW
Gas-KWK	2,61 GW
Gasturbine	1,57 GW

Verbrauch

	Verbrauch	Reduktion Endenergie	Anmerkung
Konventionell	53,4 TWh _{el}	50 %	Szenariovorgabe BUND
E-Mobilität	52,7 TWh _{el}	53 %	infolge Elektrifizierung
Wärme	45,6 TWh _{el} (+ Q _{th})	52 bis 54 %	eigene Berechnungen

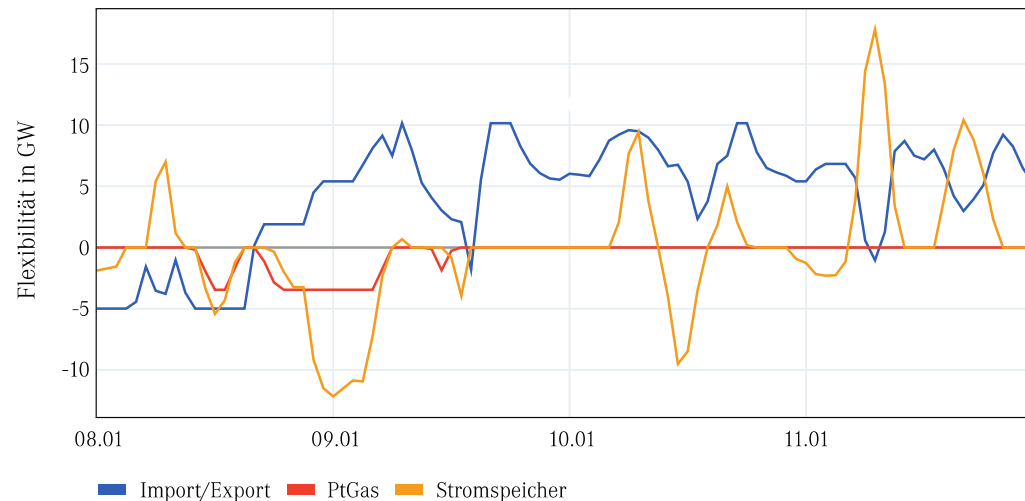
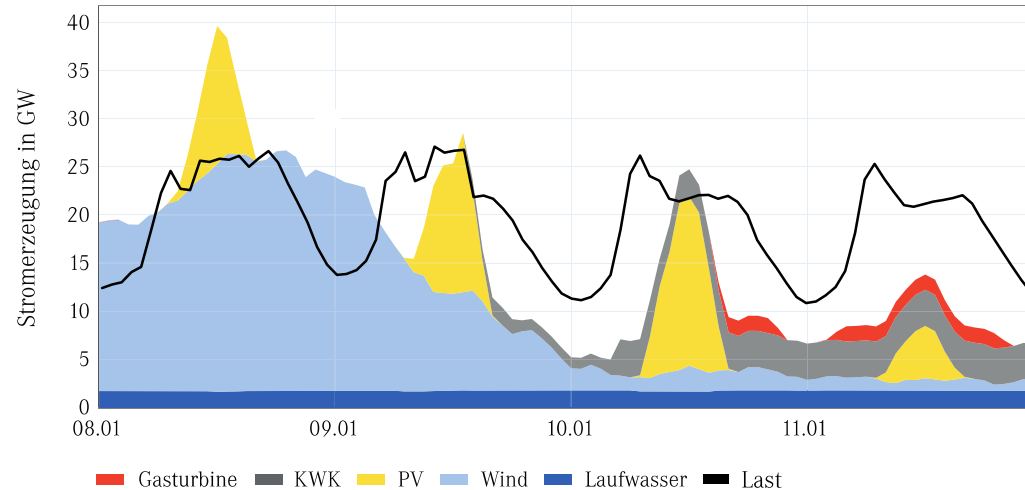
Typischer Verlauf im Sommer



- Im Sommer hohe Bereitstellung durch PV
- PV, Wind und Wasserkraft können Strombedarf decken

- Batteriespeicher größtenteils im Tag-Nacht-Rhythmus
- Exportüberschuss

Typischer Verlauf im Winter



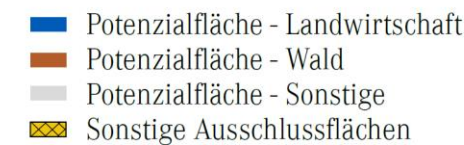
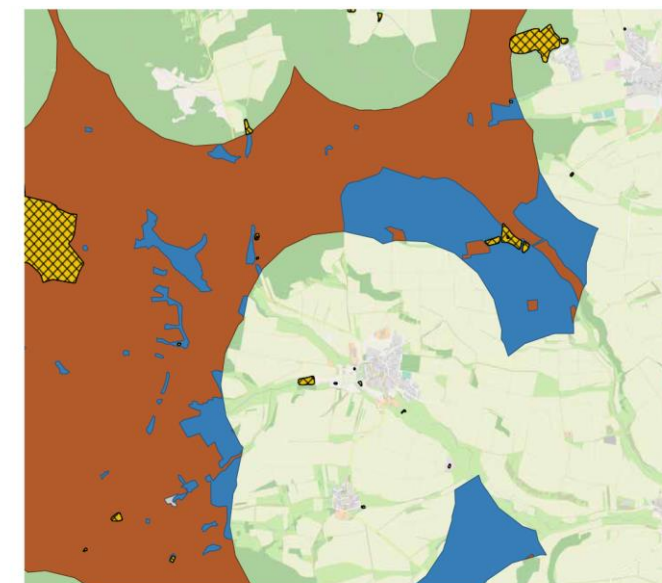
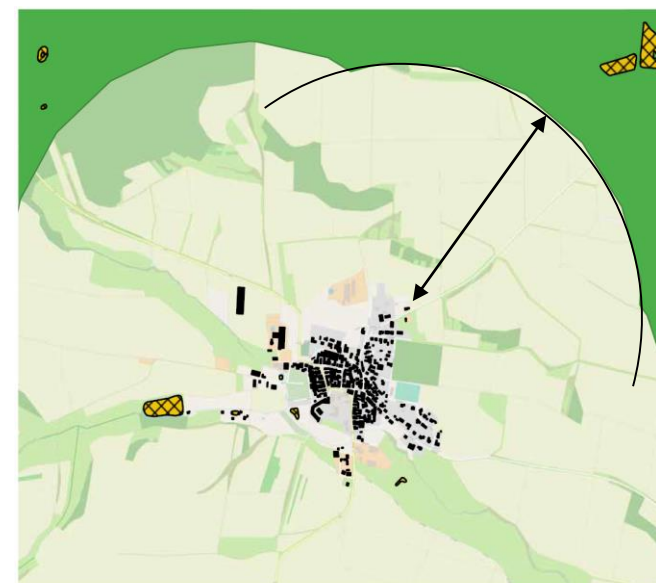
- Im Winter treten Dunkelflauten auf
- KWK und Spitzenlastgasturbinen werden benötigt

- Speicher entladen, allerdings durch Kapazität begrenzt
- Import von Bayerns Nachbarn

Windpotential – Vorgehen

Abhängigkeiten des Windpotenzials:

- 1) Für Windkraftanlagen nutzbare Flächen
(= Bay. Landesfläche - Ausschlussflächen)
- 2) Windaufkommen in nutzbaren Flächen
(→ statistische Auswertung von Wetterdaten)
- 3) Eingesetzte Windkraftanlagen
(→ moderne Schwachwindanlagen)

