



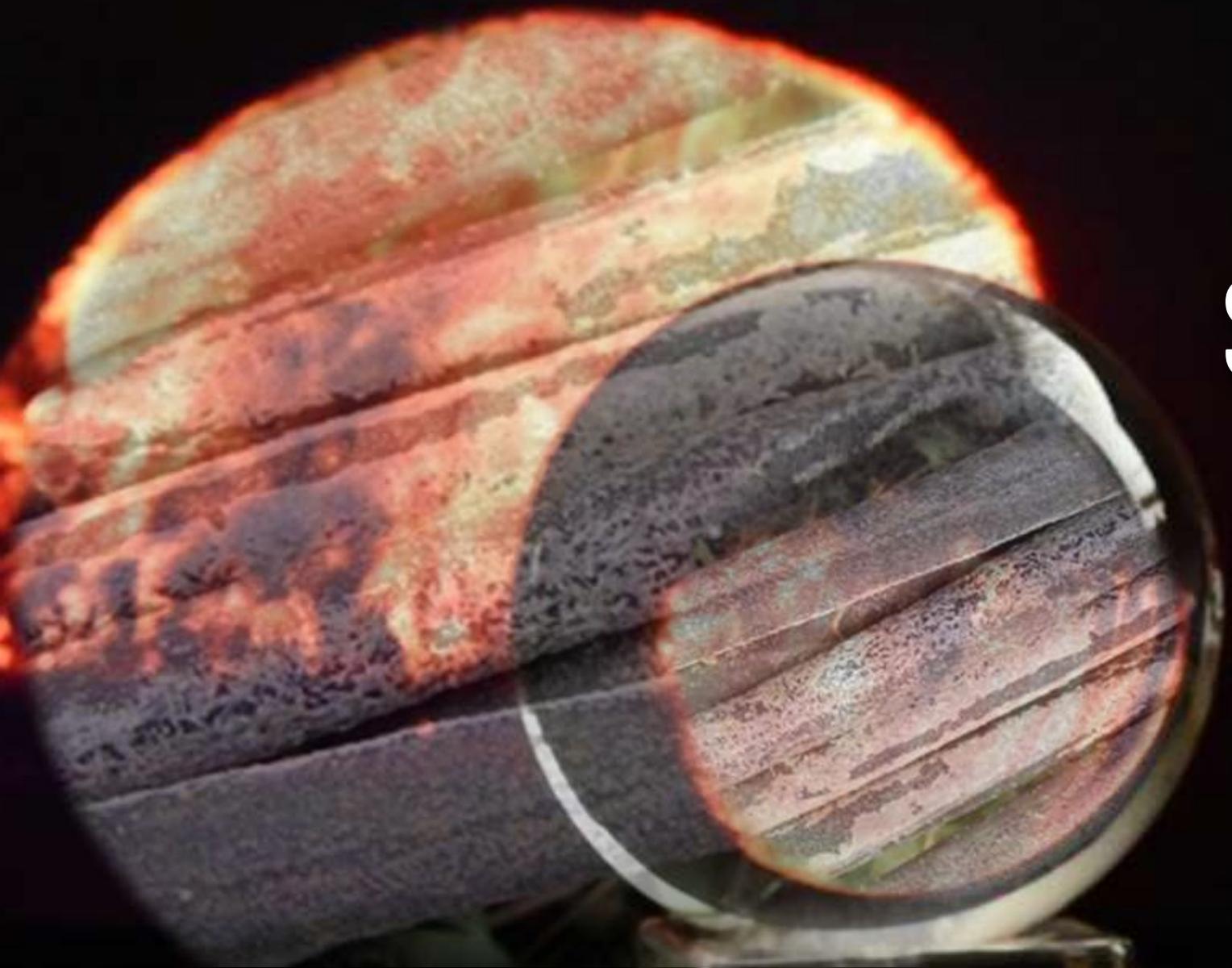
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Woche der Wärmepumpe, Kommunaler 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

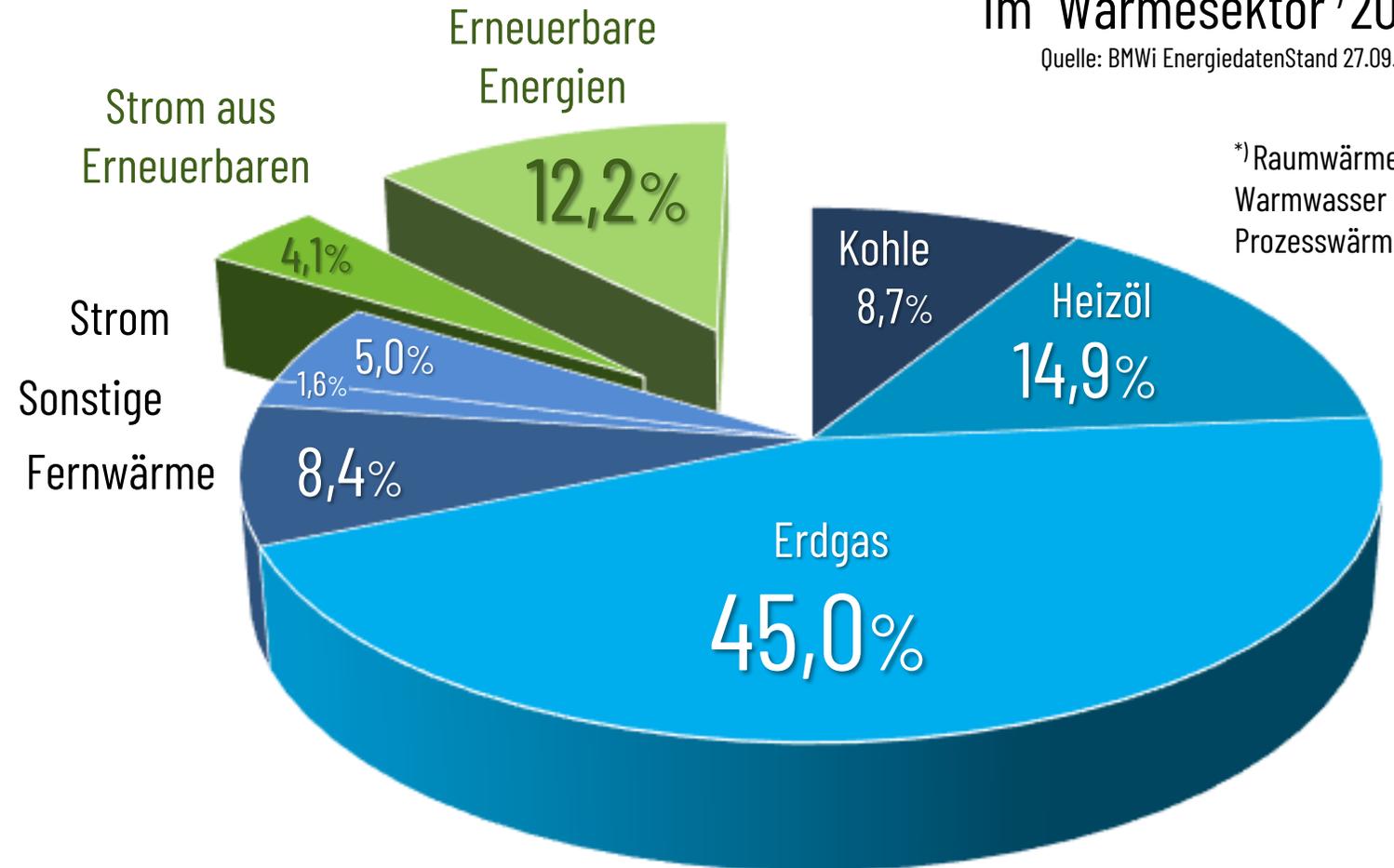
Fazit

- 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^{*)} 2019

Quelle: BMWi EnergiedatenStand 27.09.2021

^{*)}Raumwärme,
Warmwasser und
Prozesswärme



Energiewende im Wärme und Mobilitätssektor

Endenergieverbrauch der
Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2019

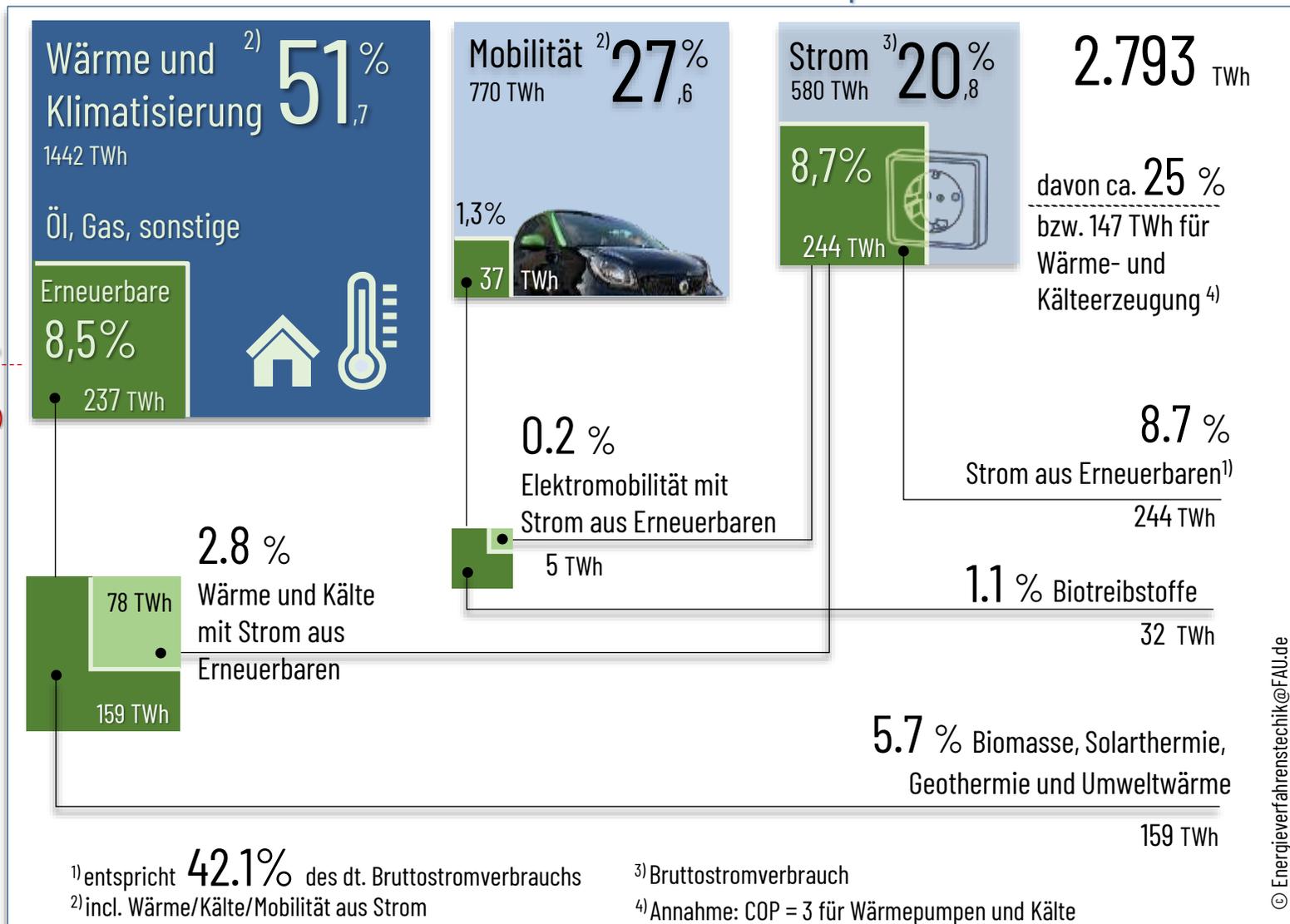
- Wärmewende
- Gibt's genug Stom?
- Ein bisschen Theorie
- Speicher mit Pumpe
- Fazit

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

... und Wasserstoff ist keine Alternative!

