

Sektorenkopplung über Wärmepumpen, Thermische Speicher

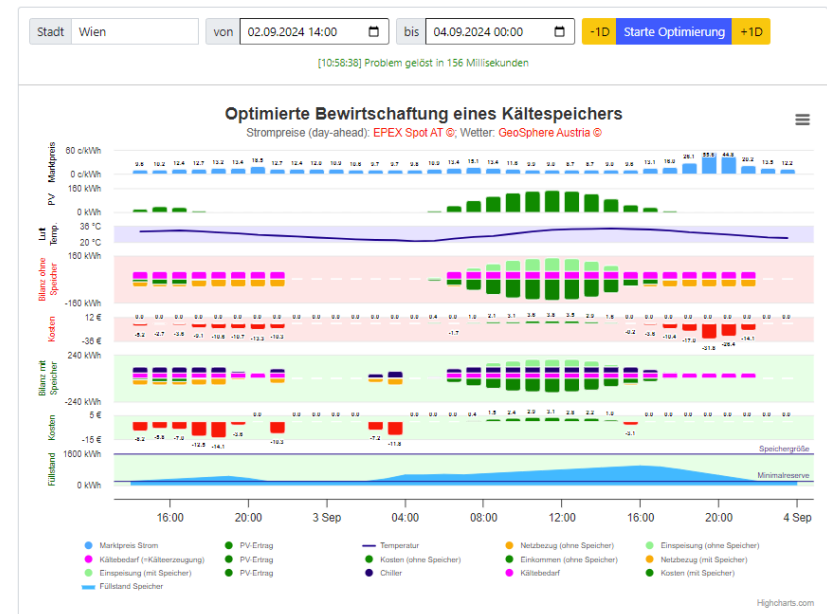
Thermische Speicher > Sektorenkopplung

Inhalt dieses Vortrags:

1. Speichertypen



2. Automatisierung



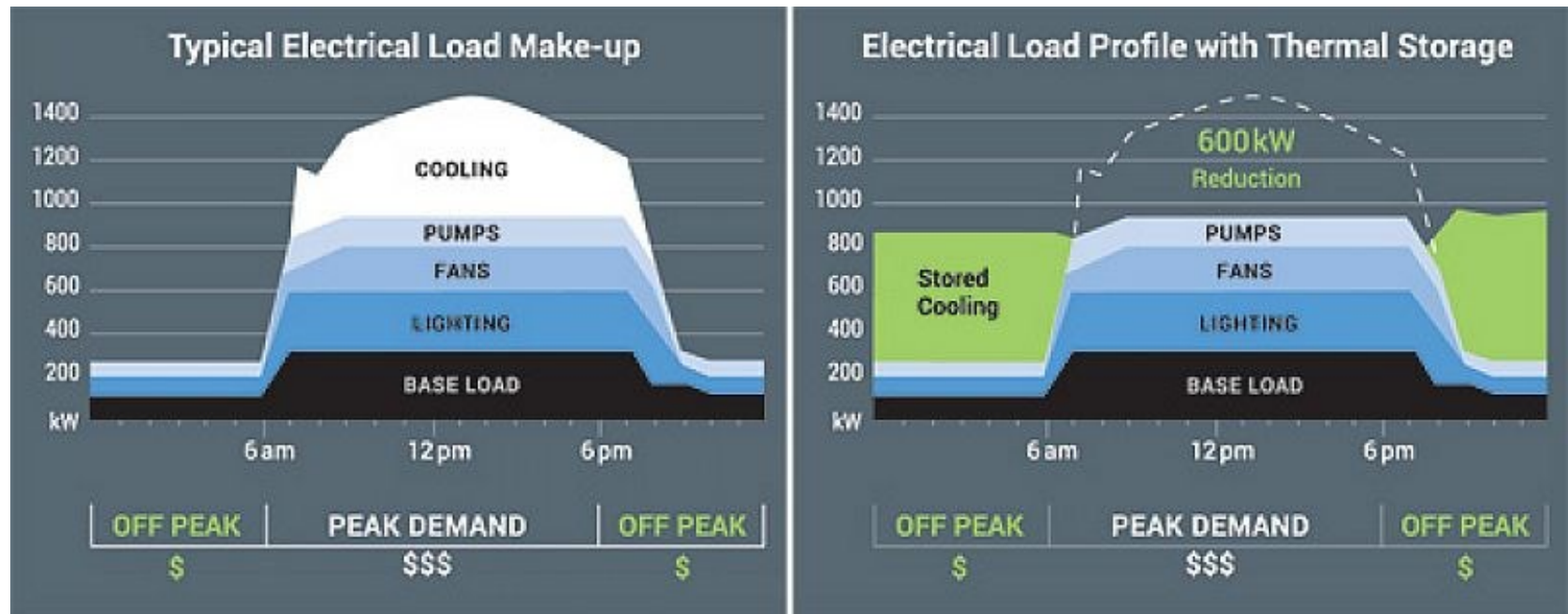
Beispiele für den Unterricht aus Informatik und Automatisierungstechnik → **Edge Computing**

<https://ihlt-project.at/threx/kaeltespeicher/>

Thermische Speicher > Sektorenkopplung

Kopplung der Sektoren Elektrizität und Wärme/Kälte

[uralte] Grundidee: Kostenreduktion bei der Erzeugung von Wärme/Kälte durch Verschiebung des Stromverbrauchs in lastschwache bzw. preisgünstige Zeiten → **Notwendigkeit für Speicher!**



In den USA sind thermische Speicher insbesondere bei der Fernkälte bereits jahrzehntelange Praxis!

[Video Fernkälte Chicago](#)

Thermische Speicher > Sektorenkopplung

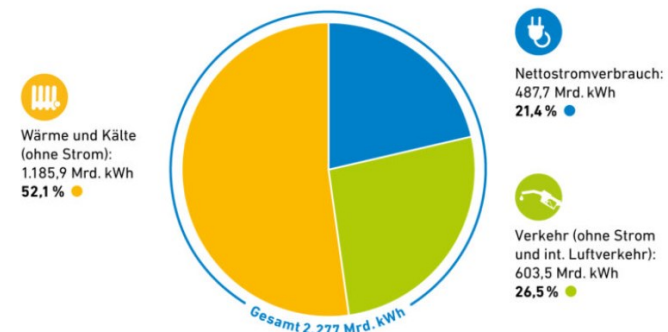
Vor- und Nachteile von thermischen Speichern

Vorteile

- Ein großer Anteil des **Gesamtenergieverbrauchs** ist ohnehin durch **Wärme/Kälte** gegeben → frühzeitige Umwandlung naheliegend
- Bei großen Energiemengen um mindestens eine **Zehnerpotenz günstiger** als z.B. elektrische Speicher (wg. Skalierungseffekten)
- Defacto **unbegrenzte Haltbarkeit** und Zyklenzahl
- **Verstärkungsfaktor** durch **Wärmepumpen: Arbeitszahlen > 3**
Abfackeln von Primärenergieträgern für Erzeugung von z.B. Raumwärme/Klimakälte generell fragwürdig