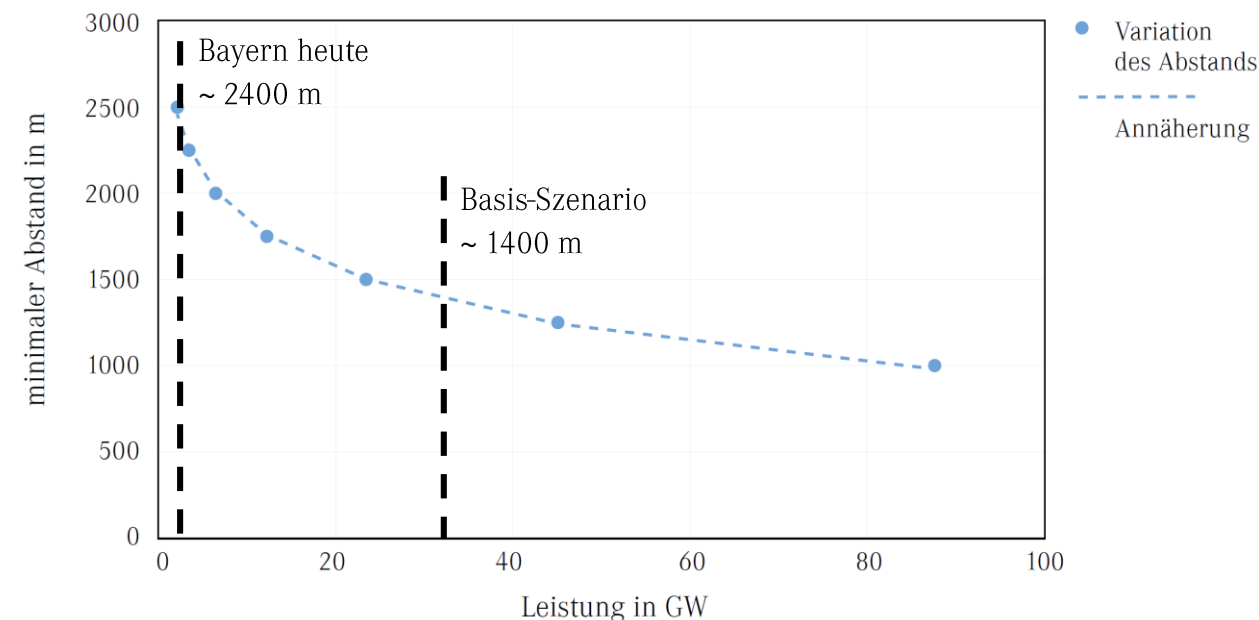
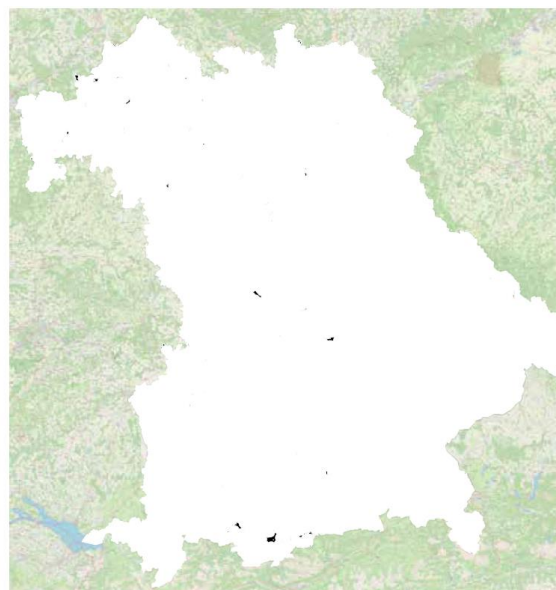
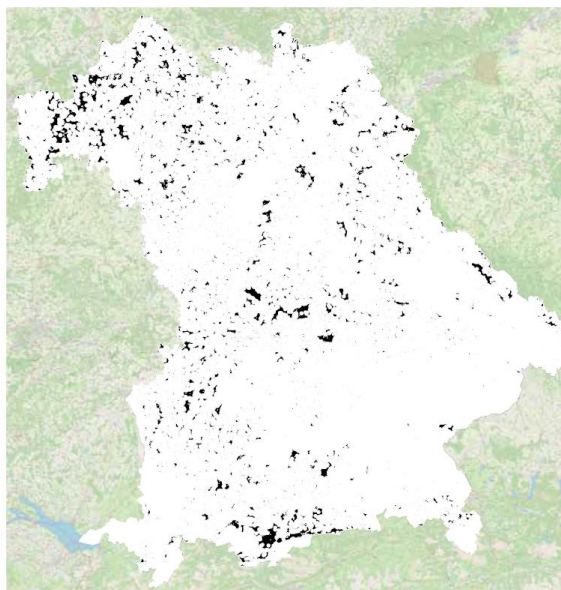


Aber: Es gibt noch weitere Einflussgrößen → Potenzial ist nur ein theoretisches Maximum

Windpotential – Ergebnisse

Abstand größer 1.000 m
Potenzial bis zu 87 GW

Abstand größer 2.500 m
Potenzial bis zu 2 GW



→ Gerade bei der Windkraft sollte das bestehende Potenzial maximal ausgenutzt werden

Photovoltaik

Basis der Berechnung

- Spezifikationen eines aktuellen PV-Moduls
- Verschiedene Ausrichtungen und Neigungen
 - Ausrichtung in Süd und Ost/West
 - Neigung von 10°, 25° und 30°
- Solare Einstrahlung aus Wetterdaten

