

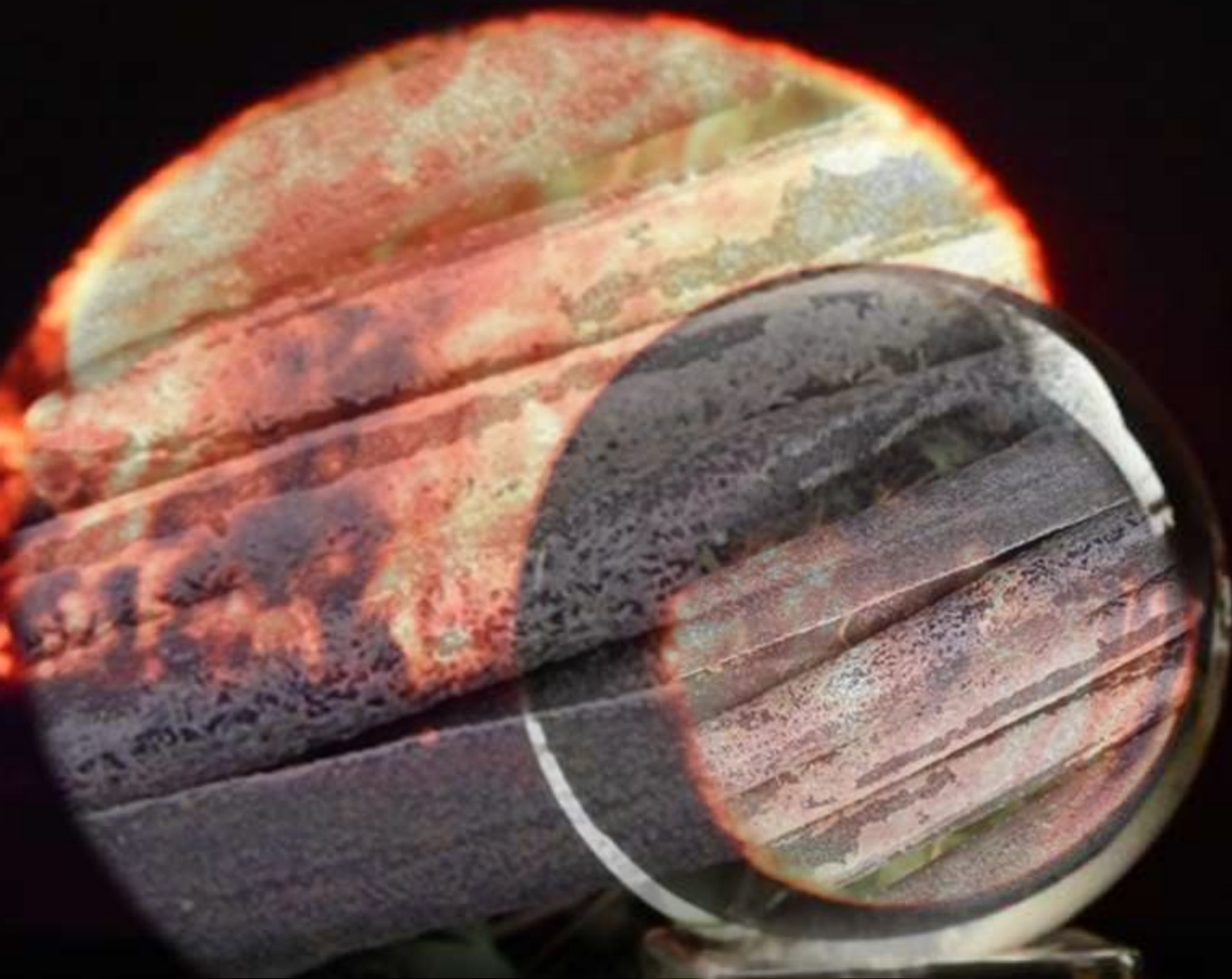


Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Woche der Wärmepumpe, Kommunalen Klima-Brunch  
Erlangen, Redoutensaal, 05. November 2024

# Stromnetze bald am Limit?

Jürgen Karl  
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



# 1. Die Energiewende im Wärmesektor

- Sektorenkopplung im Wärmesektor
- Warum Wasserstoff keine Alternative ist

# 2. Wird's künftig genug Strom für den Wärmesektor geben?

- Der aktuelle Netzentwicklungsplan (NEP) der Übertragungsnetzbetreiber
- Die Wärmeversorgung in der Dunkelflaute

# 3. Ein bisschen Theorie:

- Wirkungsgrade von Wärmepumpen
- Warum die richtigen Wärmequellen ne Menge Strom sparen

# 4. Speicherlösungen für die Sektorenkopplung

- Optimal immer im Team: Wärmepumpen + Wärmespeicher
- Still the „hidden champion“: die Carnot-Batterien

Wärmewende

Gibt's genug Strom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit



Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

# 1. Die Energiewende im Wärmesektor

- Sektorenkopplung im Wärmesektor
- Warum Wasserstoff keine Alternative ist



# Die Situation am deutschen Wärmemarkt

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

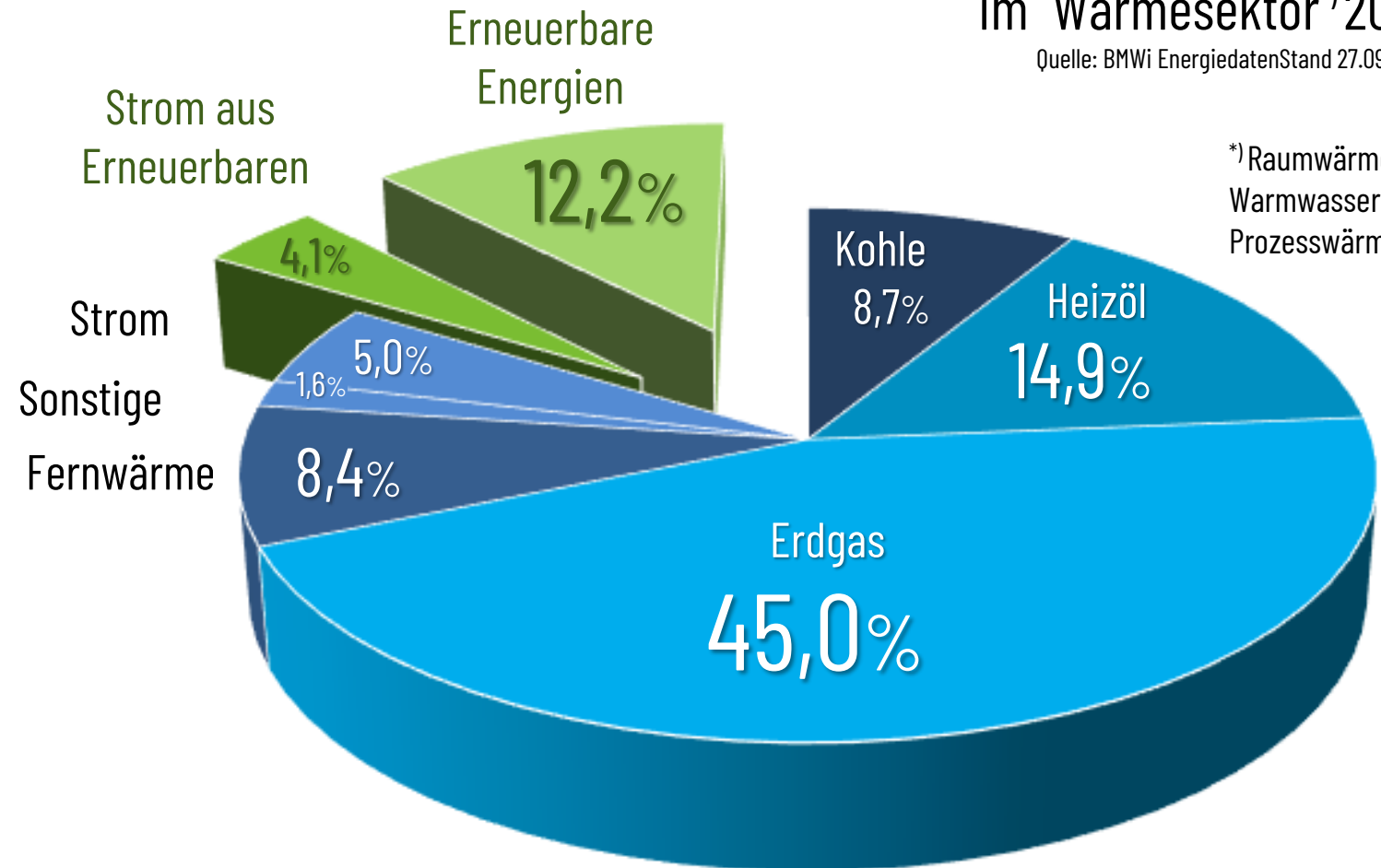
Fazit

- Die Wärmeversorgung hängt zu  $\frac{3}{4}$  von fossilem Erdgas und Heizöl ab
- Bislang ist der Anteil Erneuerbarer Energien im Wärmesektor noch viel zu gering

## Endenergiebedarf im Wärmesektor<sup>\*)</sup> 2019

Quelle: BMWi EnergiedatenStand 27.09.2021

<sup>\*)</sup> Raumwärme,  
Warmwasser und  
Prozesswärme



# Energiewende im Wärme und Mobilitätssektor

Endenergieverbrauch der  
Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2019