Nachteile

- Relativ **geringe Energiedichte** (mit Ausnahme PCM)
- Nach der Umwandlung in Wärme/Kälte ist Energie **nicht mehr flexibel** einsetzbar (z.B. im Vergleich zu Wasserstoff)
- Nur mittelmäßige Fähigkeiten im Hinblick auf Langzeitspeicherung



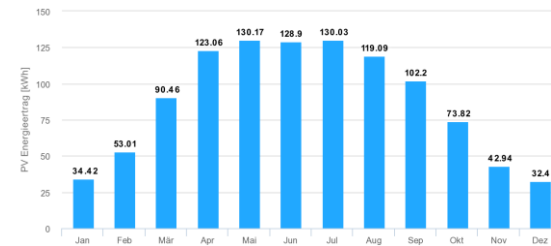
Thermische Speicher > Sektorenkopplung

Wärme vs. Kälte im Hinblick auf ihre Eignung für die Sektorenkopplung

- Insbesondere **PV-Erträge** passen saisonal hervorragend mit Kältebedarf für die Klimatisierung von Wohn- und Objektbauten bzw. Prozesskälte zusammen
- Aufgrund der hohen Schmelzenthalpie von **Wasser/Eis** steht ein preisgünstiges, überall verfügbares und energiedichtes Speichermedium zur Verfügung

and the he winner is ... COLD STORAGE

- Wegen der geringen Speicherkosten ist in vielen Fällen ist aber **auch** die **Wärmespeicherung** sinnvoll!



Thermische Speicher > Eisspeicher

Marktgängige Eisspeichersysteme



Viessmann/Isocal:
Betonzisternen mit PE-Rohren



Speichermedium: Wasser

Wärmeträger: Glykol



Calmac/Trane: Einfach zu Batterien verschaltbare Kunststofftanks



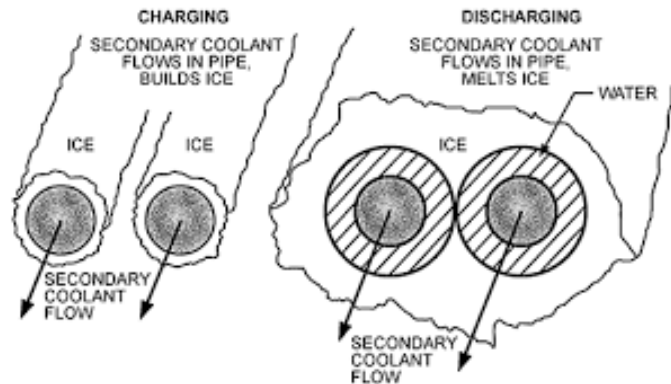
EVAPCO/BAC: Wärmetauscher auf Stahlrohrbasis, Fernkältesysteme

Thermische Speicher > Eisspeicher

Grundsätzliche Eisspeicher-Typen

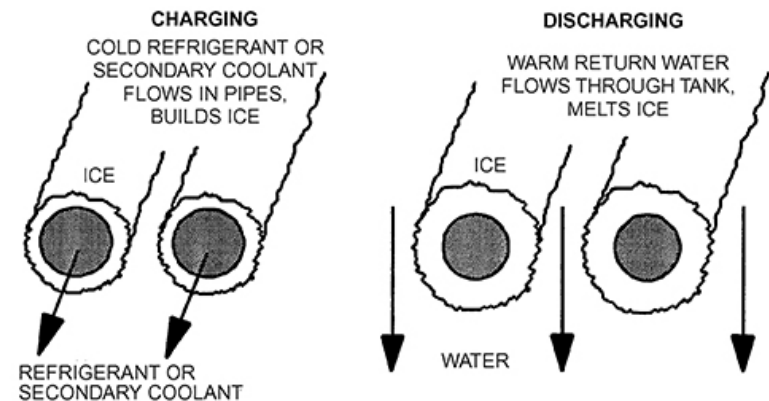
Internal Melt

- Wärmeträger für Laden und Entladen: **Glykol**
- Einsatzgebiete: Klimatisierung, Prozesskälte mit ausgeglichenem Lastgang



External Melt

- Wärmeträger für Laden **Glykol**, für Entladen **Wasser**
- Einsatzgebiete: Prozesskälte mit großen Leistungsspitzen



Thermischer Speicher > Eisspeicher

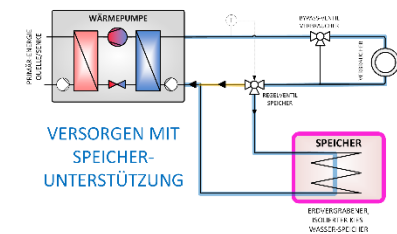
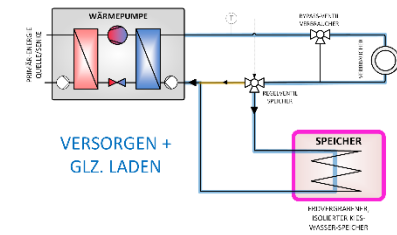
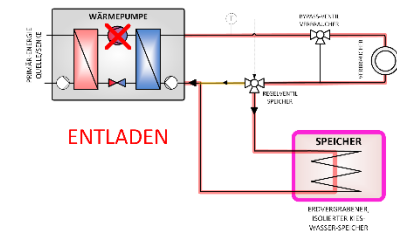
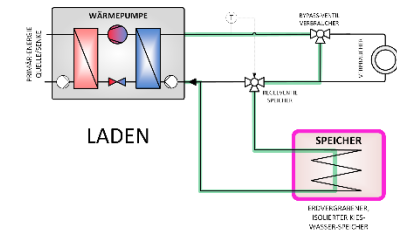
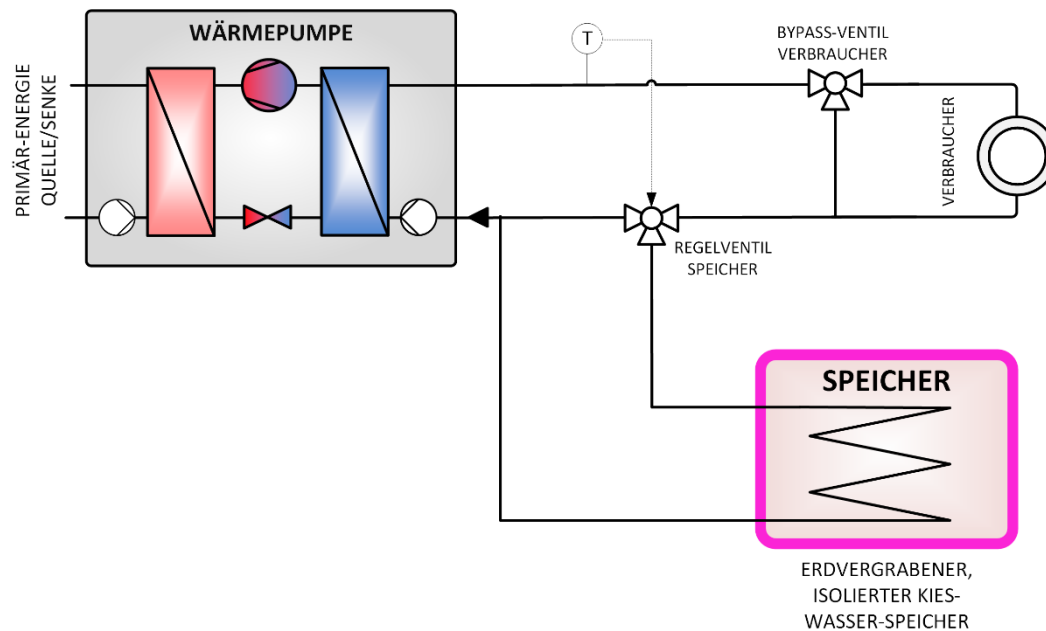
Der Wasser-Kies-Eisspeicher (WEK-Store)