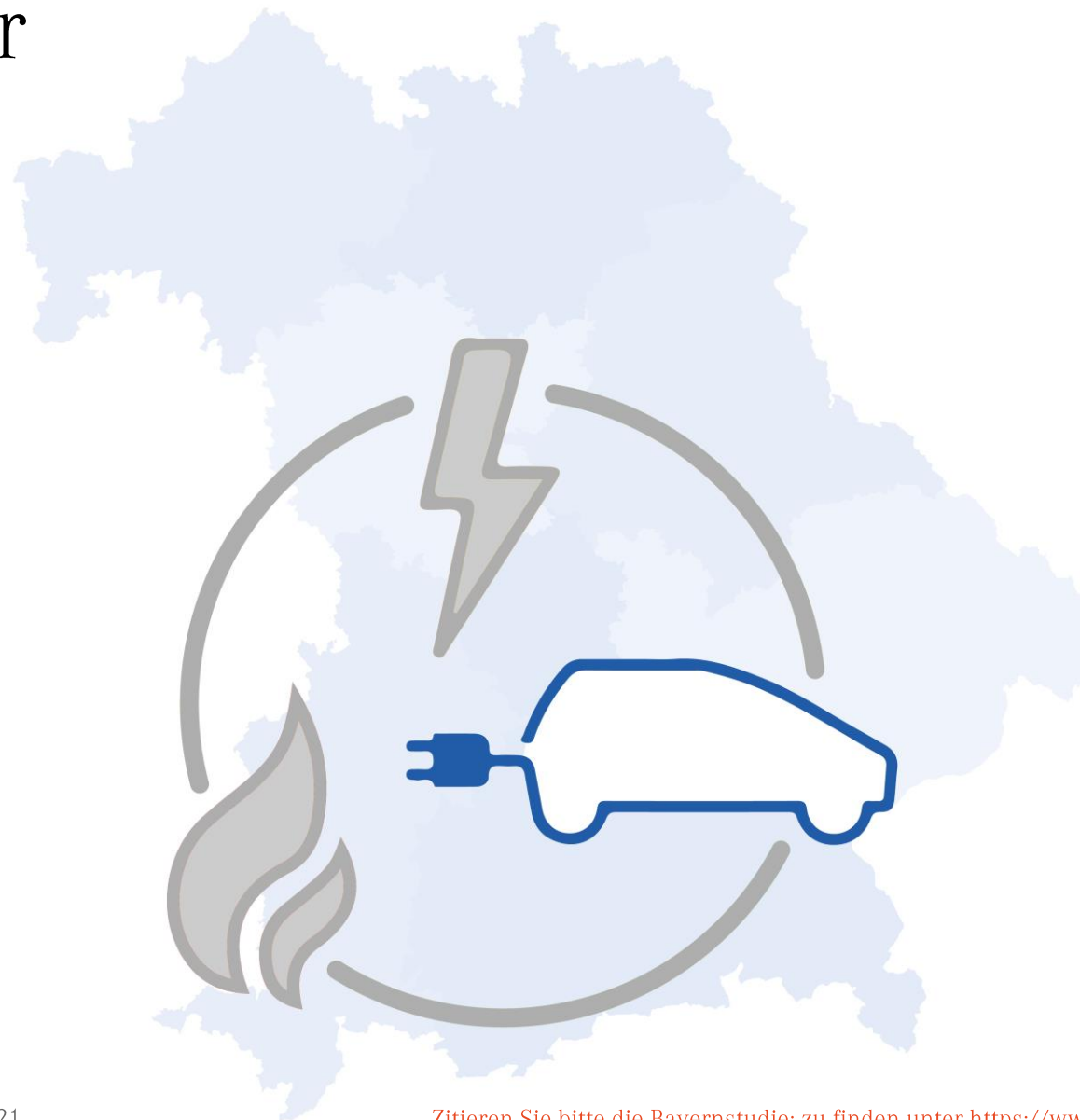


Benötigte Flächen für PV

Freifläche	133-199 km ²
Dachfläche	266 km ²

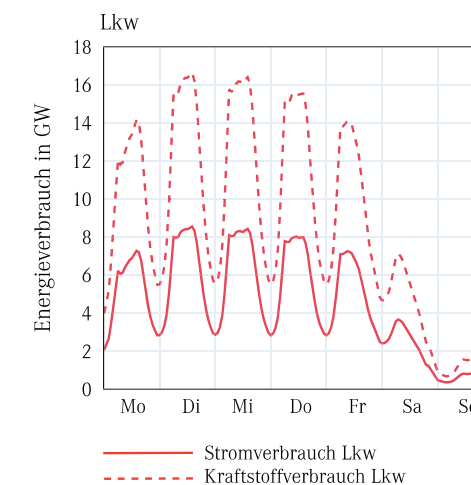
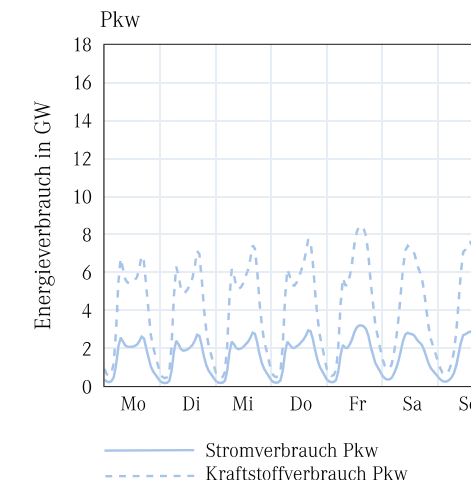


Mobilitätssektor



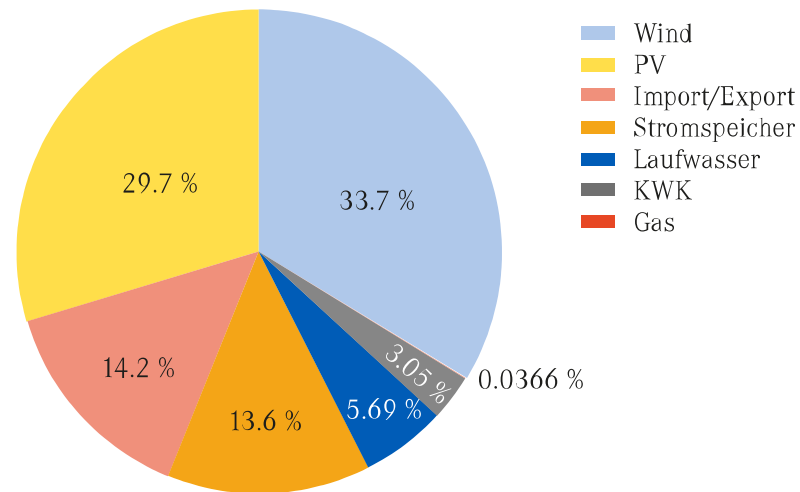
Methodik zur Datengenerierung

Typ	Endenergieanteil	Zeitreihe berücksichtigt	Energiebedarf berücksichtigt
Straße	82,1 %	ja	ja
Luftfahrt	15,4 %	nein	nein
Schifffahrt	0,4 %	nein	ja
Schienenverkehr			
elektrifiziert	1,5 %	durch Stromsektor	durch Stromsektor
dieselgetrieben	0,5 %	nein	ja
OPNV			
Stadtbusse	1,2 %	nein	ja
U-Bahn		durch Stromsektor	durch Stromsektor
Stadtbahn		durch Stromsektor	durch Stromsektor



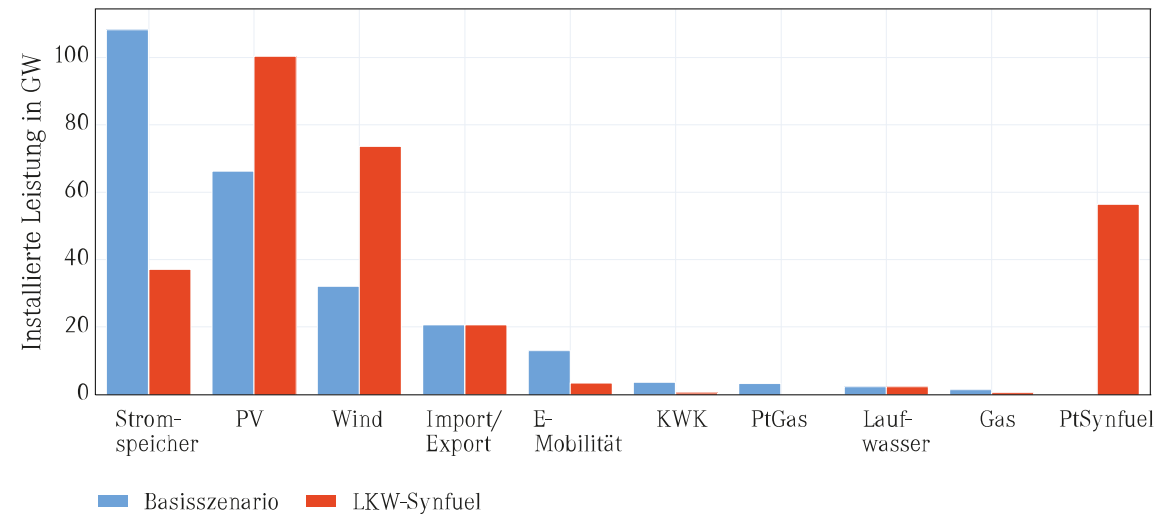
Ergebnisse Verkehrssektor

Strommix für Elektromobilität



- Strom hauptsächlich aus PV und Wind (63 %)
- aber auch aus Import und Speichern (28 %)

Szenarien für synthetische Kraftstoffe



- stark erhöhter Bedarf an erneuerbaren Energien
- deutlich geringerer Batteriespeicherbedarf, da synthetische Kraftstoffe gut speicherbar sind