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

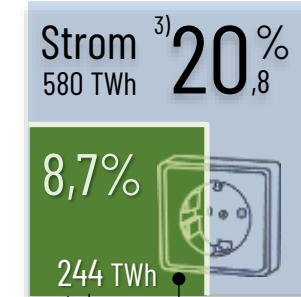
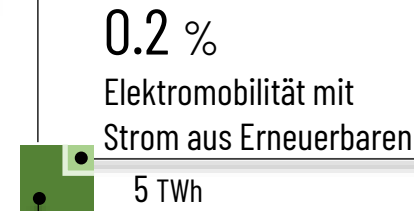
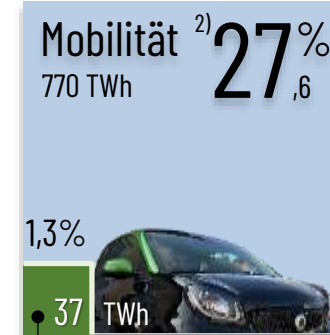
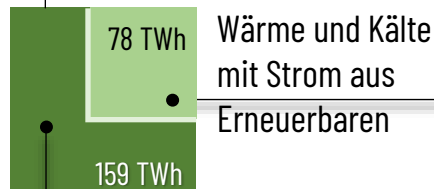
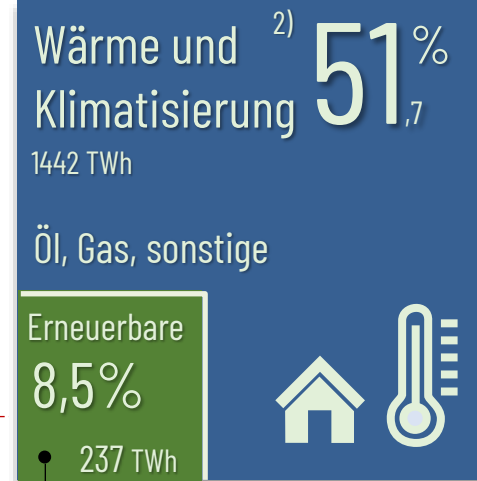
Fazit

- die **Sektoren-Kopplung** bringt Erneuerbare Energien auch in die Mobilität und den Wärmesektor

... und Wasserstoff ist keine Alternative!

BRUT  
H<sub>2</sub>  
HYDROGEN

davon ca. **13 %**  
bzw. 185 TWh  
aus Strom <sup>4)</sup>



davon ca. **25 %**  
bzw. 147 TWh für Wärme- und Kälteerzeugung <sup>4)</sup>

**8.7 %**  
Strom aus Erneuerbaren<sup>1)</sup>  
244 TWh

**1.1 %** Biotreibstoffe  
32 TWh

**5.7 %** Biomasse, Solarthermie, Geothermie und Umweltwärme  
159 TWh

<sup>1)</sup> entspricht **42.1%** des dt. Bruttostromverbrauchs

<sup>2)</sup> incl. Wärme/Kälte/Mobilität aus Strom

<sup>3)</sup> Bruttostromverbrauch

<sup>4)</sup> Annahme: COP = 3 für Wärmepumpen und Kälte

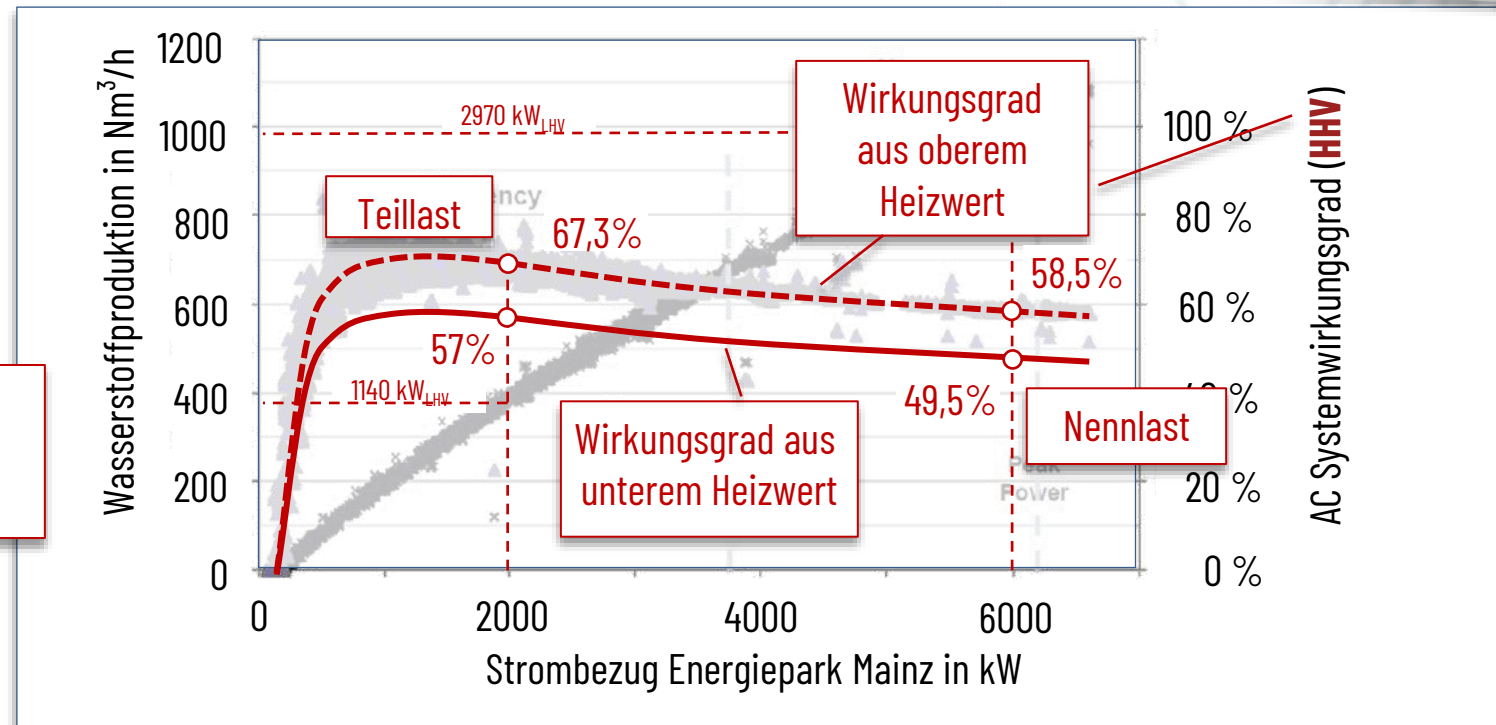
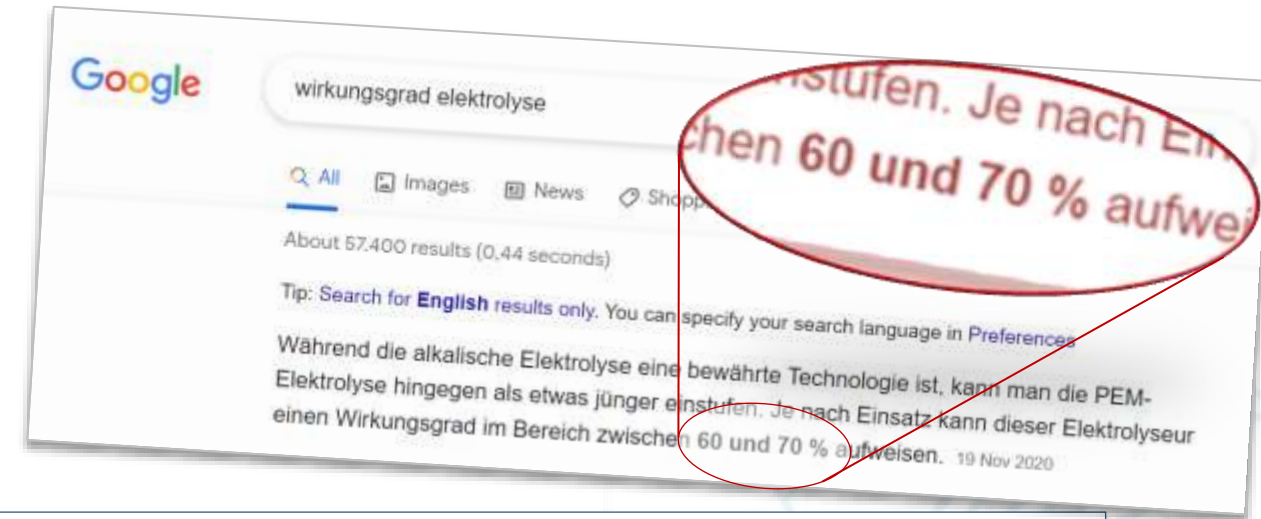
# Problem Wasserstoff: Wirkungsgrade der Elektrolyse

- Wirkungsgrade für Elektrolyseure werden oft zu hoch angegeben <sup>\*,\*\*)</sup>

\*) Wirkungsgrade für Elektrolyseure beziehen sich oft auf den oberen Heizwert, obwohl für die Nutzung des Wasserstoffs der untere Heizwert relevant ist