- Speicher: Wassergesättigte Kies-Wasser-Matrix
- Rundkies mit einer Körnung von 4-8 mm;
Porosität: 40% (→ Wasser)
- Wärmetauscherrohre aus PE-HD oder PEXa in mehreren horizontalen Schichten
- PE-HD-Folie zur Abdichtung des Speichers gegen Erdreich oder Isolierung (XPS) ab
- Einfacher und kostengünstiger Bau:
mechanische Belastungen der Wärmetauscherrohre werden vom Kies übernommen
- Böschung 45°, daher keine Pölung notwendig
- Hervorragende Wärmeleitung der Kies-Wasser-Matrix → Entkopplung von Leistung und Energie
- Oberflächen auch problemlos versiegelbar (Parkplätze, etc.)

Thermische Speicher > Eisspeicher

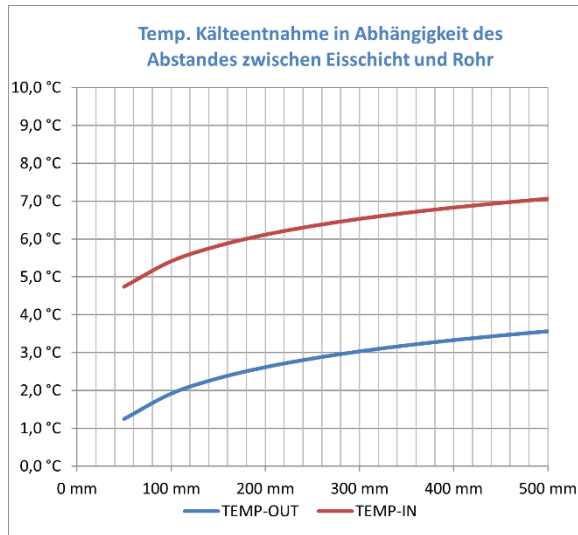
Hydraulische Einbindung eines Eisspeichers



Thermische Speicher > Eisspeicher > Kies-Wasser-Speicher

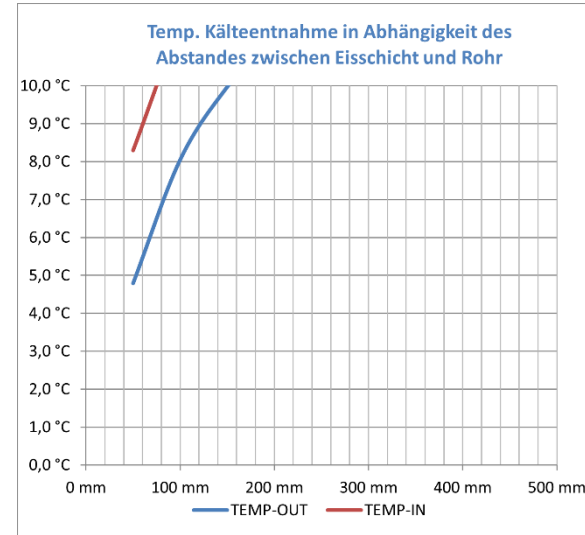
Entkopplung von Leistung und Energie beim Kies-Wasser-Speicher

Wasser-Eis-Kies-Speicher ($\lambda=2.2 \text{ W/Km}$)

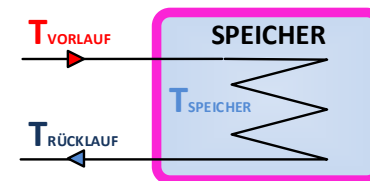


$$P_{TH} = \text{const.}$$
$$\Delta T = \text{const.}$$

Wasser-Eis-Speicher ($\lambda=0.5 \text{ W/Km}$)



Durch die bessere Wärmeleitfähigkeit der Kies-Wasser-Matrix kann die gespeicherte Kälte **aus wesentlich größeren Entfernungen** an das Wärmetauscherrohr weitergeleitet werden!