BRUT
H₂
HYDROGEN

davon ca. **13 %**
bzw. 185 TWh
aus Strom ⁴⁾



Problem Wasserstoff: Wirkungsgrade der Elektrolyse

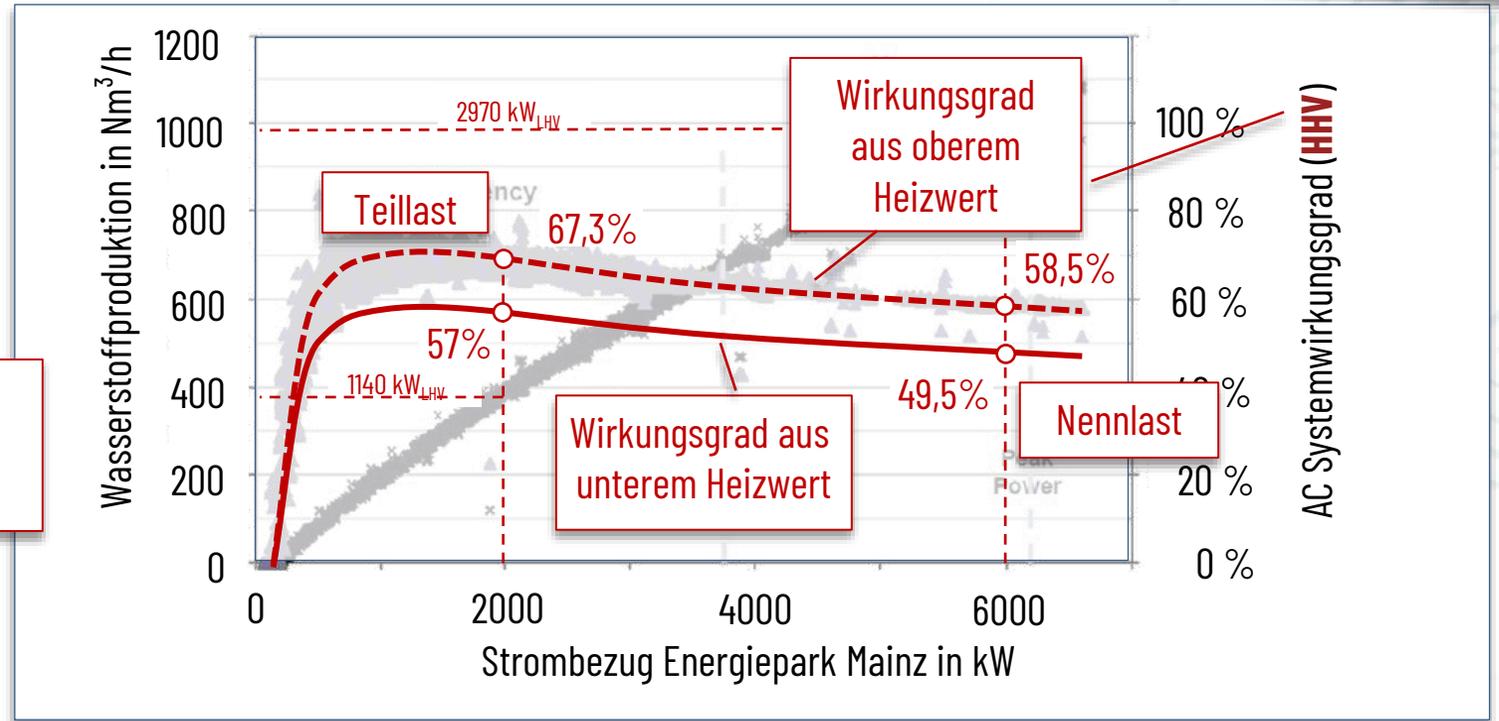
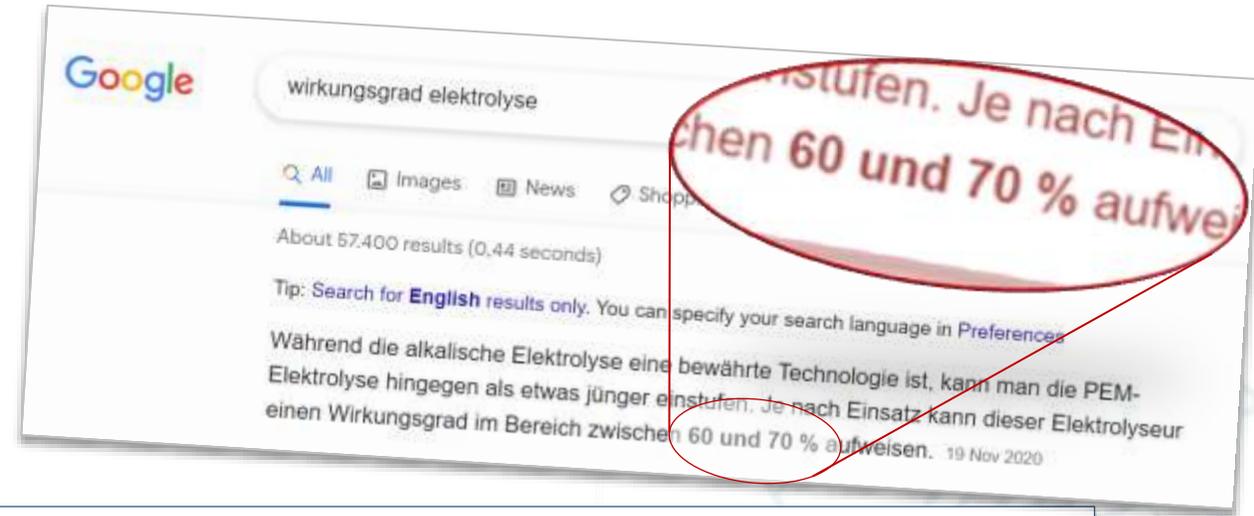
- Wirkungsgrade für Elektrolyseure werden oft zu hoch angegeben ^{*,**)}

*) 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 Strom?

Ein bisschen Theorie

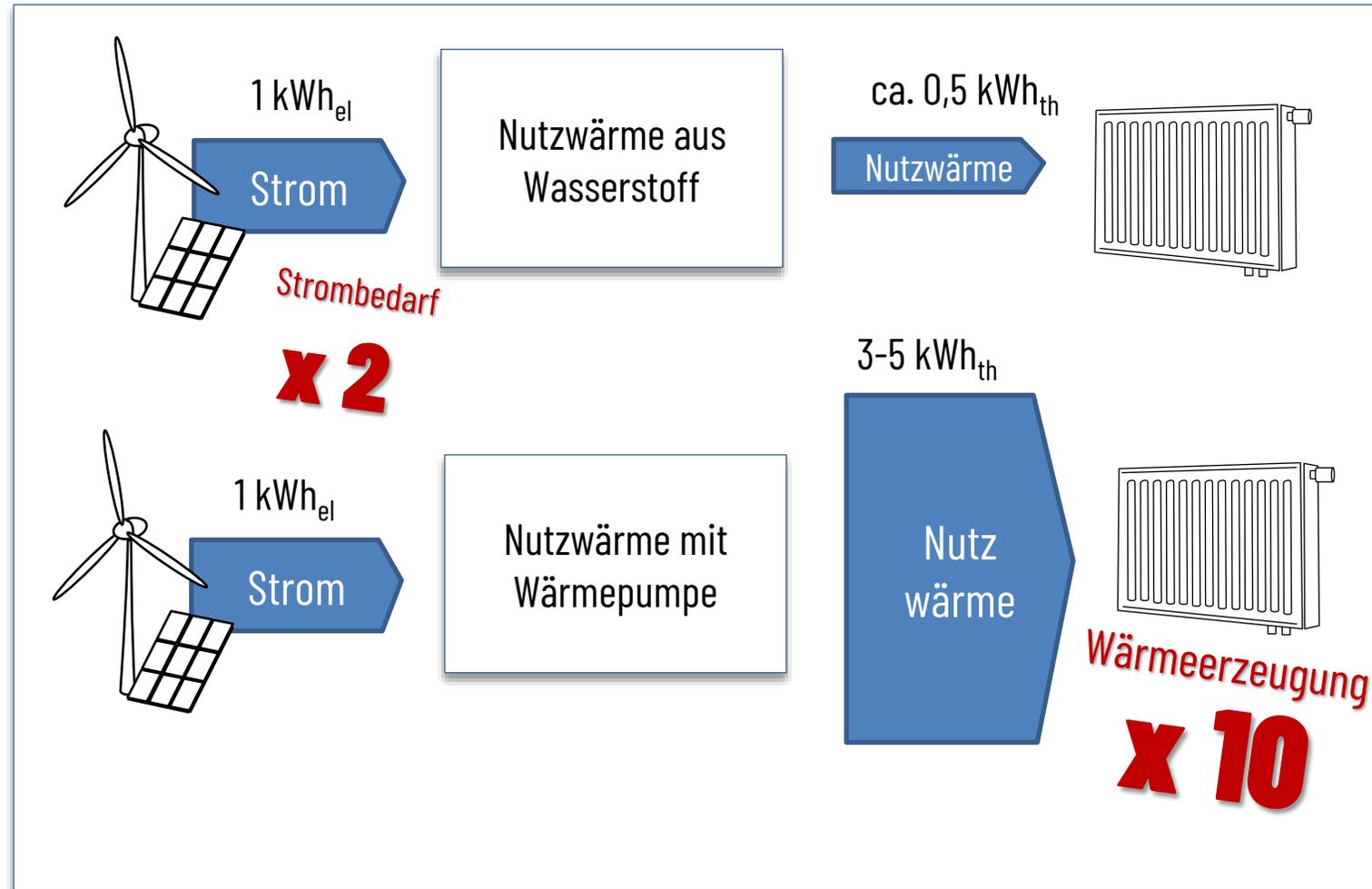
Speicher mit Pumpe

Fazit

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

... und Wasserstoff ist keine Alternative!

