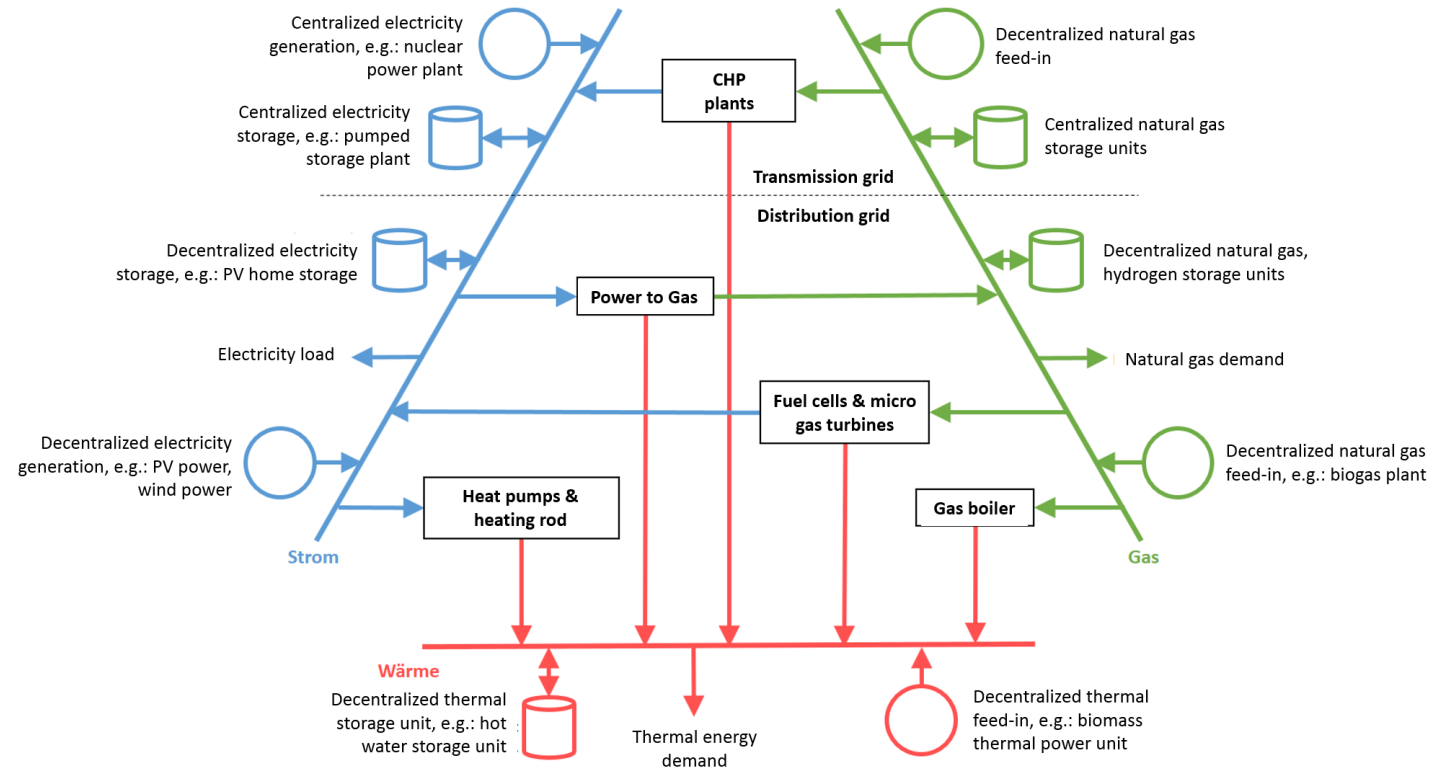


# Design und Einsparpotentiale hybrider Energiesysteme

Prof. Dr. Thomas Kienberger

DI Lukas Kriechbaum

DI Benjamin Böckl



Einführung

Exergieeffizienz

HyFlow

Zusammenfassung

**1.** systemische Notwendigkeit für flexible, energieeffiziente Energiesysteme

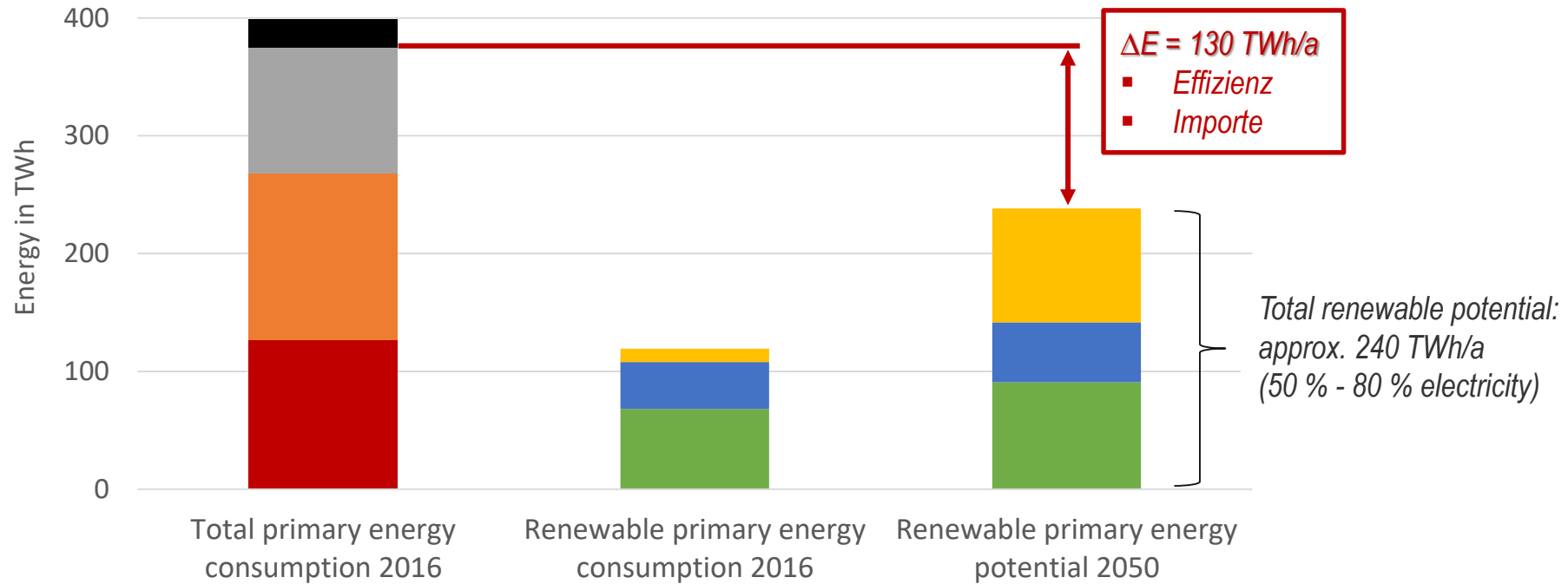
**2.** Energieeffizienz in hybriden Energiesystemen durch exergieoptimierte Kraftwerkseinsatzplanung

**3.** Lastflussberechnung in hybriden Energiesystemen - HyFlow

**4.** Zusammenfassung und Ausblick

# Sektoraler Energiebedarf in Österreich und Potentiale Erneuerbarer

- Einführung
- Exergieeffizienz
- HyFlow
- Zusammenfassung



- Industry
- Residential, public services and other
- Mobility
- Non-energetic consumption
- Biomass
- Hydropower
- Solar, wind and other renewables

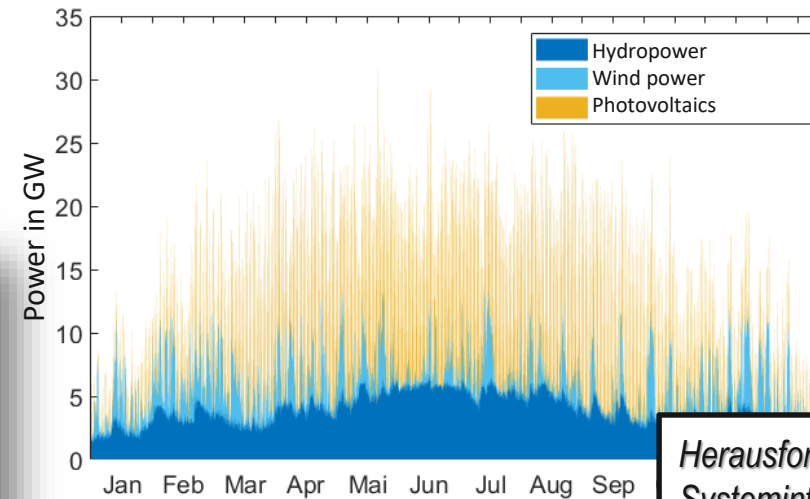
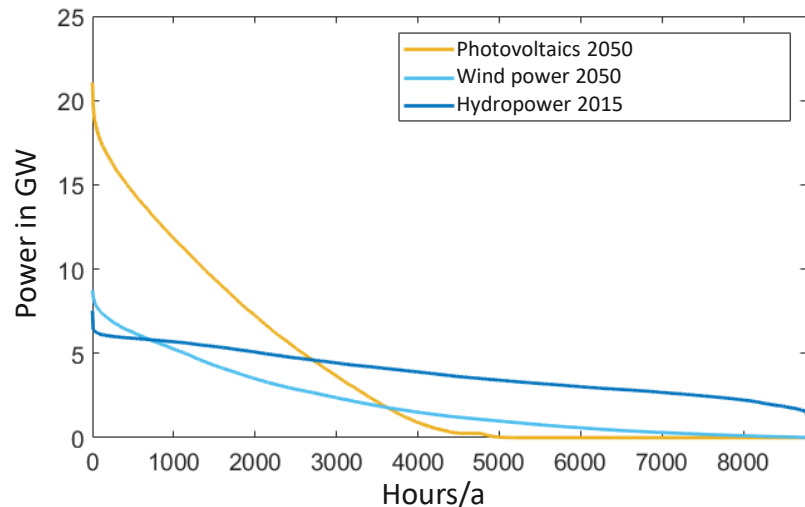
*Herausforderung bei der Systemintegration Erneuerbarer*

- Ausgleich Erzeugung Verbrauch
- Energieübertragung

# Zukünftige erneuerbare Erzeugung in Österreich

- Heutige Bedarfe können mit unseren erneuerbaren Potentialen nicht gedeckt werden!
- Potentiale sind größtenteils dezentral und räumlich ziemlich gleichverteilt
- ...und (außer Biomasse) zeitlich gesehen volatil

