

MODELLIERUNG VON FERNWÄRMENETZEN MIT WÄRMEPUMPEN IM STROMMARKTMODELL HIREPS

Gerhard Totschnig

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe TU Wien

www.eeg.tuwien.ac.at/HIREPS

TechTalk-Strommarkttreffen am 04. Mai 2017

DIW, Berlin

P2H-Pot: Potentiale, Wirtschaftlichkeit und Systemlösungen für Power-to-Heat

- Stadt der Zukunft Projekt, gefördert durch das BMVIT im Rahmen des Programms "ENERGIE DER ZUKUNFT"
- <http://www.eeg.tuwien.ac.at/P2H-Pot>
- Projektabschluss: Juni 2017.

- Partner:
 - TUWIEN – EEG
 - TUWIEN – IET
 - Energie AG OÖ Wärme GmbH
 - ECOP Technologies GmbH
 - aqotec GmbH
 - ENERGIANALYSE.DK
 - e-Think

Inhalt

- HiRESP Modell Übersicht
- Wärmepumpen Modellierung
- Beispielhafte Ergebnisse

HiREPS Modell Versionen

- AT+ DE Modell
- EU Modell
- Regionale Modelle (Türkei, Balkan, Nordafrika)

HiREPS Komponenten AT+DE Modell

Stündliche Kostenoptimierung und Simulation von

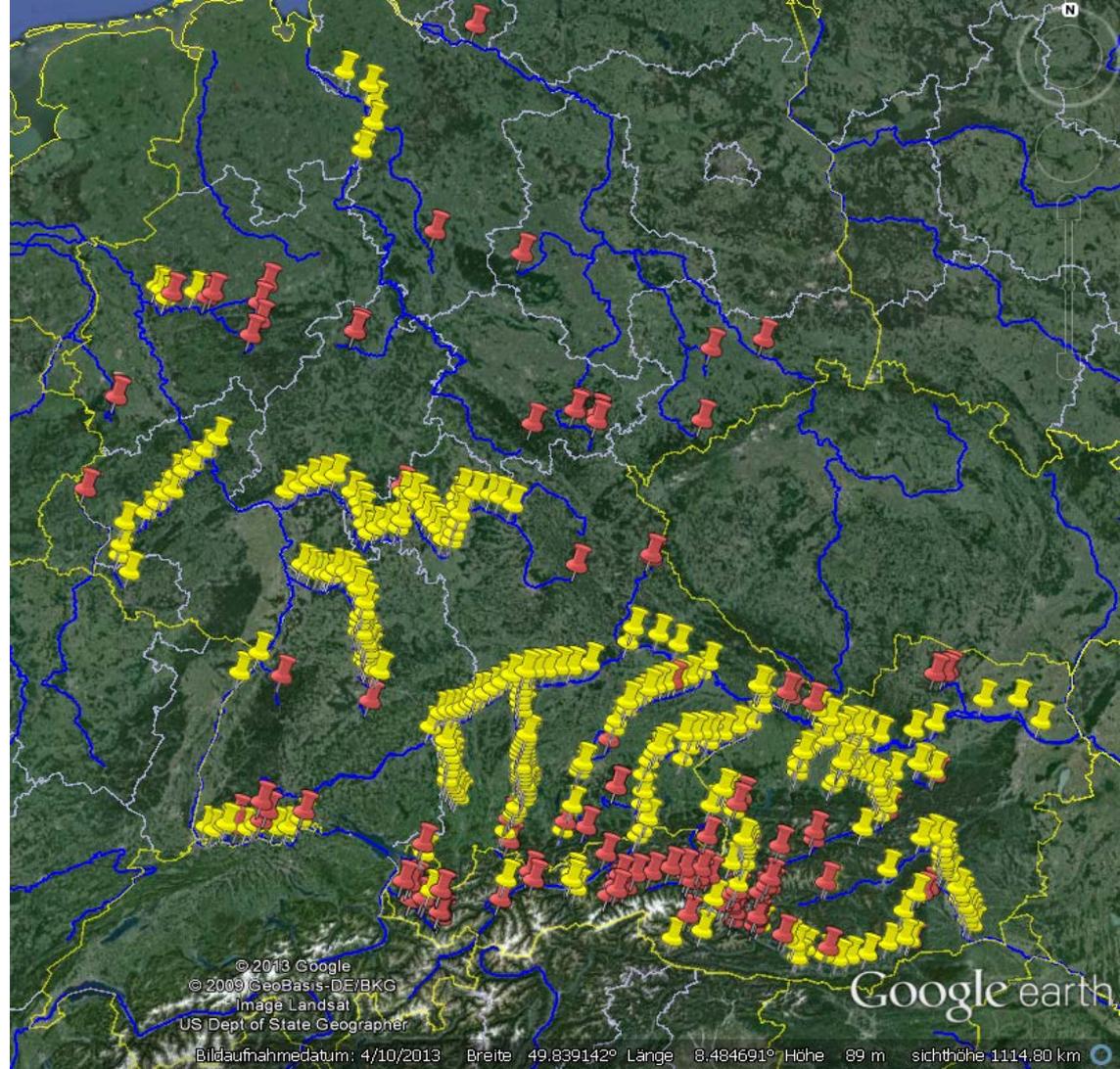
- Wasserkraftwerken (alle 400 Kraftwerke >10 MW)
 - Laufwasserkraft, Pumpspeicher
- thermische Kraftwerken (inkl. KWK)
- Wind- und Solarkraft
- Wärmeversorgung
 - Fernwärme und nicht netzgekoppelte Wärmesektoren
 - Heizkessel, Solarthermie, Wärmepumpen, Direktstromzusatzheizung, Wärmespeicher
- nichtkonventionellen Speichern
 - Power to Gas, Power to Heat, adiabate Druckluftspeicher (AA-CAES)
- Elektromobilität

Implementierung der Wasserkraft

Das HiREPS-Modell beinhaltet
detailliert abgebildet alle 400
Wasserkraftwerke >5-10MW in
AT+DE