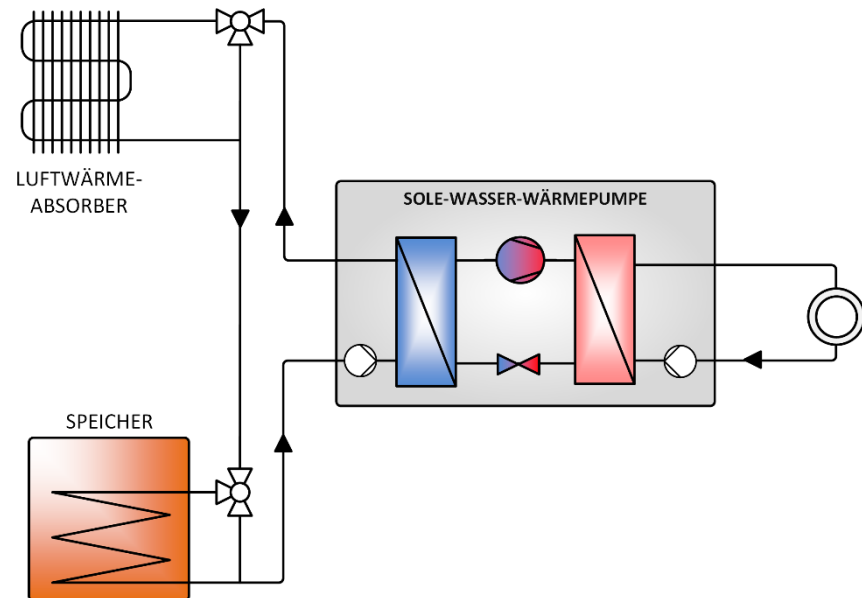
Thermische Speicher > Eisspeicher

Kies-Wasser-Speicher für Heizwärmepumpen



Reduktion des Flächenbedarf : > 90%

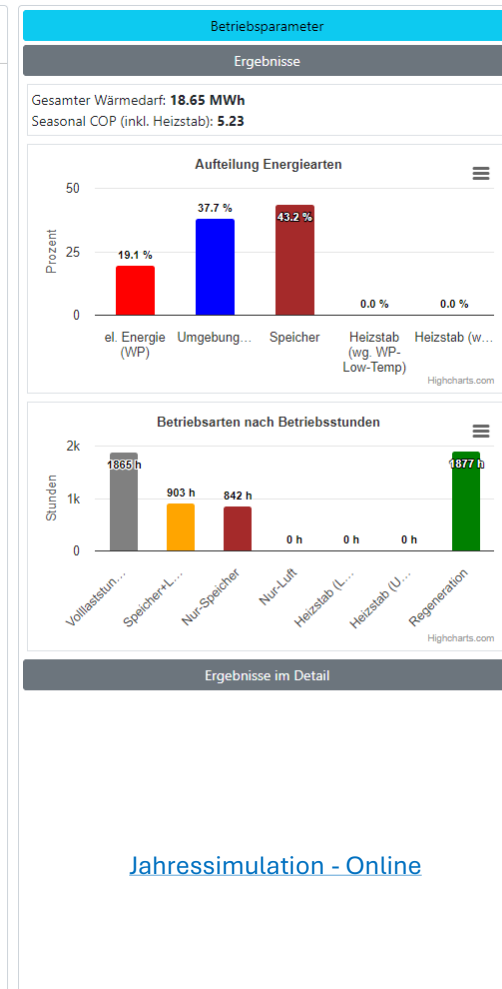
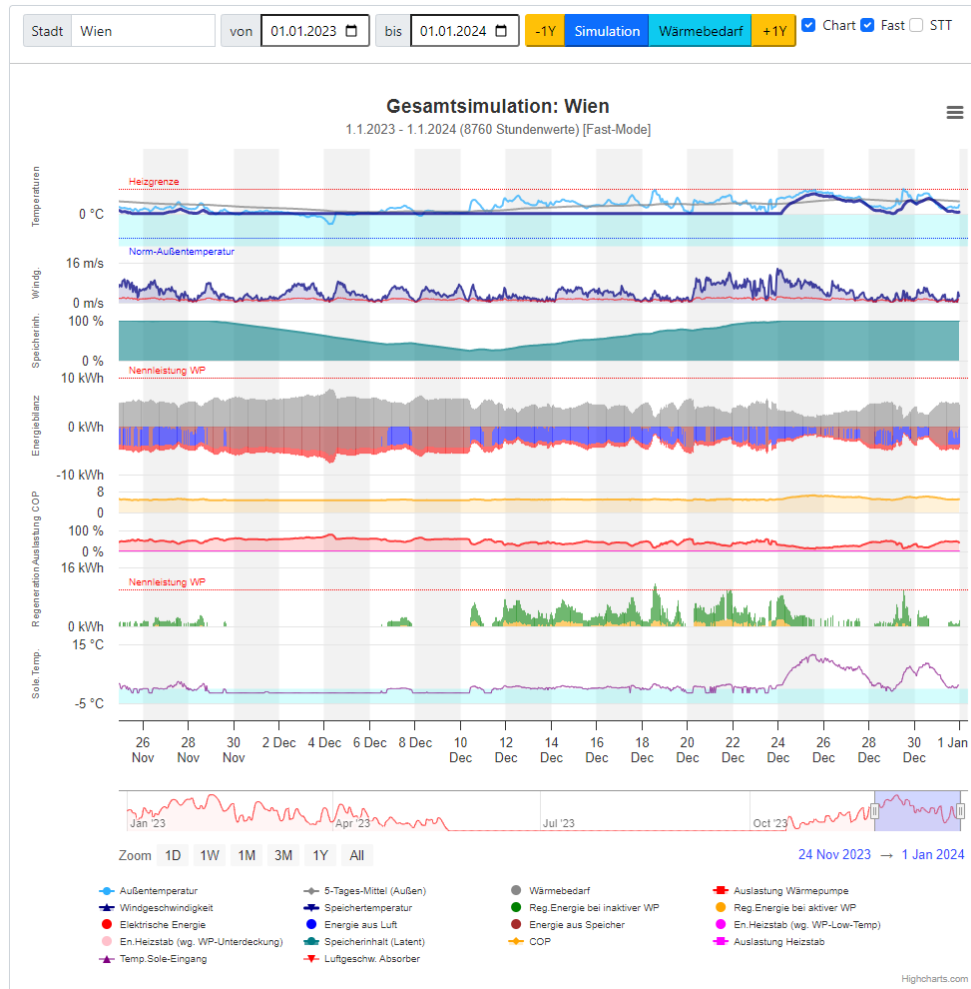
Speicher im **Primärkreis** einer
Sole-Wasser-Wärmepumpe



Intrasaisonale Regeneration des Speichers
durch einen **Luftwärme-Absorber**

Thermische Speicher > Kies-Wasser-Speicher im Primärkreis einer WP

Jahressimulation – auf der Basis von Daten der GeoSphere Austria



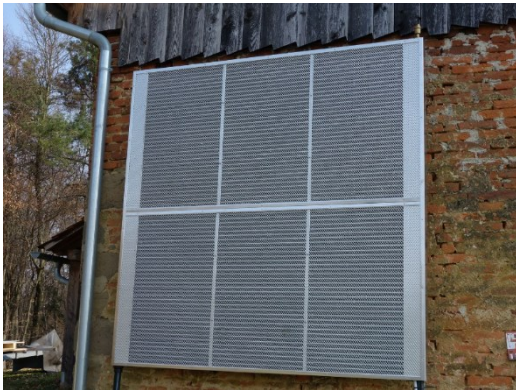
[Jahressimulation - Online](#)

Thermische Speicher > Eisspeicher > Kies-Wasser-Speicher

Ausführungsvarianten



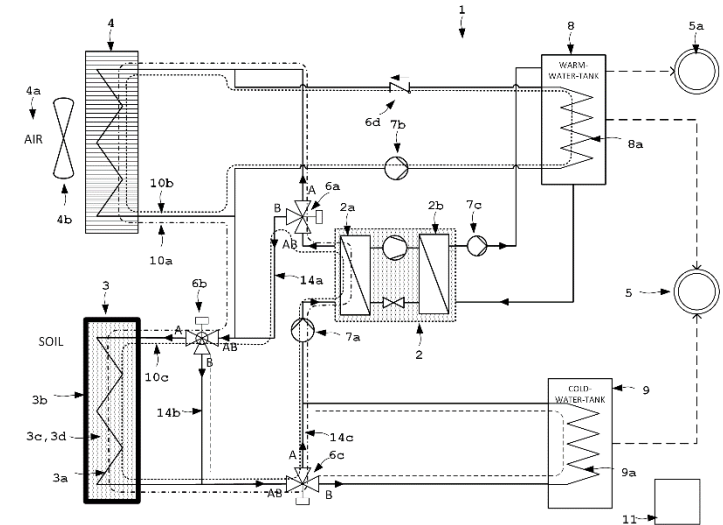
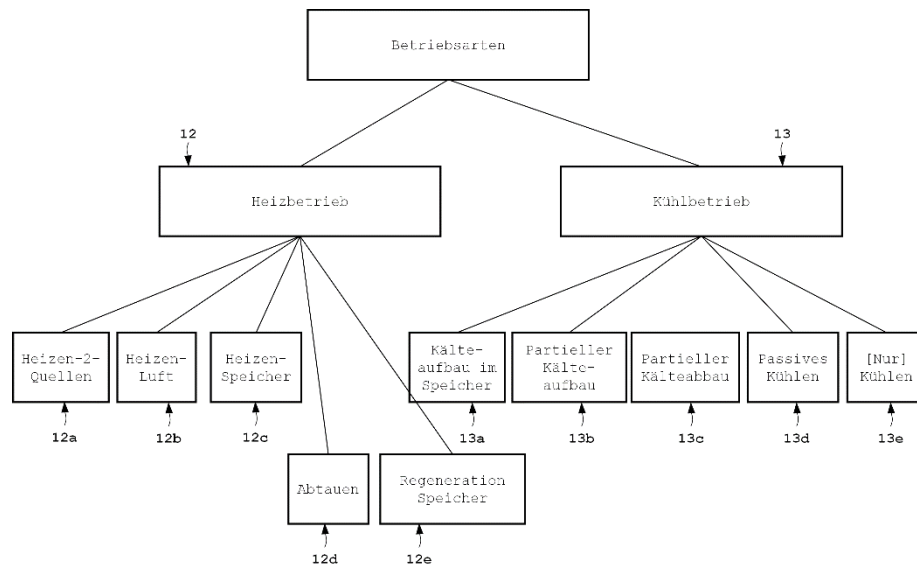
Speicher