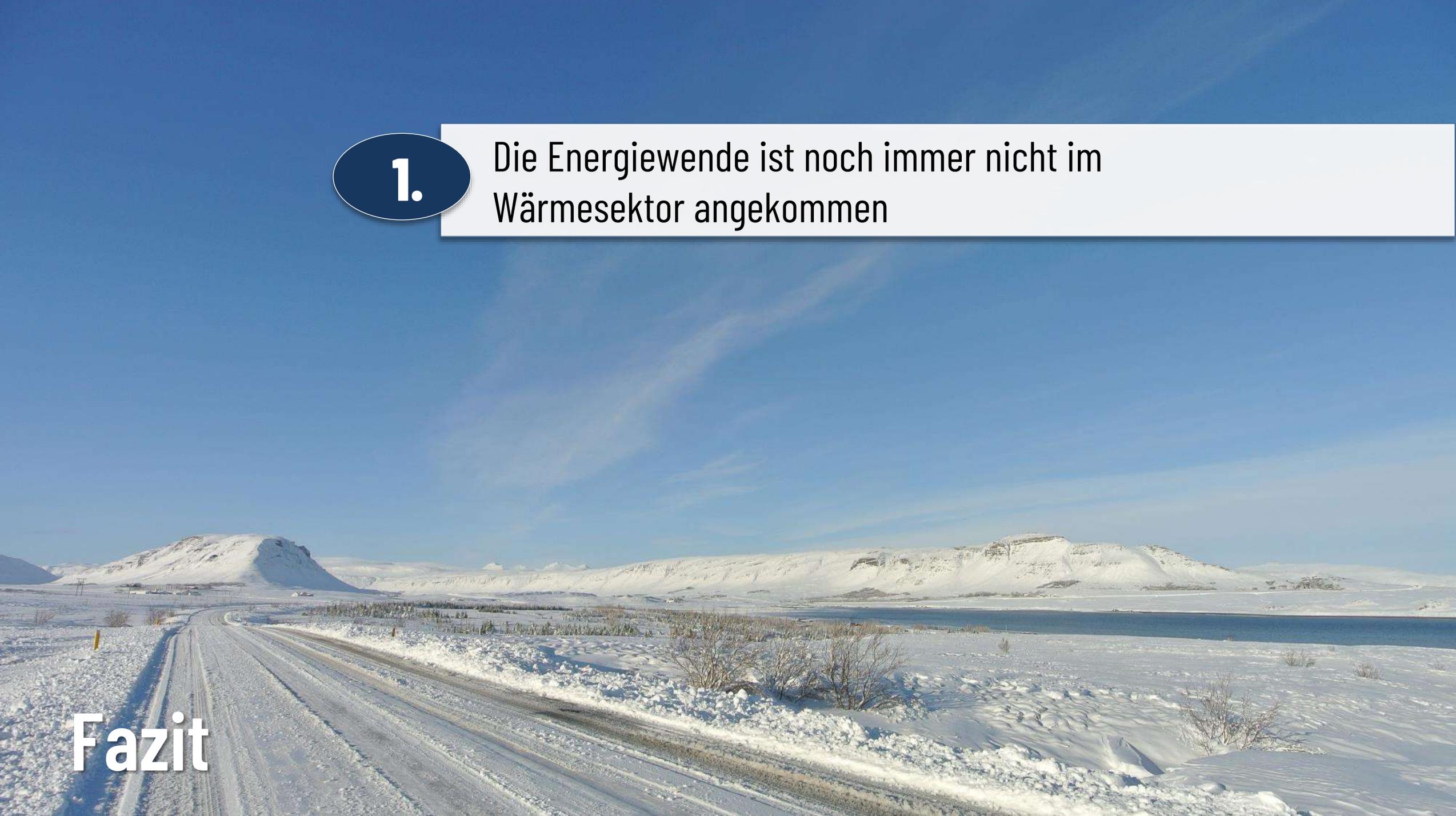
BRUT
H₂
HYDROGEN



1.

Die Energiewende ist noch immer nicht im Wärmesektor angekommen

Fazit



Wärmewende

Gibt's genug Strom?

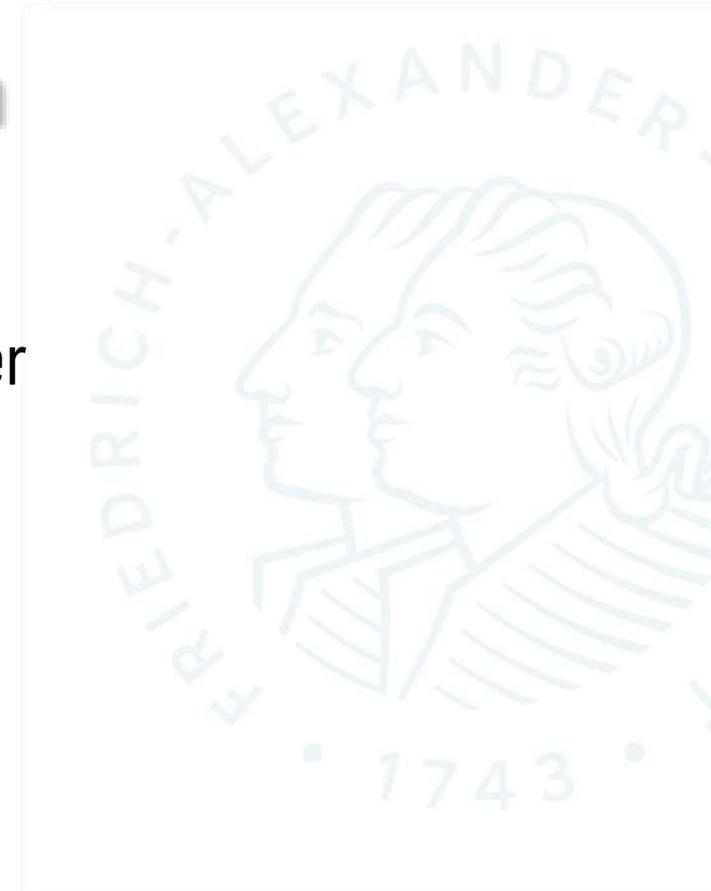
Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

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

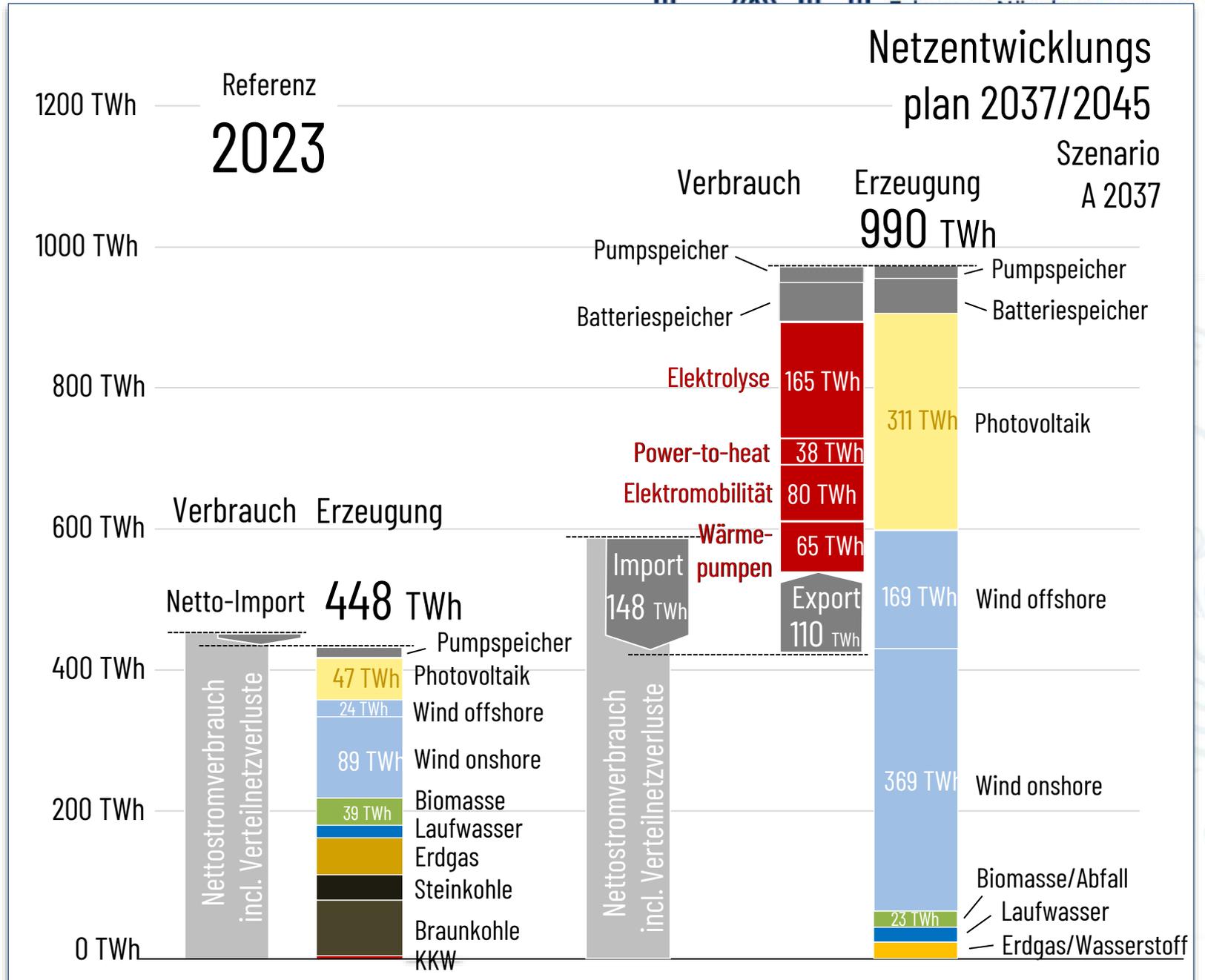
- Der aktuelle Netzentwicklungsplan (NEP) der Übertragungsnetzbetreiber
- Die Wärmeversorgung in der Dunkelflaute



- Wärmewende
- Gibt's genug Stom?
- Ein bisschen Theorie
- Speicher mit Pumpe
- Fazit

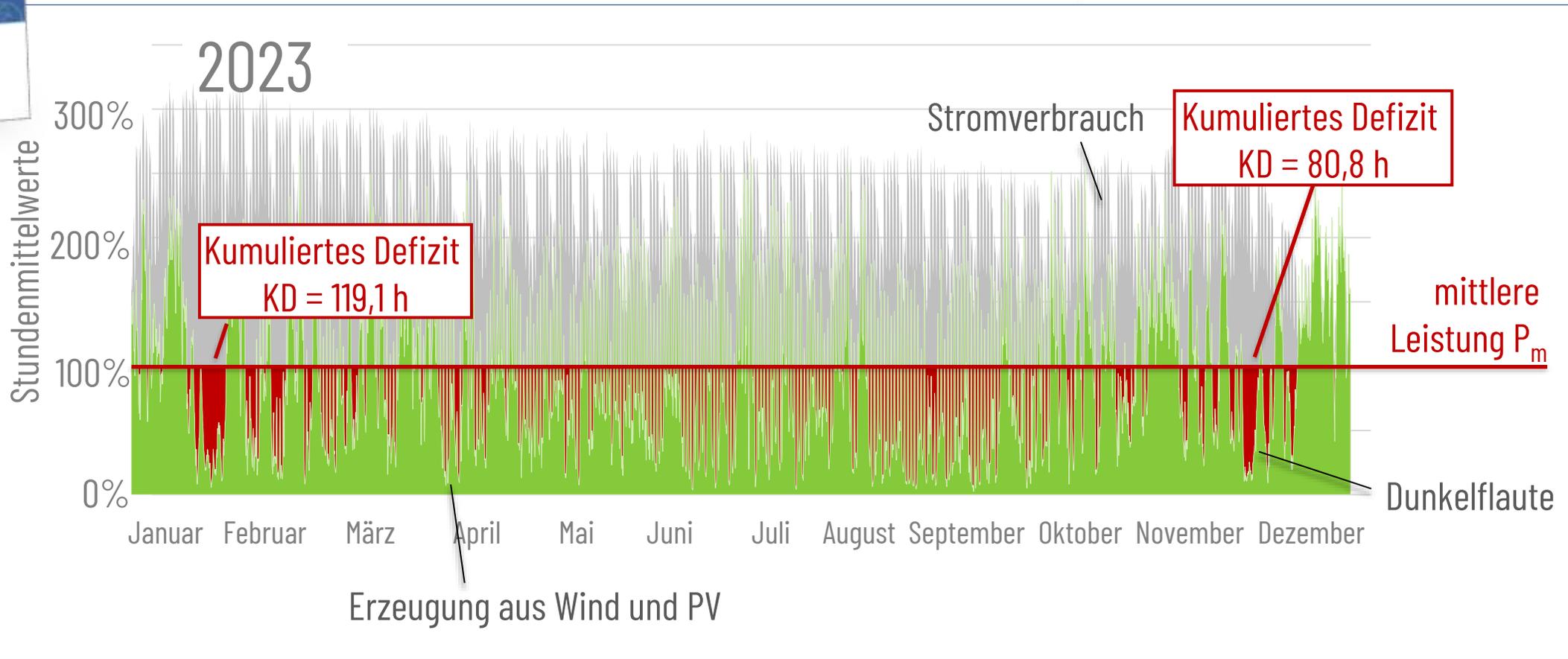
Kernproblem der Energiewende: Der Strombedarf wird steigen