\*\*) Wirkungsgrade für Elektrolyseure beziehen sich oft auf Teillastbetrieb und vernachlässigen höhere Verluste in Volllast / Nennlast

heute  
Bei der Elektrolyse geht die Hälfte der eingesetzten Energie verloren



# Energiewende im Wärme und Mobilitätssektor

## Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

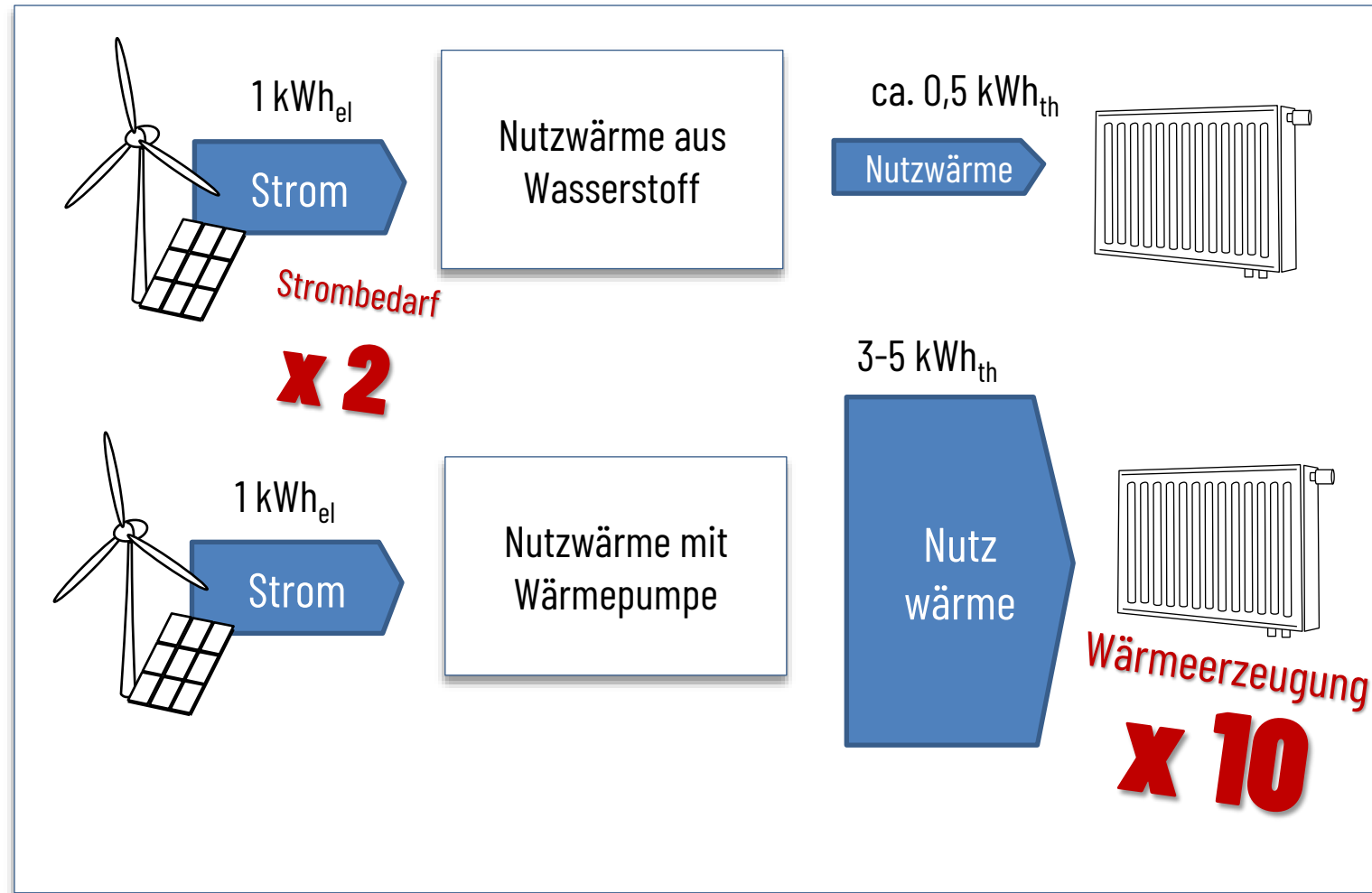
Speicher mit Pumpe

Fazit

- die **Sektoren-Kopplung** bringt Erneuerbare Energien auch in die Mobilität und den Wärmesektor

... und Wasserstoff ist keine Alternative!

BRUT  
H<sub>2</sub>  
HYDROGEN





1.

Die Energiewende ist noch immer nicht im Wärmesektor angekommen

Fazit

Wärmewende

Gibt's genug Strom?

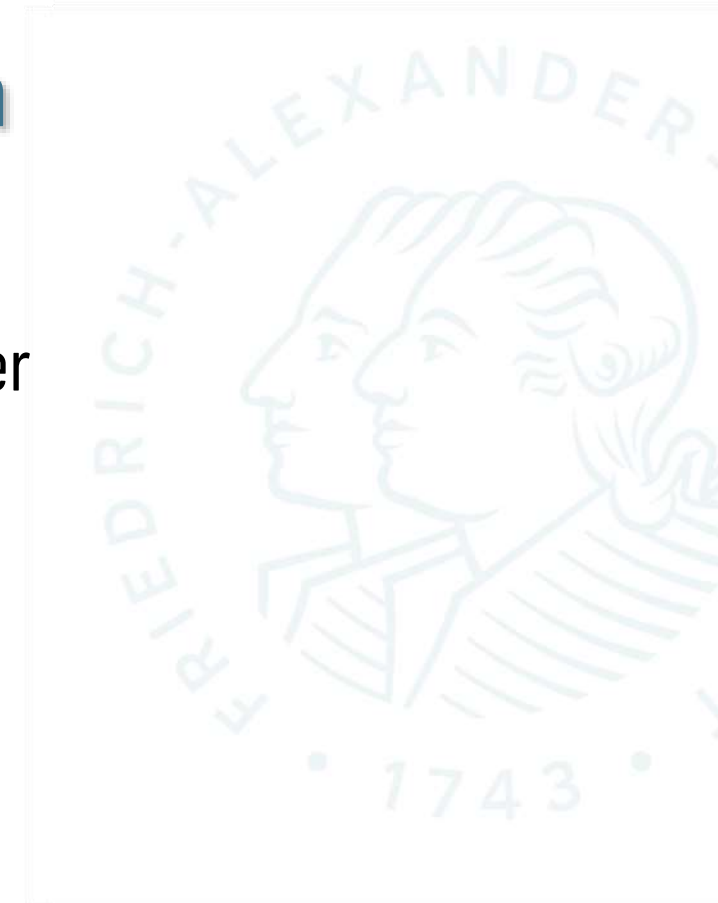
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

## 2. Wird's künftig genug Strom für den Wärmesektor geben?

- Der aktuelle Netzentwicklungsplan (NEP) der Übertragungsnetzbetreiber
- Die Wärmeversorgung in der Dunkelflaute



Wärmewende

Gibt's genug Stom?

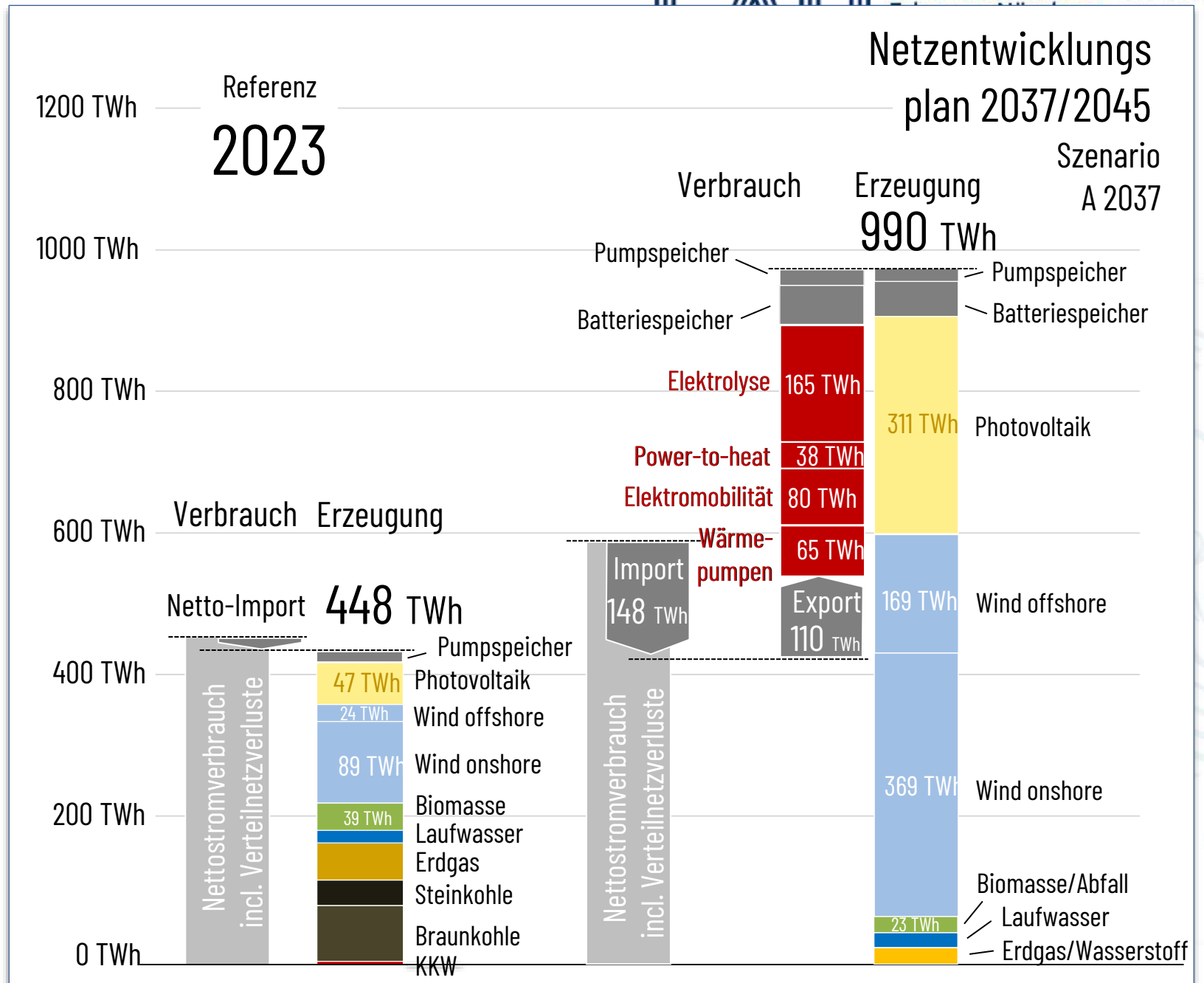
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