Rote Pins: Speicher- und
Pumpspeicher-Kraftwerke

Gelbe Pins: Laufwasserkraftwerke

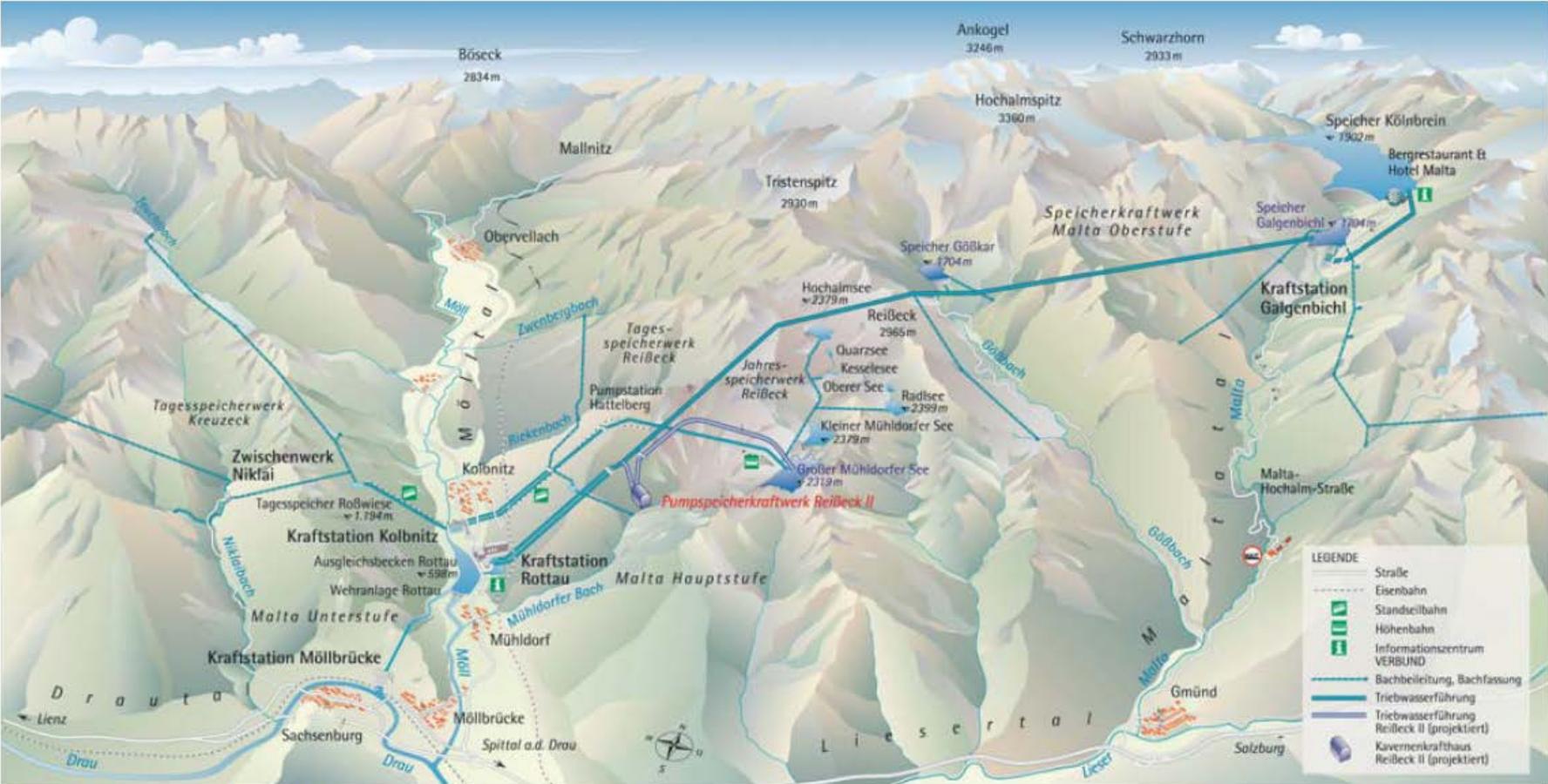


© 2013 Google
© 2009 GeoBasis-DE/BKG
Image Landsat
US Dept of State Geographer

Google earth

Bildaufnahmedatum: 4/10/2013 Breite 49.839142° Länge 8.484691° Höhe 89 m sichthöhe 1114.80 km

Detailgrad der HiREPS Modellierung der Wasserkraft



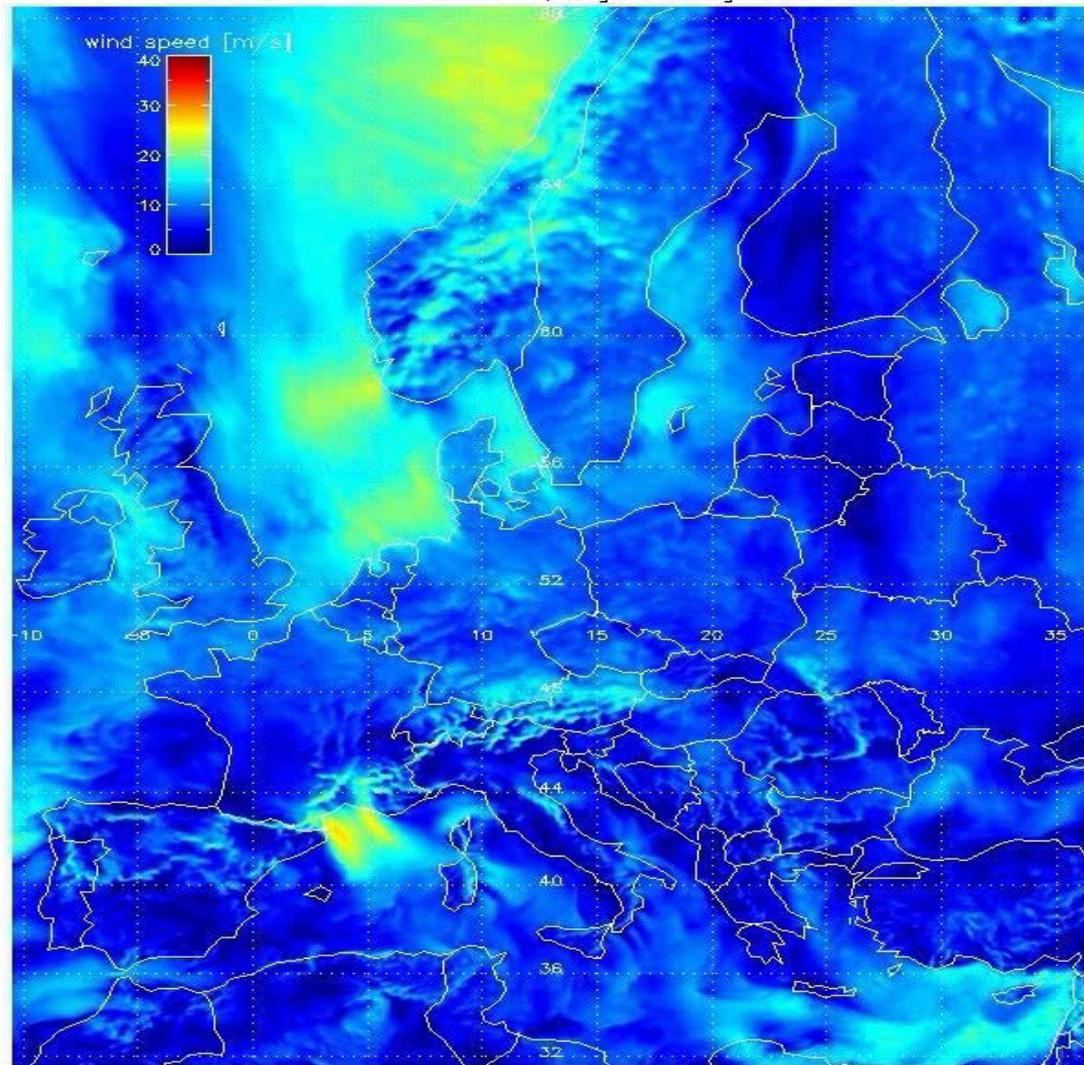
Kraftwerksgruppen Malta und Reibek/Kreuzeck