Wärmesektor

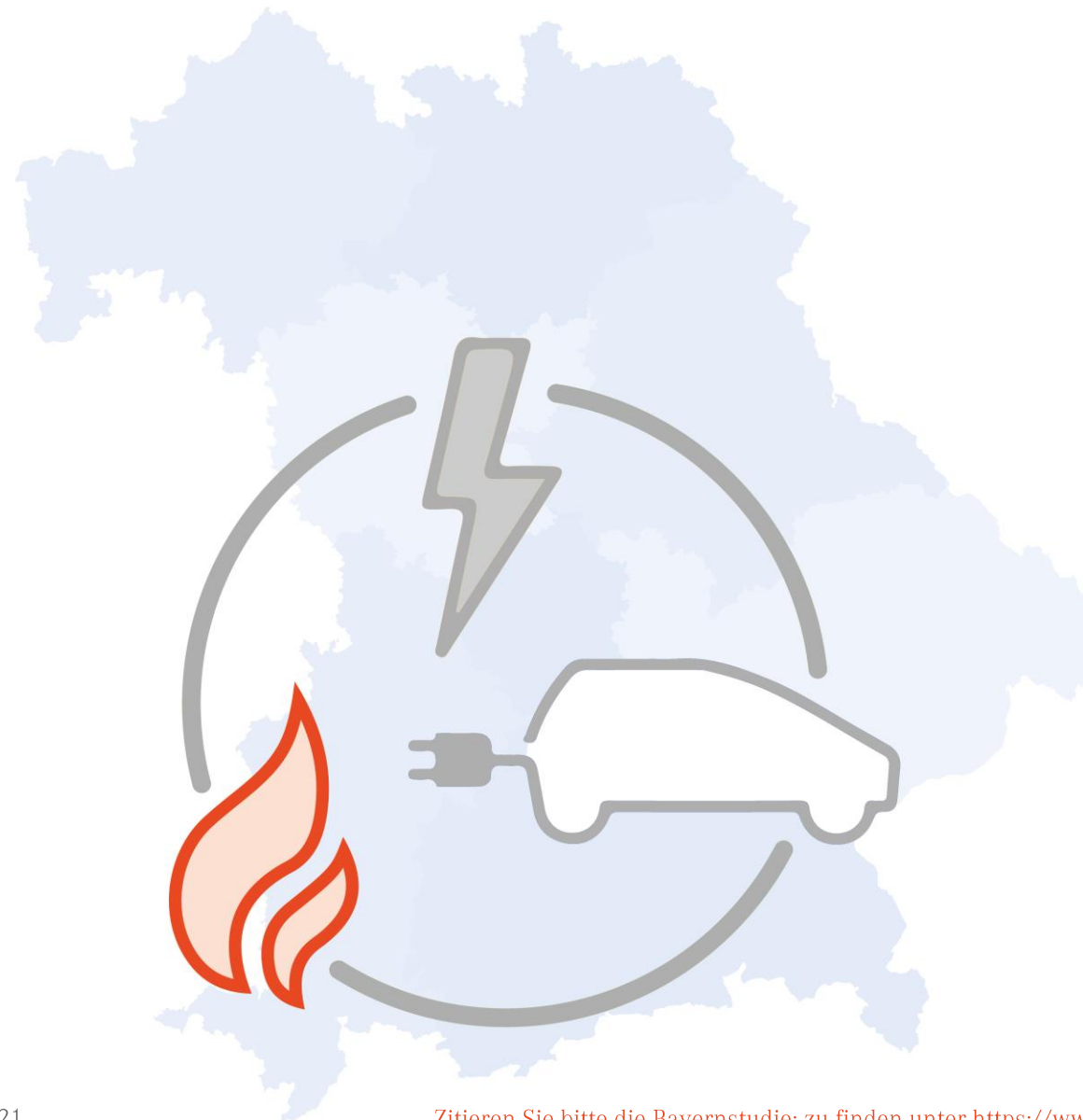


Abbildung des Wärmesektors

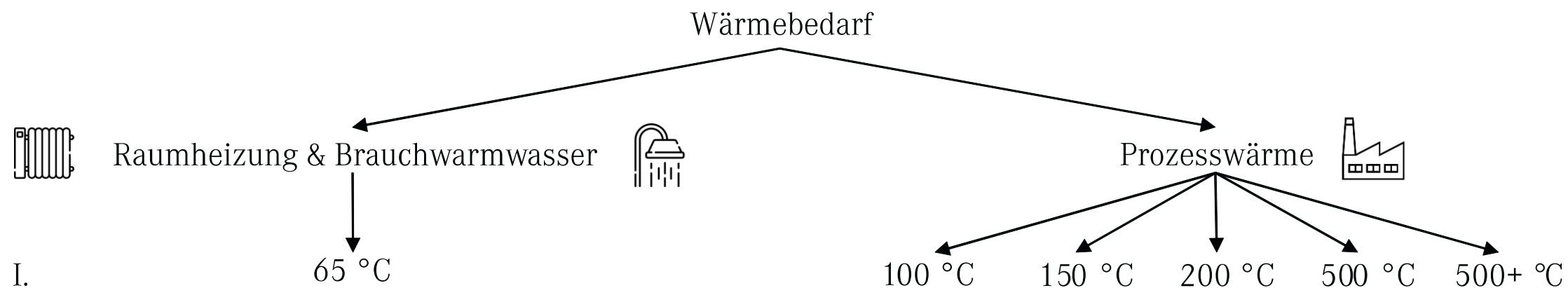


Abbildung des Wärmesektors

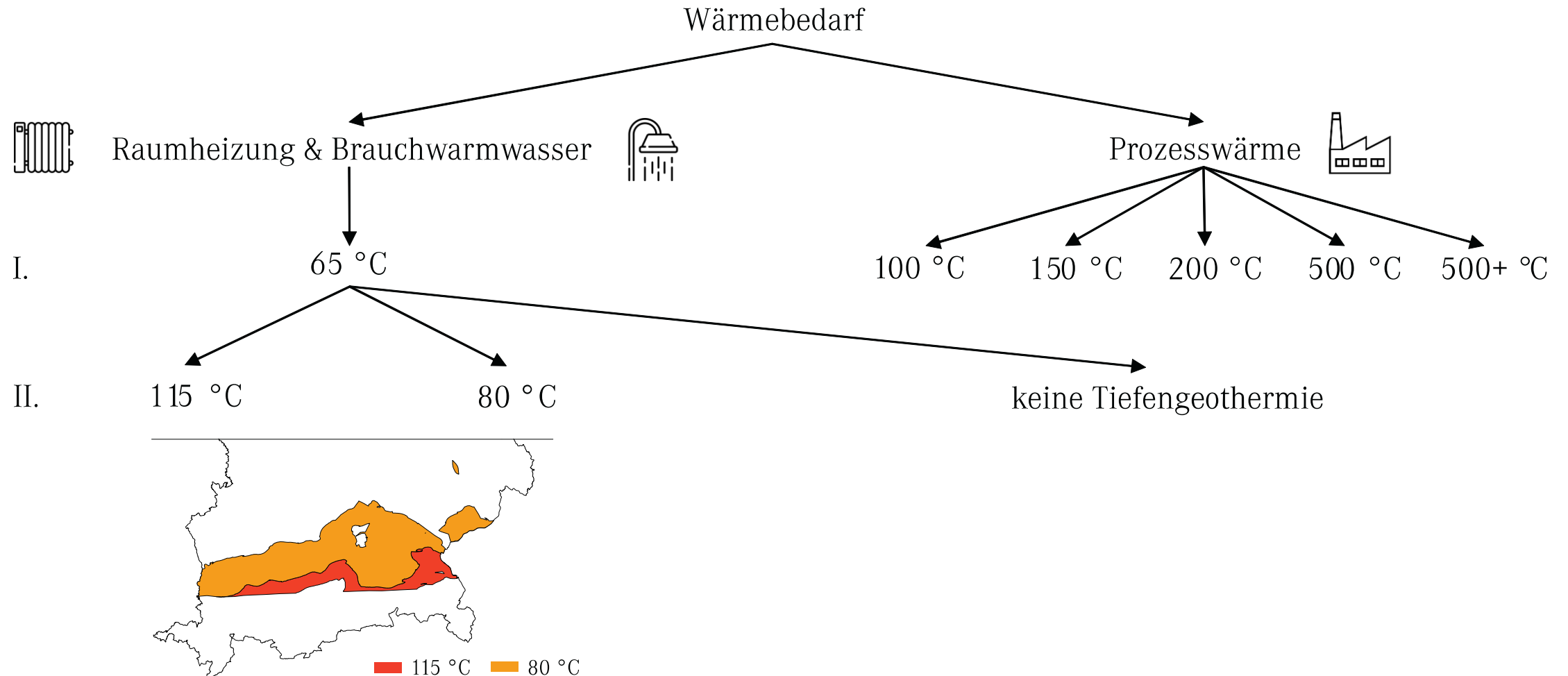


Abbildung des Wärmesektors

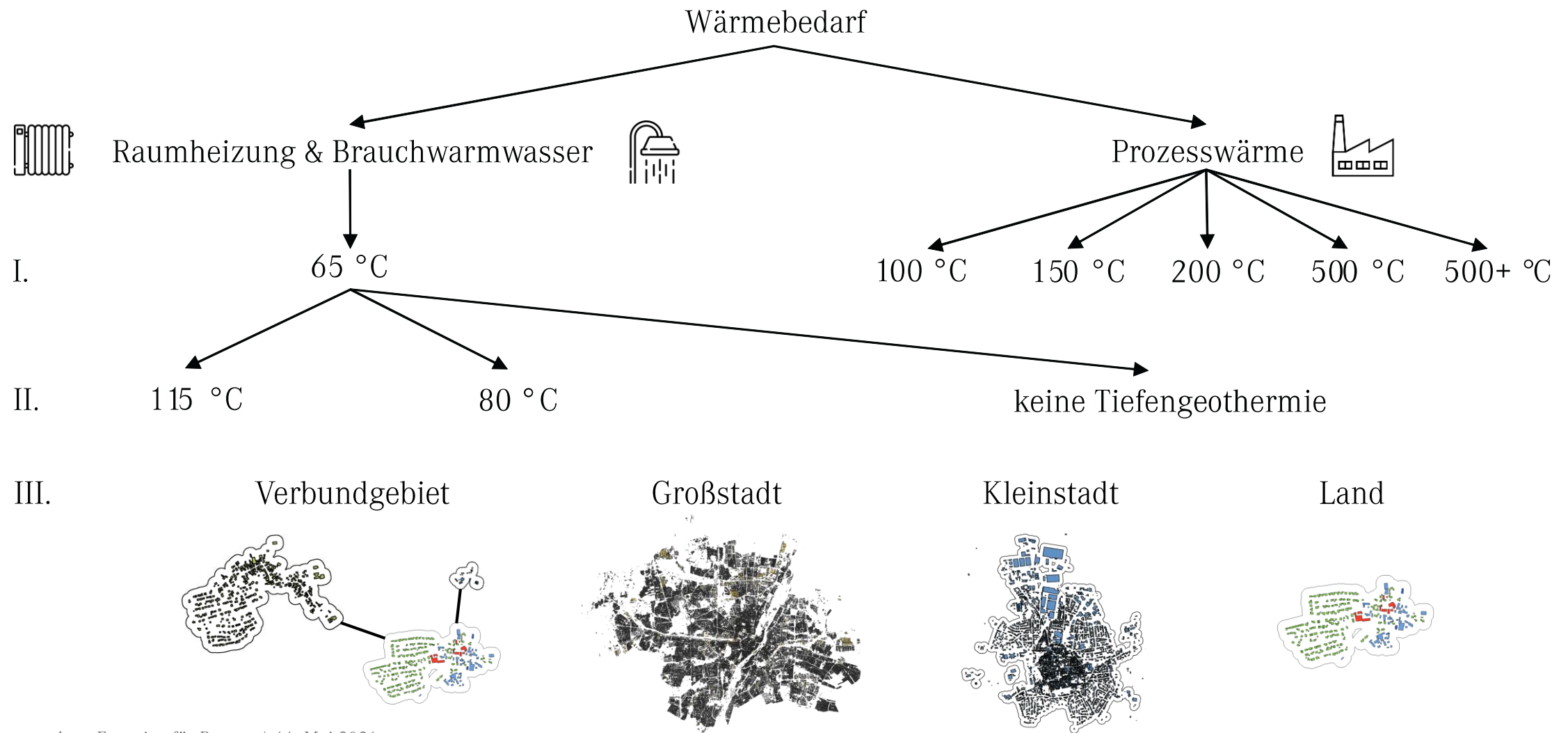