- *PV auf Dach- und Freiflächen*
- *Wind-power*
- *Hydro-power*



Source: Renewables4Industry: Sejkora, Christoph; Kienberger, Thomas (2018)

*Herausforderung bei der Systemintegration Erneuerbarer*

- *Ausgleich Erzeugung Verbrauch*
- *Energieübertragung*

# Erwartete Residuallast im elektrischen Energiesystem

in Österreich

Einführung

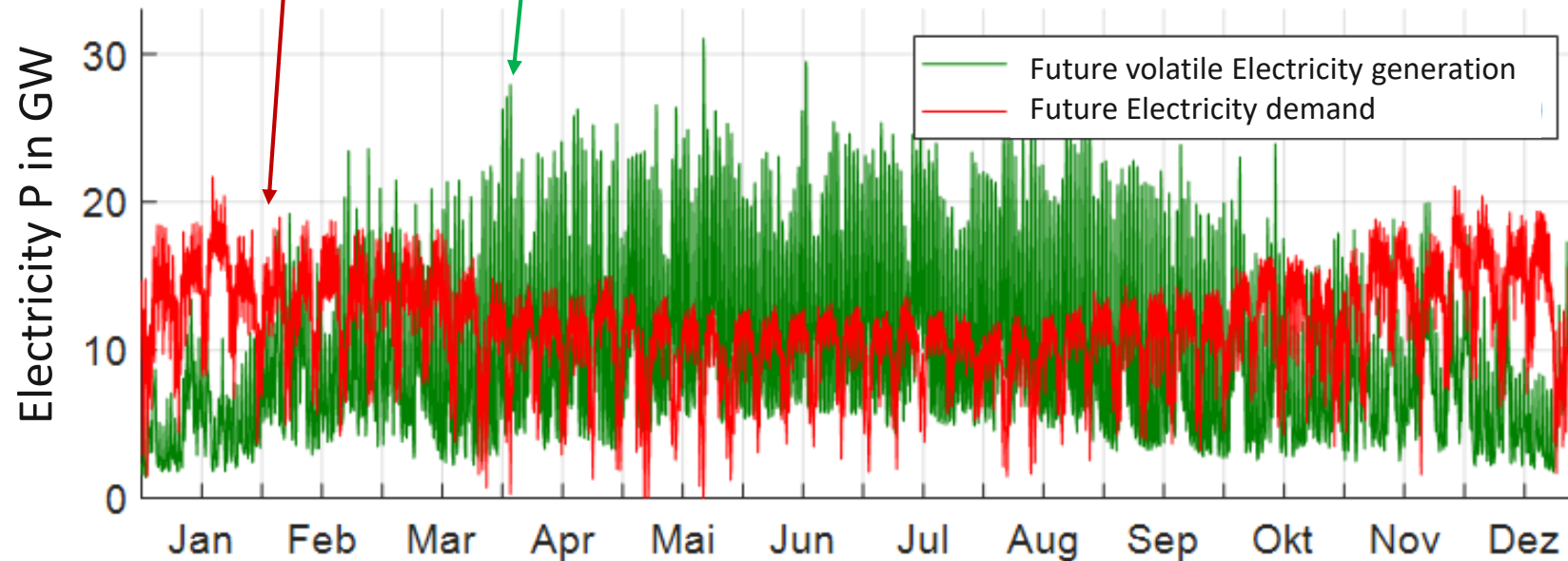
Exergieeffizienz

HyFlow

Zusammenfassung

$$P_{Res}(t) = P_{Load}(t) - (P_{Volat.}(t) + P_{CHP}(t))$$

- *Positive Residuallast: volatile erneuerbare Erzeugung kann die momentane Last nicht decken*
- *Negative Residuallast: überschüssige Erzeugung*



# Erwartete Residuallast im elektrischen Energiesystem in Österreich

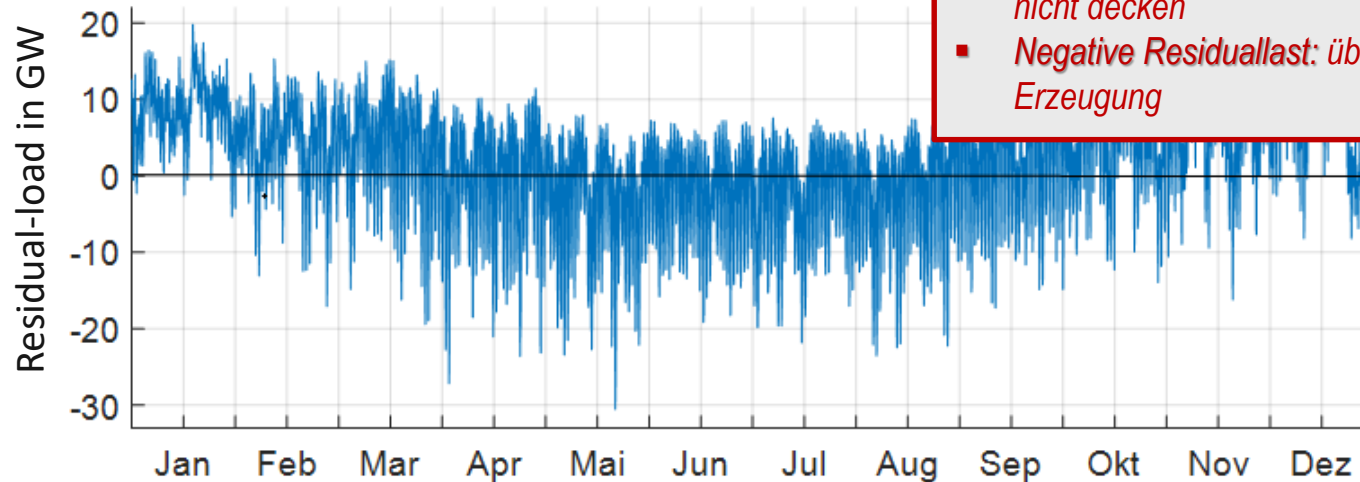
Einführung

Exergieeffizienz

HyFlow

Zusammenfassung

$$P_{Res}(t) = P_{Load}(t) - (P_{Volat.}(t) + P_{CHP}(t))$$



- *Positive Residuallast: volatile erneuerbare Erzeugung kann die momentane Last nicht decken*
- *Negative Residuallast: überschüssige Erzeugung*

## Heute

- Fast durchgängig positive Residuallasten  
...aber regelmäßige Engpässe in den Netzen führen zu Intraday-Stopp und Re-Dispatch
- Einige wenige Stunden Überdeckung  
...Windturbinen "Werden aus dem Wind gedreht"

## Zukunft

- Drastische Zunahme von neg. Residuallasten
- Lösungsansatz: Flexibilitätsoptionen
  - Speicher
  - Demand-response

← Elektromobilität,  
flexibel versorgte  
Prozesse

# Berechnung des Bedarfs an Flexibilität: Discrete Fourier transformation (DFT)

Einführung

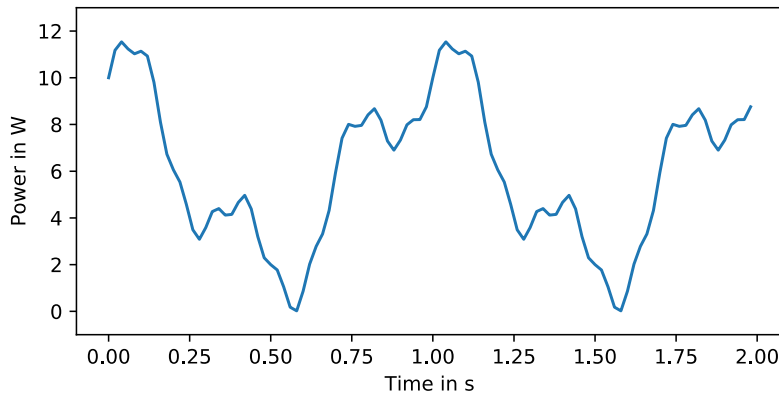
Exergieeffizienz

HyFlow

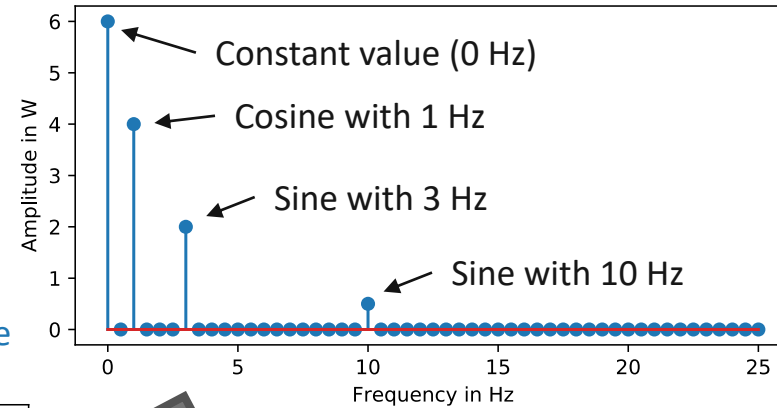
Zusammenfassung

Erlaubt die Zerlegung eines zeitdiskreten Signals in seine Spektralkomponenten

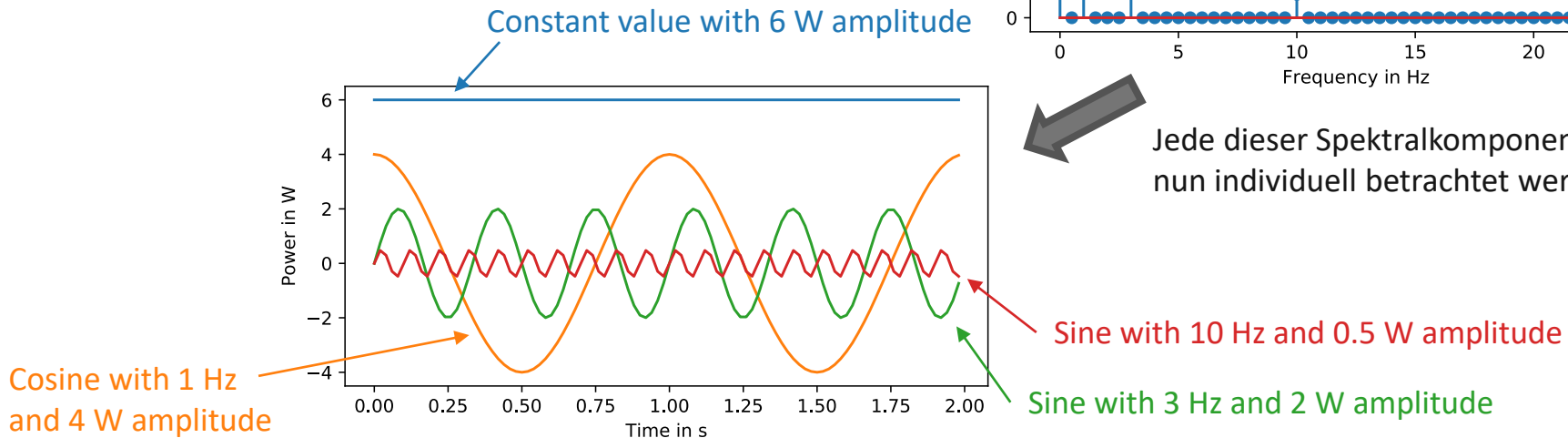
$$y(t) = C_1 \cdot \sin(\omega_1) + C_1 \cdot \cos(\omega_1) + C_2 \cdot \sin(\omega_2) + C_2 \cdot \cos(\omega_2) + \dots$$