Quelle: Grafik Verbund Hydro Power

Datenbankauszug:

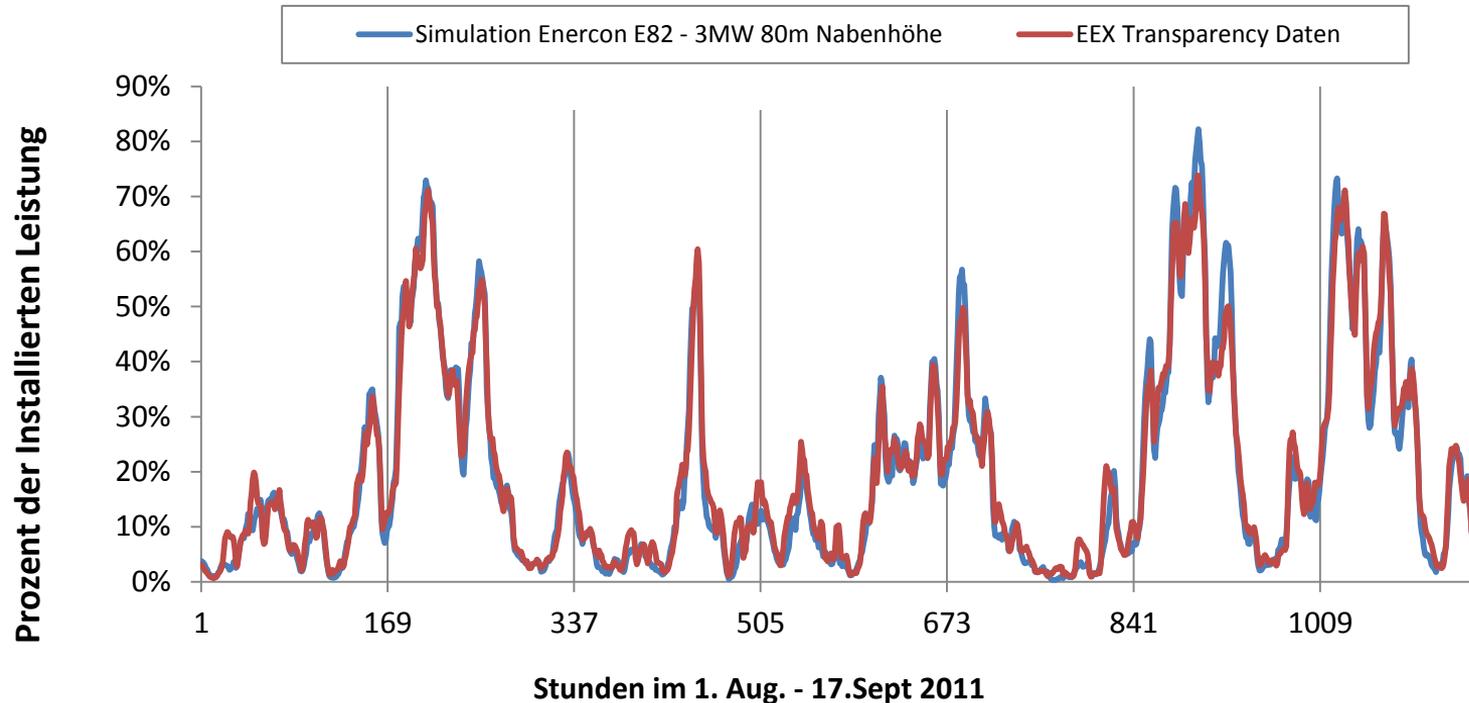
Windgeschwindigkeit
100m über Grund

Bsp.: Februar 2005
stündliche Daten



Beispiel Datenvalidierung:

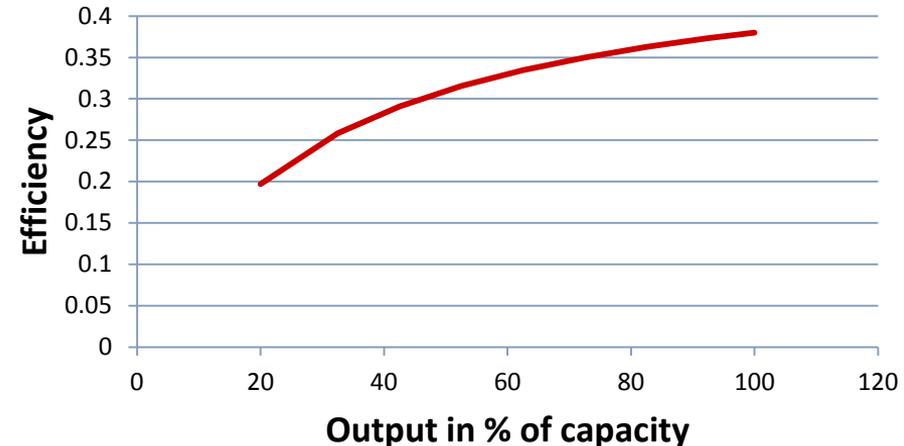
Vergleich der simulierten Windenergieerzeugung mit der tatsächlichen Erzeugung (DE+AT)



Simulation unter Berücksichtigung von

- Startup Kosten
- Mindestlasten
- Vorgaben zu minimalen Einschalt- und Ausschaltdauern
- Kopplung mit Wärmenetzen als Entnahmedampf- oder Gegendruckanlage
- Effizienzkurven für Teillastbetrieb

Open cycle gas turbine



Betrachtete Sektoren des Wärmesystems

Netzgebundene Wärmebereitstellung:

- Fernwärmenetze

Dezentrale Wärmebereitstellung:

- Gebäude mit Heizkesseln (Gas oder Biomasse)
- Gebäude mit Luftwärmepumpe
- Gebäude mit Grundwasserwärmepumpe

In allen Sektoren kann kostenoptimiert auch investiert werden in:

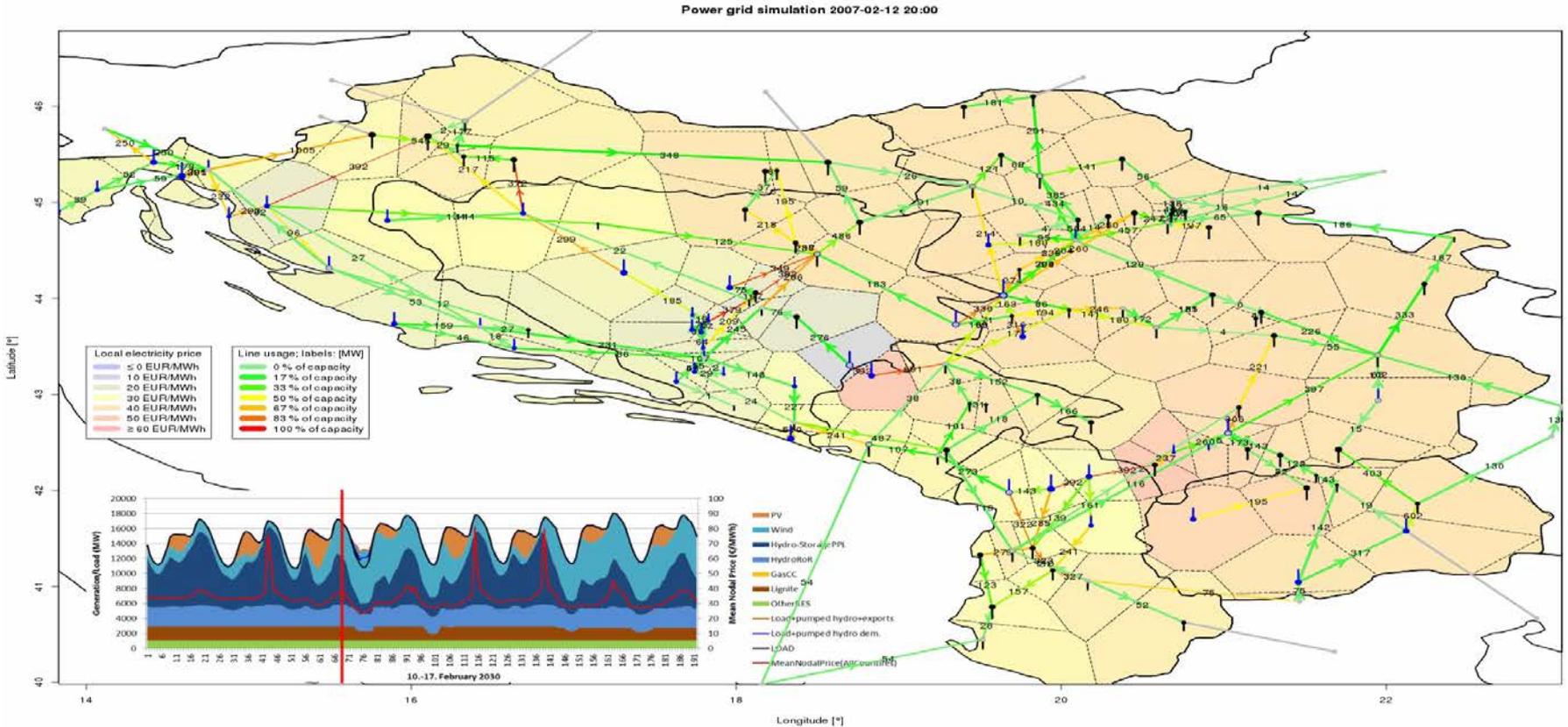
Solarthermie, Direktstromzusatzheizer, Wärmespeicher

Elektromobilität

- Simulation mit 100 repräsentativen Fahrprofilen für 6 Elektroautotypen(3 BEV und 3 PHEV) basierend auf Mobilitätserhebungen in Österreich und Deutschland.
- Städtische und ländliche Fahrprofile
- Je Fahrprofil: stündliche Daten für 4 Wochen(je eine pro Jahreszeit)
- Verschiedene Ladestrategien möglich:
 - Strommarktgesteuertes Laden oder sofortiges Laden. Mit und ohne V2G
- Verschiedene Nutzerverhalten möglich:
 - Häufiges und seltenes Anstecken

Kraftwerkseinsatz- und Lastflusssimulation

Dargestellt: Nodal prices, Leistungsauslastung, Lastfluss:



Modellierung der Wärmepumpen in der Fernwärme

Modellierung der Fernwärmenetze mit Wärmepumpen

Problemstellung:

KWK Anlagen, Heizkessel → mit fixer Effizienz bei Volllast modelliert

- Energiebilanz: Erzeugung = Nachfrage
- Variation der Vorlauf- und Rücklauftemperatur vernachlässigt
- Einspeichern in der FW Speicher immer bei der Maximaltemperatur

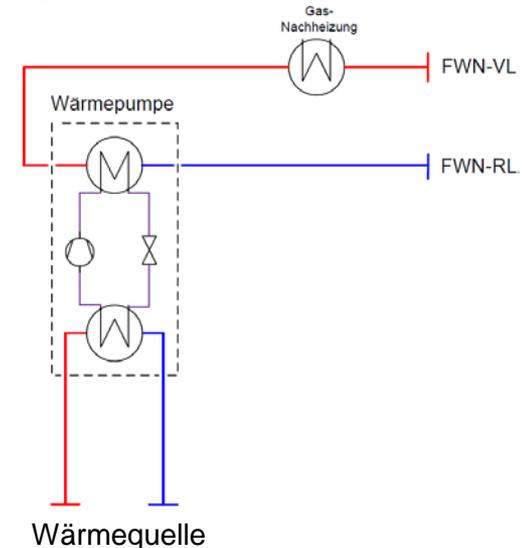
Aber: Wärmepumpen COPs sehr abhängig von den Temperaturniveaus

Möglichkeit 1:

Fix vorgegebener Wärmepumpen-Einsatz:

Quelle abkühlen und Rücklauf auf Vorlauftemperatur aufheizen, keine Speicherung von Wärmepumpenerzeugung

- COP im Voraus berechnen und im Modell implementieren



Modellierung der Fernwärmenetze mit Wärmepumpen

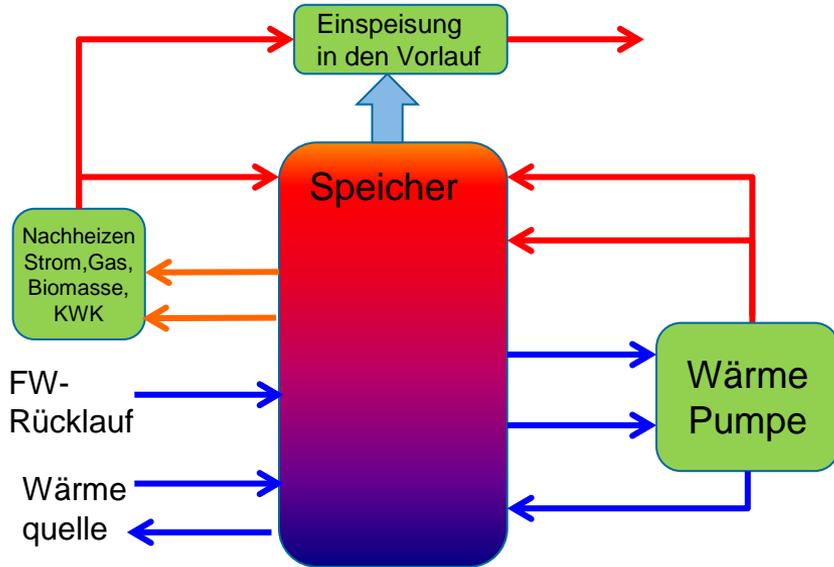
Wie Zwischenspeichern von Wärmepumpen-Erzeugung simulieren?