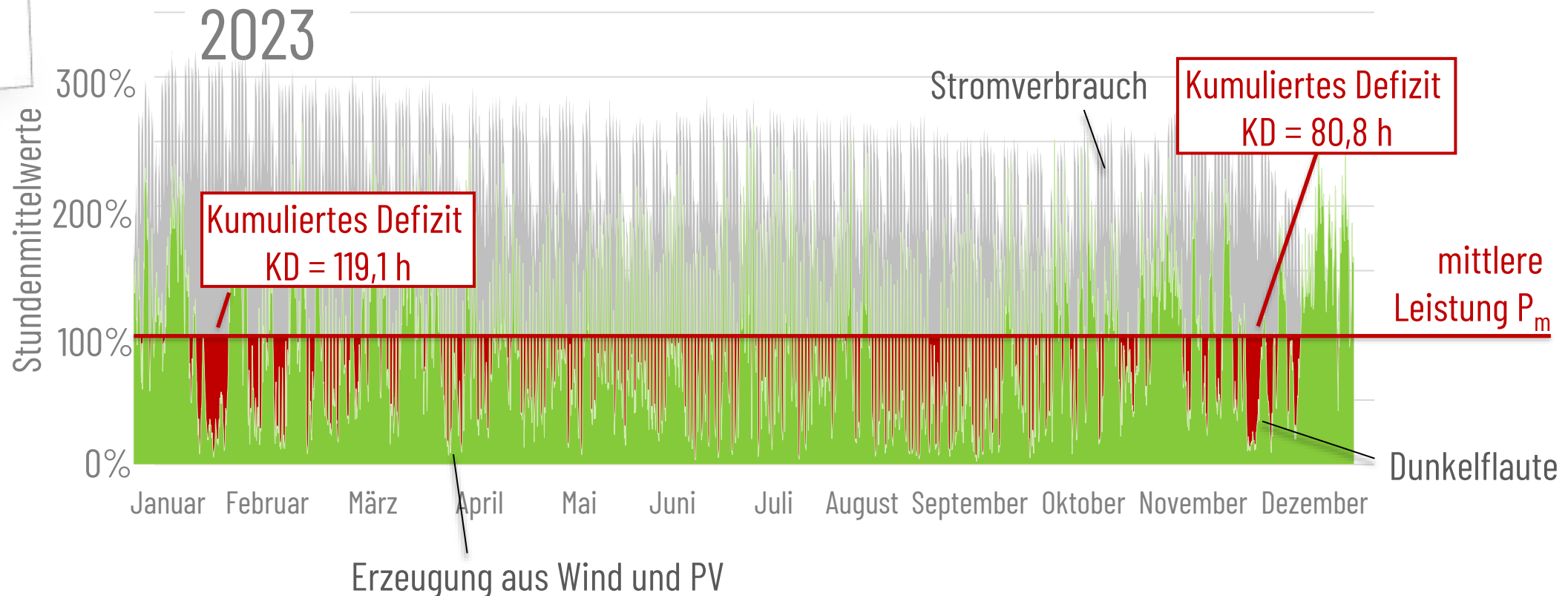
Kernproblem der  
Energiewende:**Der Strombedarf  
wird steigen**

- Durch die Sektorenkopplung (und die Elektrolyse) wird der Strombedarf in Deutschland massiv steigen



# Herausforderung „Dunkelflaute“

- Vor allem im Winter treten regelmäßig längere Perioden mit wenig PV und Winderzeugung auf („Dunkelflauten“)
- Historische Daten zeigen: Dunkelflauten dauern bis 280 Stunden bzw. 160 „Volllaststunden“



Download der Studie



Wärmewende

Gibt's genug Strom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

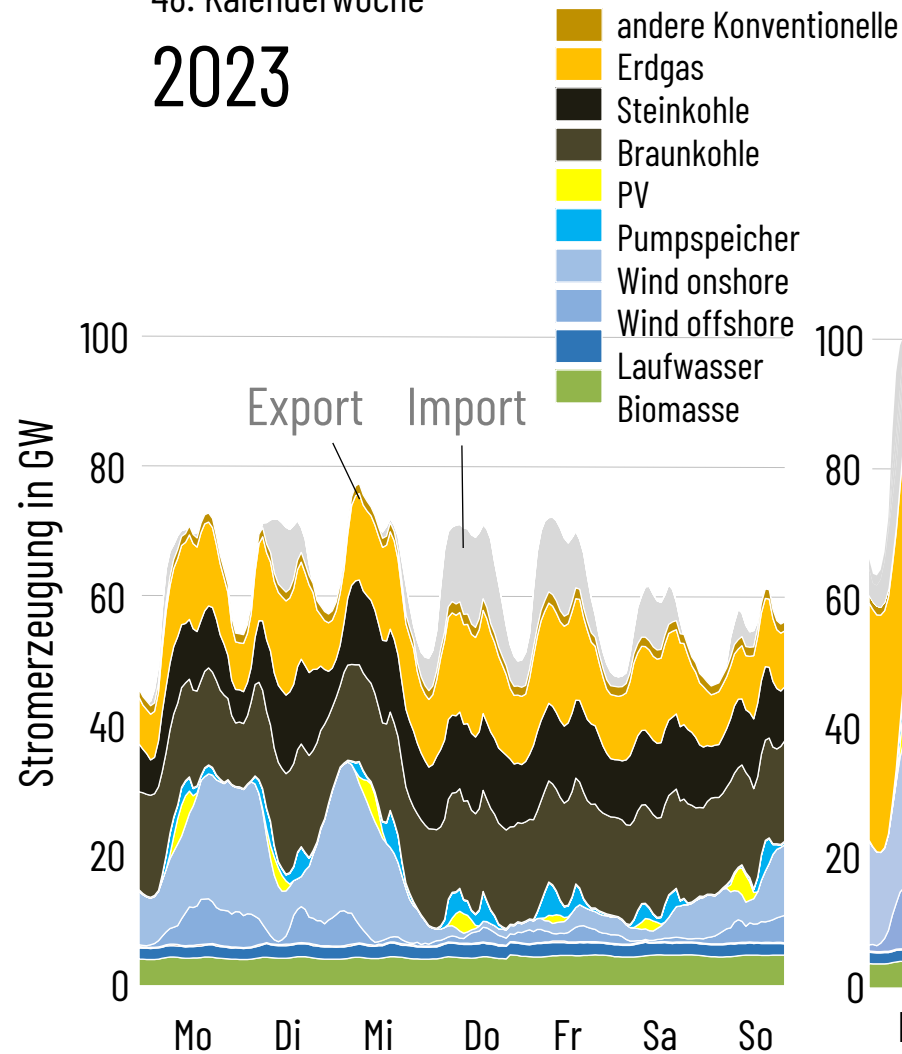
Fazit

Kernproblem der  
Energiewende:

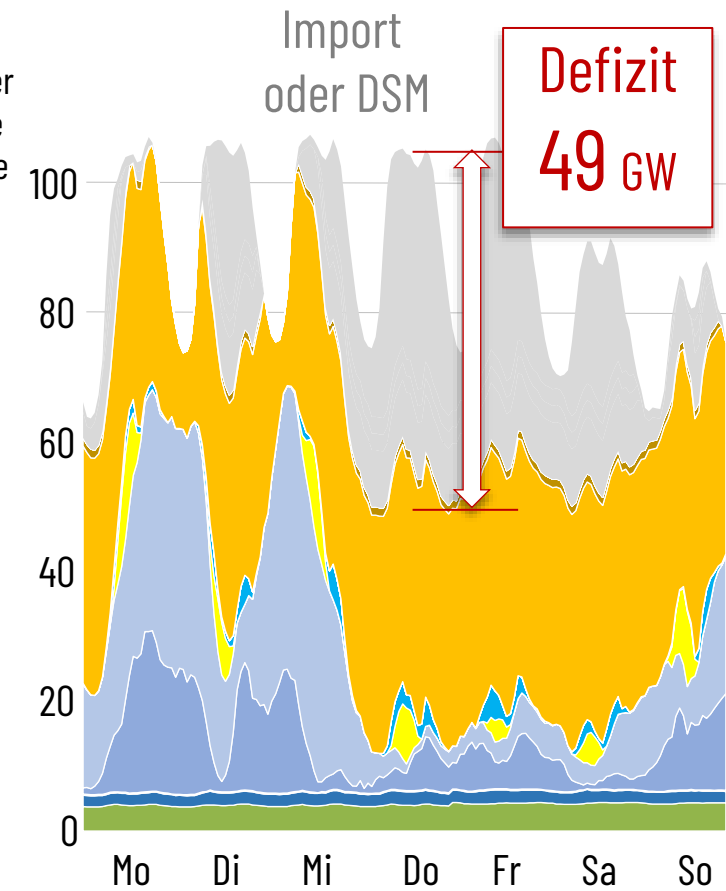
**Der Strombedarf  
wird steigen**

- Durch die Sektorenkopplung (und die Elektrolyse) wird der Strombedarf in Deutschland massiv steigen
- **Kernaufgabe wird es sein, Erneuerbare Energien zu speichern**
- Wärme lässt sich viel einfacher und kostengünstiger speichern als Strom

Dunkelflaute  
48. Kalenderwoche  
**2023**



Projektion der Dunkelflaute  
48. Kalenderwoche  
**2030**



A wide-angle photograph of a winter landscape. In the foreground, a snow-covered road with visible tire tracks leads from the bottom left towards the center. The road is flanked by snow-covered fields and small, bare bushes. In the middle ground, a calm blue lake stretches across the scene. The background features a range of snow-covered mountains under a clear, bright blue sky. The overall scene is peaceful and cold.

1.

Die Energiewende ist noch immer nicht im Wärmesektor angekommen

2.