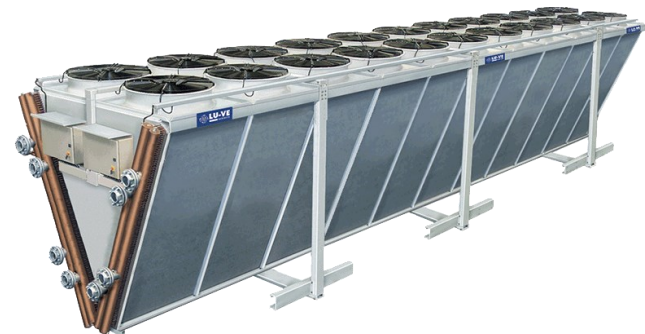
Luftwärme-Absorber

Thermische Speicher > Eisspeicher

Kombinierte Heiz- und Kühlanwendung für große Leistungen

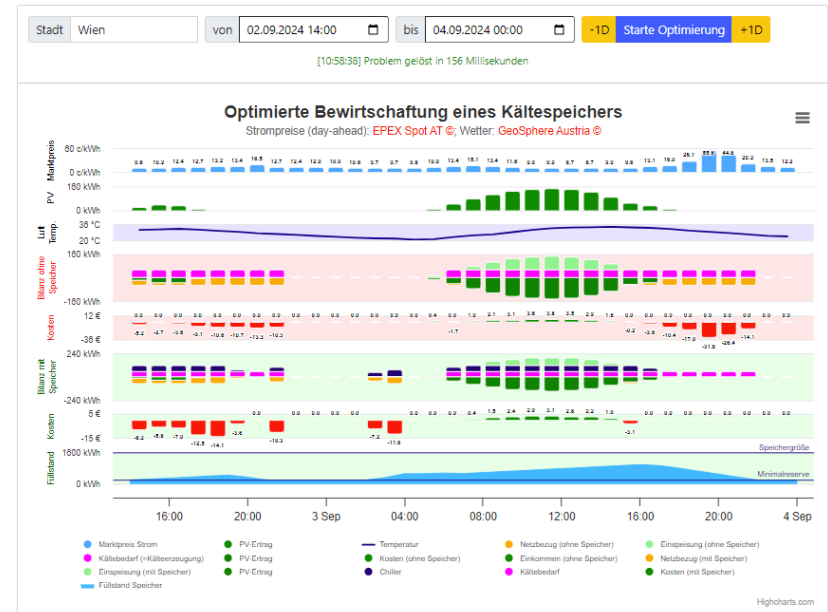
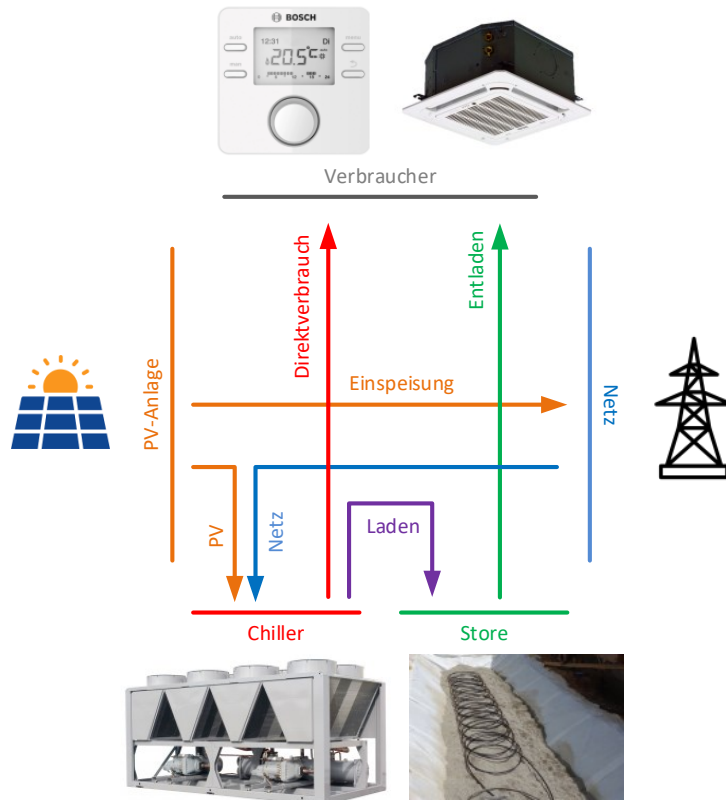


- **Heizbetrieb:** Speicher arbeitet unterstützend im Primärkreis der WP
- **Kühlbetrieb:** Speicher arbeitet direkt als Kältespeicher im Verbraucherkreis



Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept

Problemstellung: WHEN do WHAT?



Optimierung eines Kältespeichers - Live

Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept > Optimierung

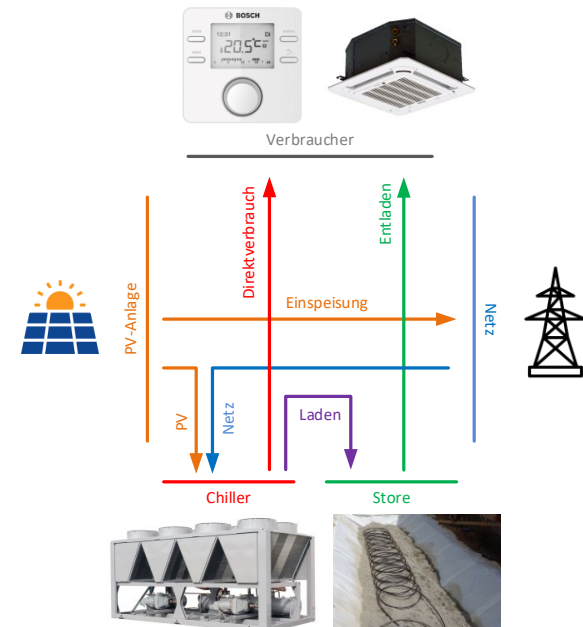
Problemstellung

- Kältebedarf der Verbraucher ist gegeben. Zur Erzeugung der Kälte steht eine **Kältemaschine**, für ihre Pufferung ein **Kältespeicher** zur Verfügung.
- **Stromkosten** sind **variabel**. Die Marktpreise stehen über EPEX Spot AT ab 14:00 für den darauffolgenden Tag zur Verfügung. Der Prognosehorizont beträgt damit **34 Stunden**.
- Es steht eine **PV-Anlage** zur Verfügung, deren Erträge über die Daten der **GeoSphere Austria** prognostiziert werden können. Der Prognosehorizont beträgt **60 Stunden**.