Die Wärmepumpe wird nicht bei der maximalen Speichertemperatur einspeisen, wenn dies die VL Temperatur nicht erfordert.

→ Brauche Speichermodell mit Temperaturschichten

→ Das hilft auch bei der Simulation der Solarthermie

Modellierung der Fernwärmenetze mit Wärmepumpen



Flexibler Einsatz von Wärmepumpen mit Speichern (Hotstorage+Coldstorage)

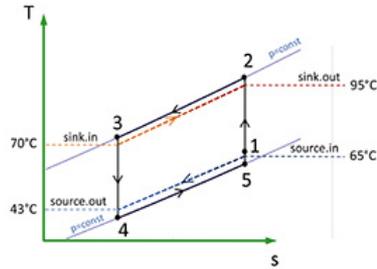
- Statt einer Wärmepumpe gibt es im Modell eine installierte WP-„Leistung“, die unter verschiedenen Betriebszuständen aufgeteilt wird.
- Betriebszustand der WP ist Ergebnis der Optimierung
- COP ist Ergebnis der Optimierung
- Simulation mit Wärmespeicher mit Temperaturschichten mit jeweils 5° C Abstand.
 - Nachheizen: Gas, Strom, Biomass oder KWK
 - Auch Rücklaufanhebung verwenden in einem KWK oder Heizkessel.

Betriebszustände von Wärmepumpen

Beispiel ECOP Wärmepumpe, ww.ecop.at: Eine neue Wärmepumpentechnologie



Kombiniert mit Biomasse KWK Bioenergie Bucklige Welt



- 1 – 2 isentrope Verdichtung
- 2 – 3 isobare Wärmeabfuhr (WT – HD)
- 3 – 4 isentrope Entspannung
- 4 – 5 isobare Wärmezufuhr (WT – ND)
- 5 – 1 isentrope Verdichtung (Ventilator)

Quelle Grafiken: www.ecop.at

- ECOP eine Anlage kann alle möglichen Quellen und Senken-Temperaturen fahren
- Kompressionswärmepumpen zum Teil nicht so flexibel bei Änderungen der Quellen und Senken-Temperaturen im Betrieb.

Betriebszustände im Modell:

- COP optimiert, Output optimiert
- Verschiedene VL- und RL-Temperaturen im FW-Netz

COP Ammonika WP Simuliert: WQ 60°C/40°C

Rücklauf- temperatur	Vorlauf Temperatur im FW Netz					
	70	75	80	85	90	95
40	5.23	4.63	4.05	3.60	3.05	2.49
45	5.88	5.10	4.50	3.85	3.48	2.95
50	5.91	5.15	4.45	3.95	3.63	3.24
55	0	5.17	4.56	4.06	3.66	3.37
60	0	0	4.63	4.08	3.71	3.38
65	0	0	0	4.05	3.79	3.20
70	0	0	0	0	3.72	3.43

- Verschiedene Quelltemperaturen, falls für die installierte Anlage möglich
 - ECOP-Anlage ist eine Serienanlage, die sehr variabel betrieben werden kann.
→ Die selbe installierte ECOP WP kann im Modell 50,55,60,65,70,75 und 80° C Quelltemperaturen aus dem Speicher verwenden und eine ganze Matrix von VL und RL Temperaturen bedienen.
 - Die selbe installierte Ammoniak-WP kann standardmäßig eher nicht flexibel bei verschiedenen Quelltemperaturen betrieben werden.

Problem: Angabe der spezifischen Inv. Kosten

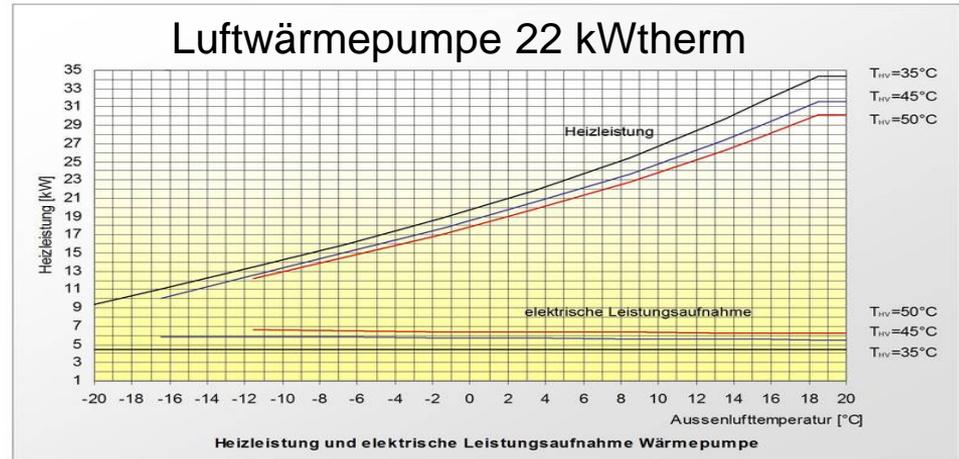
- Investitionskosten oft in Euro/kW thermischer Leistung angegeben.

Thermischer Output einer installierten Anlage variiert aber stark mit den Betriebsbedingungen

- Es scheint die maximale elektrische Stromaufnahme bei einigen WP-Anlagen weniger abhängig von Betriebsbedingungen. Bei anderen WP scheinbar nicht.

Beispiele für die das recht gut passt:
ECOP, Luftwärmepumpe (siehe Grafik)

→ Im Modell standardmäßig:
Installationskosten in Euro/kWelec



Quelle: <https://www.effiziento.de>

Modellierung der Wärmepumpen

[bz]=verschiedene Betriebszustände der selben installierten Wärmepumpe

Wärmeaufnahme von der Quelle = $Q_{zu}[bz] = M3pS[bz] * 4.19 * (Quell_Temp[bz] - Quell_Rück_Temp[bz])$

$Verlustfaktor[bz] = Q_{ab}[bz] / (Q_{zu}[bz] + Strom[bz])$, $Cop[bz] = Q_{ab}[bz] / Strom[bz]$,

$Strombezug[bz] = Q_{zu}[bz] / (Cop[bz] / Verlustfaktor[bz] - 1)$

$Fernwärmeabgabe[bz] = Q_{zu}[bz] / (1 / Verlustfaktor[bz] - 1 / Cop[bz])$

Gleichung für die Limitierung der Erzeugung der Betriebszustände in Bezug zur installierten Leistung:

$P_{zuPnenn}[bz] = \text{Maximale elektrische Stromaufnahme im Betriebszustand} / \text{installierte elektrische Nennleistung}$.

$$\sum_{\text{Betriebszustände}} \text{Strombezug}[bz] / P_{zuPnenn}[bz] \leq \text{Installierte elektrische Leistung}$$

In **blau** sind die verwendeten Input-Parameter im Modell

Modellierung des Wärmespeichers

Temperaturschichten mit 5°C Abstand: z.B. $0\text{-}95^\circ\text{C}$ bei drucklosem Speicher
Modellierung mit: Massenströmen (m^3/s) und Volumen (m^3) pro Temperaturschicht.