DFT



Jede dieser Spektralkomponenten kann nun individuell betrachtet werden



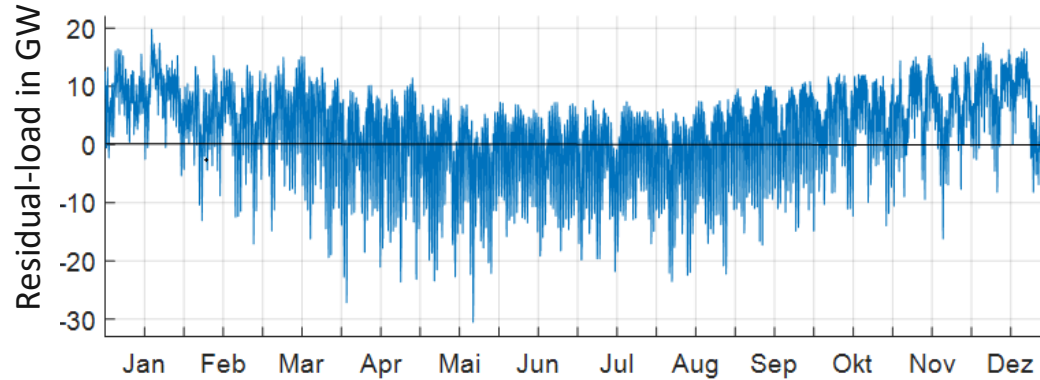
# Berechnung des Bedarfs an Flexibilität: Discrete Fourier transformation (DFT)

Introduction

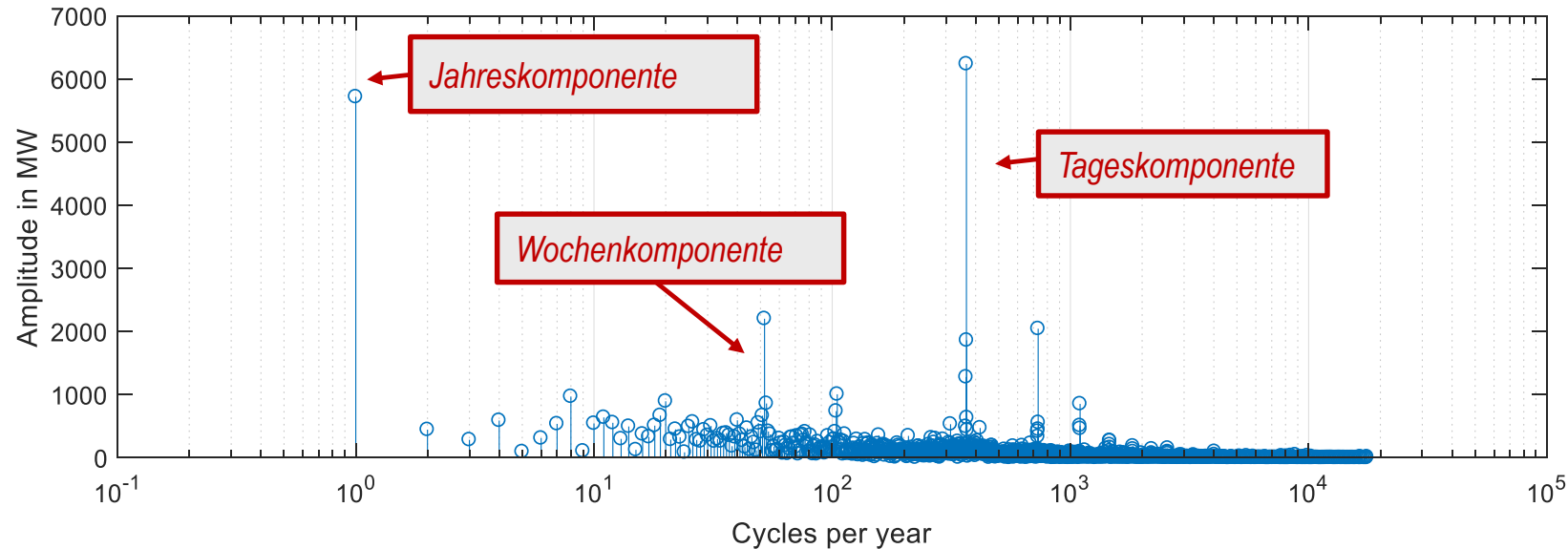
Case-Study 1

Case-Study 2

Summary/Outlook



Anwendung der DFT auf die gezeigte Residuallast





# Zukünftige erneuerbare Erzeugung in Österreich

- Heutige Bedarfe können mit unseren erneuerbaren Potentialen nicht gedeckt werden!
- Potentiale sind größtenteils dezentral und räumlich ziemlich gleichverteilt
- ...und (außer Biomasse) zeitlich gesehen volatil

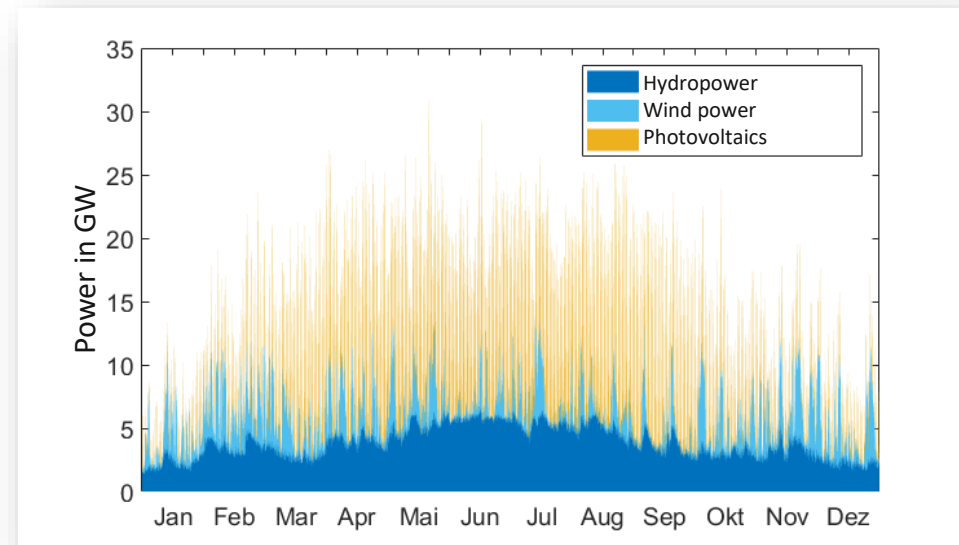
## Fazit:

Wir brauchen Energiesysteme, die

- ... Flexibilität in den benötigten Zeitkonstanten bereitstellen kann.
- ... hocheffizient sind.

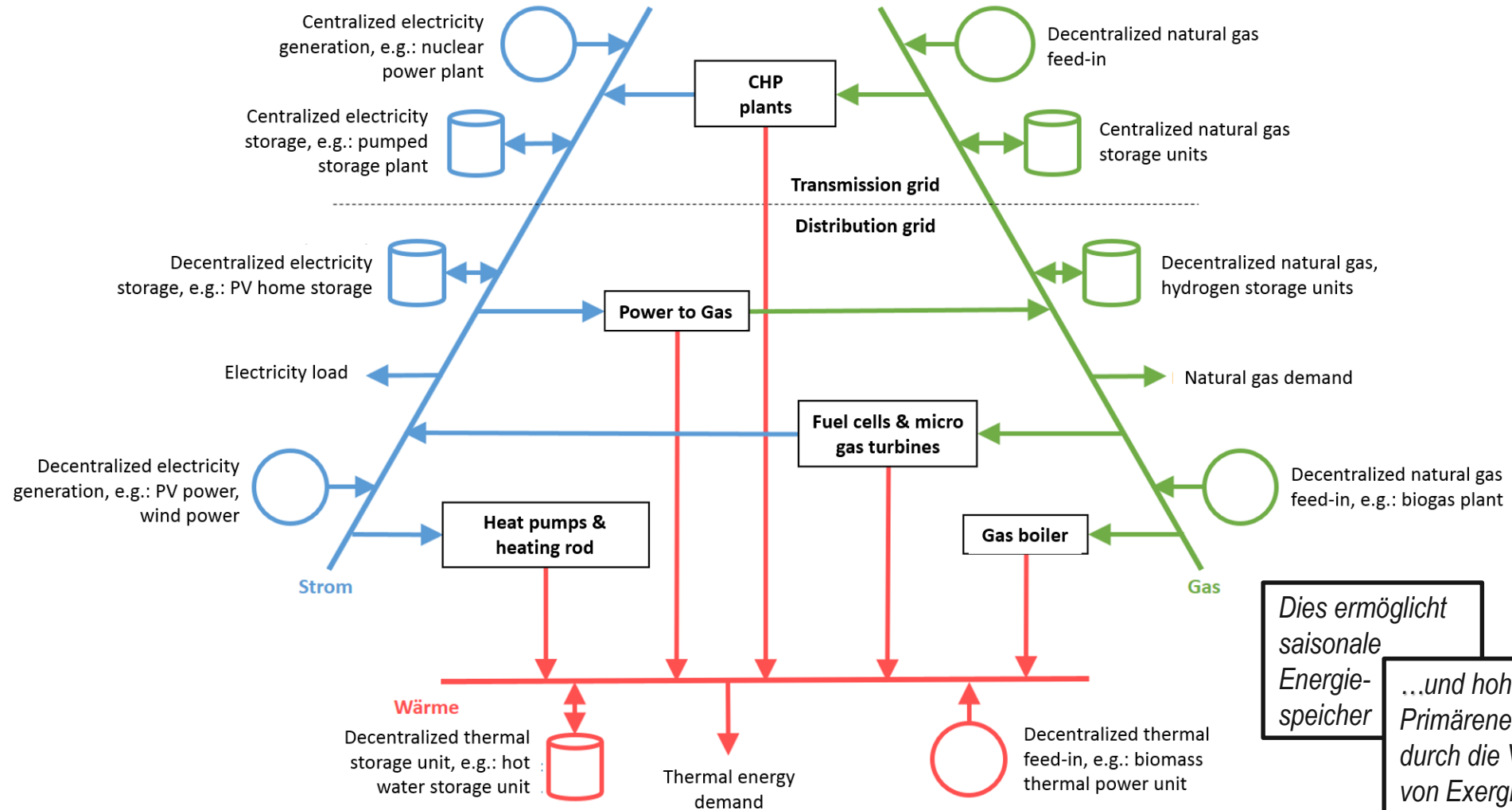
## Ansatz:

Hybride Energiesysteme ermöglichen beides.



