



Kurzbeschreibung

flexible renewable energy system: **power to cold**

Kälte- und Wärmeversorgung mit erneuerbaren Energien und einem Flüssigeis-Speicher

-

Pilotanlage zur Erzeugung und Speicherung eines Eis-Wasser-Gemisches

Hochschule für angewandte
Wissenschaften München

CENERGIE
Forschungsinstitut
für energieeffiziente
Gebäude und Quartiere

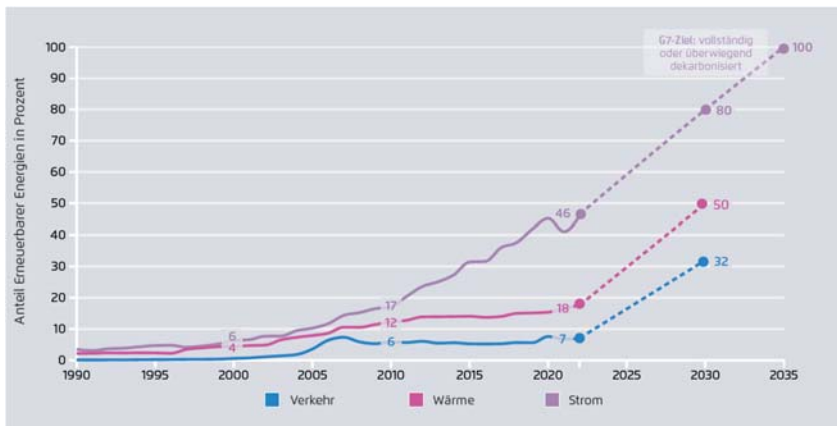
Lothstraße 34
D-80335 München

Prof. Dr.-Ing. Franz Josef Ziegler
Telefon +49 (0) 89 1265 - 1548
f.ziegler@hm.edu

Dr. Jürgen Meier
Telefon: +49 (0) 89 1265 - 1296
juegen.meier@hm.edu
Forschungsreferent

Dr. Holger Klos
Telefon: +49 (0) 89 1265 - 1810
holger.klos@hm.edu
Geschäftsleitung
CENERGIE

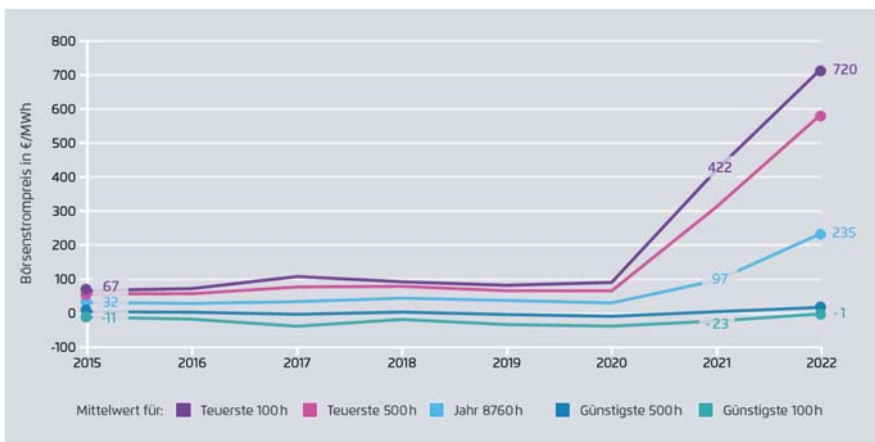
1. Problemstellung



[Quelle: Agora Energiewende (2023), Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023]

Abbildung 1: Anteil Erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch 1990 bis 2022 und Ziele für 2030 und 2035

Der Ausbau erneuerbarer Energien führt zu einer stark fluktuierenden Stromerzeugung und zu sehr hohen Preisschwankungen an der Strombörse. Speicher sind daher unverzichtbar im Energiesystem der Zukunft, um eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch zu erreichen. Neben den Stromspeichern bei PV-Anlagen oder Elektroautos können auch thermische Speicher in Gebäuden eine wichtige Rolle bei der Verschiebung der Stromnachfrage übernehmen.