- 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

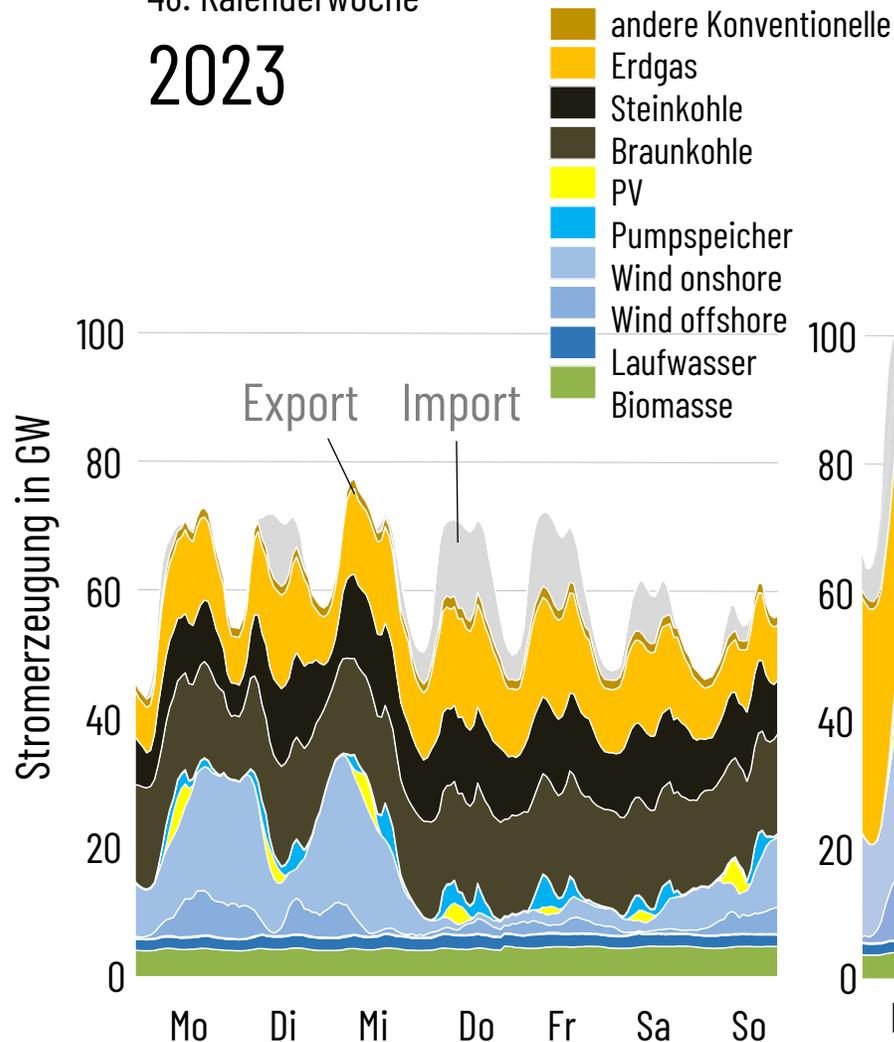
Fazit

Kernproblem der Energiewende:

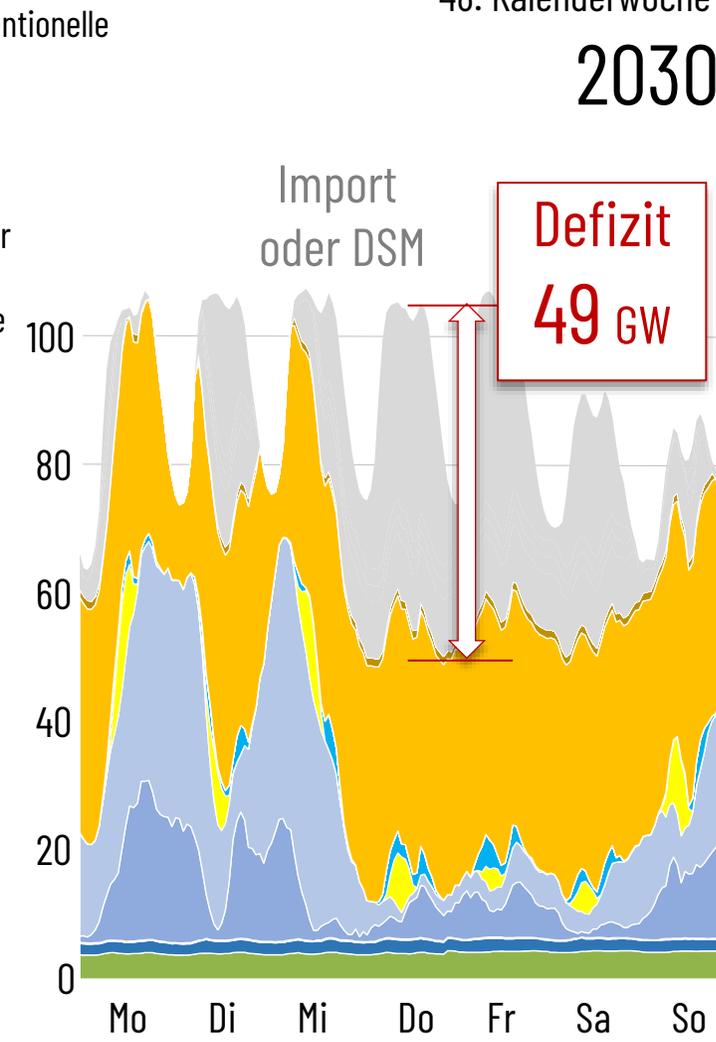
Der Strombedarf wird steigen

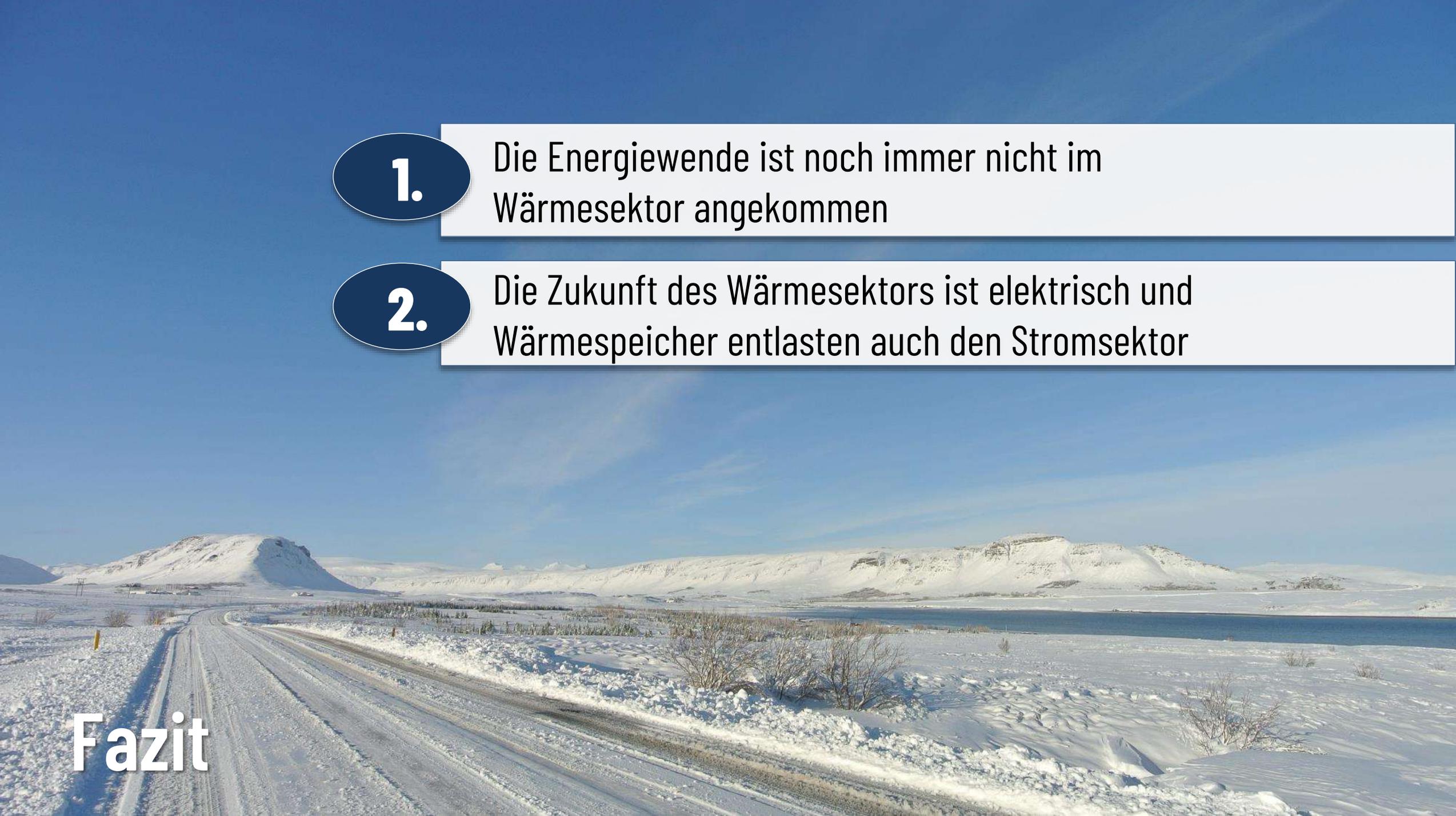
- Durch die Sektorenkopplung (und die Elektrolyse) wird der Strombedarf in Deutschland massiv steigen
- **Kernaufgabe wird es sein, Erneuerbare Energien zu speichern**
- Wärme lässt sich viel einfacher und kostengünstiger speichern als Strom