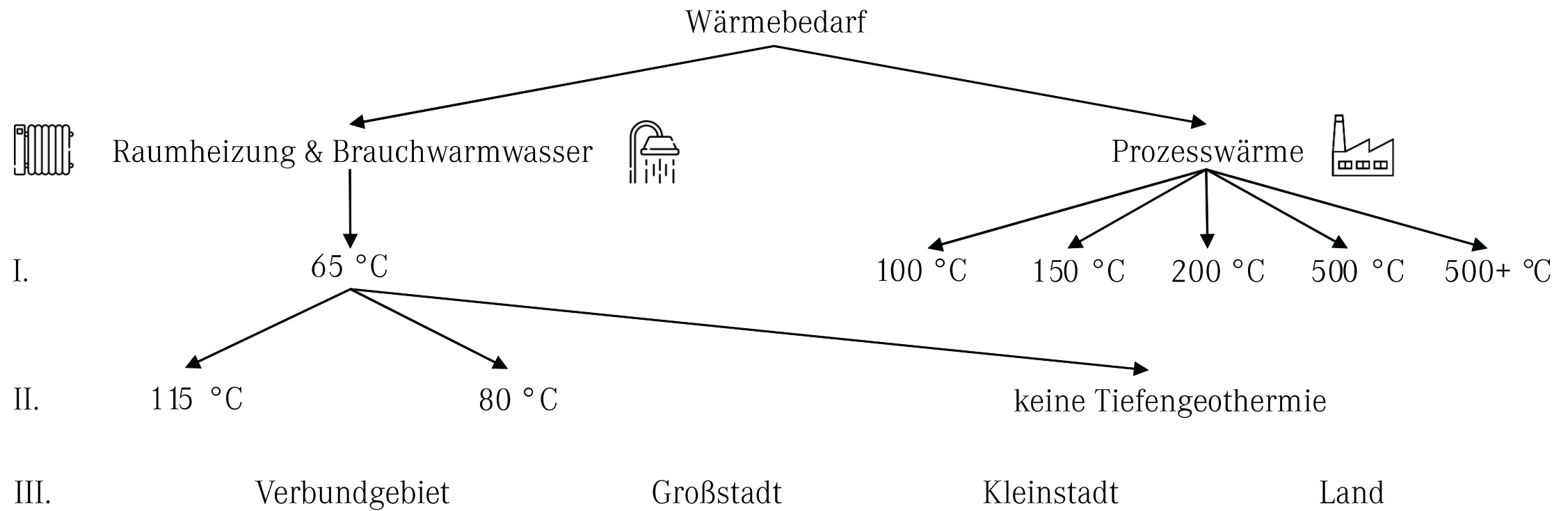


Abbildung des Wärmesektors

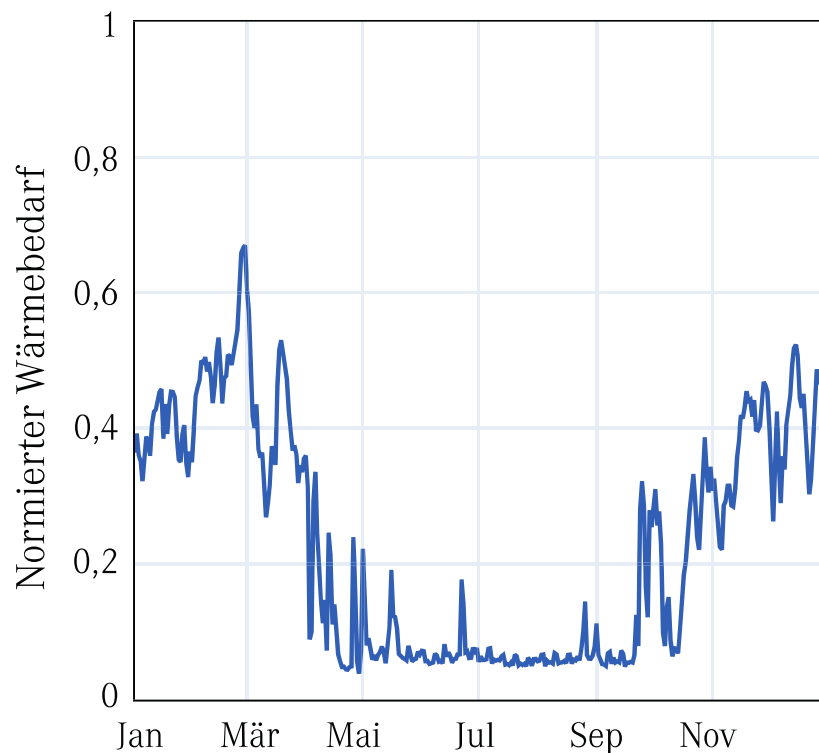


IV. Kosten potentieller Fernwärmenetze

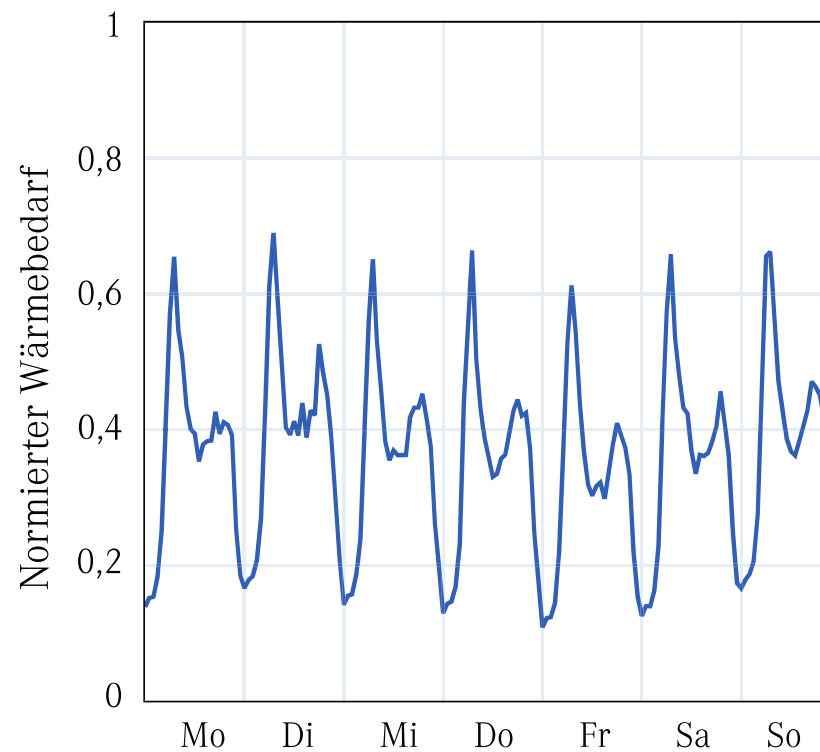


Wärmebedarfslastgang

Jahr (Tagesmittelwerte)