[Quelle: Agora Energiewende (2023), Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023]

Abbildung 2: Teuerste und billigste Stunden an der Strombörse 2015 bis 2022 (EPEX, day-ahead, stündlich)

Seit 2020 ist die Volatilität der Preise an der Leipziger Strombörse (EEX) deutlich angestiegen. Der Mittelwert der teuersten 500 Stunden lag im Jahr 2022 nur knapp unter 600 €/MWh, der Mittelwert der günstigsten 500 Stunden lag nahe bei der Nulllinie. Für die Stromkosten ist künftig die Frage entscheidend:

„nicht wieviel Strom wird benötigt, sondern wann“.

Power-to-Cold-Anlagen ermöglichen die Umwandlung von regenerativ erzeugtem Strom in Kälteenergie und eine Lastverschiebung durch thermische Speicherung. Eisspeicher stellen unter allen Speichertechnologien die günstigste Energiespeicherung mit guten Wirkungsgraden und hohen Energiedichten dar.

2. Klimaneutrale Kälteerzeugung und -speicherung mit Flüssigeis

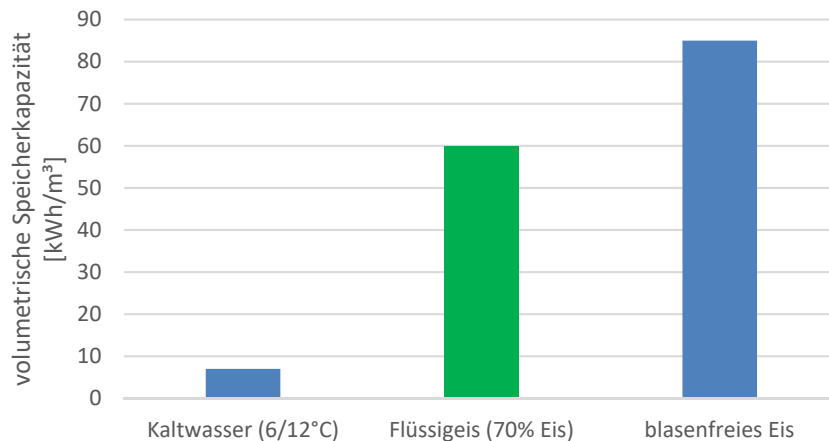


Abbildung 3: Volumetrische Speicherkapazität von Kältespeichern

In Kaltwasserspeichern (6/12 °C) können in einem Kubikmeter rund 7 kWh/m³ gespeichert werden, in Flüssigeis Speichern dagegen bis zu 60 kWh/m³.

An der Hochschule München wurde ein neues Verfahren zur Erzeugung und Speicherung von Flüssigeis entwickelt. Die Kälteerzeugung kann bei einem entsprechend dimensionierten Speicher ausschließlich in Zeiten von regenerativen Stromüberschüssen erfolgen.

Die Kälteanlage besteht im Wesentlichen aus einer Kompressionskältemaschine mit einem Luftkühler (Direktverdampfer mit Abtaueinrichtung), einem Ventilator, einer marktüblichen Schneelance und einem großen Eis-Wasser-Speicher. Mit der bei der Schneebildung freiwerdenden Wärmeenergie (Schmelzenthalpie) wird die am Luftkühler austretende Luft auf 0°C erwärmt und vom Ventilator wieder zum Luftkühler gefördert. Die wesentlichen Kenndaten der geplanten Pilotanlage sind in der nachfolgenden Abbildung angegeben.