Die Zukunft des Wärmesektors ist elektrisch und Wärmespeicher entlasten auch den Stromsektor

Fazit

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

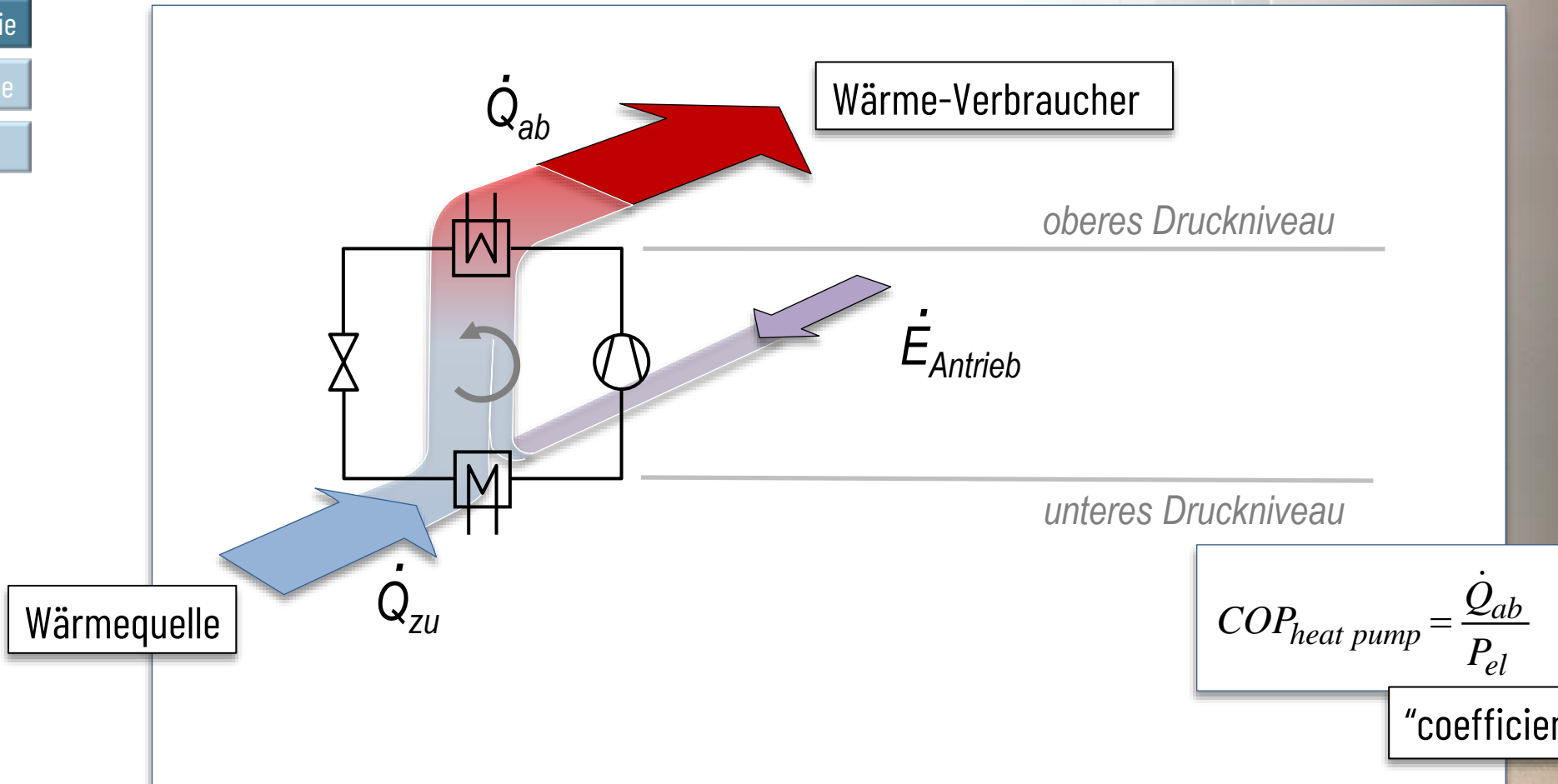
### 3. Ein bisschen Theorie:

- Wirkungsgrade von Wärmepumpen
- Warum die richtigen Wärmequellen ne Menge Strom sparen



# Ein bisschen Theorie

- Eine Wärmepumpe nutzt die Wärme einer Wärmequelle und erhöht deren Temperatur
- Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe (COP) errechnet sich aus dem Strom, der dafür notwendig ist



Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

# Ein bisschen Theorie

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

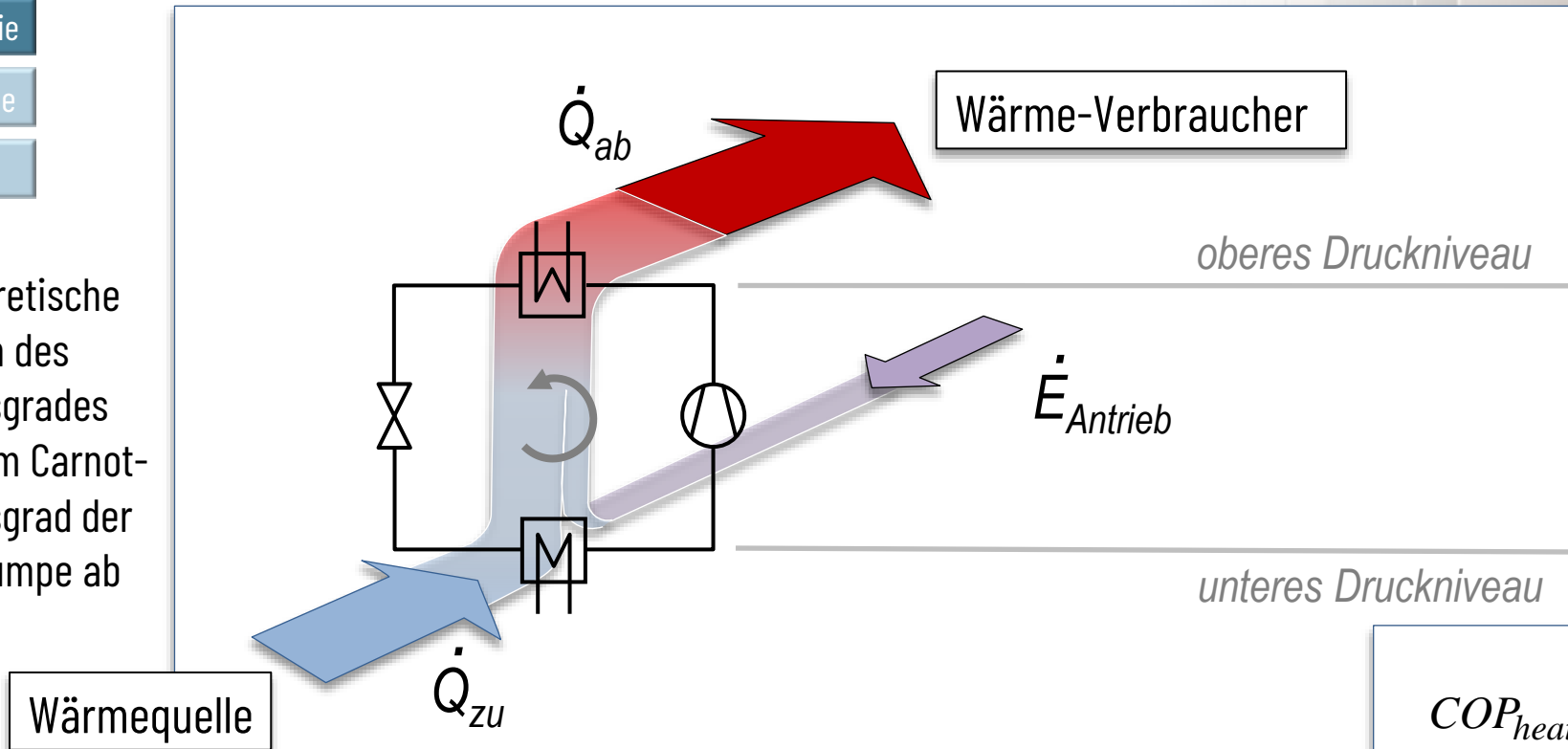
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Das theoretische Maximum des Wirkungsgrades hängt vom Carnot-Wirkungsgrad der Wärmepumpe ab

- Eine Wärmepumpe nutzt die Wärme einer Wärmequelle und erhöht deren Temperatur
- Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe (COP) errechnet sich aus dem Strom, der dafür notwendig ist



$$COP_{heat\ pump} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{el}} = \frac{T_{ab}}{T_{ab} - T_{zu}}$$

"coefficient of performance"