*Hybride Energiesysteme: Energiesysteme die die unterschiedliche wirtschaftliche Sektoren (Elektrizität, Gas, Verkehr, Wärme..) über netzgebundene Energieträger koppeln.*

# Hybride Energiesysteme koppeln energiewirtschaftliche Sektoren über netzgebundene Energieträger



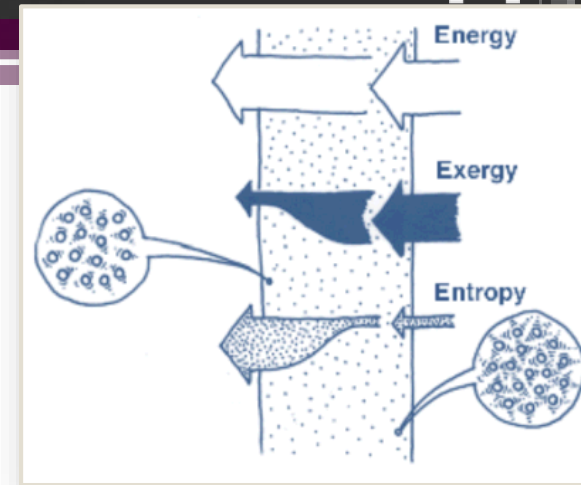
# Energie Q = Exergie E + Anergie A

## Exergie ist...

.. die maximale Arbeit die aus einem allgemeinen Strom mittels eines reversiblen Prozesses generiert werden kann ( $\Delta s_{\text{system}} = 0$ )

## Anergie ist...

..jener Teil des Energiestrom, der keine Arbeit enthält...



## Fazit:

Wir brauchen Energiesysteme, die

- ... Flexibilität in den benötigten Zeitkonstanten bereitstellen kann.
- ... hocheffizient sind.

## Ansatz:

Hybride Energiesysteme ermöglichen beides.

- In allen irreversiblen Prozessen wird Exergie in Anergie umgewandelt.
- Irreversible Exergieverluste  $I$  entstehen...

$$\sum(\dot{m} \cdot h) - \sum(\dot{m} \cdot T_u \cdot s) + \sum \dot{Q}_{zu} - \sum \dot{Q}_{zu} \frac{T_u}{T_{zu}} = \dot{E} + i$$

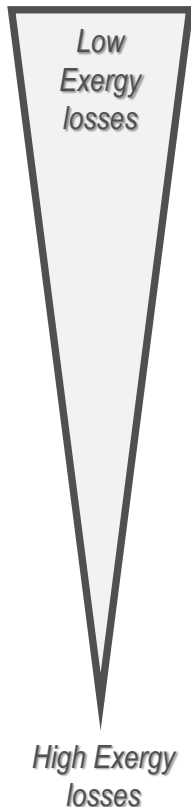
Ziel einer Exergieoptimierung  
Exergieverluste so gering wie möglich zu halten. Dies führt zu einer Maximierung der Primärenergieeffizienz.

# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

## 0. Verringerung irreversibler Exergieverluste durch kaskadische Energienutzung

- Hoher Exergiebedarf: hochexergetische Energieträger
- Niedriger Exergiebedarf: niederexergetische Energieträger

## Zukunft: exergiegemäße Nutzung negativer Residuallasten erneuerbarer Erzeugung



### 1. Nutzung von Stromüberschüssen für direkte elektrische Lasten und Wärmepumpen

- Elektrisch betriebene Fahrzeuge als exergieeffiziente Flexibilitätsoption.
- Geringer Exergiebedarf um Abwärmen od. Umgebungswärme auf jeweils benötigtes Temperaturniveau zu heben

### 2. Wasserstoffproduktion über Elektrolyse

- Direkte Einspeisung ins Wasserstoffnetz
- Nutzung direkt z.B. in Industrieprozessen

### 3. Bei Limitierung: Methanisierung

- Challenge: woher kommt das CO<sub>2</sub>
- Ansatz: Industrieprozesse liefern Abgasströme mit hohem CO<sub>2</sub>-Partialdruck

### 4. Direkte Power-to-Heat Anwendungen

# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

Einführung

Exergieeffizienz

HyFlow

Zusammenfassung

**Ziel:** exergieoptimierter Einsatz bestehender Kraftwerke sowie optimierte Verwendung Erneuerbarer

- Wärme- und Stromerzeugungseinheiten, Verbraucher, Transformatoren, Speicher, Netzwerkelemente:

- Umwandlungseffizienzen

$$P_o(t) = P_i(t) \eta_{io}$$

- Kapazitäten

$$P_{min}, P_{max}$$

- Randbedingungen

$$P(t) > P_{min}, P(t) < P_{max}$$

$$expr = \sum_{i,o,t} (P(i,t) \cdot \varepsilon \cdot \tau - P(o,t) \cdot \varepsilon \cdot \tau) = \min$$

$\forall i \in \text{INPUTS}$

$\forall o \in \text{OUTPUTS}$

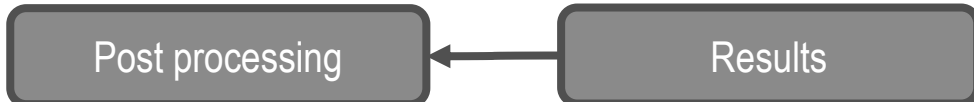
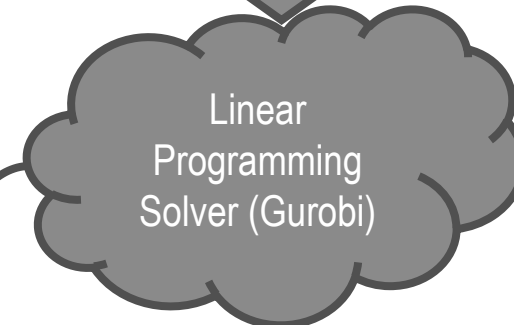
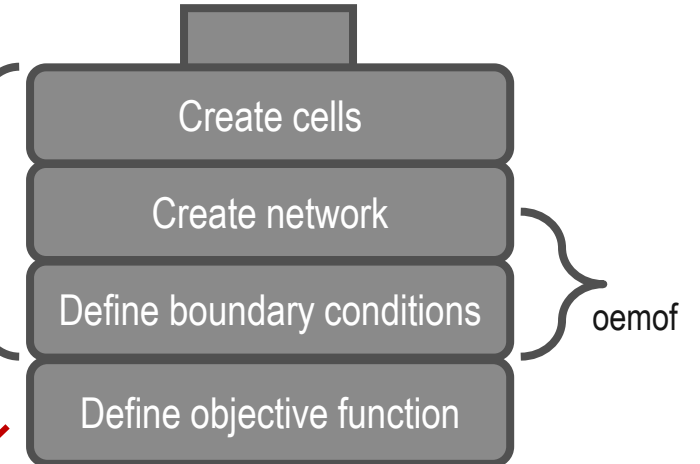
$\forall t \in \text{TIMESTEPS}$

P power

$\varepsilon$  exergetic cost = exergy demand per unit energy

$\tau$  timestep

Energy system description



# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

Einführung

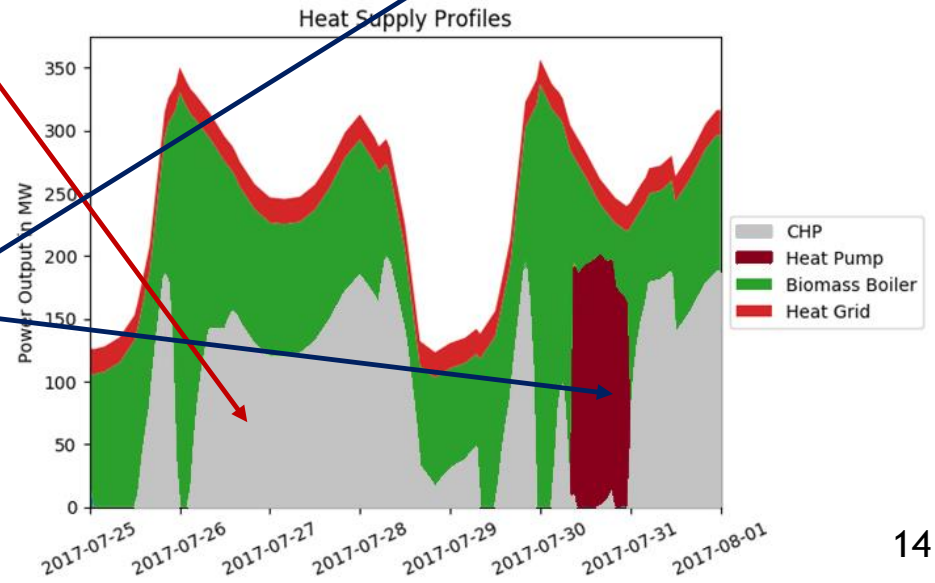
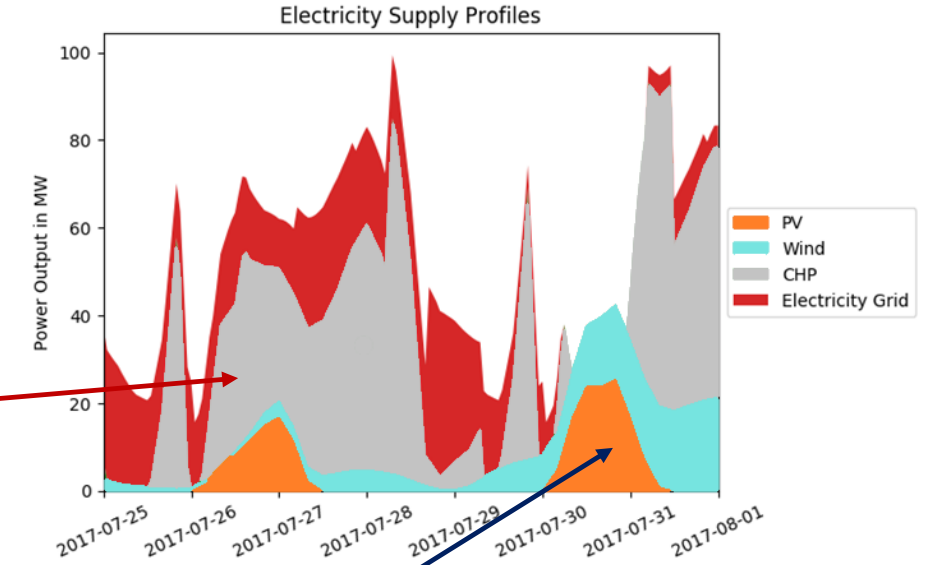
Exergieeffizienz