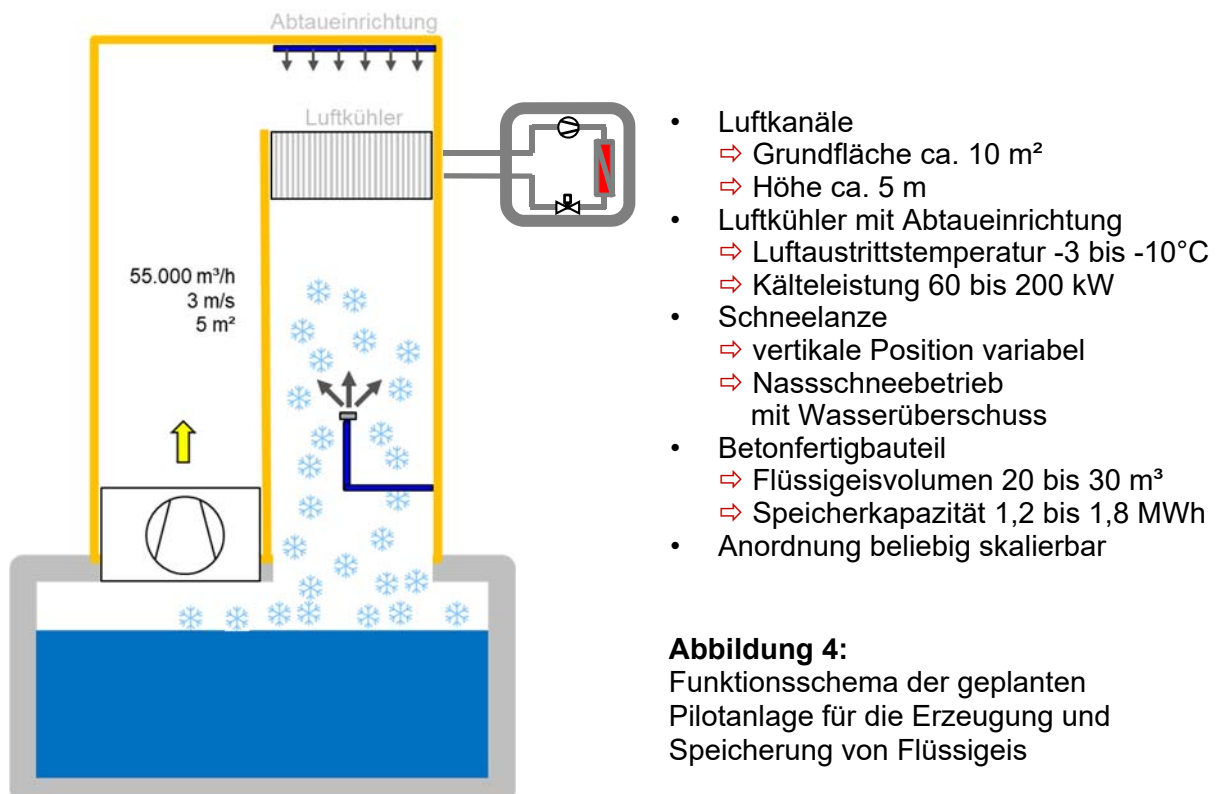


Abbildung 4: Funktionsschema der geplanten Pilotanlage für die Erzeugung und Speicherung von Flüssigeis

3. Heizen mit Eis – Nutzung von Gewässern als ganzjährige Wärmequelle

Wärmepumpensysteme sind für das Gelingen der Energiewende im Wärmesektor unverzichtbar. Aufgrund der geringeren Investitionskosten werden momentan überwiegend Wärmepumpen mit der Wärmequelle Luft eingesetzt. Die Effizienz sinkt jedoch bei niedrigen Lufttemperaturen, also gerade dann, wenn der Heizwärmebedarf ansteigt.

Oberflächengewässer mit Temperaturen im Winter nahe dem Gefrierpunkt werden bislang nicht als Wärmequelle für Wärmepumpen genutzt.

Mit dem innovativen Anlagenkonzept zur Flüssigeiserzeugung können natürliche oder künstliche Wasserreservoirs ganzjährig als Wärmequelle verwendet werden. Die Investitionskosten sind deutlich geringer als bei der Wärmequelle Erdreich.