# Ein bisschen Theorie

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

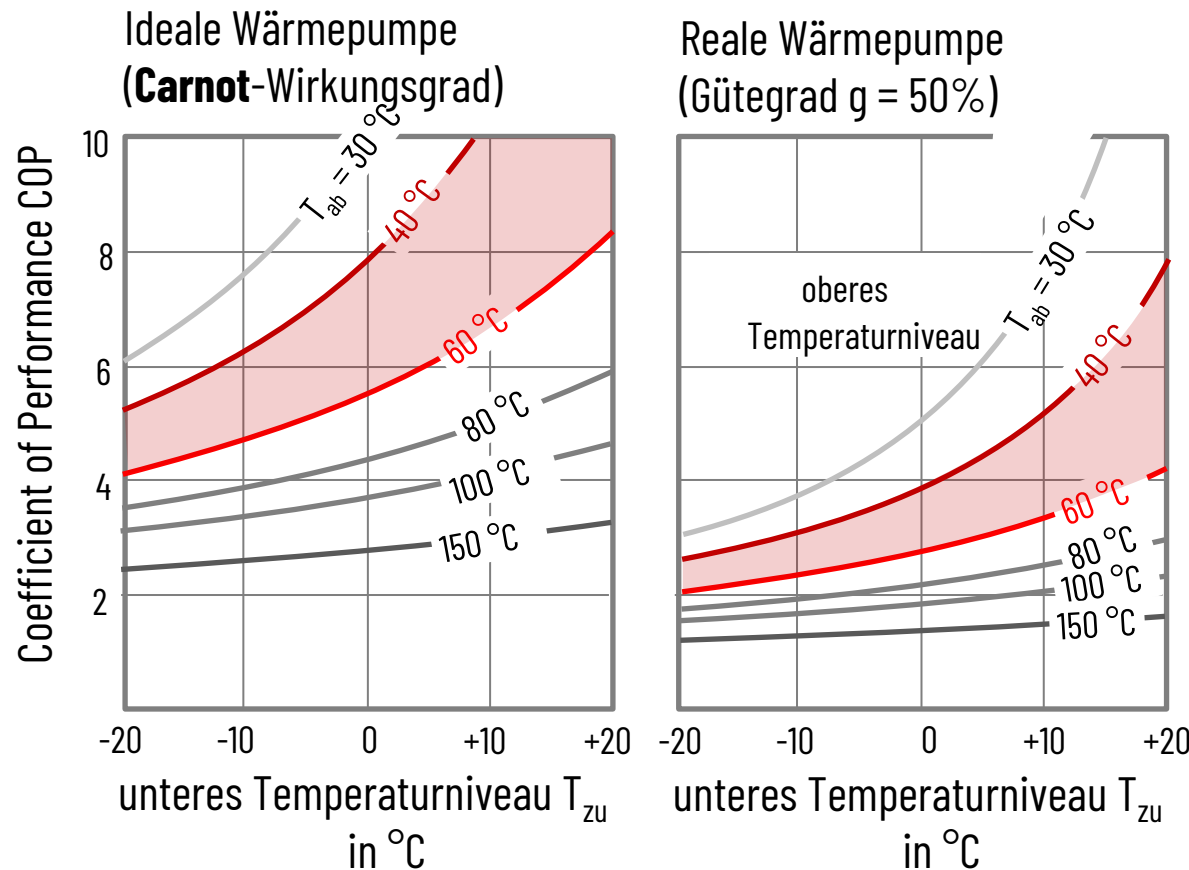
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Das theoretische Maximum des Wirkungsgrades hängt vom Carnot-Wirkungsgrad der Wärmepumpe ab

- Eine Wärmepumpe nutzt die Wärme einer Wärmequelle und erhöht deren Temperatur
- Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe (COP) errechnet sich aus dem Strom, der dafür notwendig ist



$$COP_{heat\ pump} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{el}} = \frac{T_{ab}}{T_{ab} - T_{zu}}$$

"coefficient of performance"

# Fazit zur leidigen Diskussion der **Altbautauglichkeit von Wärmepumpen**

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

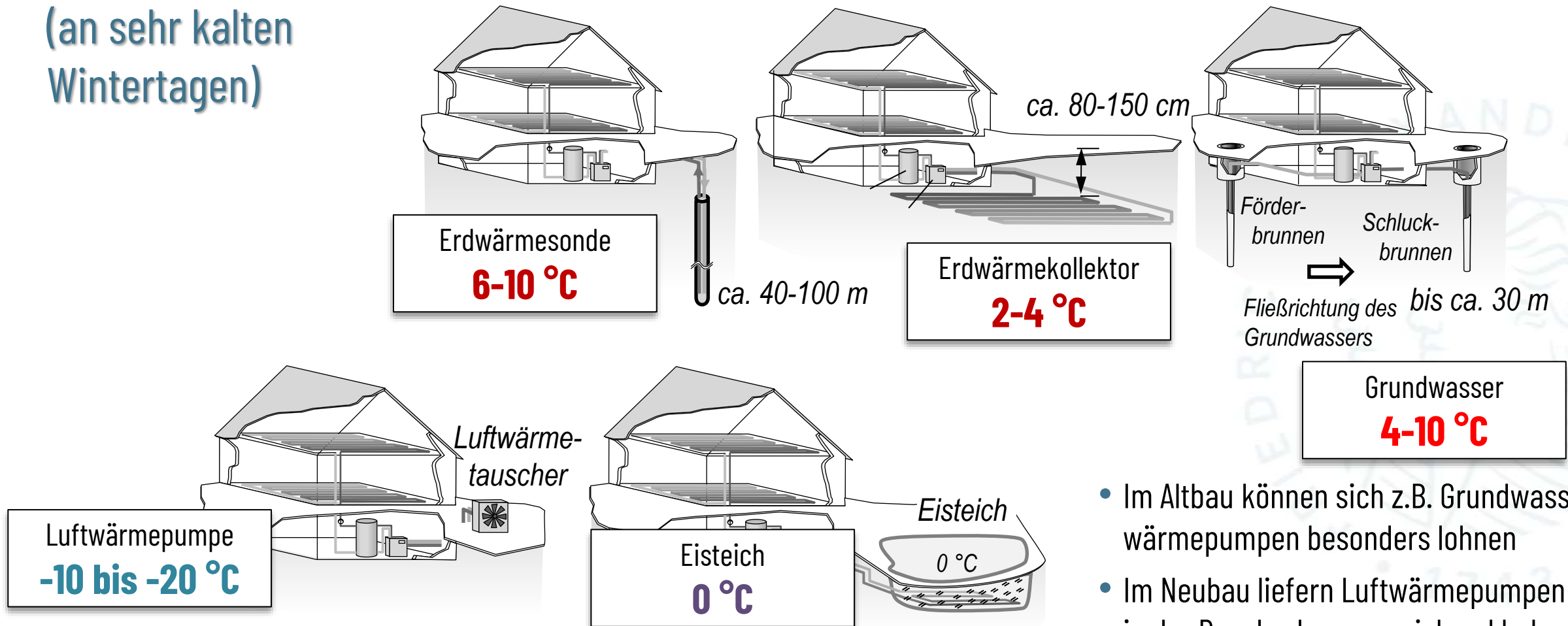
Speicher mit Pumpe

Fazit

- Eine Wärmepumpe kann auch Vorlauftemperaturen um oder über 60 °C liefern
- Bei hohen Vorlauftemperaturen ist der COP allerdings dann niedriger
- Mit "guten" Wärmequellen können hohe COPs auch mit hohen Vorlauftemperaturen realisiert werden



# Wärmequellen für Wärmepumpen (an sehr kalten Wintertagen)



- Im Altbau können sich z.B. Grundwasserwärmepumpen besonders lohnen
- Im Neubau liefern Luftwärmepumpen in der Regel schon ausreichend hohe Vorlauftemperaturen

# Fazit zur leidigen Diskussion der Überlastung der Stromkabel durch Wärmepumpen

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

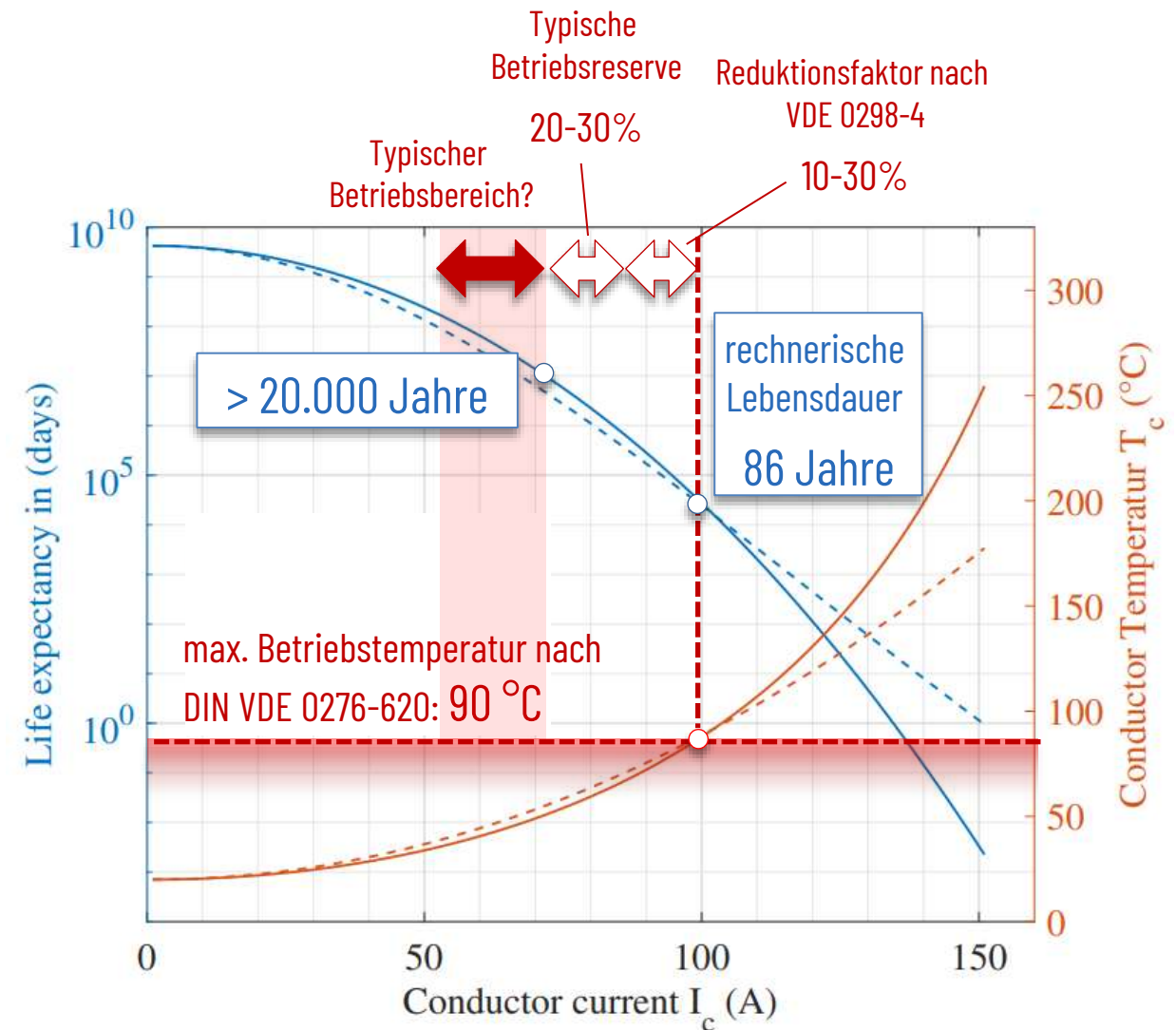
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Eine kurzzeitige Überlastung von Kabeln im Verteilnetz führt nicht zum unmittelbaren Ausfall sondern zur **beschleunigten Alterung** der Kabel
- Die Betriebsreserven sind so hoch, dass nicht unmittelbar mit Ausfällen gerechnet werden muss?
- **Risiken könne durch die intelligente Steuerung von Wärmepumpen minimiert werden**

S. Bottler, T. Blenk and C. Weindl, "An approach for determining load-dependent monetary assessment factors for PILC and XLPE cables within a load flow simulation," 2022 Global Energy Conference (GEC), Batman, Turkey, 2022, pp. 58-64, doi: 10.1109/GEC55014.2022.9986564.