HyFlow

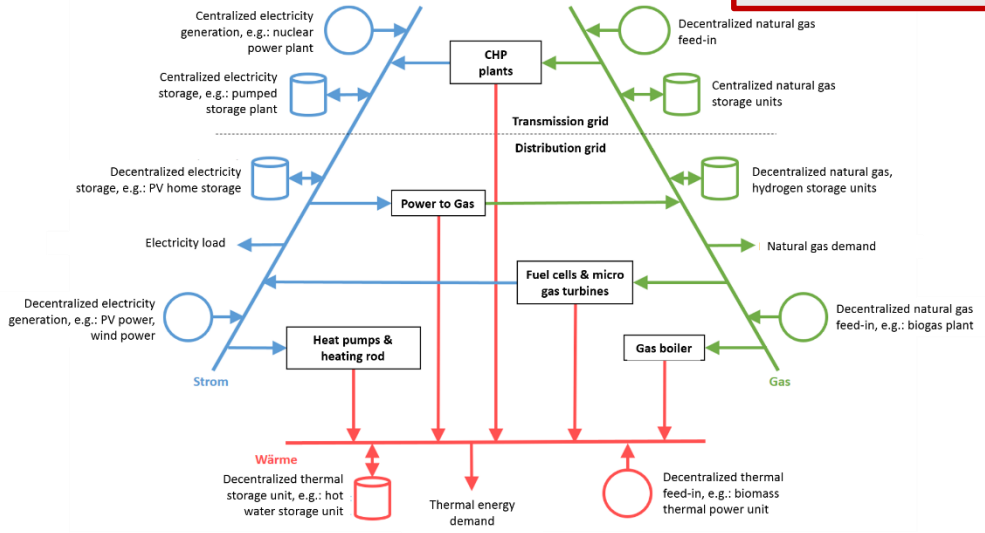
Zusammenfassung

**Ziel:** exergieoptimierter Einsatz bestehender Kraftwerke sowie optimierte Verwendung Erneuerbarer

*Hoher Strom- und Wärmebedarf, geringe Erneuerbare Einspeisung  
Verwendung vom KWK anstatt getrennter Erzeugung von Strom und Wärme*



*Starke Erneuerbare Einspeisung, hoher Wärmebedarf  
Wärmepumpen anstatt KWK-Einsatz, restliche Wärmeaufbringung: Biomasse*



# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

## Case-Study:

- Österreichische Mittelstadt
- Strom-, Gas- und Wärmenetz
- 2 Szenarien

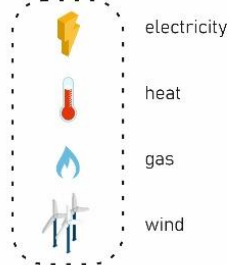
### Base-case

- Strom vom Netz und einer KWK-Anlage
- keine lokalen Erneuerbaren
- Wärme aus der KWK, aus Abwärme, aus Gas- und Biomassekesseln

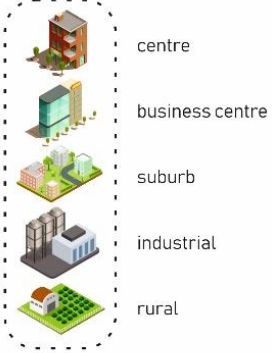
### Renewables (RES) -case

- Strom vom Netz, KWK, großer Anteil lokaler Erneuerbarer (Wind und PV)
- Wärme aus der KWK, Abwärme, Biomasse und Wärmepumpen

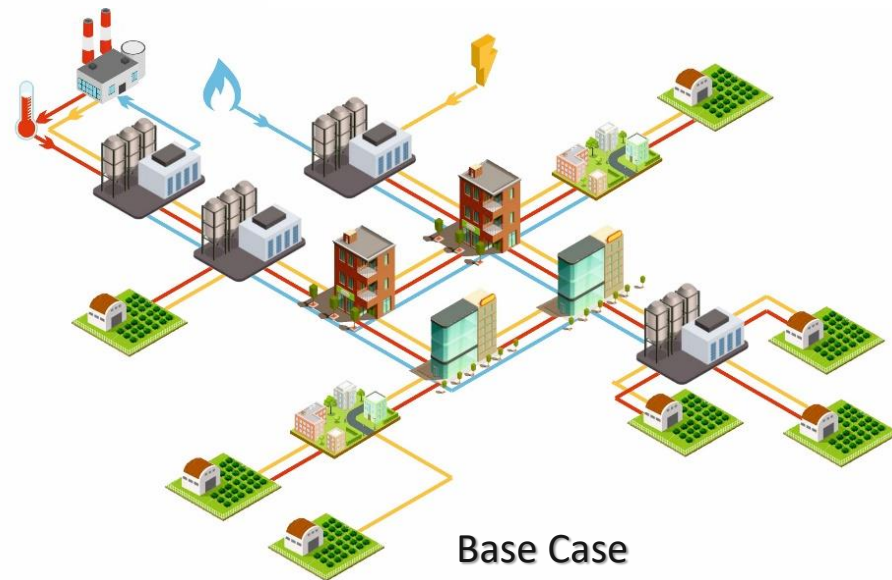
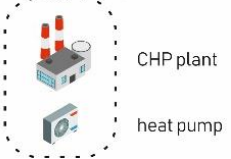
#### RESOURCES



#### CELLS



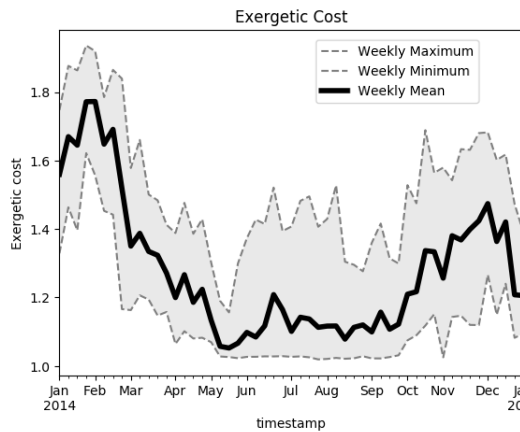
#### TRANSFORMERS



# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

## Inputs und Randbedingungen

Exergetische Kosten des Netzstrombezugs  
in Abh. der exerg. Effizienz der Stromerzeugung



RES Potentiale in GWh	
PV	211.5
Wind	104.6

Bedarf in GWh	
Strom	220.5
Wärme	361.5
Gas	37.0

**15-Minuten  
Zeitauflösung**

Randbedingungen	
Max. Leistung Abwärme	23 MW
Max. übertragene Leistung Strom, Gas, Wärme	Unbeschränkt
Max. Leistung Übertragungseinrichtungen	Unbeschränkt

Energieumwandlungseinheiten, Umwandlungswirkungsgrade	
KWK	$\eta_{el} = 0.35,$ $\eta_{th} = 0.5$
Wärmepumpe	$COP = 4$
Biomasskessel	$\eta_{th} = 0.8$
Gaskessel	$\eta_{th} = 0.95$

Netz: Übertragungseffizienz	
Wärme	$\eta_{th} = 0.9$
Gas	$\eta_g = 0.99$
Strom	$\eta_{el} = 0.99$

Exergetrische Kosten: Endenergieanwendung	
Strom zur Anwendung	1
Strom ins Netz	1
Gas zur Anwendung	1
Wärme zur Anwendung	0.228

Exergetische Kosten: Inputs	
Strom aus dem Netz	f(T)
Strom aus RES	1
Gas aus dem Netz	1.1
Abwärme	0.25
Umgebungswärme	0.0



# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

## Resultate:

	Base case	RES-case
	in GWh	in GWh
Strom aus dem Netz	212.9	44.9
Strom ins Netz	-	(- 197.7)
RES (Wind & PV)	-	316.2
Gasbezug	256.6	304.3
Abwärme	153.1	153.1
Biomasse	44.2	-
Primärenergieeinsatz	666.8	620.8
Umgebungswärme	-	100.0