Dunkelflaute
48. Kalenderwoche
2023



Projektion der Dunkelflaute
48. Kalenderwoche
2030





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

Wärmewende

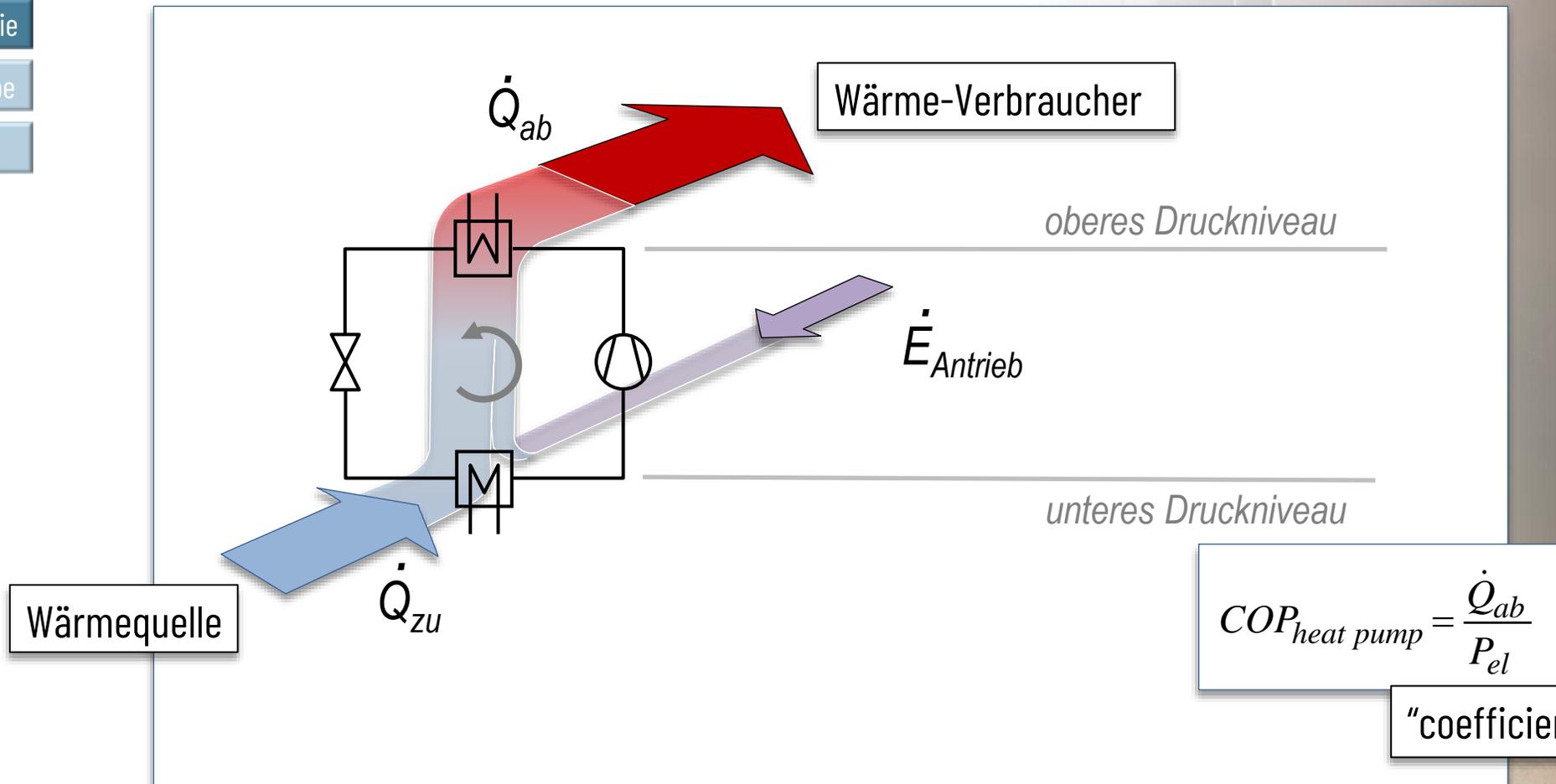
Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- 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



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

"coefficient of performance"

Ein bisschen Theorie

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

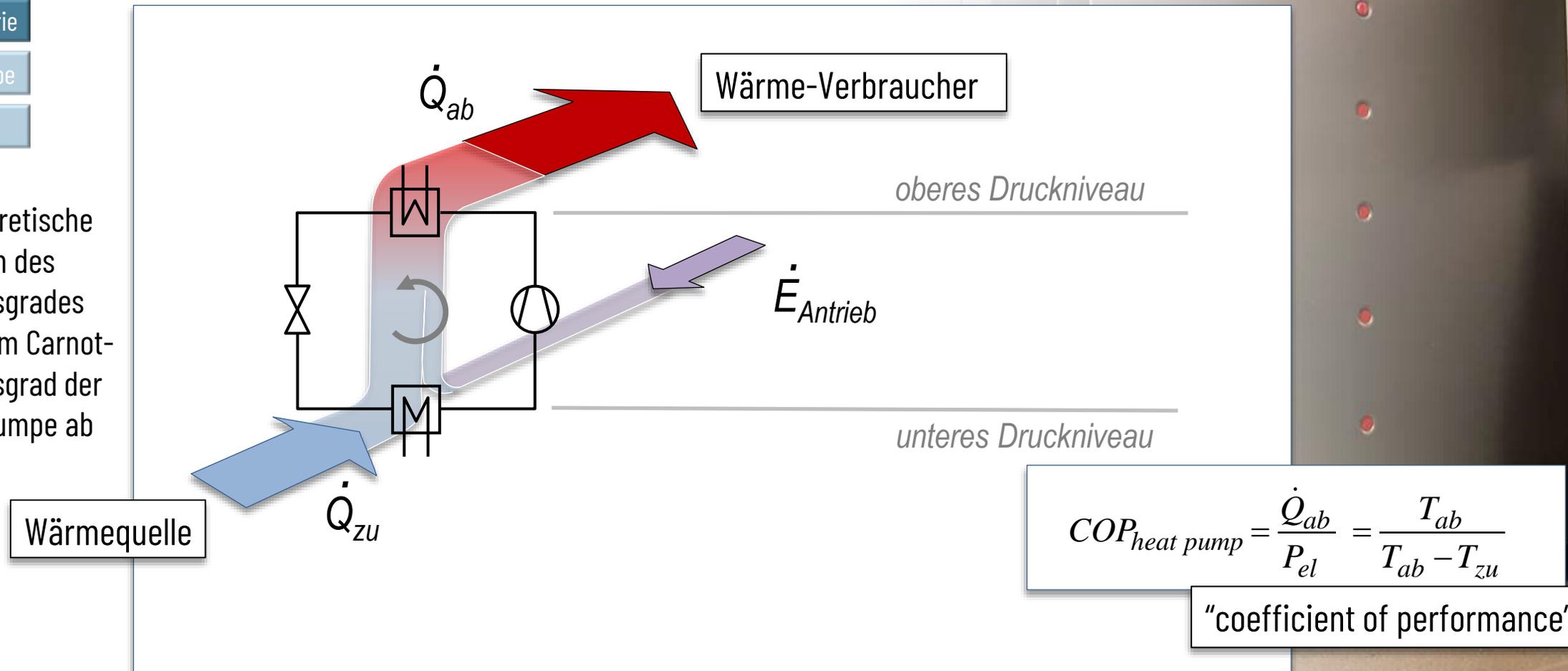
Ein bisschen Theorie

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"