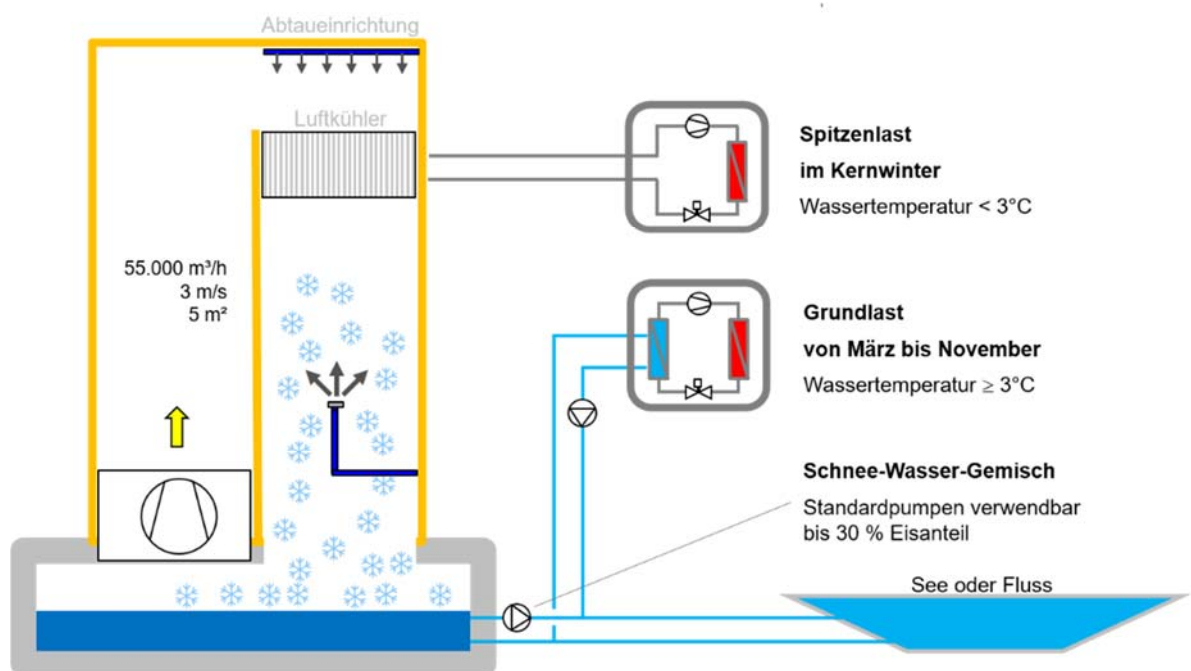


Abbildung 5: Wärmeversorgungskonzept für Gebäude und Quartiere mit Nutzung der Wärmequelle Oberflächenwasser

In der Übergangszeit bei Wassertemperaturen über 3°C kann die Grundlast-Wärmepumpe das Oberflächenwasser direkt als Wärmequelle verwenden, im Kernwinter wird die Spitzenlast der Wärmeerzeugung über die Wärmequelle Flüssigeis bereitgestellt. Das Schnee-Wasser-Gemisch kann bis zu einem Eisanteil von 30% mit Standard-Umwälzpumpen zum Gewässer zurückgeführt werden.

4. Wirtschaftlichkeit einer klimaneutralen Kälteversorgung mit einem Flüssigeis-Tagesspeicher

Ein Flüssigeis-Speicher ermöglicht die Nutzung von Stromüberschüssen aus erneuerbaren Energien und ist unter den folgenden zwei Voraussetzungen auch wirtschaftlich vorteilhaft:

- Niedrige Stromerzeugungskosten bei selbst genutzten PV-Anlagen
 - ⇒ Deutschland 40 bis 80 €/MWh
 - ⇒ südliche Klimaregionen 10 bis 40 €/MWh
- Kontinuierlicher Kältebedarf
 - ⇒ Deutschland Industriekälte, Lebensmittel, Rechenzentren
 - ⇒ südliche Klimaregionen 24 h Gebäudeklimatisierung

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeitsabschätzung für eine industrielle Kälteversorgung mit/ohne Flüssigeis-Tagesspeicher dargestellt.