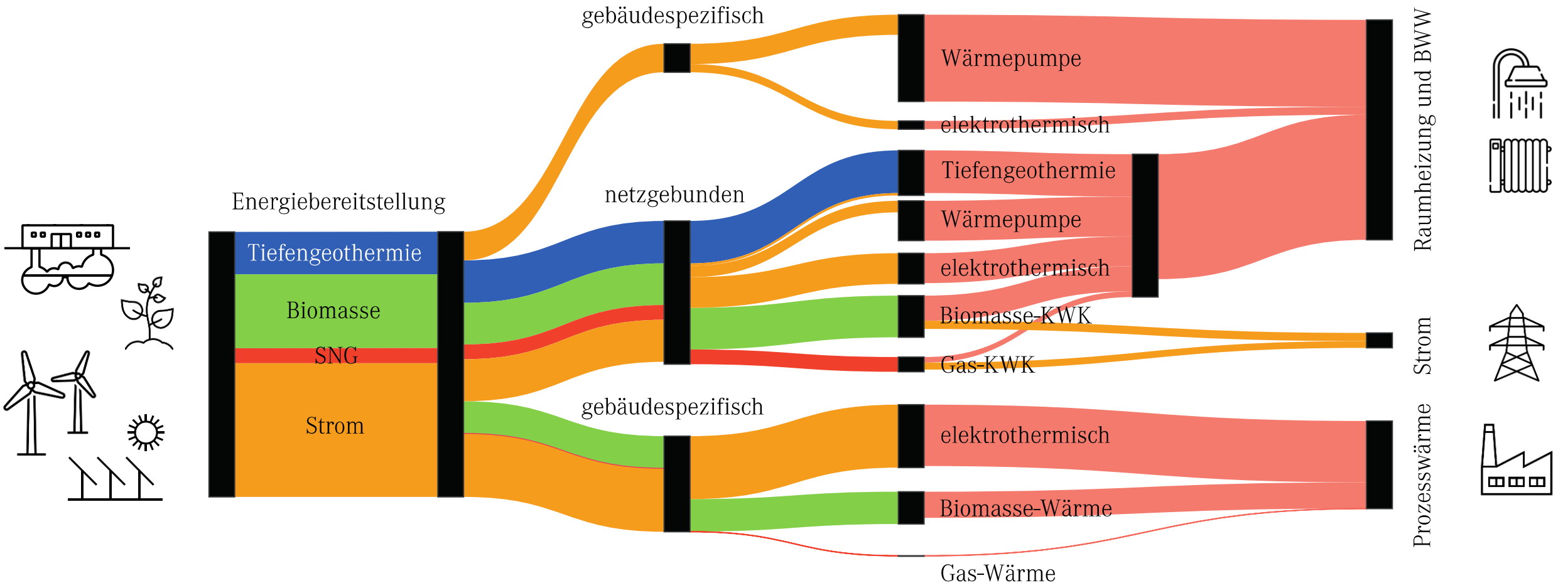


Winterwoche

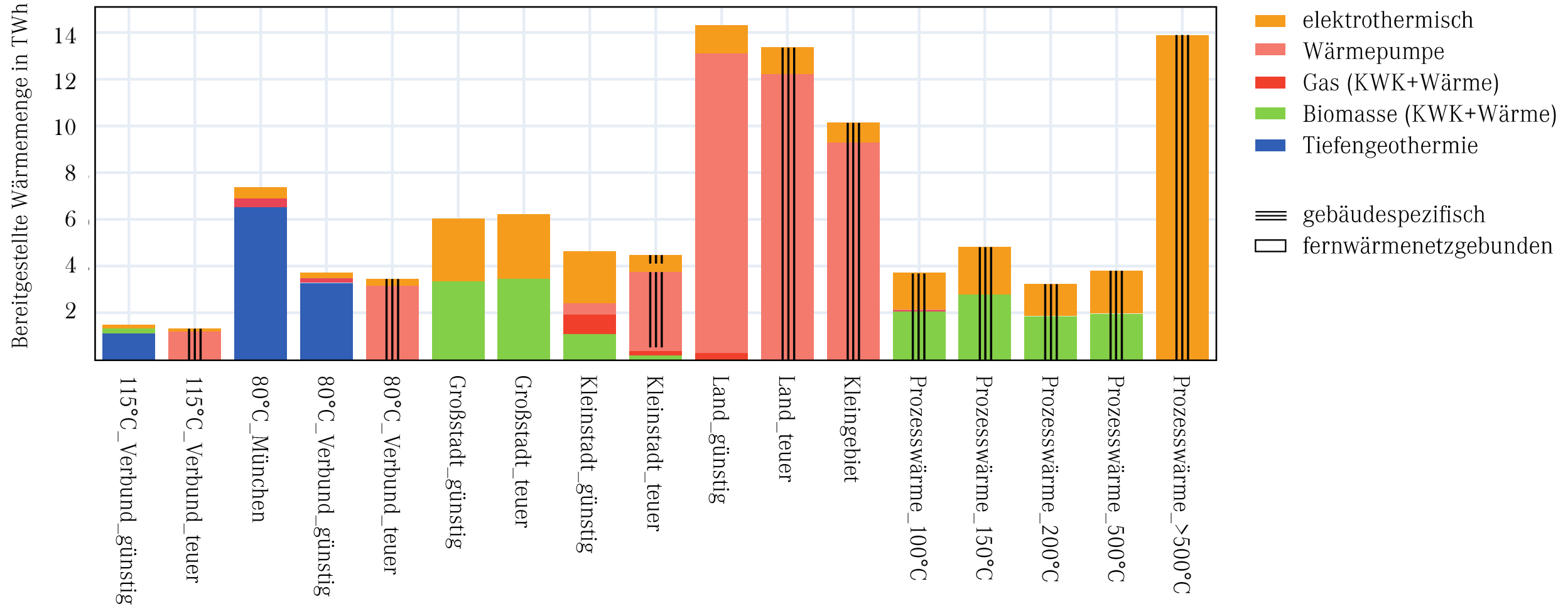


- Raumheizung im Winter dominant
- Brauchwarmwasser im Sommer dominant
- Bedarfsspitzen am Morgen und Abend