Ein bisschen Theorie

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

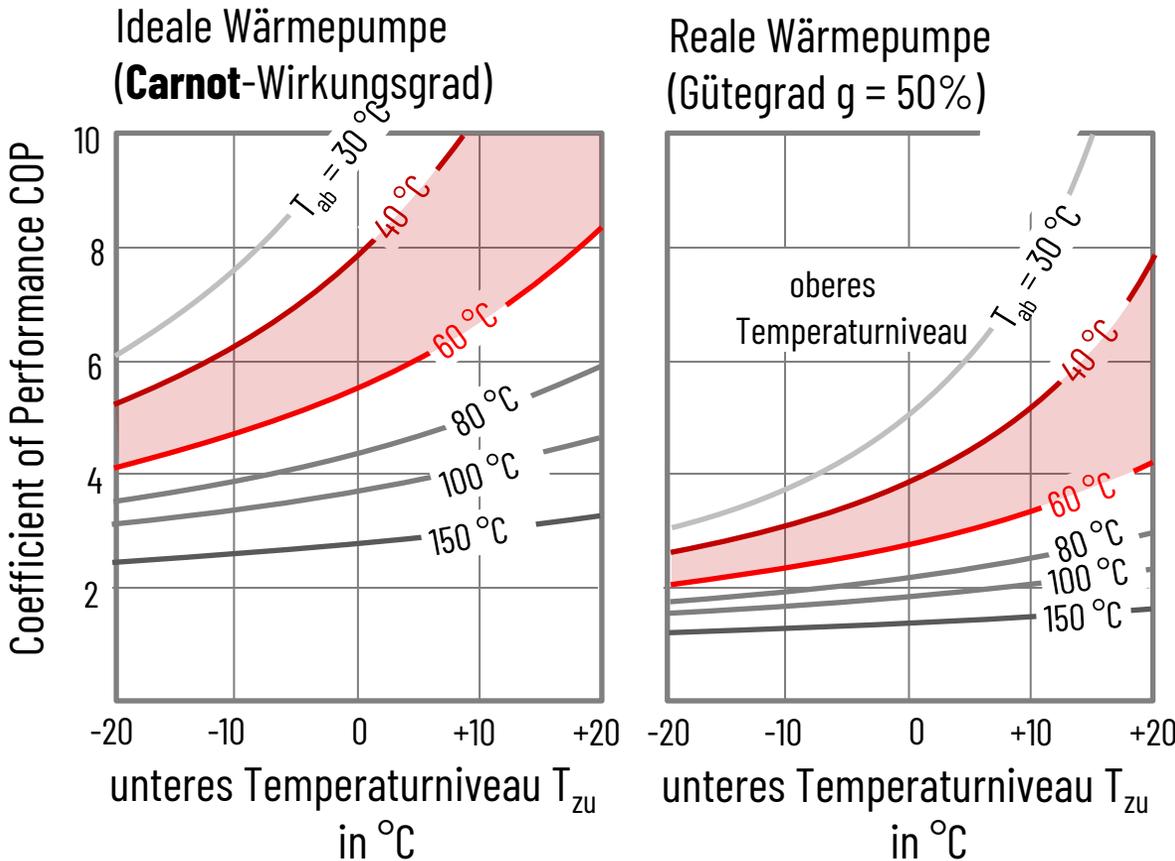
Ein bisschen Theorie

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

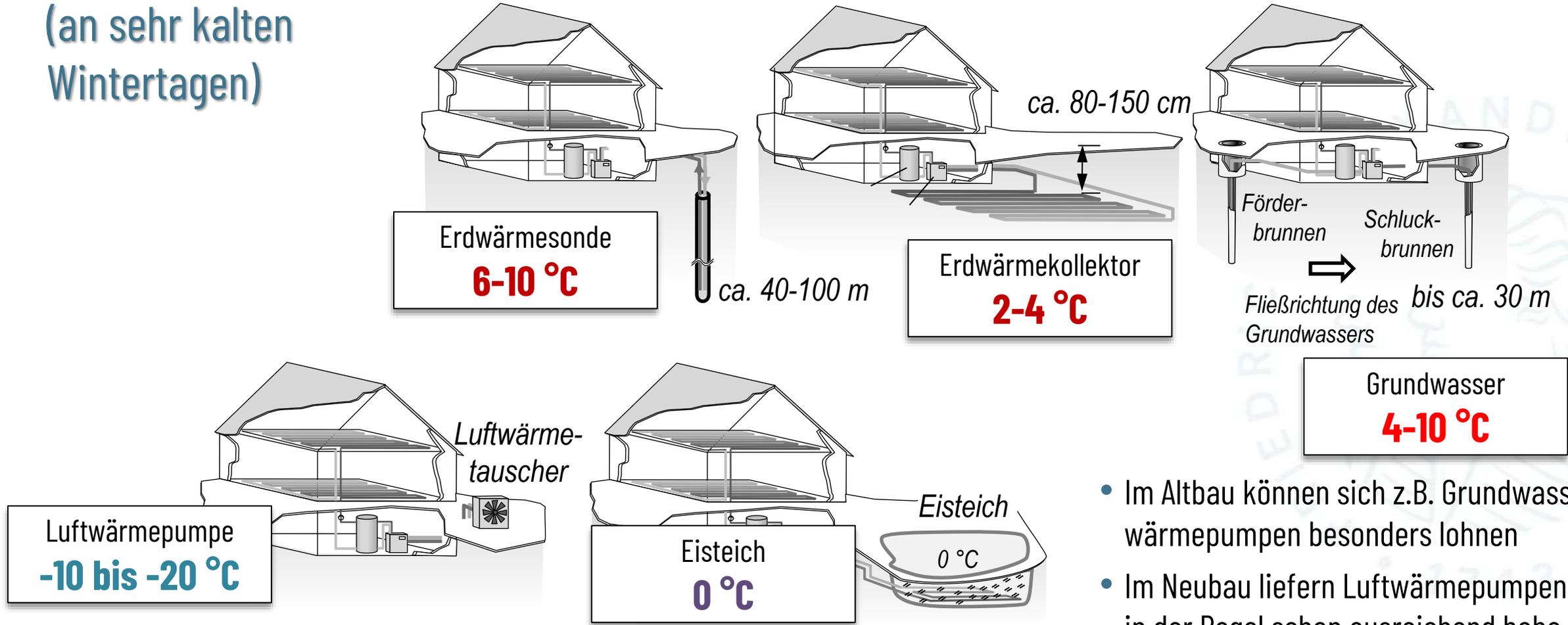
Fazit

- 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 Strom?

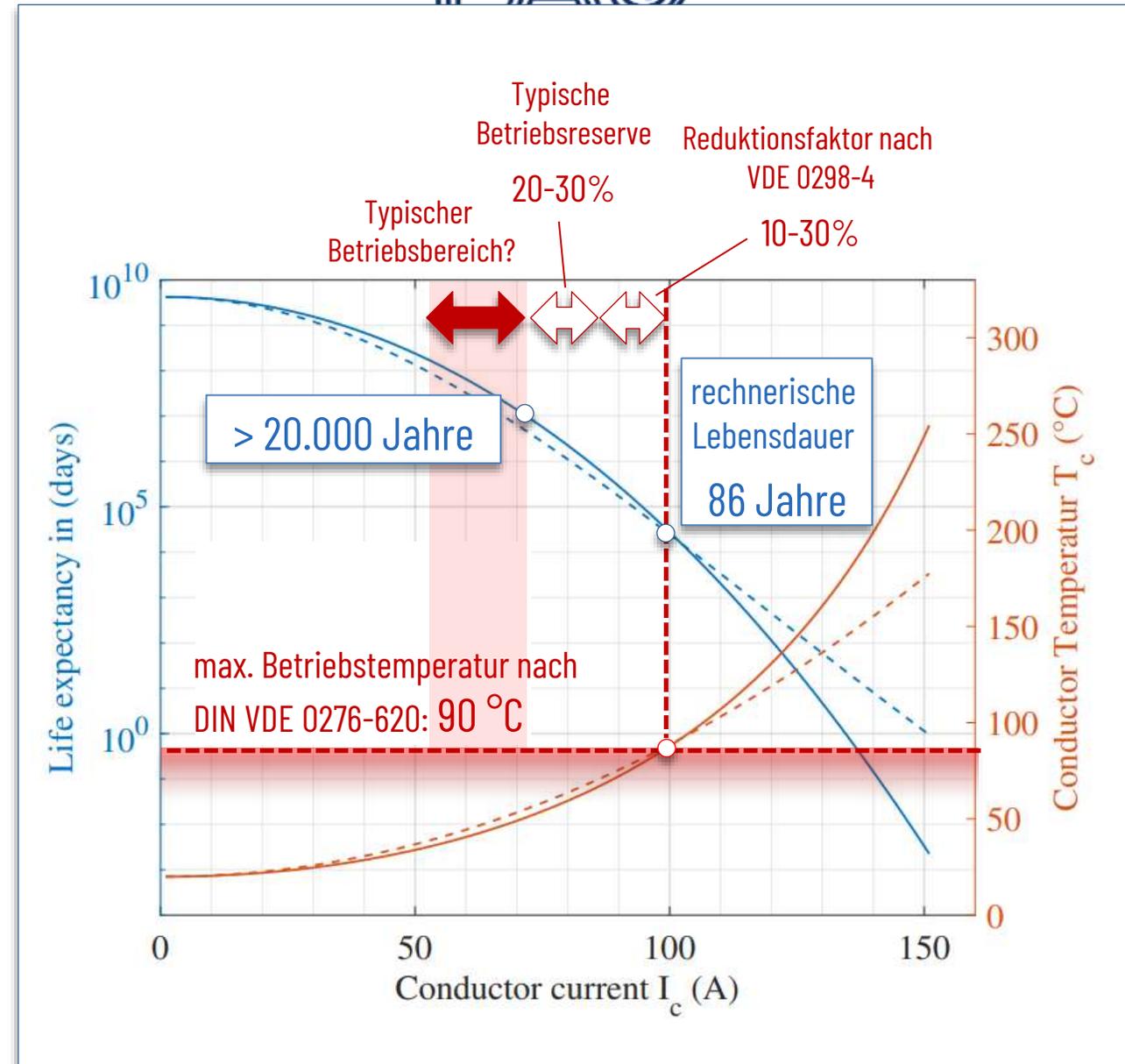
Ein bisschen Theorie

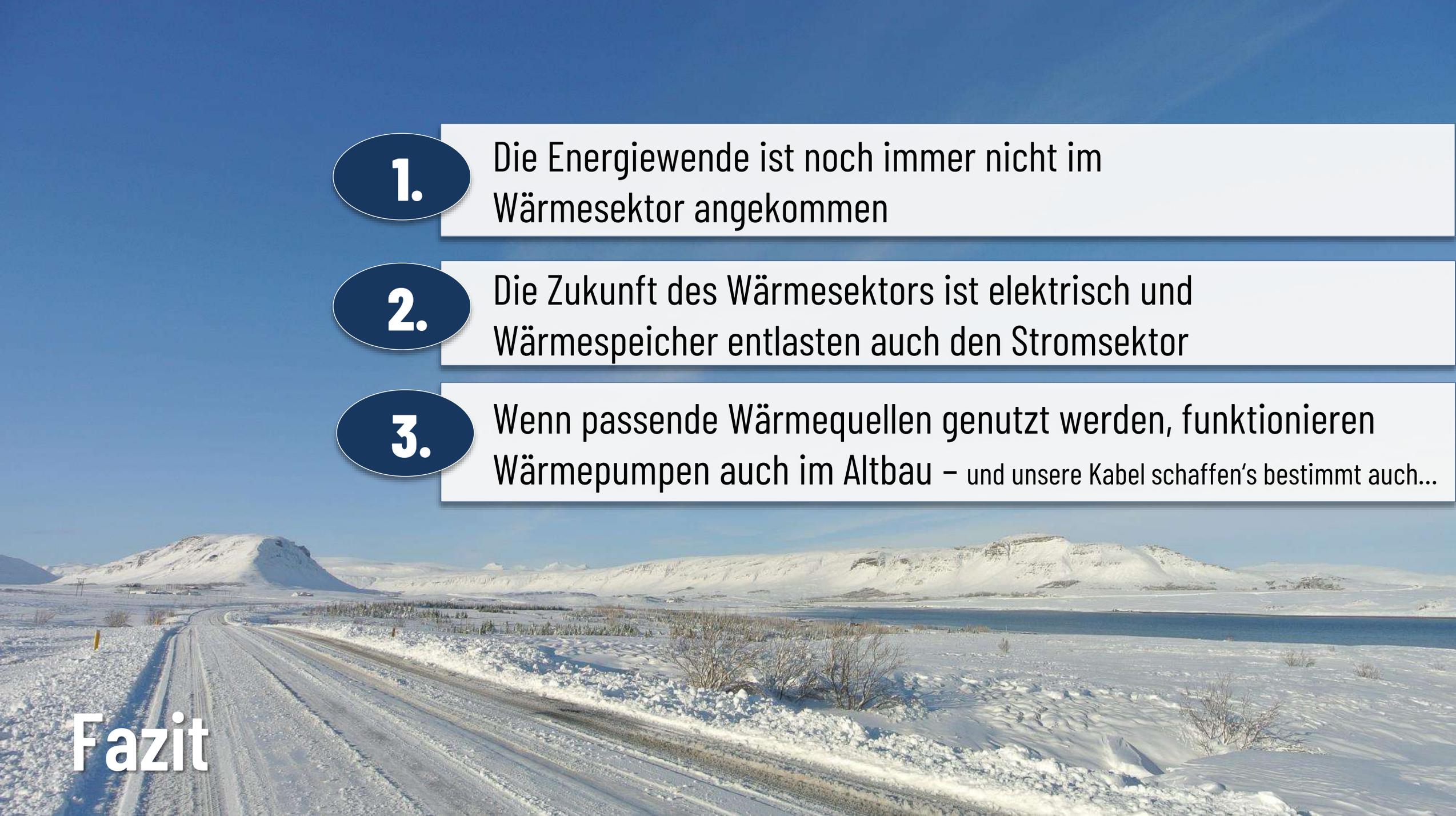
Speicher mit Pumpe

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 dirt road with tire tracks leads from the bottom left towards the center. The ground is covered in snow with some sparse, dry vegetation. In the middle ground, there's a body of water, possibly a lake or a wide river, which is partially frozen. The background features rolling hills and mountains, all covered in snow, 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