Variante 1:	Standard-Kälteerzeugung	
	Nennkälteleistung	1000 kW
	Investitionskosten	250.000 €
	EER (Energy Efficiency Ratio)	3,04
Variante 2:	Klimaneutrale Kälteerzeugung mit Eisspeicher	
	Nennkälteleistung	1000 kW
	Flüssigeis-Tagesspeicher	200 m ³
	Maximale Speicherkapazität	12 MWh
	Investitionskosten	475.000 €
	EER (Energy Efficiency Ratio)	1,87

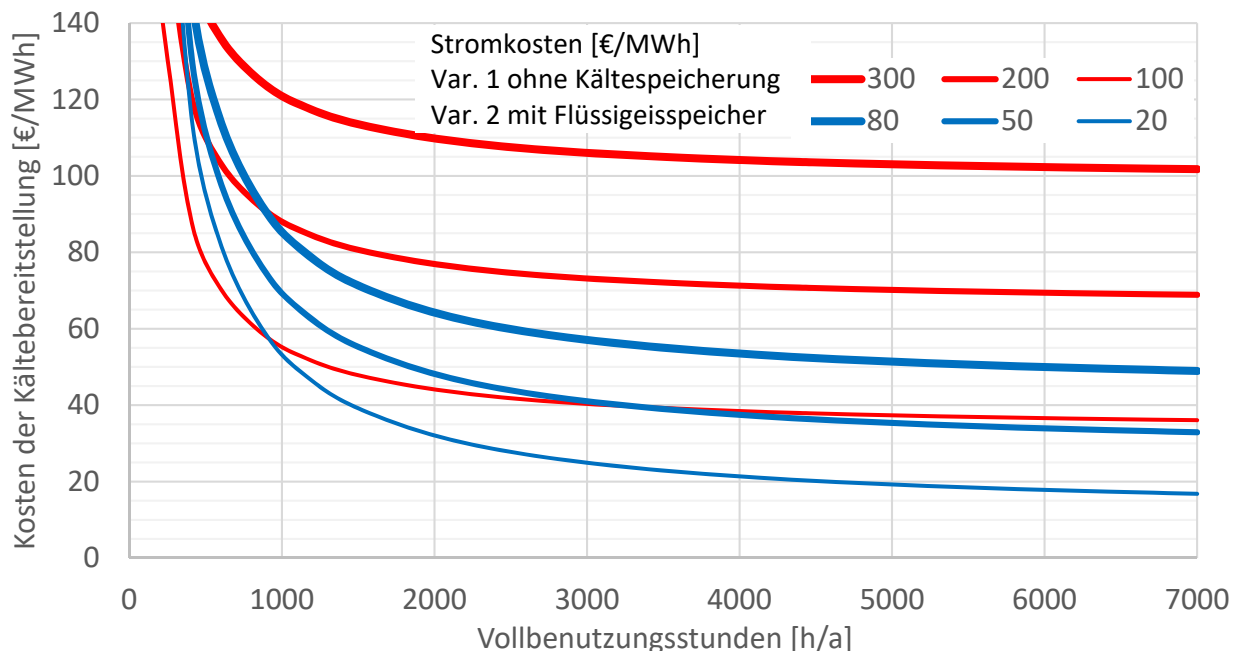


Abbildung 6: Kosten der klimaneutralen Kältebereitstellung (Variante 2) im Vergleich zu einer Standardanlage (Variante 1) in Abhängigkeit von den Stromkosten und den Vollbenutzungsstunden

In südlichen Klimaregionen mit geringen PV-Stromgestehungskosten und hohem Kältebedarf kann mit einem Flüssigeis-Tagesspeicher (Variante 2) ein ROI (return of investment) von über 40% erreicht werden.