A wide-angle photograph of a snowy landscape. In the foreground, a snow-covered road with tire tracks leads from the bottom left towards the center. To the right of the road is a snow-covered field with some small, bare bushes. In the background, there is a calm blue lake, and beyond that, a range of snow-covered mountains under a clear blue sky.

**1.**

Die Energiewende ist noch immer nicht im Wärmesektor angekommen

**2.**

Die Zukunft des Wärmesektors ist elektrisch und Wärmespeicher entlasten auch den Stromsektor

**3.**

Wenn passende Wärmequellen genutzt werden, funktionieren Wärmepumpen auch im Altbau – und unsere Kabel schaffen's bestimmt auch...

**Fazit**

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

## 4. Speicherlösungen für die Sektorenkopplung

- Optimal nur im Team: Wärmepumpen + Wärmespeicher
- Still the „hidden champion“: die Carnot-Batterien



Beispiel sensible Wärme:

# Das richtige Team: Wärmepumpe + Speicher

Wärmewende

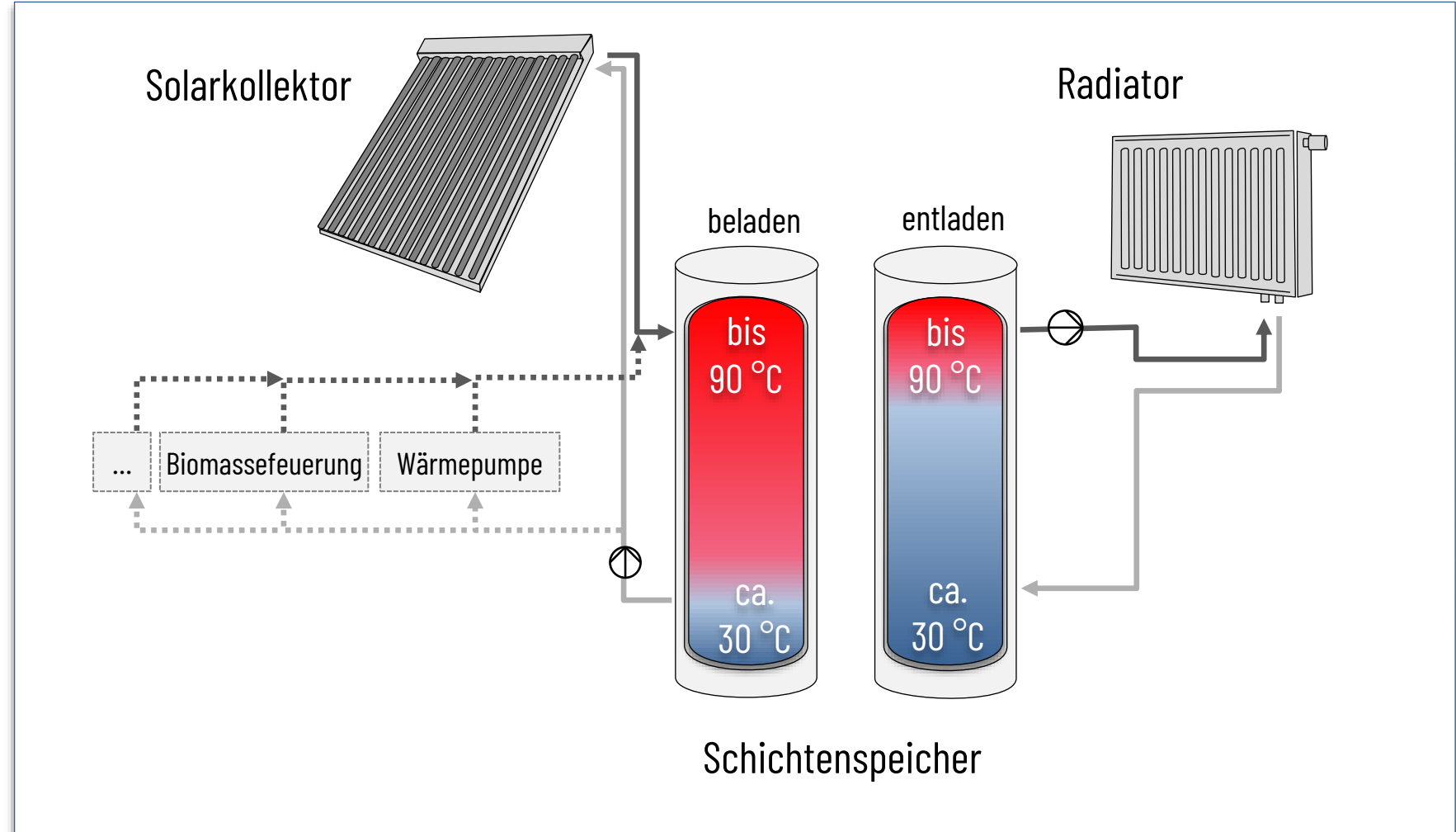
Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Flexibel und **intelligent steuerbar**  
wird die Wärmepumpe mit geeigneten Speichern
- Speicher ermöglichen auch die einfache Kombination mit zusätzlichen Wärmequellen



# Optionen zur Kombination von Wärmepumpen und Speichern

Wärmewende

Gibt's genug Strom?

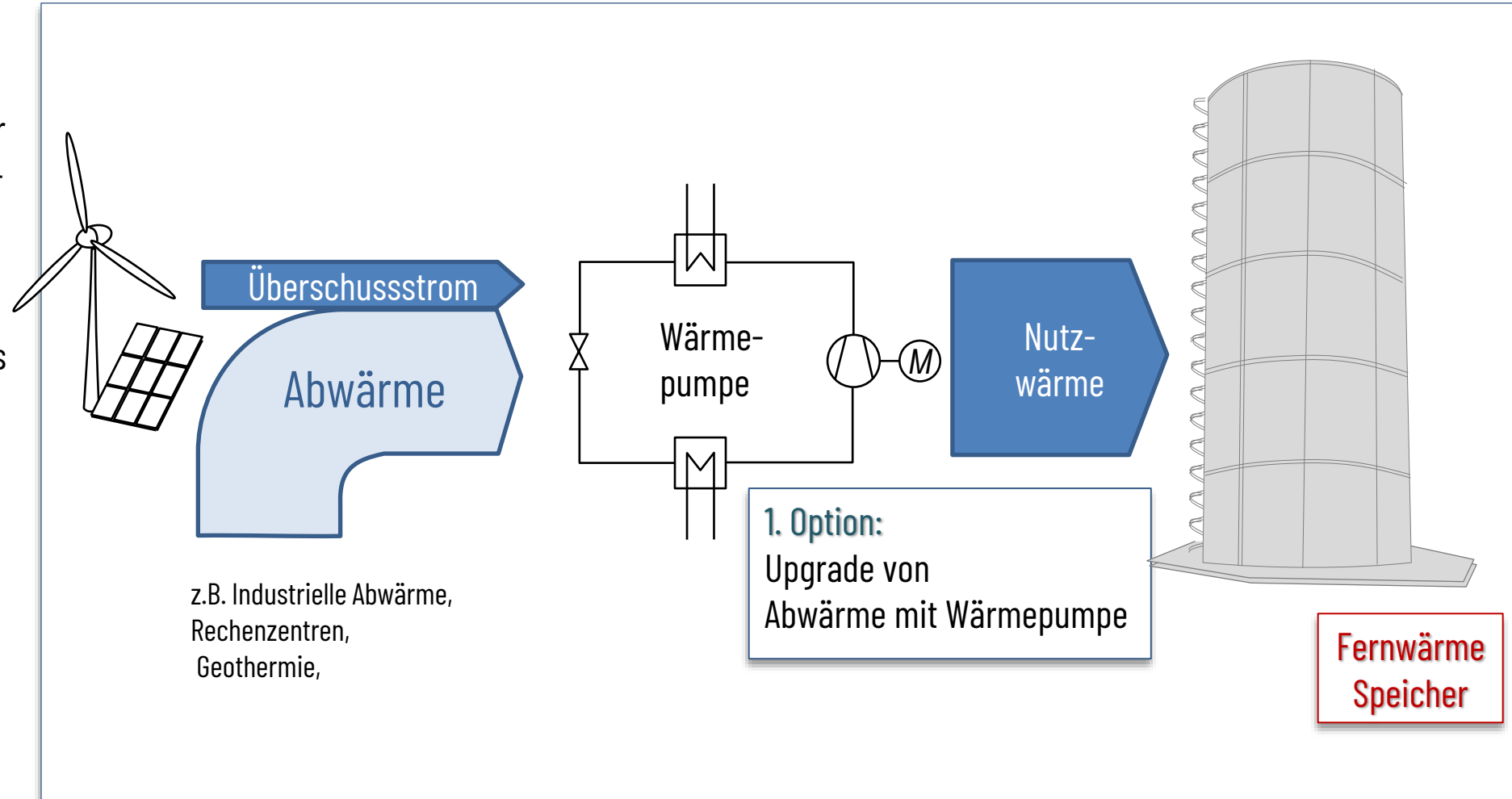
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Wärmepumpe reduziert den Strombedarf für die Nutzwärmeerzeugung

- Wärmespeicher ermöglichen erst die Nutzung volatile Stroms für die **Sektorenkopplung**



# Optionen zur Kombination von Wärmepumpen und Speichern

Wärmewende

Gibt's genug Strom?