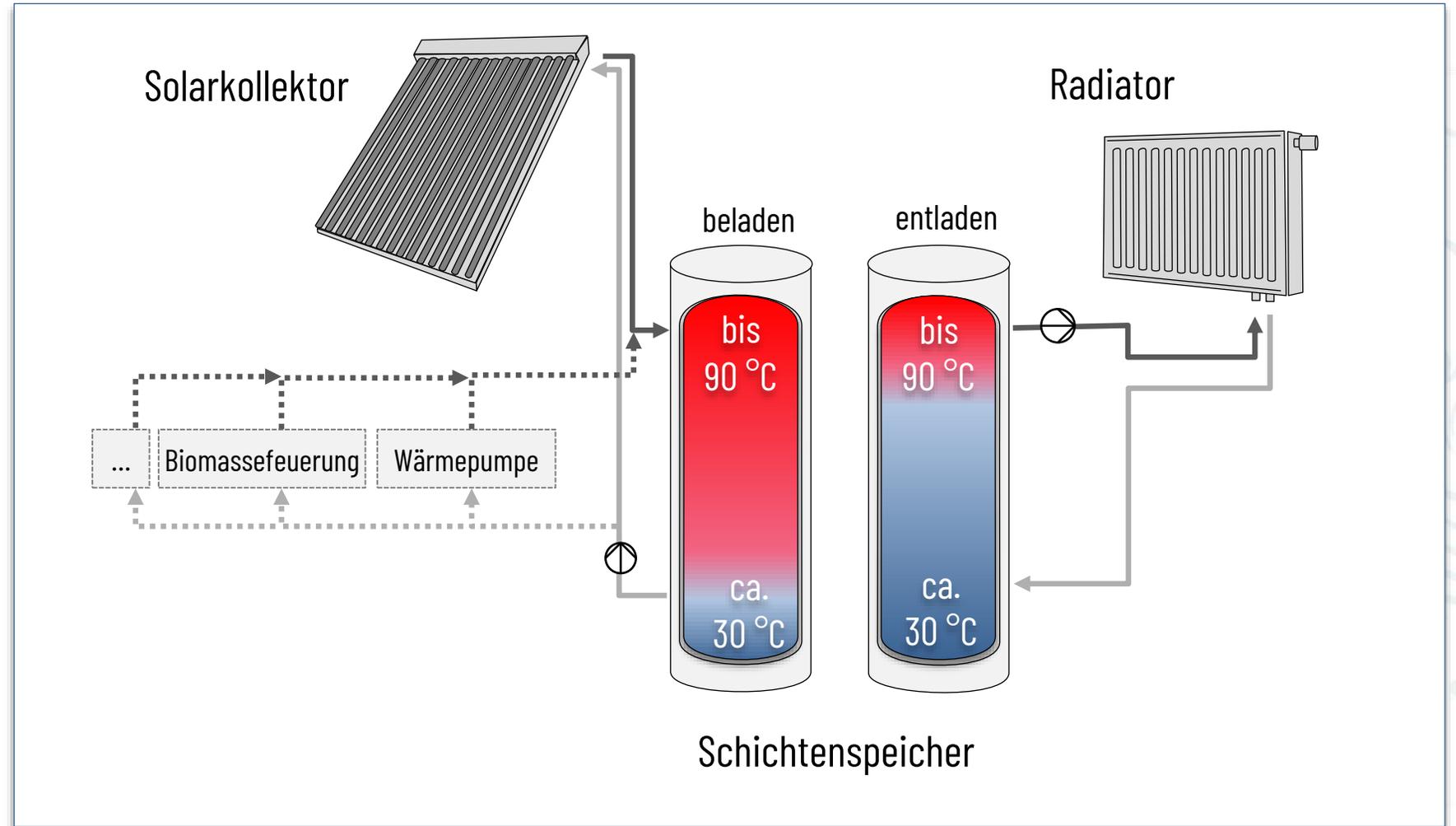
Gibt's genug Stom?

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

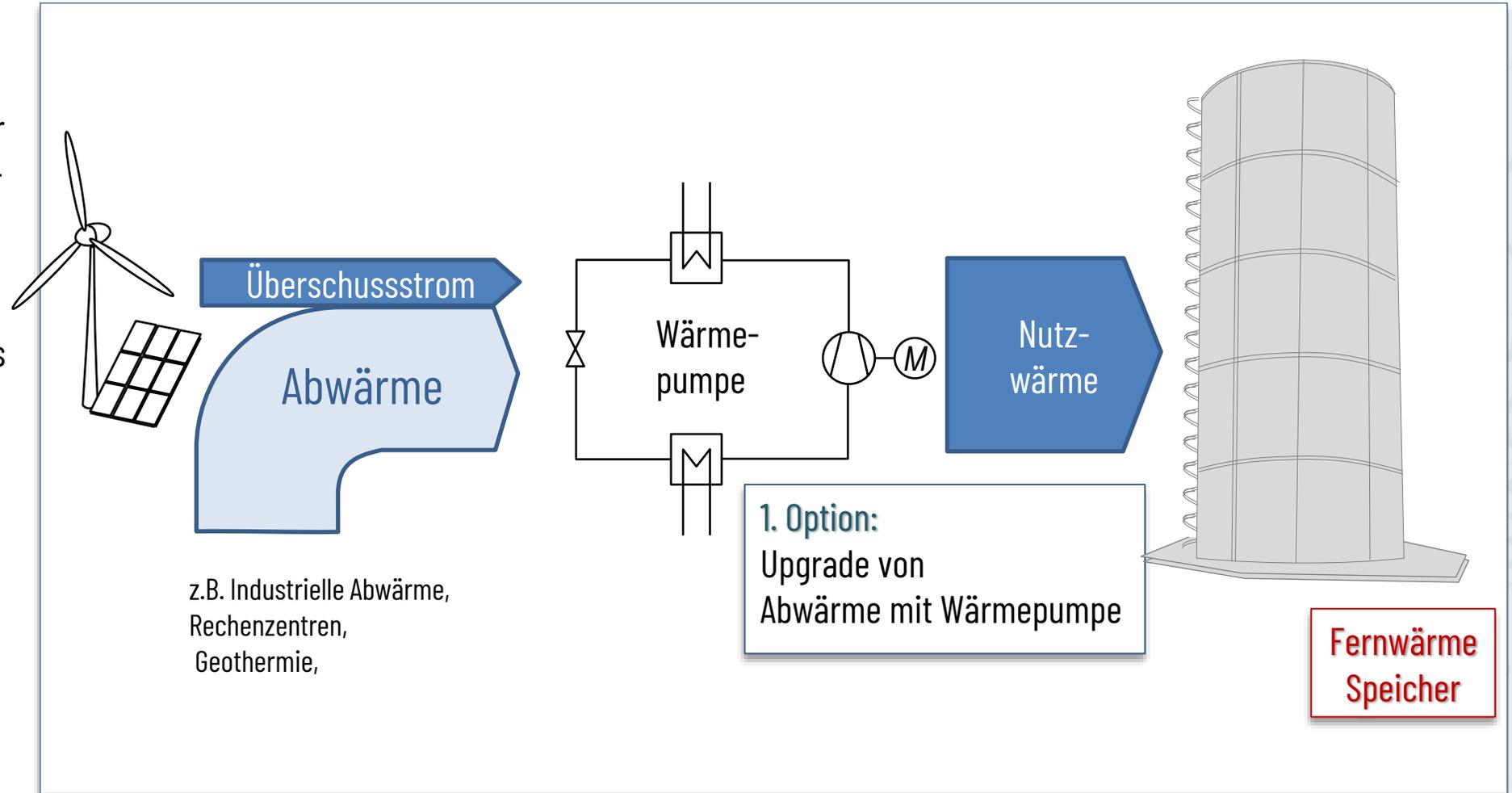
Gibt's genug Strom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit

- Wärmepumpe reduziert den Strombedarf für die Nutzwärmeerzeugung
- Wärmespeicher ermöglichen erst die Nutzung volatile Stroms für die **Sektorenkopplung**

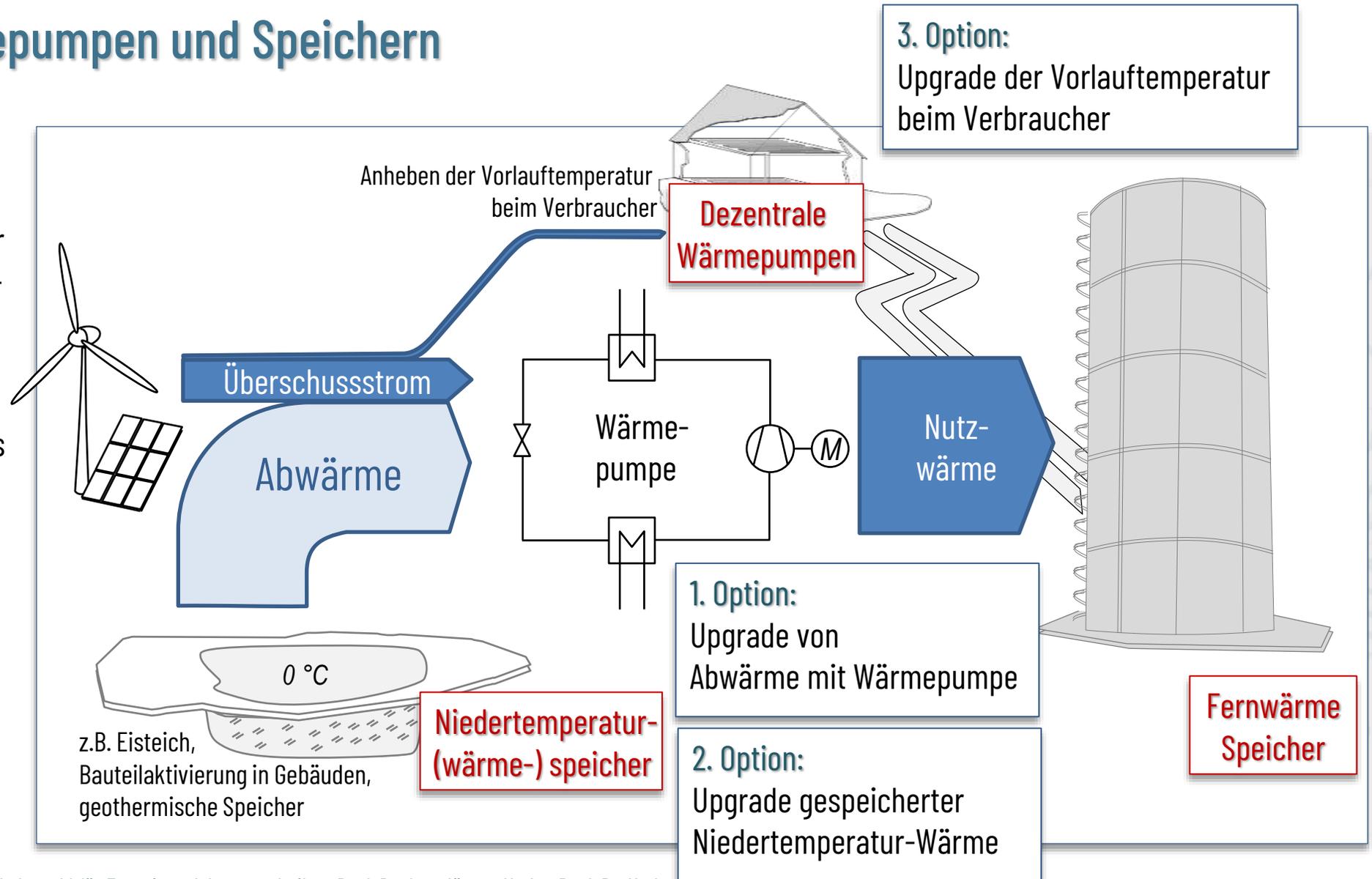


Optionen zur Kombination von Wärmepumpen und Speichern

- Wärmewende
- Gibt's genug Stom?
- Ein bisschen Theorie
- Speicher mit Pumpe
- Fazit