Um mehr als 75 % reduziert

Vergrößert, aber Gas durch KWK effizienter genutzt

Ca. 50 GWh geringerer Primärenergiebezug

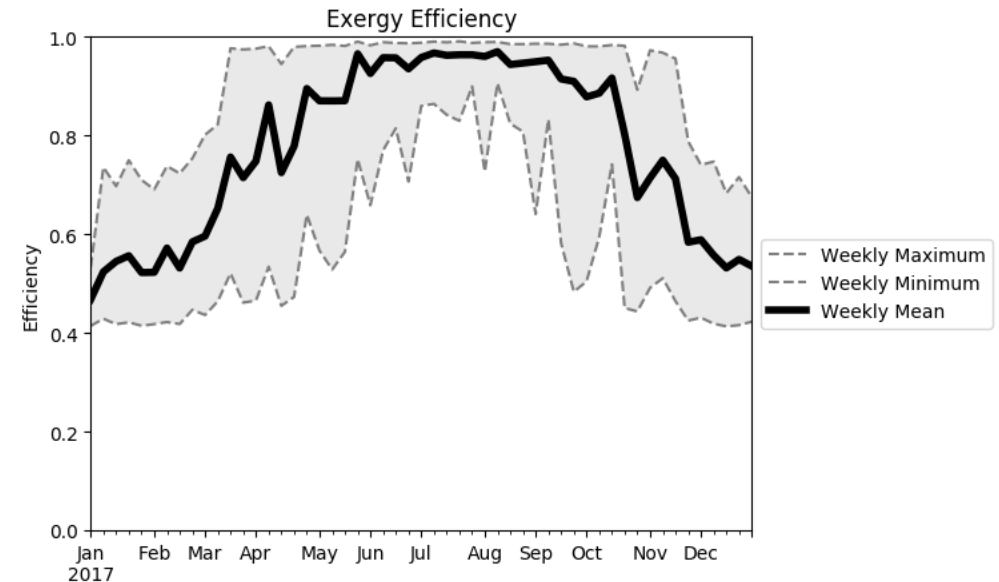
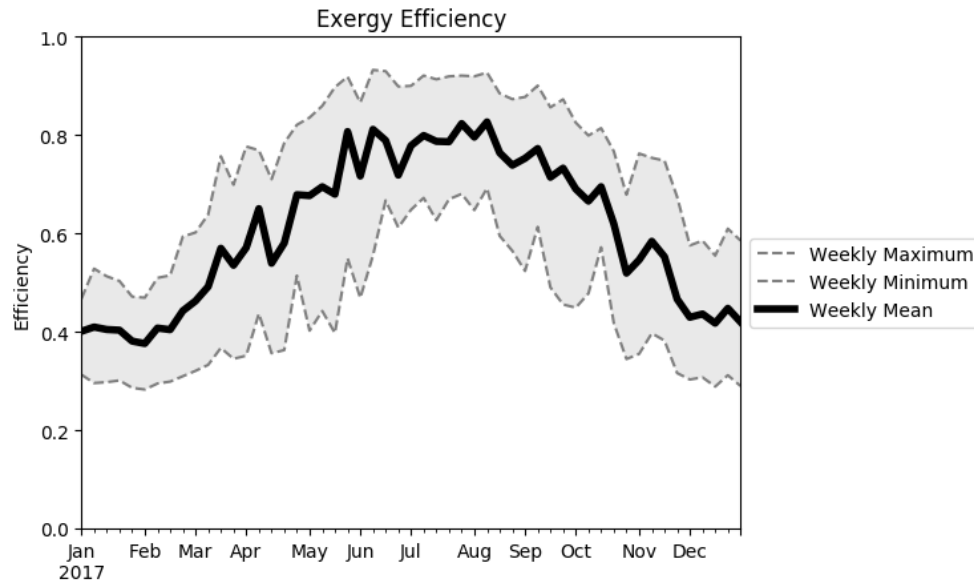
	Base case	RES-case
Exergiebedarf in GWh	340.0	340.0
Exergieeinsatz in GWh	638.5	547.7 (+197.7 to the grid)
Exergieverluste in GWh	298.5	207.8
Exergieeffizienz in -	0.53	0.62

$$\eta_{Ex} = \int_1^2 \frac{E_{demand}}{E_{input}} dt$$

→ Exergieeffizienz und –verluste zeigen zeitliche Schwankungen

# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

## Resultate: Exergieeffizienz (links: Base case)



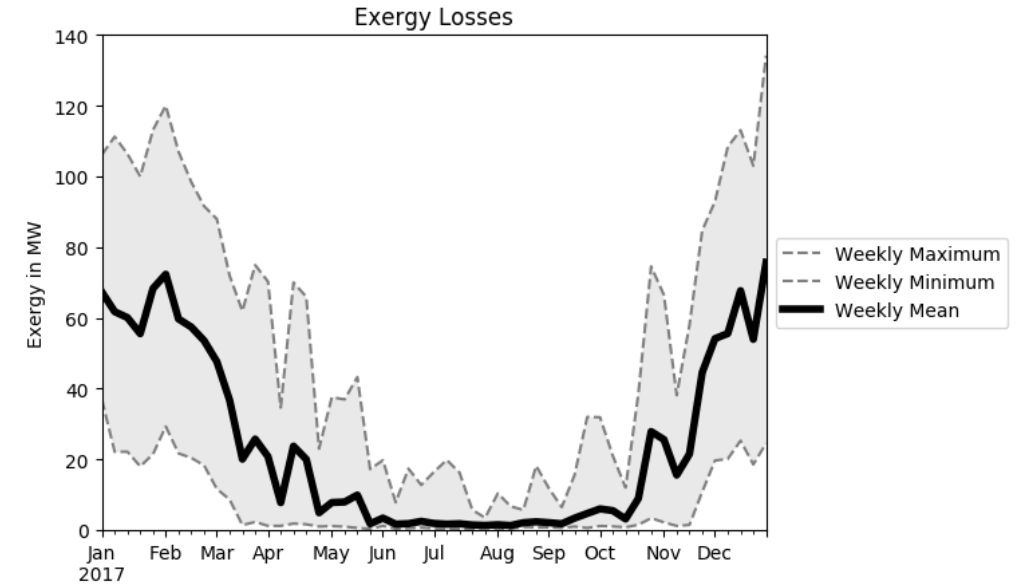
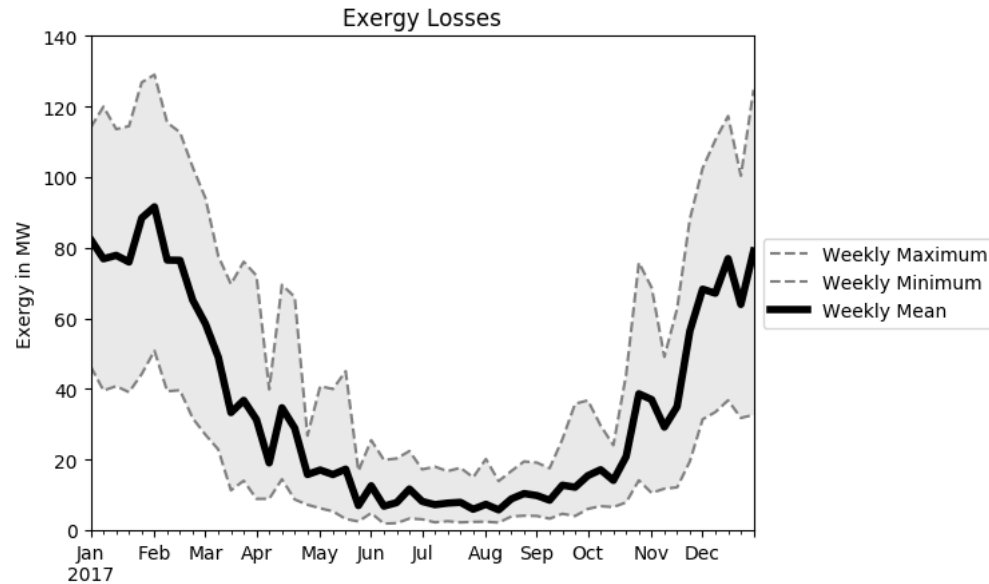
	Base case	RES-case
Exergiebedarf in GWh	340.0	340.0
Exergieeinsatz in GWh	638.5	547.7 (+197.7 to the grid)
Exergieverluste in GWh	298.5	207.8
Exergieeffizienz in -	0.53	0.62

$$\eta_{Ex} = \int_1^2 \frac{E_{demand}}{E_{input}} dt$$

→ Exergieeffizienz und –verluste zeigen zeitliche Schwankungen

# Exergie-Optimierung in hybriden Energiesystemen

## Resultate: Exergieverluste (links: Base case)



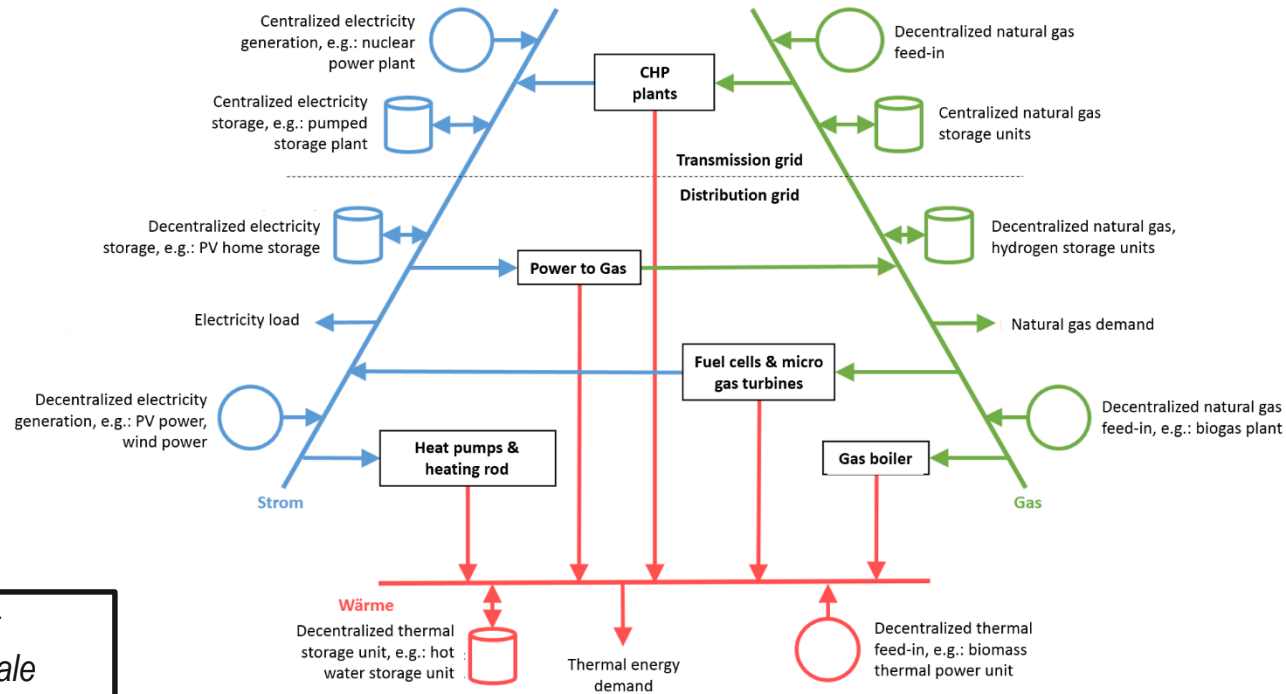
	Base case	RES-case
Exergiebedarf in GWh	340.0	340.0
Exergieinsatz in GWh	638.5	547.7 (+197.7 to the grid)
Exergieverluste in GWh	298.5	207.8
Exergieeffizienz in -	0.53	0.62

Exergieverluste im Vergleich zum Base-case um ca. 30% reduziert.

$$\eta_{Ex} = \int_1^2 \frac{E_{demand}}{E_{input}} dt$$

→ Exergieeffizienz und -verluste zeigen zeitliche Schwankungen

# Hybride Energiesysteme koppeln energiewirtschaftliche Sektoren über netzgebundene Energieträger



erlaubt  
saisonale  
Energie-  
speicher

...und hohe  
Primärenergieeffizienz  
durch die Verringerung  
von Exergieverlusten

## Fazit:

hybrider Betrieb des Energiesystems beeinflusst die Lastflüsse alle netzgebundenen Energieträger maßgeblich.