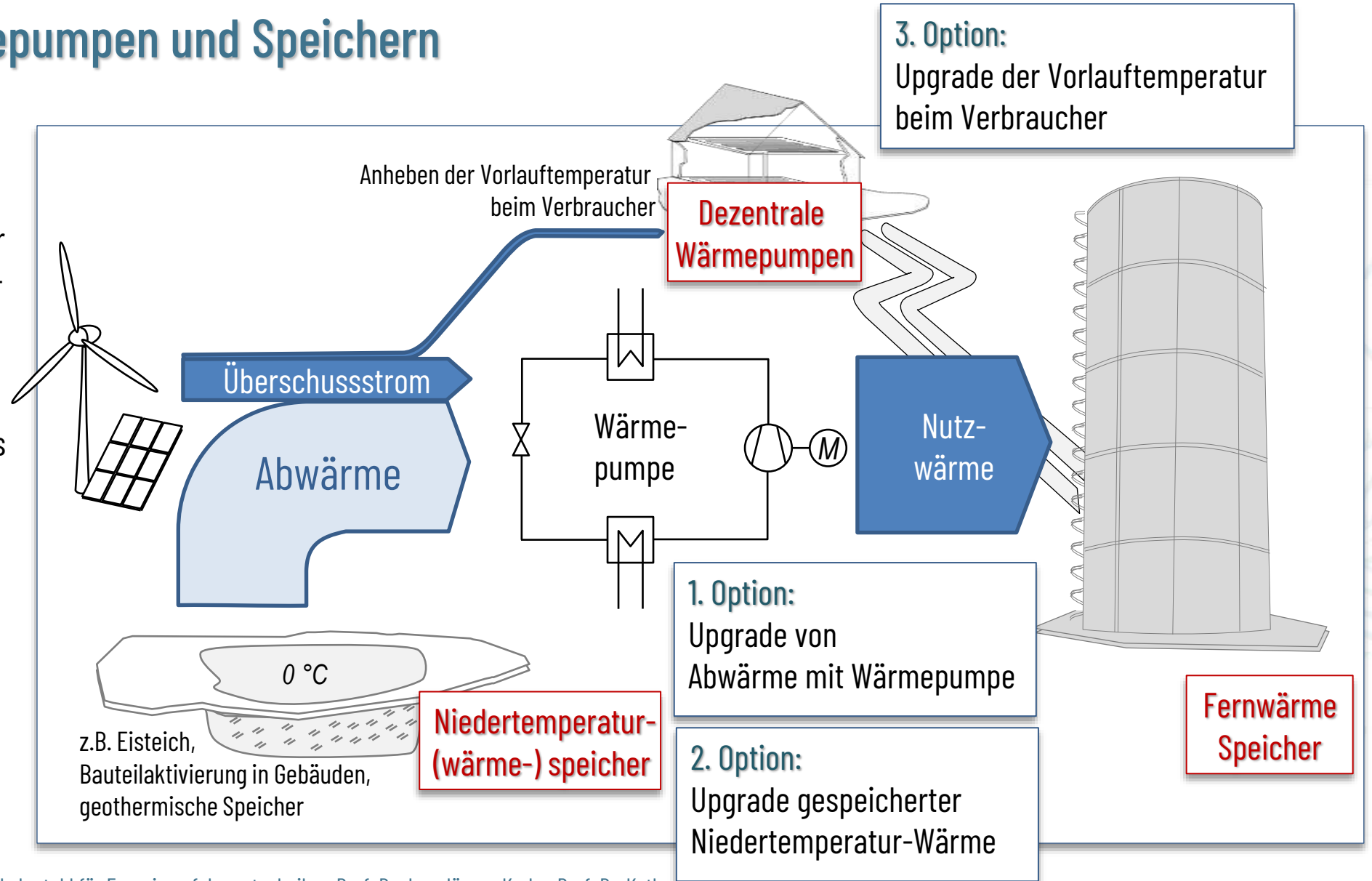
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Wärmepumpe reduziert den Strombedarf für die Nutzwärmeerzeugung

- Wärmespeicher ermöglichen erst die Nutzung volatile Stroms für die **Sektorenkopplung**

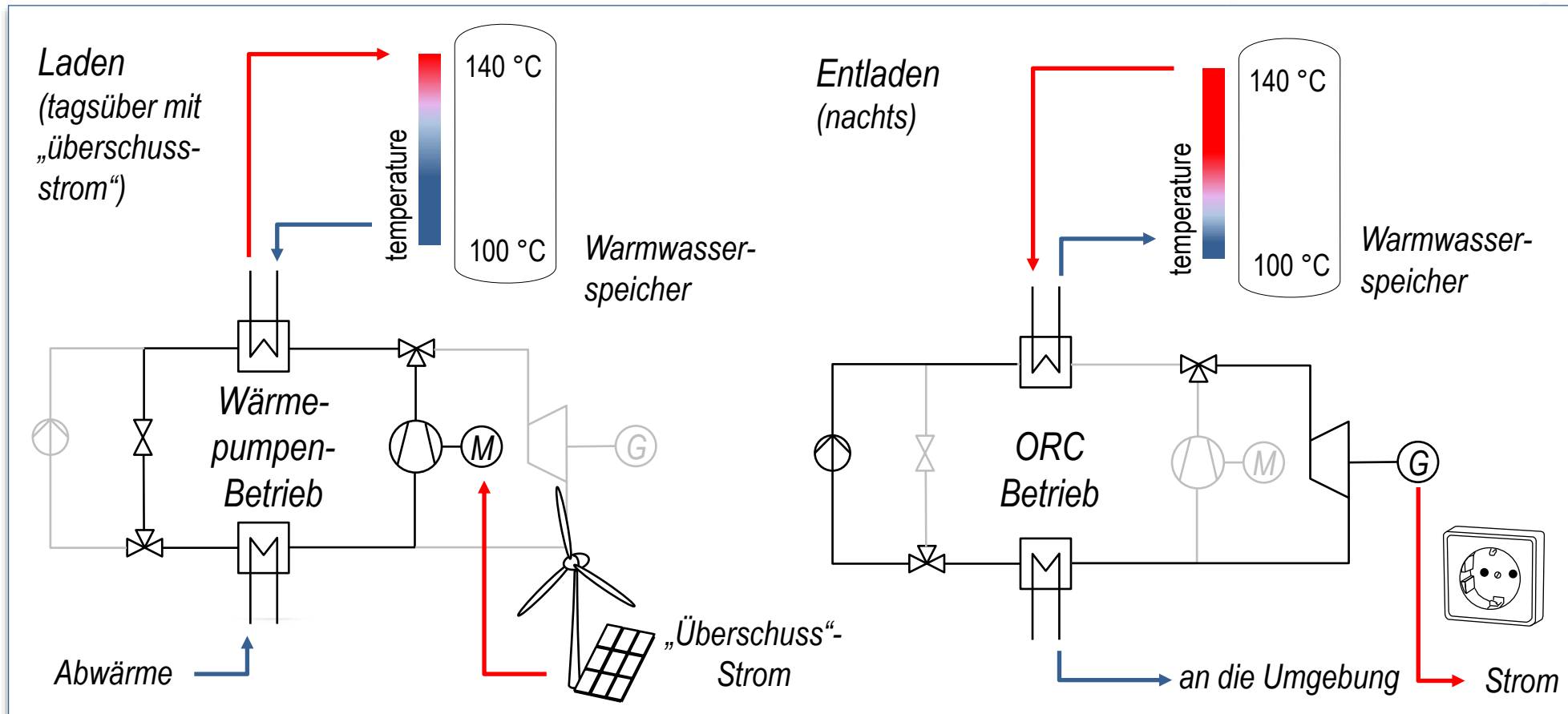


# Optionen zur Kombination von Wärmepumpen und Speichern

4. Option:

## Carnot-Batterien

- Wärmepumpe kann beim Entladen des Speichers als ORC-Prozess betrieben werden
- Wärmespeicher dienen dann als (günstig skalierbare ) **Stromspeicher für die Dunkelflaute**



# Optionen zur Kombination von Wärmepumpen und Speichern

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Wärmepumpe kann beim Entladen des Speichers als ORC-Prozess betrieben werden
- Wärmespeicher dienen dann als (günstig skalierbare ) **Stromspeicher für die Dunkelflaute**



## Carnot-Battery @ FAU

- reversibler Wärmepumpen-ORC-Prozess  
15 kW<sub>el</sub> (Wärmepumpe) bzw. 9 kW<sub>el</sub> (ORC)
- zwei 4000 Liter Heißwasserspeicher  
Speicherkapazität 270 kWh<sub>th</sub>

<https://youtu.be/2bGG58m8Jgs?t=10>

6. Option:

## Carnot-Batterien





1.

Die Energiewende ist noch immer nicht im Wärmesektor angekommen

2.

Die Zukunft des Wärmesektors ist elektrisch und Wärmespeicher entlasten auch den Stromsektor

3.

Wenn passende Wärmequellen genutzt werden, funktionieren Wärmepumpen auch im Altbau – und unsere Kabel schaffen's bestimmt auch...

und

4.

Wärmespeicher müssen mit Wärmepumpen kombiniert werden, um Strom möglichst flexibel und effizient zu nutzen

Fazit