- Wärmepumpe reduziert den Strombedarf für die Nutzwärmeerzeugung

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



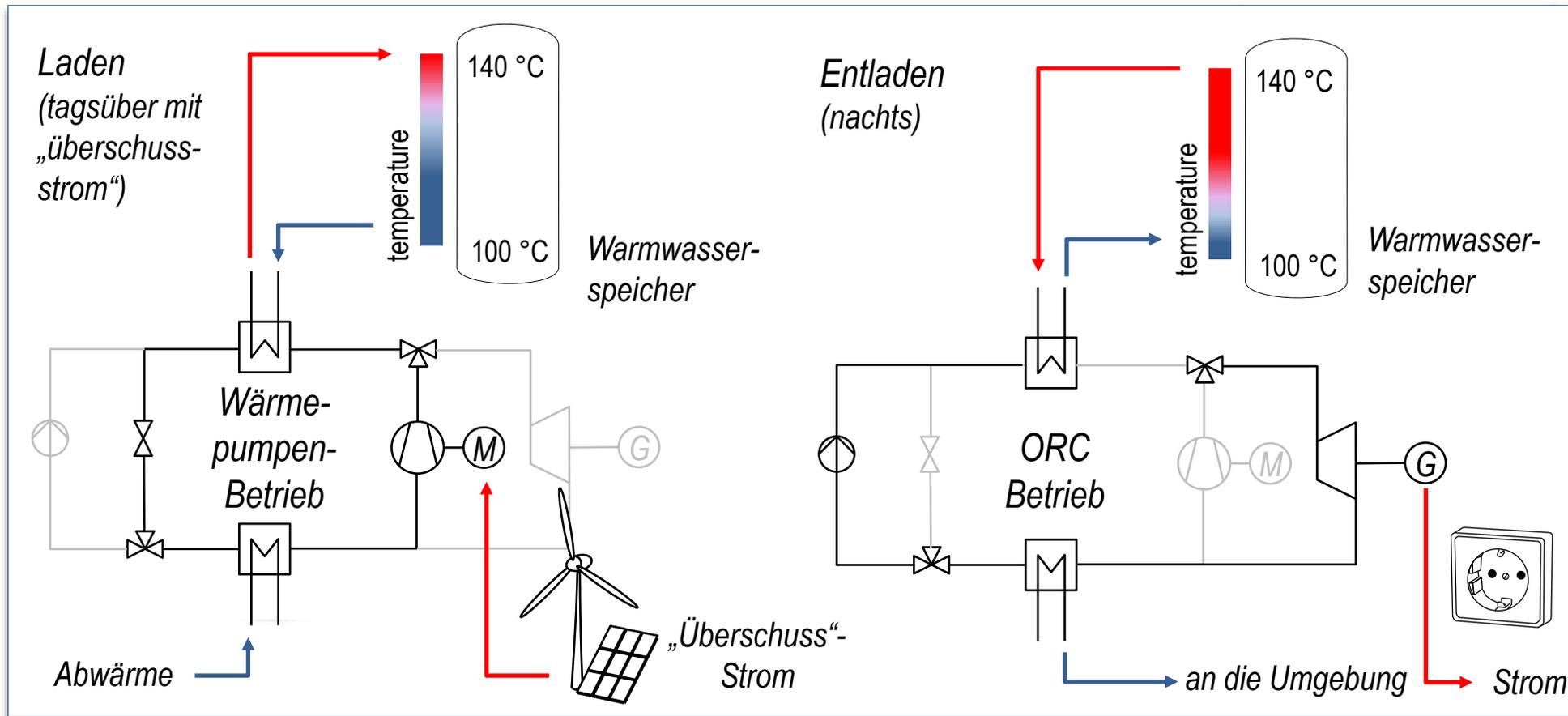
Optionen zur Kombination von Wärmepumpen und Speichern

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**

- Wärmewende
- Gibt's genug Stom?
- Ein bisschen Theorie
- Speicher mit Pumpe
- Fazit



Optionen zur Kombination von Wärmepumpen und Speichern

Wärmewende

Gibt's genug Stom?

Ein bisschen Theorie

Speicher mit Pumpe

Fazit



Carnot-Battery @ FAU

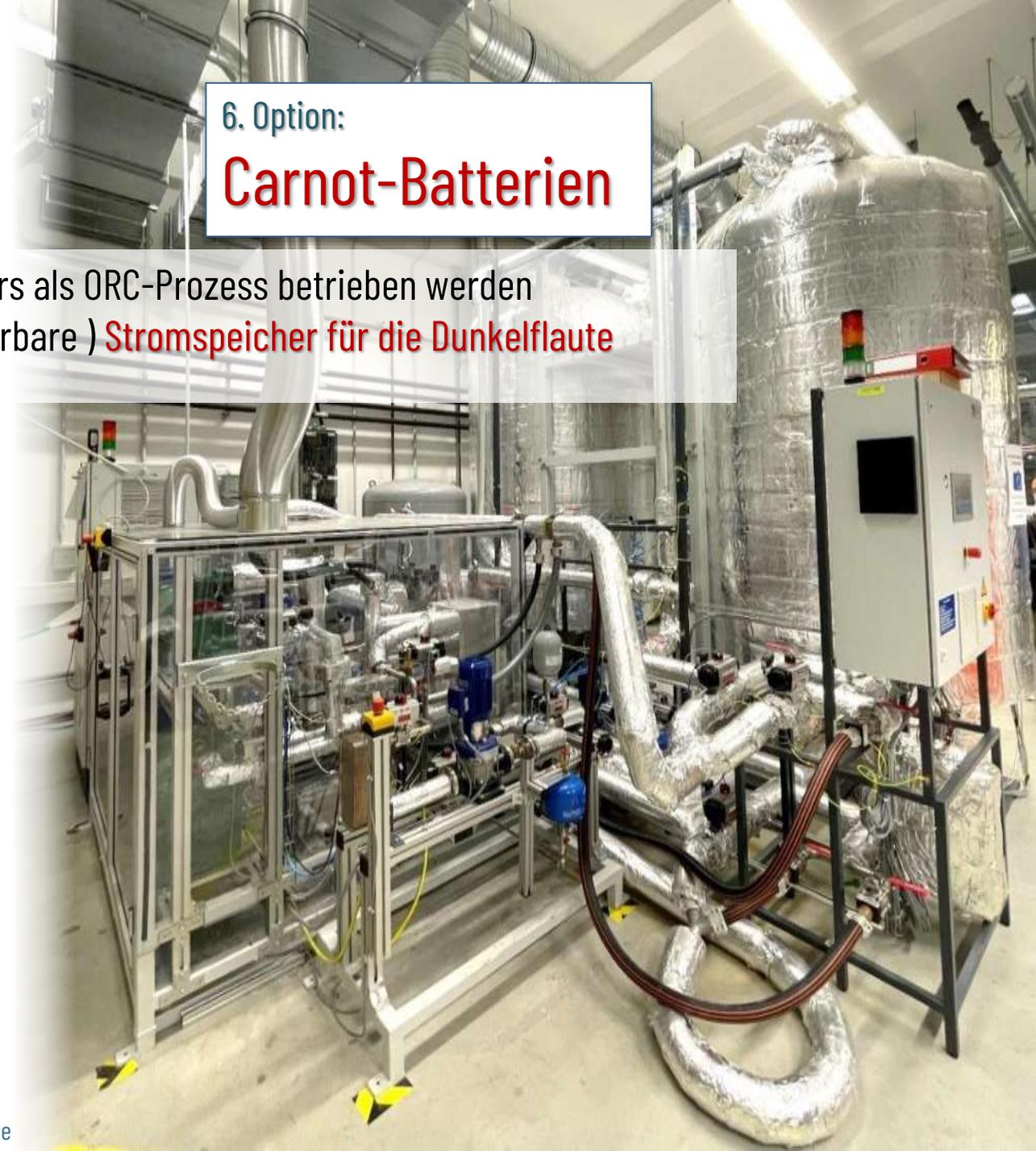
- reversibler Wärmepumpen-ORC-Prozess
15 kW_{el} (Wärmepumpe) bzw. 9 kW_{el} (ORC)
- zwei 4000 Liter Heißwasserspeicher
Speicherkapazität 270 kWh_{th}

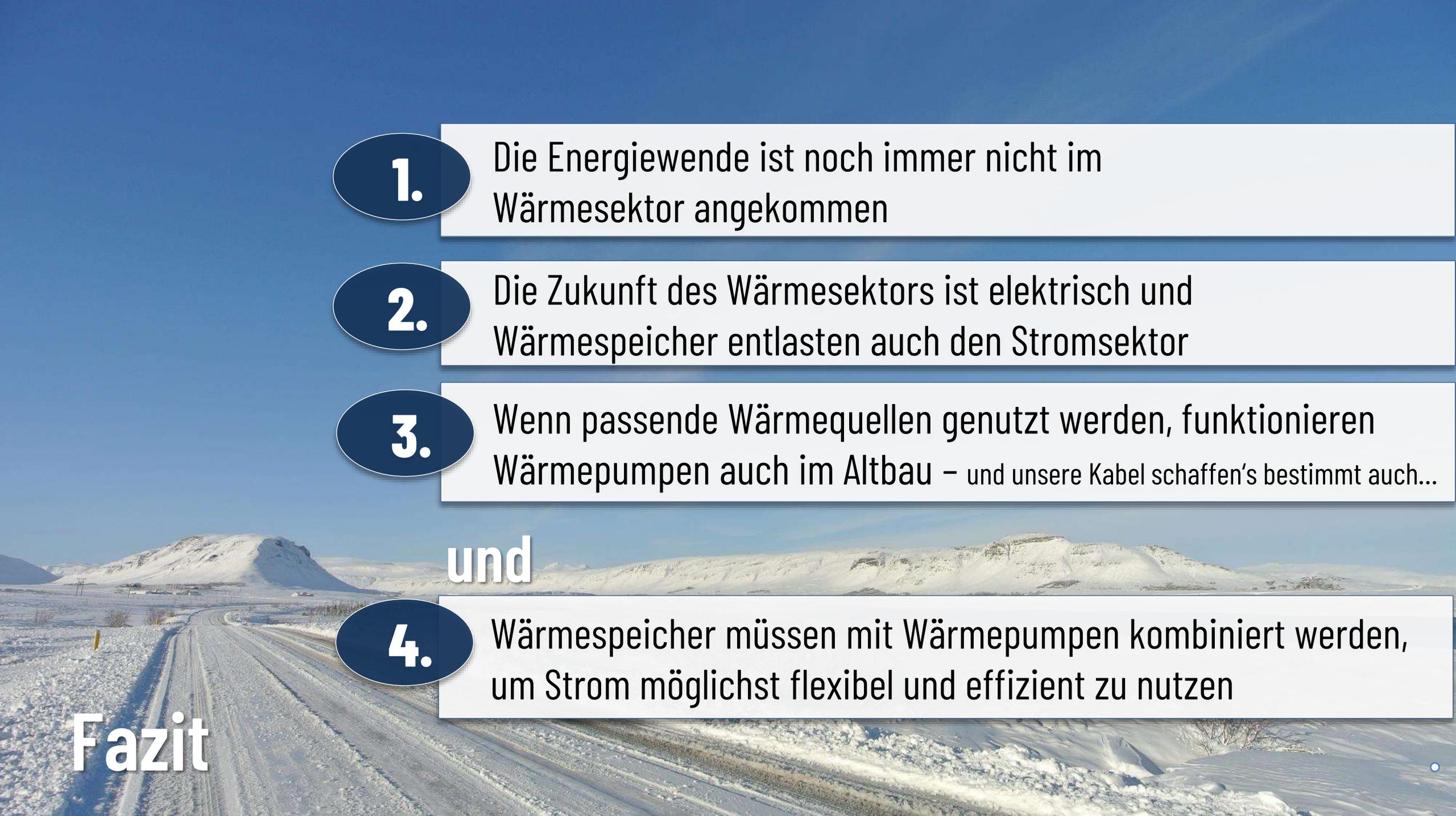
<https://youtu.be/2bGG58m8Jgs?t=10>

6. Option:

Carnot-Batterien

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





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