- Optimierter Betrieb benötigt genaue Kenntnis der aktuellen Lastflüsse, bzw. sich ggf. einstellender Engpässe
- State-of-the-art Programme zur Lastflussberechnung sind derzeit allerdings auf einen Energieträger beschränkt

## Notwendiges Werkzeug:

- Tool zur Lastflussberechnung ALLER netzgebundenen Energieträger
- Kopplungsmöglichkeit zwischen den Energieträgern
- Einbindung Flexibilitätsoptionen

Forschungsansatz: Entwicklung  
des Modelingframework:  
HyFlow

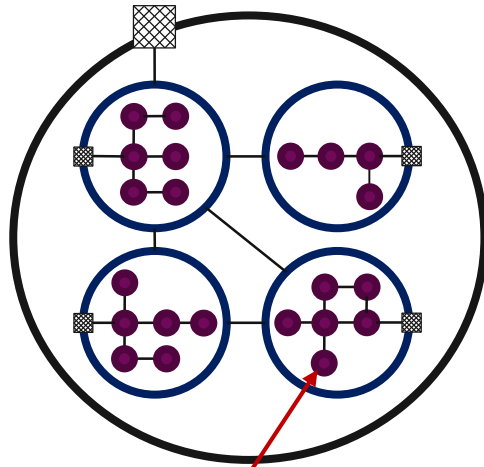
# HyFlow Hierarchischer Aufbau




Einführung

Exergieeffizienz

HyFlow

Zusammenfassung

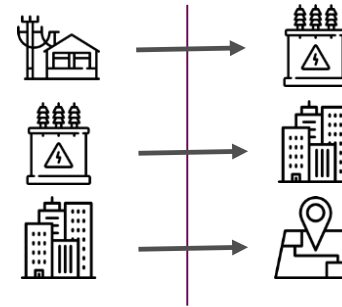


-  Slack-Knoten
-  Leitung
-  Ebene 1 Zelle
-  Ebene 2 Zelle
-  Gesamtsystem

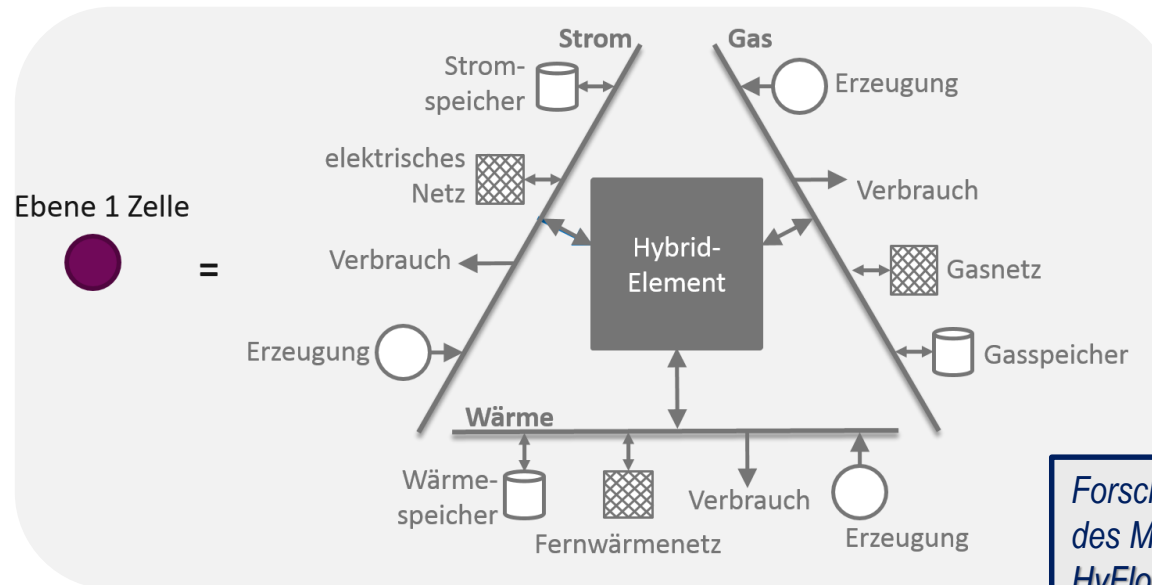
## Beispiele:

Ebene 1

Ebene 2



Abgespeicherte Inhalte  
für jede Ebene 1 Zelle



Forschungsansatz: Entwicklung  
des Modelingframework:  
HyFlow

# HyFlow Modellierung der Energienetze

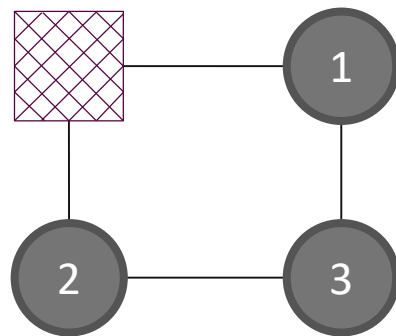
Einführung

Exergieeffizienz

HyFlow

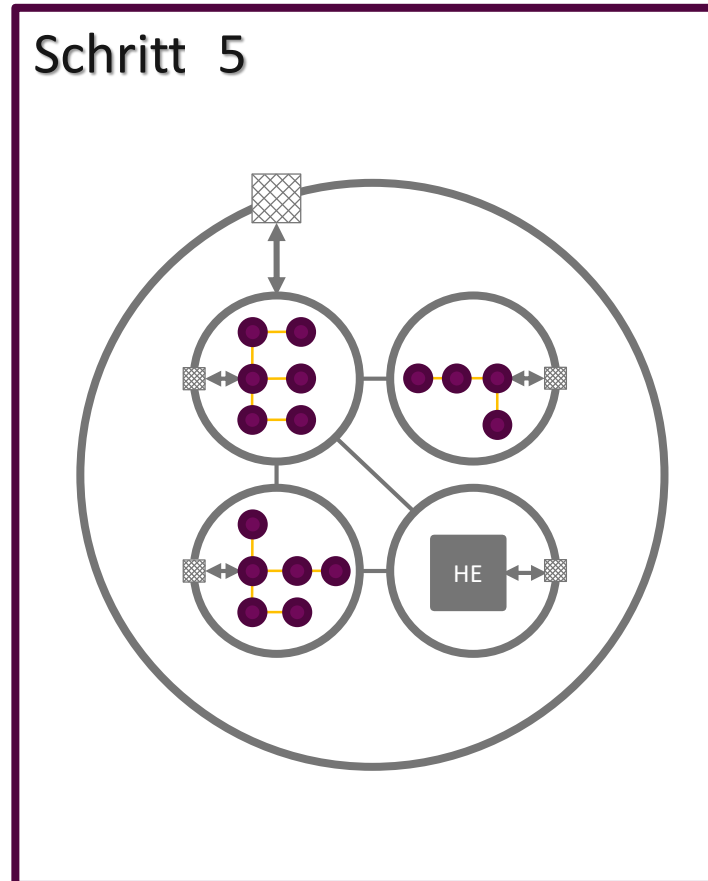
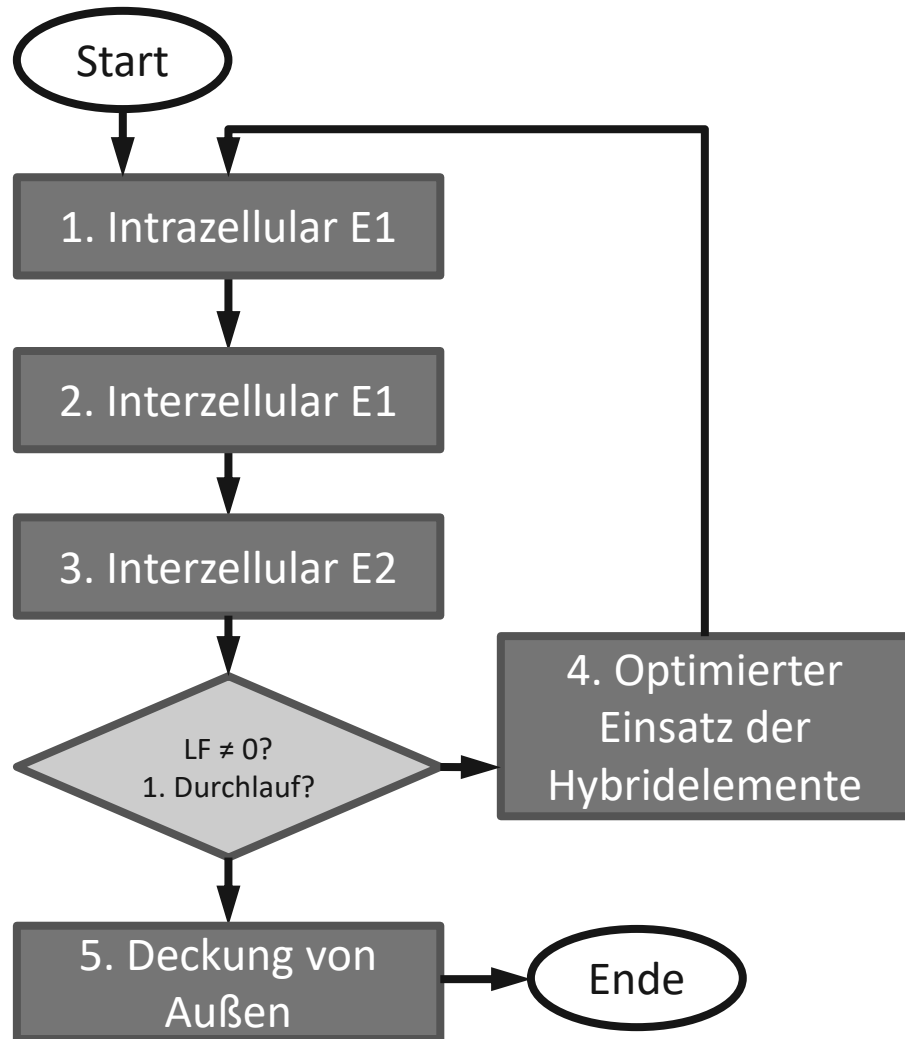
Zusammenfassung