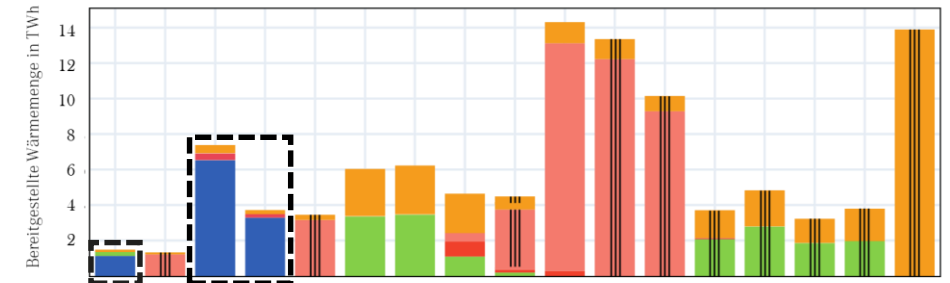
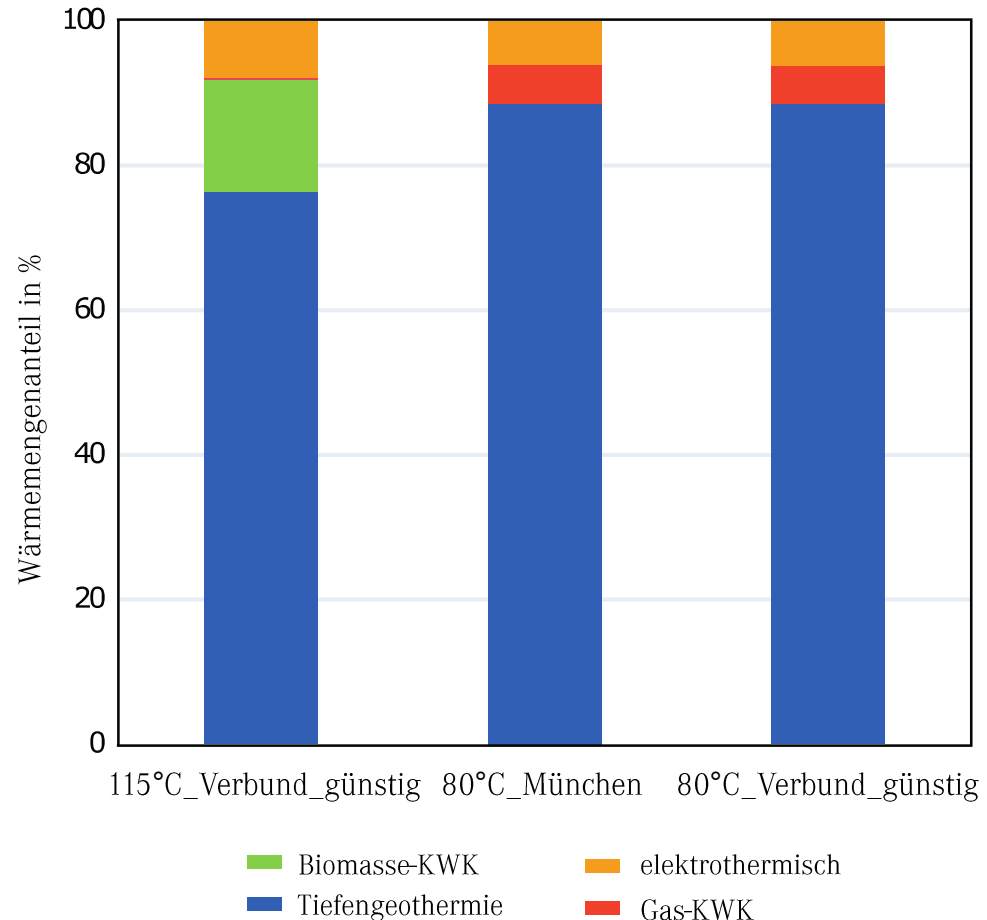
Die bayerische Wärmeversorgung



Wärmebereitstellung in den Typgebieten

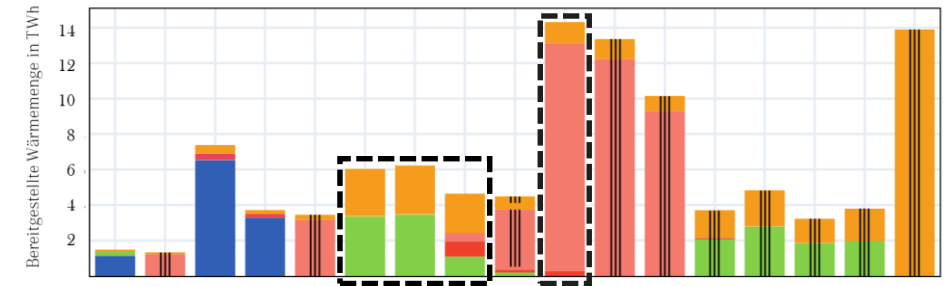


Gebiete mit Nutzung hydrothermaler Tiefengeothermie



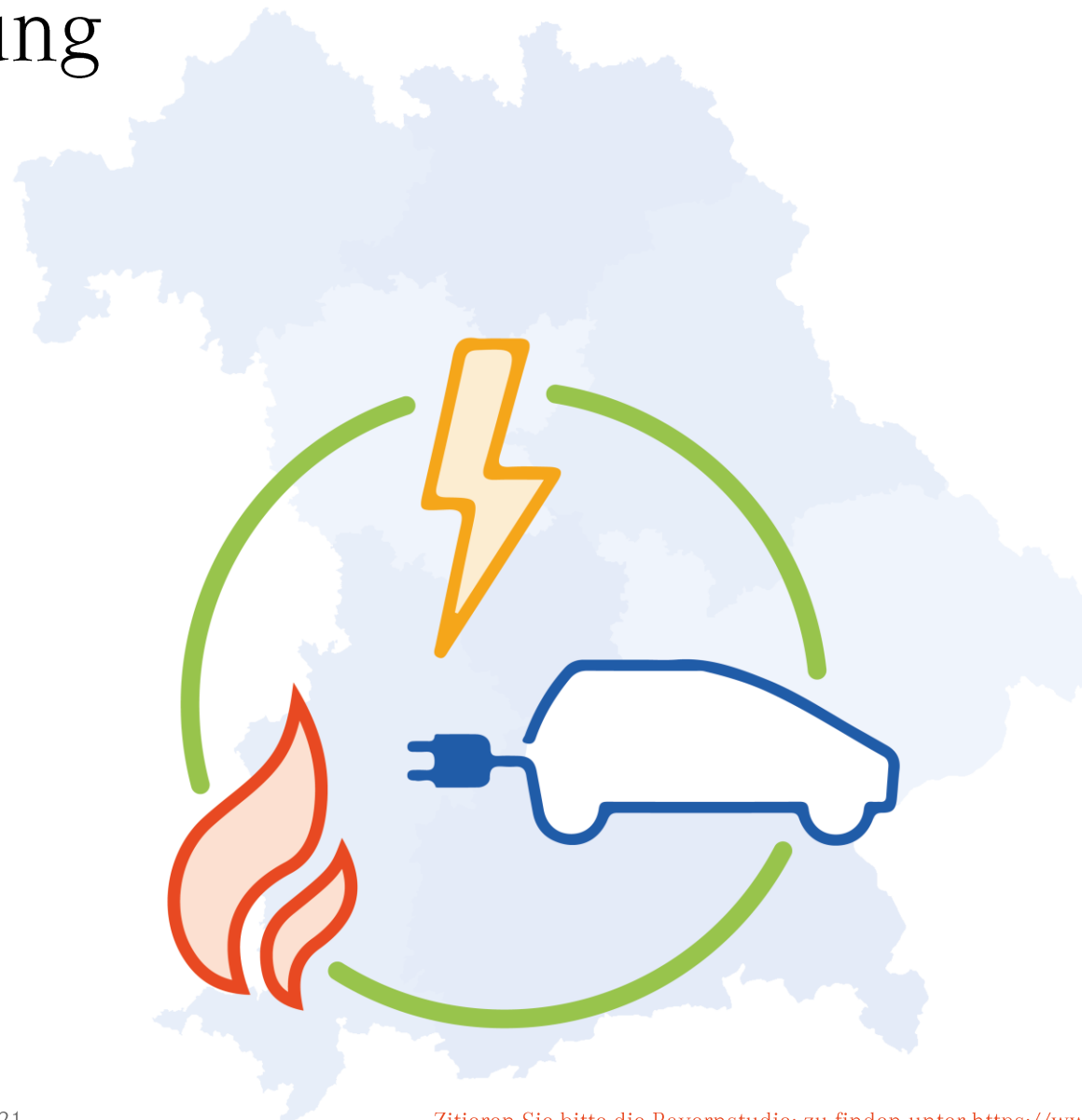
- Hydrothermale Tiefengeothermie für Grund- und Mittellast
- Biomasse-KWK und SNG-KWK zur Spitzenlastversorgung und zum Ausgleich der träge regelbaren Tiefengeothermie
- Elektrothermische Wärmebereitstellung mittels Heizstäbe zur Spitzenlastversorgung