- **Zielfunktion:** Berechne die Laufzeiten der Kältemaschine so, dass über die **nächsten 34 Stunden** der Kältebedarf jederzeit abgedeckt ist und insgesamt ein **Kostenminimum** erzielt wird!

$$\sum_{k=1}^n \text{KostenAusBezug}(k) - \text{EinnahmenAusEinspeisung}(k) = \text{MIN}$$

- **Nebenbedingungen:**
 - **Kältebedarf** des Verbrauchers jederzeit gedeckt
 - **Energiebilanz** jederzeit erfüllt
 - aus Gründen der **Betriebssicherheit** jederzeit **Minimalreserve**, ...

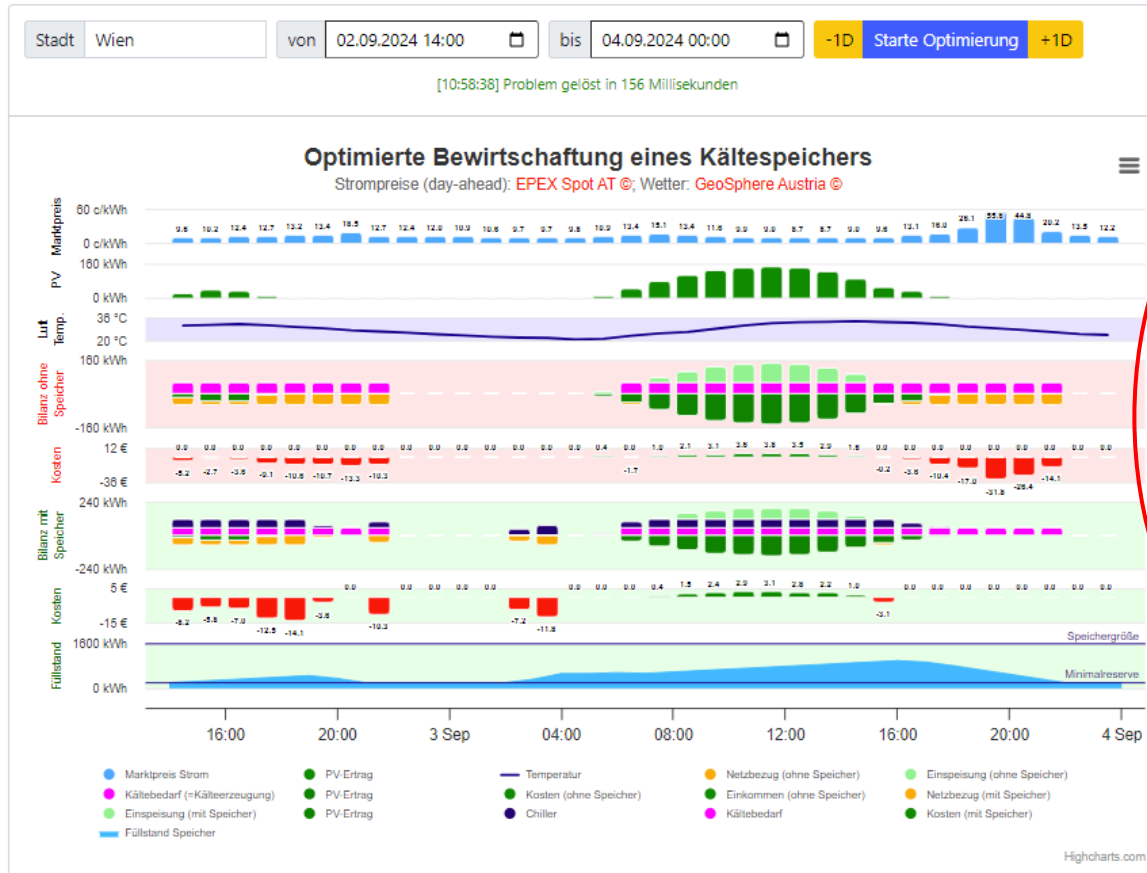


Optimierung eines Kältespeichers - Live

Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept

Kostenoptimierter Betrieb - Parameter

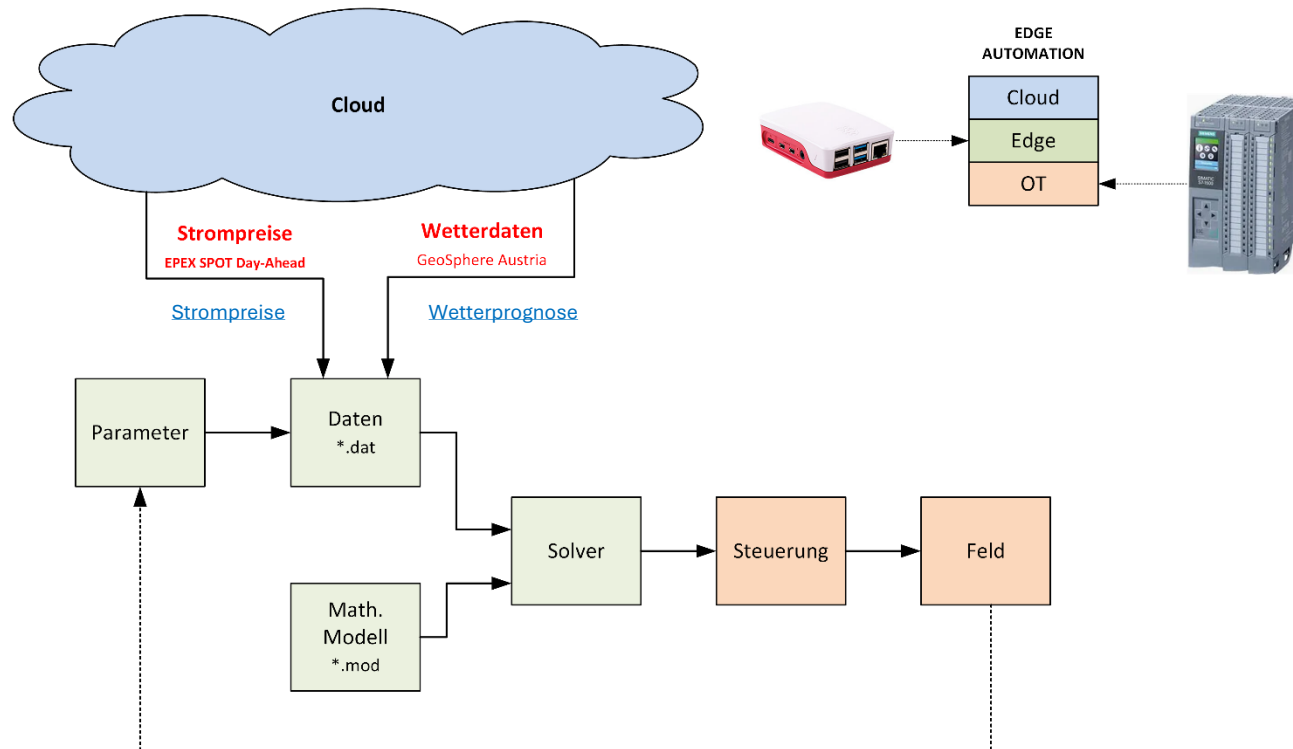
Optimierung eines Kältespeichers - Live



Parameter	
Eco-Fit	
$P_{CHILLER}$	200 kW_{TH} Thermische Nennleistung der Kälteanlage
P_{LOAD}	150 kW_{TH} Kälteverbrauch in den Laststunden
P_{PEAK}	200 kW Photovoltaik Peak-Leistung
EER	3 - Arbeitszahl der Kälteanlage
T_{START}	6 - Startzeit der Last, z.B. 6 => 06:00