	Inputmatrizen	Lastflussberechnung
Stromnetz	Länge <sub>xy</sub> , Eingangsspannung am Slackknoten, spez. Widerstand	DC-Lastflussrechnung
Wärmenetz	Länge <sub>xy</sub> , Durchmesser, Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeübergang, Temperaturen, Druck am Slackknoten	Potentialknotenverfahren
Gasnetz	Länge <sub>xy</sub> , Durchmesser, Rauigkeit, Druck am Slackknoten	Potentialknotenverfahren



$$V = \begin{matrix} & \mathbf{S} & \mathbf{1} & \mathbf{2} & \mathbf{3} \\ \mathbf{S} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

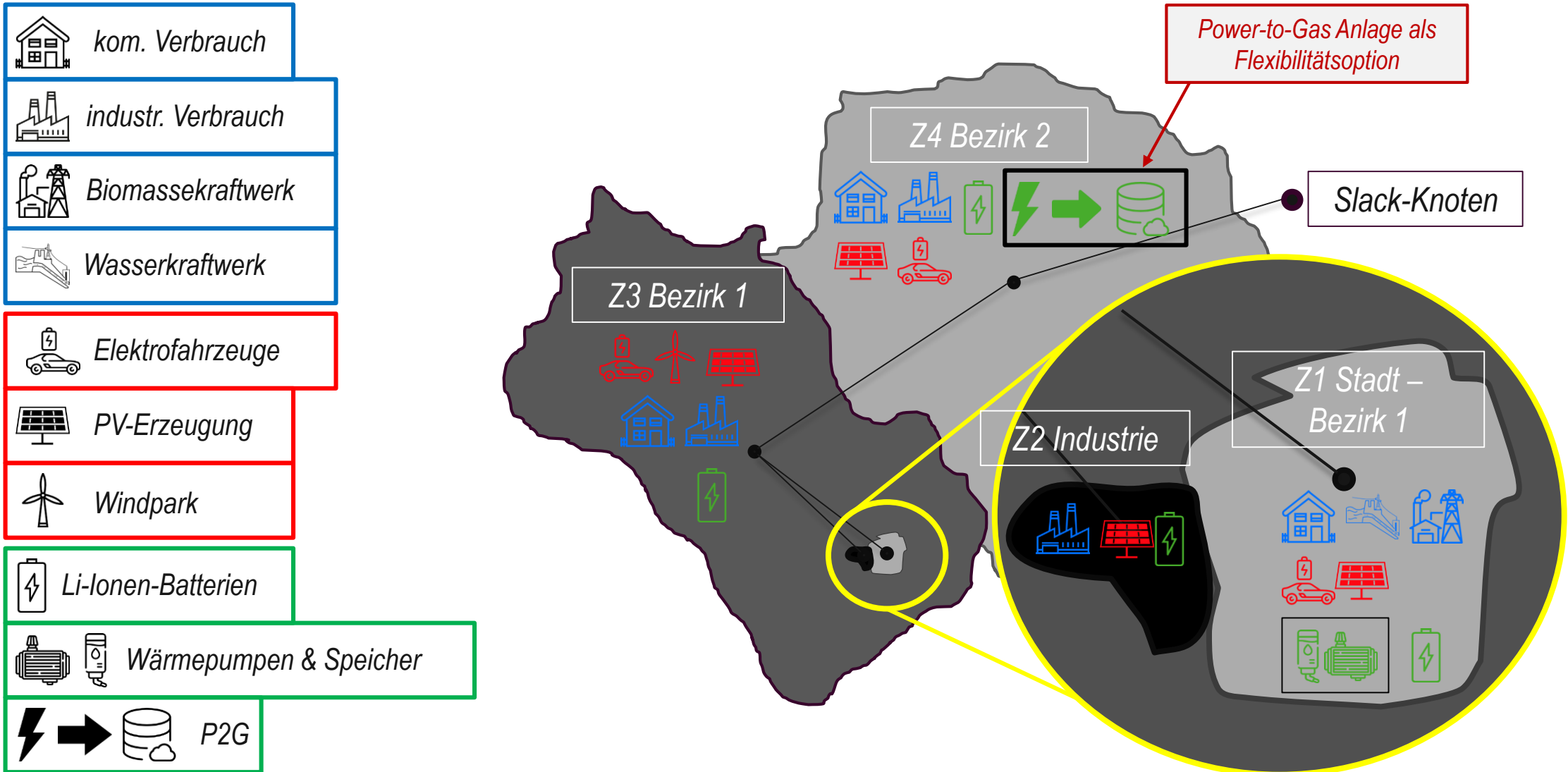
# HyFlow Berechnungsablauf



## Output

- Lastfluss über Systemgrenze
- Speicherstände
- hybride Konversion
- Leitungsbelastungen
- Spannungs-/Druckverläufe in den Leitungen
- Autarkiegrade
- Verluste
  - Transportverluste
  - Speicherverluste

# HyFlow Demoanwendung: Netzdienlicher Einsatz einer PtG-Anlage





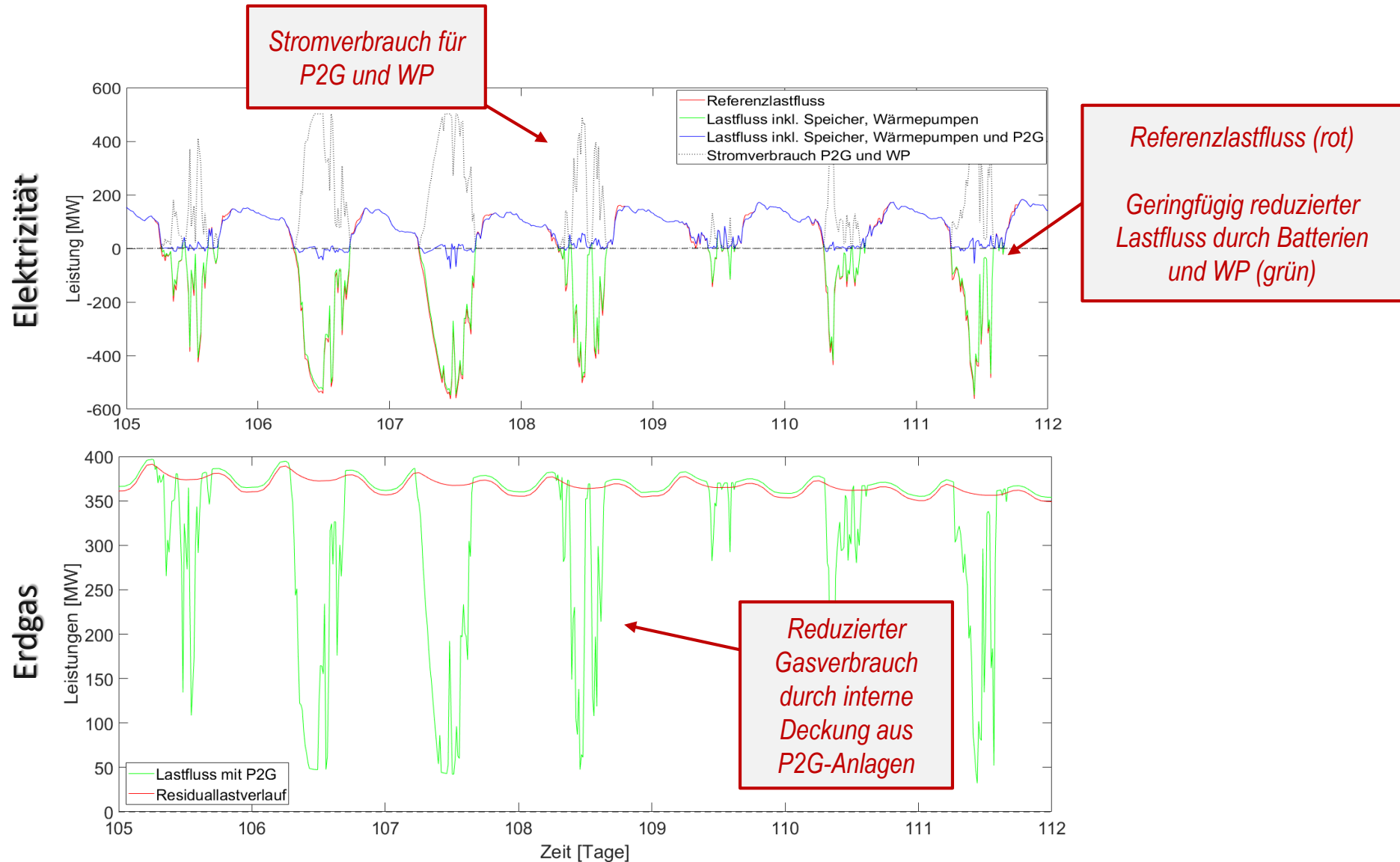
# HyFlow Demoanwendung: Netzdienlicher Einsatz einer PtG-Anlage

Einführung

Exergieeffizienz

HyFlow

Zusammenfassung



## ...Zusammenfassung:

- Zukünftige Energiesysteme mit hohen Anteilen volatiler Erneuerbarer müssen flexibel und effizient sein.
- Mittels Exergieoptimierung kann gezeigt werden, wie Erneuerbare möglichst primärenergieeffizient genutzt werden.
- Zur Berücksichtigung von netzseitigen Engpässen: energieträgerübergreifende Lastflussberechnungen

## ... und Ausblick

- Weiterentwicklung unserer Tool zur Modellierung, Simulation und Optimierung hybrider Energiesysteme
- HyFlow: AC-Lastfluss, Implementierung unterschiedlicher Optimierungsstrategien, Usability...

**DANKE FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!**