Fernwärmegebiete zur Bereitstellung elektrischer Flexibilität

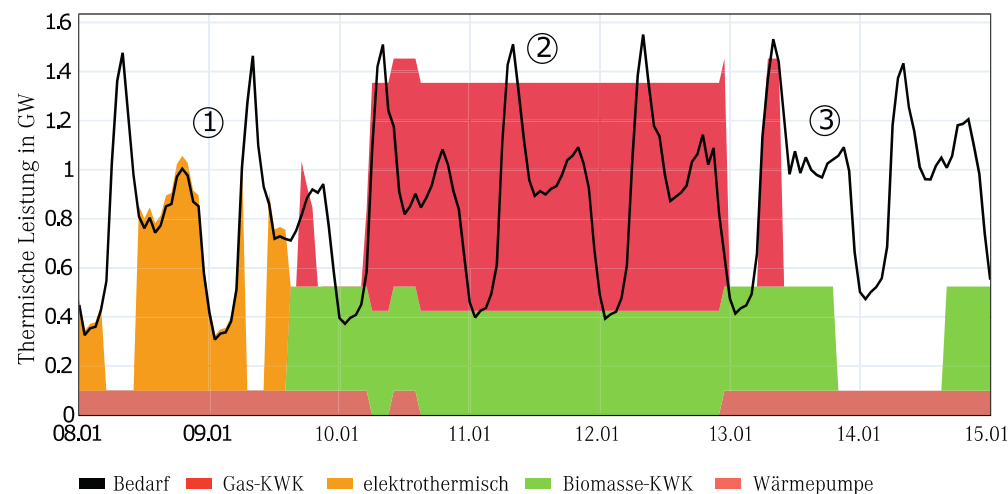
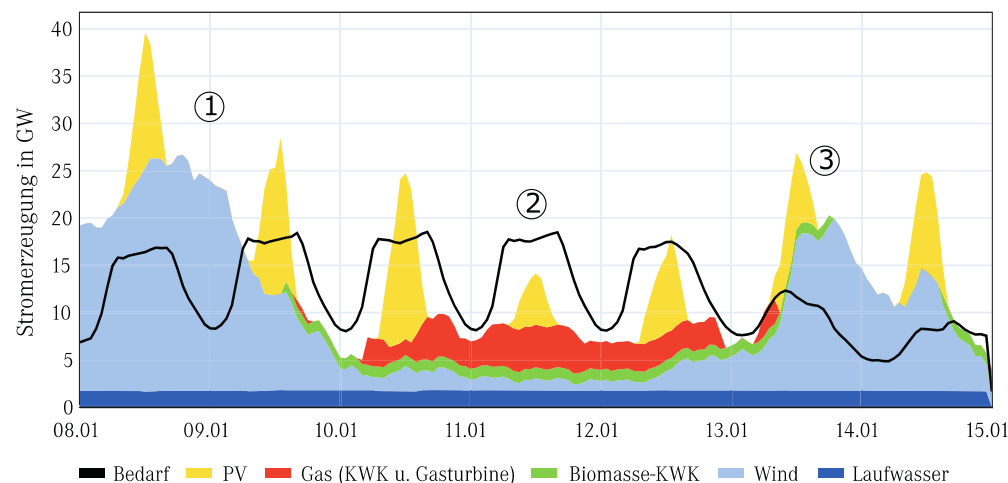


- Bei hoher Stromproduktion erfolgt die Wärmebereitstellung elektrothermisch
- Biomasse-KWK und SNG-KWK sorgen für mehr Flexibilität im Stromsektor
- Wärmespeicher ermöglichen erhöhte Flexibilität in der Wärmelast eines Typgebiets
→ indirekte Auswirkung auf den Stromsektor

Sektorenkopplung

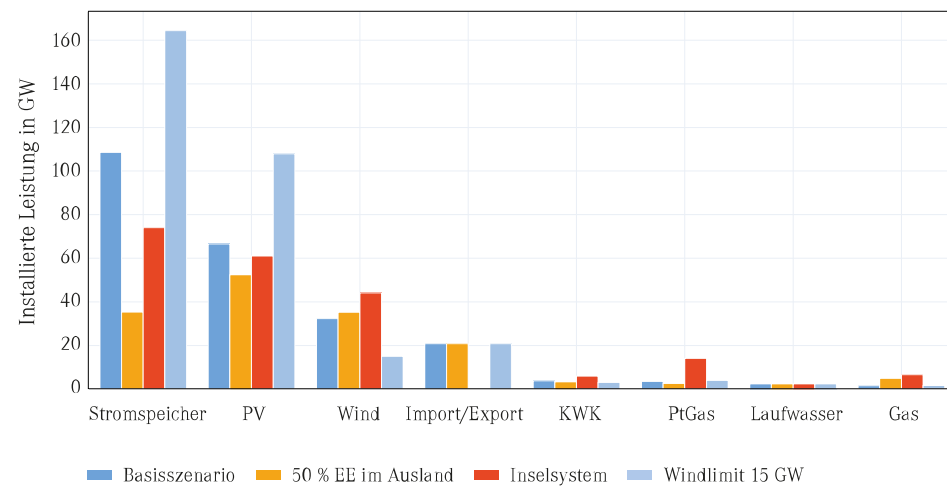
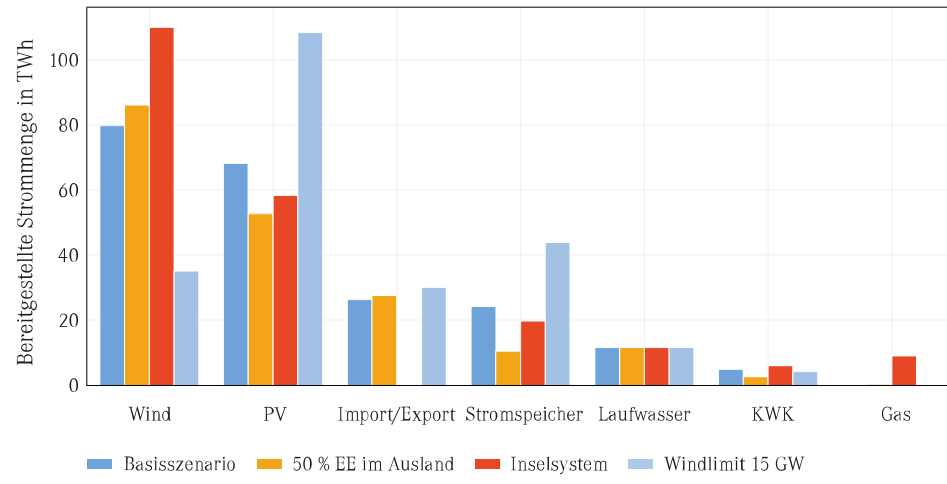


Flexibilität während einer „Dunkelflaute“



1. Windreicher Wintertag
 - Windleistung größer als Strombedarf
 - Laden der Stromspeicher und elektrothermische Wärmebereitstellung
2. „Dunkelflaute“
 - Geringer Wind- & PV-Stromertrag wird durch Stromspeicher und KWK-Strom ausgeglichen
 - Wärmebereitstellung übersteigt Bedarf, Wärme wird in Fernwärmenetzspeichern gespeichert
3. Ausgeglichener Wintertag
 - Wind & PV decken den Bedarf, elektrische Speicher werden geladen
 - Abschalten der KWK-Anlagen, Wärmespeicher werden entladen

Szenarienvergleich



Berechnung weiterer Betrachtungsszenarien

- 1) Geringerer Anteil von erneuerbaren Energien im Ausland
 - Nachbarn stellen mehr Flexibilität bereit
 - Bayern benötigt weniger flexible Erzeuger und Speicher

- 2) Bayern als Inselsystem
 - Nachbarn stellen weniger Flexibilität bereit
 - Bayern benötigt mehr flexible Erzeuger und Speicher

- 3) Windlimit von 15 GW
 - Bayern ist deutlich stärker auf PV angewiesen
 - Bayern benötigt mehr flexible Erzeuger und Speicher

Zusammenfassung / Schlussfolgerungen

- Starke Verbrauchsreduzierung und starker Zubau von Photovoltaik, Windkraft und Batteriespeichern für bilanzielle Eigenversorgung Bayerns notwendig
- Eigenversorgung technisch machbar, aber Umsetzung anspruchsvoll: je autarker, desto anspruchsvoller!
- Importe können sinnvoll sein, wie z. B. Windstrom aus DE/EU oder synthetische Treibstoffe aus sonnenreichen Gegenden
- Entscheidend für die Versorgungssicherheit sind Import und Export von Strom, Kraft-Wärme-Kopplung, Energiespeicher und Power-to-Gas
- Gekoppelte Sektoren Strom, Mobilität und Wärme unabdingbar
- Technologien im optimierten Energiesystem ändern sich



Verbrauchsreduzierung und Ausbau von EE in Bayern müssen umgesetzt werden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Download der Studie unter www.mw.tum.de/es/publikationen/bayernstudie

Lehrstuhl für Energiesysteme

Sebastian Miebling*

Benedikt Schweiger*

Wolf Wedel

Andreas Hanel

Hartmut Spliethoff

* geteilte Erstautorenschaft

ZAE Bayern

Jakob Schweiger

Rene Schwermer

Maximilian Blume