T_{STOP}	22 - Endzeit der Last, z.B. 22 => 22:00
$STORE_{SIZE}$	1600 kWh_{TH} Energieinhalt Speicher Nenngröße
$STORE_{MIN}$	200 kWh_{TH} Energieinhalt Speicher unterer Grenzwert
$STORE_0$	200 kWh_{TH} Energieinhalt Speicher Startwert
$STORE_N$	200 kWh_{TH} Energieinhalt Speicher Min. Endwert
C_{GRID}	8 c/kWh Netztarif (Bezug)
C_{FEEDIN}	4 c/kWh Einspeisetarif
$T_{SOLVER,MAX}$	5 sec Maximale Solverzeit
Ergebnisse	
C_{STD}	170,7 € Kosten ohne Optimierung
C_{OPT}	67,22 € Kosten mit Optimierung
C_{SAV}	103,48 € absolute Einsparung
P_{SAV}	60,62 % prozentuelle Einsparung
Some special days ...	
2024-06-25 2024-07-05 2024-09-02	

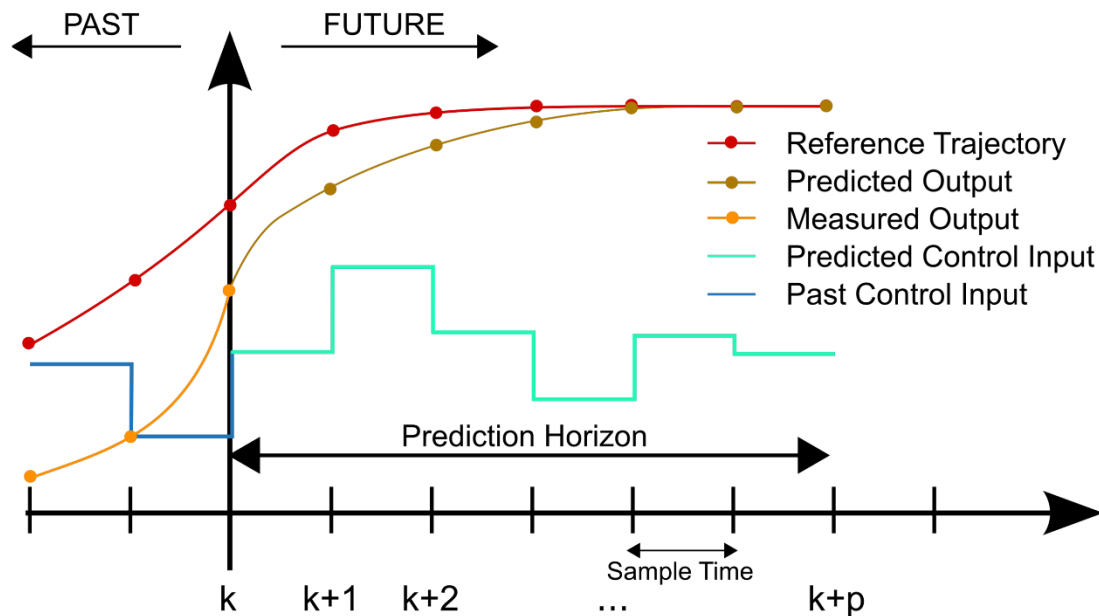
Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept

Automatisierungskonzept – „Edge-Computing“



Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept

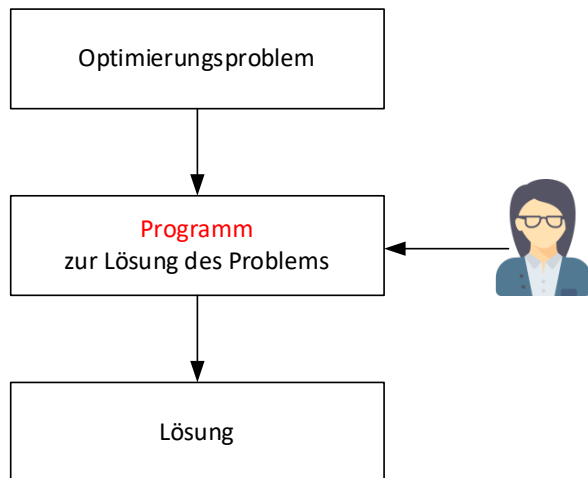
Grundsätzlicher Lösungsansatz: Modellprädiktiver Regler (MPC)



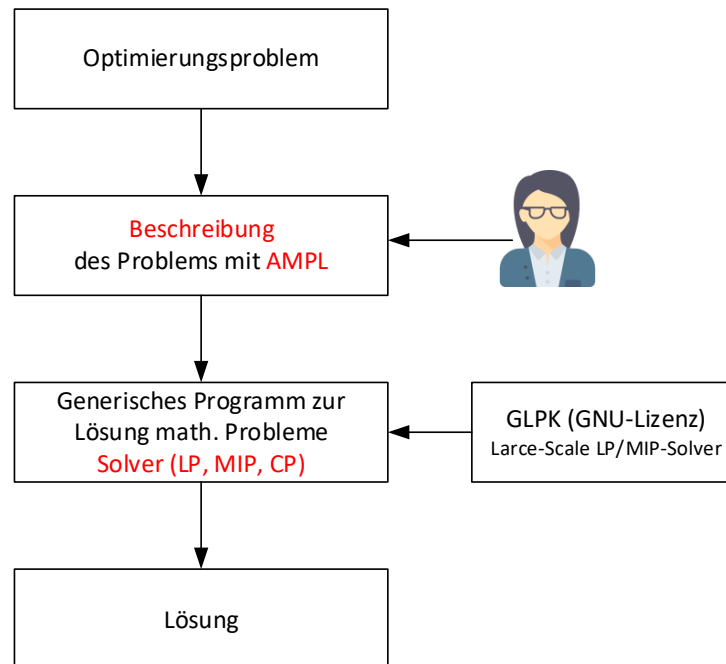
Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept

Lösung von Optimierungsproblemen

Klassische Programmierung



Lineare Programmierung



Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept > Optimierung

Das Kältespeicherproblem in AMPL (*.mod)

```
#####
### Parameter
#####

param N;
param P_LOAD;      # Leistung Chiller in kW
param P_CHILLER;    # Leistung Last in kW
param STORE_SIZE;   # Speichergröße in kWh
param STORE_MIN;    # min. Speicherinhalt in kWh
param STORE_0;      # Startwert Speicherinhalt in kWh
param STORE_N;      # Min. Speicherinhalt in kWh am Ende
param C_GRID;       # Netztarif in Eurocent
param C_FEEDIN;     # Einspeisetarif in Eurocent
param EER;          # Arbeitszahl CHILLER

set PARAM_VALS;     # Array mit Marktpreis, Last, PV-Erträge

param params {1..N, PARAM_VALS};

#####
### Variable
#####

var p_feedin {t in 1..N} >=0;    # Einspeisung
var p_grid {t in 1..N} >=0;      # Netzbezug
var p_chiller {t in 1..N} >=0;   # Chiller
var c_feedin {t in 1..N} >= 0;   # Einnahmen aus Einspeisung
var c_grid {t in 1..N} >= 0;     # Kosten aus Netzbezug
var store {t in 0..N} >= 0;      # Speicherinhalt

var z{t in 1..N},binary; #1:Netzbezug, 0:Einspeisung

#####
### Zielfunktion
#####
minimize cost: sum{t in 1..N} (c_grid[t] - c_feedin[t]);
```

```
#####
### Nebenbedingungen (Constraints)
#####

# Einnahmen aus Einspeisung
subject to c1{t in 1..N}: c_feedin[t] = C_FEEDIN * p_feedin[t];
# Kosten aus Strombezug
subject to c2{t in 1..N}:
    c_grid[t] = (params[t,"price"] + C_GRID) * p_grid[t];

# Bilanz THERMISCH + Speicher
subject to b_th {t in 1..N}: 0 =
    + p_chiller[t]          # Kälterzeugung
    - params[t,"load"]      # Kälteverbrauch
    + store[t-1]            # Rest aus Speicherveränderung
    - store[t];

# Einhaltung von Grenzwerten
subject to c3a: store[0] = STORE_0/EER;
subject to c3b: store[N] >= STORE_N/EER;
subject to c5 {t in 1..N}: store[t] >= STORE_MIN/EER;
subject to c6 {t in 1..N}: store[t] <= STORE_SIZE/EER;

# Bilanz ELEKTRISCH
subject to b_el {t in 1..N}: 0 =
    + p_grid[t]             # Netzbezug
    + params[t,"pv"]        # PV-Erträge
    - p_chiller[t]          # Verbrauch Chiller
    - p_feedin[t];          # etwaige Einspeisung

subject to c8 {t in 1..N}: p_feedin[t] <= params[t,"pv"];
subject to c9{t in 1..N}: p_chiller[t] <= P_CHILLER/EER;

# entweder NETZBEZUG ODER EINSPEISEN 0, never both ...
subject to c10 {t in 1..N}:p_grid[t] <= z[t] * P_CHILLER/EER;
subject to c11 {t in 1..N}:p_feedin[t] <= (1 -z [t]) * params[t,"pv"];
```

Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept > Optimierung

Die Daten in AMPL (*.dat)

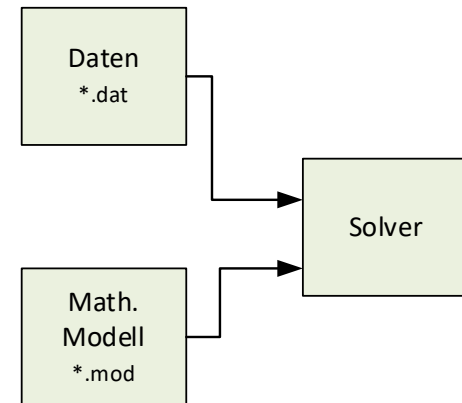
data;

```
param P_CHILLER:= 200.000000;  
param P_LOAD:= 150.000000;  
param EER:= 3.000000;  
param STORE_SIZE:= 1600.000000;  
param STORE_MIN:= 200.000000;  
param STORE_0:= 200.000000;  
param STORE_N:= 200.000000;  
param C_GRID:= 8.000000;  
param C_FEEDIN:= 4.000000;  
param N:= 34;
```

```
set PARAM_VALS := price load pv;  
param params[*,*]:
```

	price	load	pv :=
1	7.765000	50.000000	17.376000
2	8.047000	50.000000	4.010000
3	7.844000	50.000000	4.088000
4	10.642000	50.000000	0.000000
5	14.176000	50.000000	0.000000
6	25.615000	50.000000	0.000000
7	22.235000	50.000000	0.000000
8	12.027000	50.000000	0.000000
....			
32	8.457000	50.000000	0.000000
33	7.939000	0.000000	0.000000
34	6.173000	0.000000	0.000000;

end;



```
glpsol -m math.mod -d data.dat
```


Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept > Optimierung

Die Beschaffung der Daten: REST-APIs

dataset.api.hub.geosphere.at/v1/timeseries/historical/inca-v1-1h-1km?parameters=GL¶meters=T2M&start=2024-09-18T14:00&end=2024-09-19T00:00

Quelltextformatierung ☒

```
{
  "media_type": "application/json",
  "type": "FeatureCollection",
  "version": "v1",
  "timestamps": [
    "2024-09-18T14:00+00:00",
    "2024-09-18T15:00+00:00",
    "2024-09-18T16:00+00:00",
    "2024-09-18T17:00+00:00",
    "2024-09-18T18:00+00:00",
    "2024-09-18T19:00+00:00",
    "2024-09-18T20:00+00:00",
    "2024-09-18T21:00+00:00",
    "2024-09-18T22:00+00:00",
    "2024-09-18T23:00+00:00",
    "2024-09-19T00:00+00:00"
  ],
  "features": [
    {
      "type": "Feature",
      "geometry": {
        "type": "Point",
        "coordinates": [15.9873352050781, 46.6855583190918]
      },
      "properties": {
        "parameters": {
          "GL": {
            "name": "global radiation",
            "unit": "W m-2",
            "data": [432.08, 277.81, 124.91, 0.18, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
          },
          "T2M": {
            "name": "air temperature",
            "unit": "degree_Celsius",
            "data": [20.27, 20.36, 19.86, 18.54, 17.72, 17.18, 16.45, 15.78, 15.26, 14.88, 14.77]
          }
        }
      }
    }
  ]
}
```

REST-Architektur (nach Roy Fielding)

- **Ressourcen** statt Befehle
- Zustandslos (kein Verbindungsaufbau zwischen Server und Client notwendig)
- Einfacher Datenaustausch über die Standardmechanismen des HTTP-Protokolls (GET, PUT, ...)
- Serverseitiges Caching zur Verringerung von Latenzzeiten, ...

Beispielanfrage

dataset.api.hub.geosphere.at/v1/timeseries/forecast/nwp-v1-1h-2500m?parameters=t2m&lat_lon=46.688679,15.990256

[API-Dokumentation GeoSphere Austria](#)

Sektorenkopplung > Automatisierungskonzept > Edge-Geräte

Siemens SIMATIC IoT2050, Raspberry PI, ...



Edge-Controller:

- **Linux-Debian-basiert** (z.B. SIMATIC Industrial OS)
- Package Manager (!)
- Bei Bedarf Patch für Echtzeit-Kernel
- Gängige Industrieprotokolle (OPC-UA, Modbus, MQTT, PROFINET, ...)