Kombination von *Anergiespeicher* und *Heißwasserspeicher*

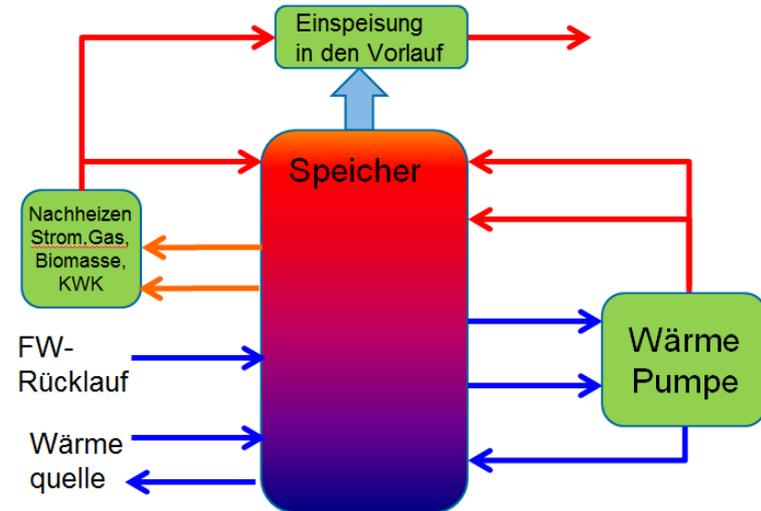
Zuflüsse pro Schicht:

Wärmequellen, Wärmepumpe (Quelle und Senke), FW-Rücklauf, KWK, Heizkessel, Solarthermie

Abflüsse pro Schicht:

Entnahme, Wärmequellen, Wärmepumpe(Quelle und Senke), KWK, Heizkessel, Solarthermie

Solarthermie ist ähnlich flexibel wie die Wärmepumpe implementiert, kann auf verschiedenen Schichten mit unterschiedlichen Effizienzen einspeisen. Die Betriebszustände teilen sich die installierte Kapazität



Beispiel Ergebnisse der Simulation: Szenario -84% CO₂ DE+AT 2050

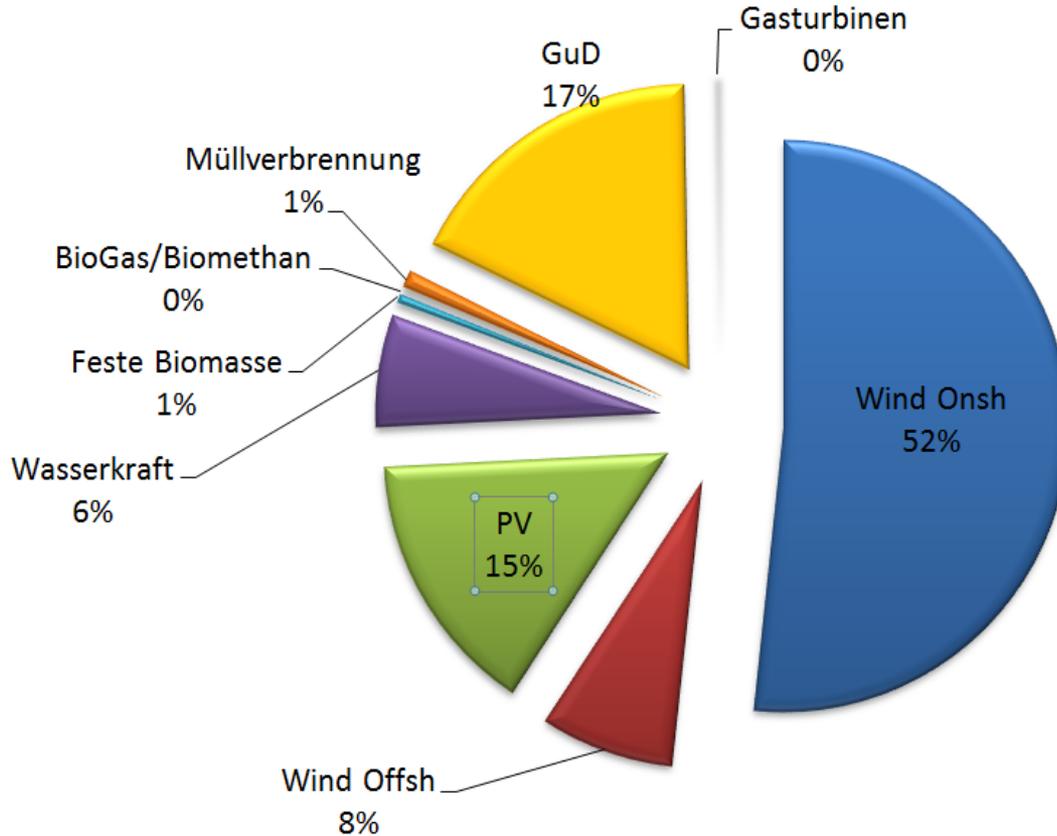
- Reduktion CO₂ Emissionen von 613,5 MtCO₂ zu 147 MtCO₂ in den Sektoren
 - Stromerzeugung
 - Raumwärme und Warmwasser
 - PKW-Verkehr
- Elektromobilitätsanteil von 50%
- Optimierte Erzeugungskapazitäten für Strom und Wärme
- Keine Förderungen sondern nur endogener CO₂ Preis, so dass CO₂ Limit gehalten wird.

Exemplarische Ergebnisse:

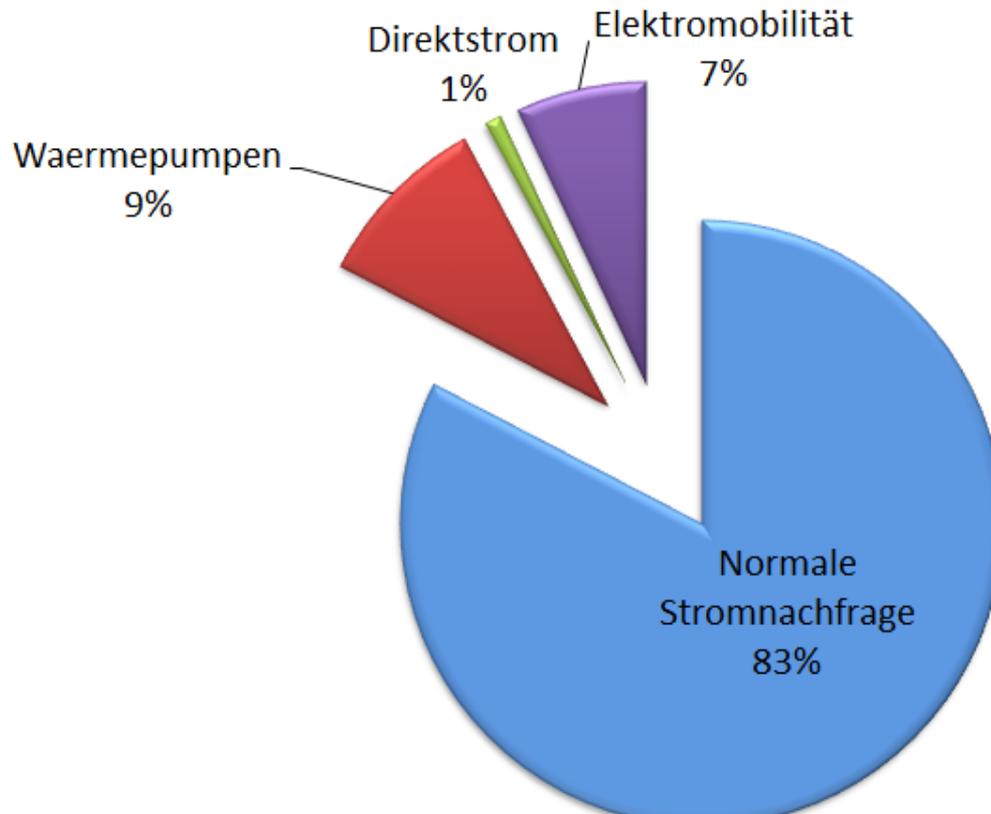
- Fall einer Rauchgaskondensationswärmepumpe; Wärmenetz ohne industrielle Abwärme
- Fall der Integration von Geothermie und Wärmepumpe

Stromerzeugungsmix DE + AT

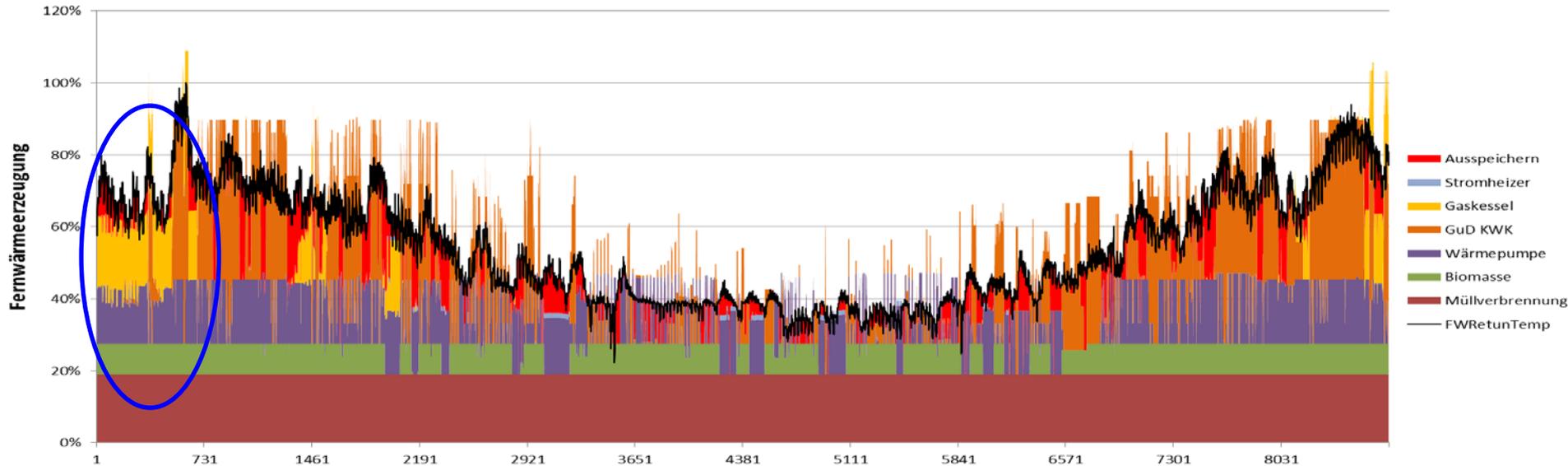
2050 -84% CO2



Stromnachfragemix

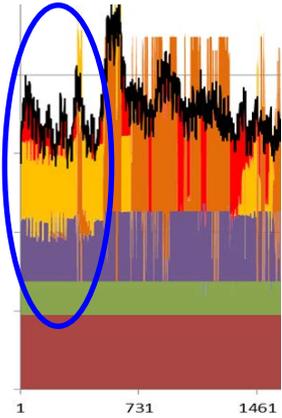


Ergebnis: FW Netz mit KWK und Rauchgaskondensations-Wärmepumpe



- Wärmepumpe: 22% der FW-Erz, Arbeitszahl 5.8 mit 5300 VLS bei 2790€/kWelec (=480/kWtherm)
- Stromheizer: 0.2% der FW-Erz, 768 VLS bei 180€/kW Investitionskosten
- Speichergröße: 32h des mittleren Winterwärmebedarfes (bei 100€/m³ Inv.Kosten)
- Frage Rauchgaskondenstation bei GuD? Momentan nein(Luftüberschuss um NO_x Probleme zu vermeiden?), in Zukunft ja (andere Konstruktion ohne Luftüberschuss)? Hier Annahme es gibt GuD+RGK

Woher bekommt die Wärmepumpe die Anergie in den ersten 500 Stunden? Wie funktioniert der Speicher?



Rauchgaskondensation speist
bei 50° C ein.

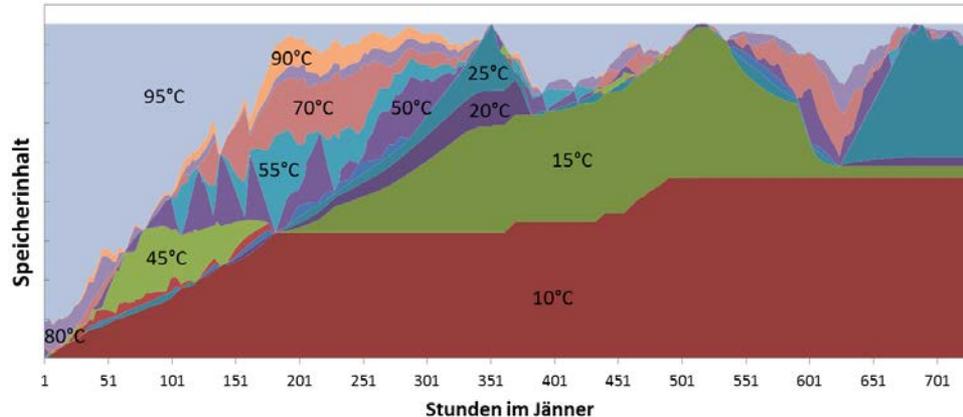
Massenströme beim 50°C Speicherlevel:

Einspeisung:

Rauchgaskondensation	27%
Rücklauf bei Speicherentnahme	73%

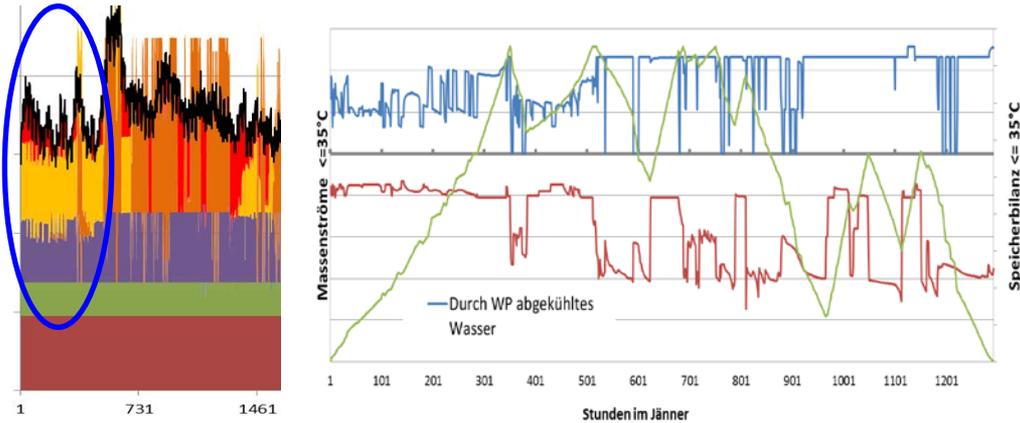
Entnahme:

WP_Quelle (wird abgekühlt)	-36%
WP_Senke (wird aufgeheizt)	-25%
Gasheizer	-38%



Die ersten 500 Stunden kein
GuD sondern Gaskessel.
Speicher Anfang des Jahres
voll mit heißem Wasser.
Nach 500 Stunden der
Speicher gefüllt mit 10-15° C
kaltem Wasser. Der Rücklauf
hat in dieser Zeit eine
Temperatur um die 50° C.

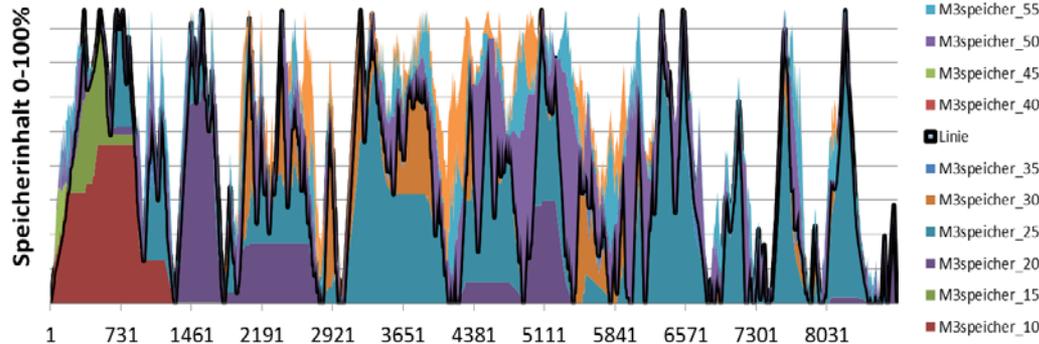
Woher bekommt die Wärmepumpe die Energie in den ersten 500 Stunden?



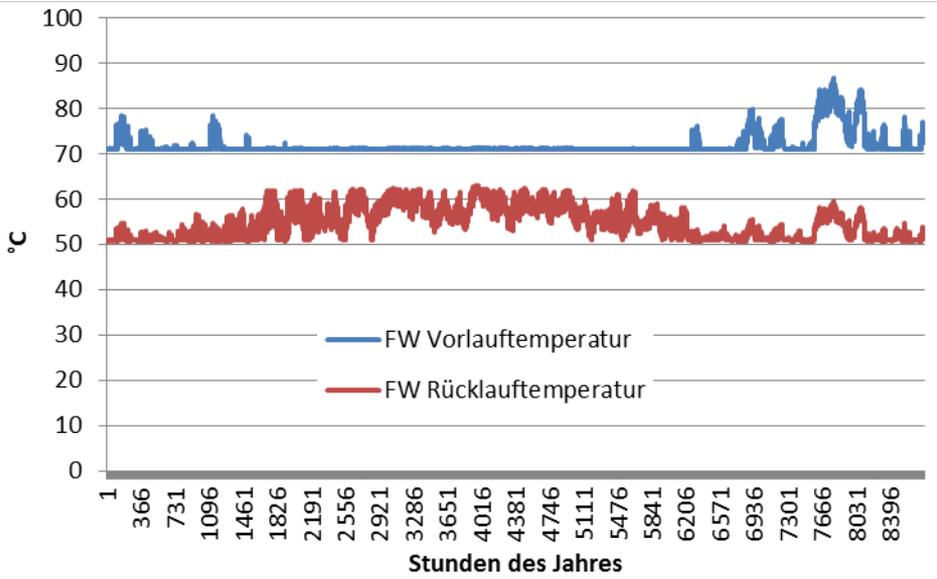
- Speicher am Anfang des Jahres voll. Wird entladen
- Fernwärmerücklauf fließt mit 50°C in den Speicher
- Es gibt nur wenig Rauchgaskondensation in den ersten 500 Stunden
- Die Wärmepumpen verwenden einen Teil des 50°C Wassers als Wärmequelle und kühlen es ab,
- Einen anderen Teil des 50°C Wassers heizen die Wärmepumpen auf
- Ein Teil des 50°C Wassers wird vom Gaskessel nachgeheizt

Der Speicher wirkt als **Anergiespeicher**: Rücklauf wird als **Anergiebuffer** verwendet, weiter abgekühlt ($10\text{--}15^\circ\text{C}$), und wenn der Speicher wieder durch die GuD KWK geladen wird gibt es auch wieder Rauchgaskondensation um Wasser wieder auf 50°C aufzuwärmen. Die Rauchgaskondensation liefert die meiste Zeit im Jahr die Anergie erst nach, diese wurde davor dem Rücklauf entzogen. Nur Sommer wird auch Anergie bei $40\text{--}60^\circ\text{C}$ gespeichert.

Coldstorage 0-60°C Linie bei 40°C



D.h. wenn die Wärmepumpe (die im Prinzip die Rauchgaskondensation bei 50°C als Wärmequelle verwendet) ihre Quelltemperatur flexibel zwischen 50°C und der RL Temperatur anpassen kann, kann sie die Flexibilität des Speichers nutzen um von der Energiequelle entkoppelt zu arbeiten, ohne dass ein eigener Anergiespeicher gebaut werden muss.



COP Optimierter Zustand:

Wärmeabgabe in den Speicher bei 50°C Quelltemperatur

Summe: 48.00%

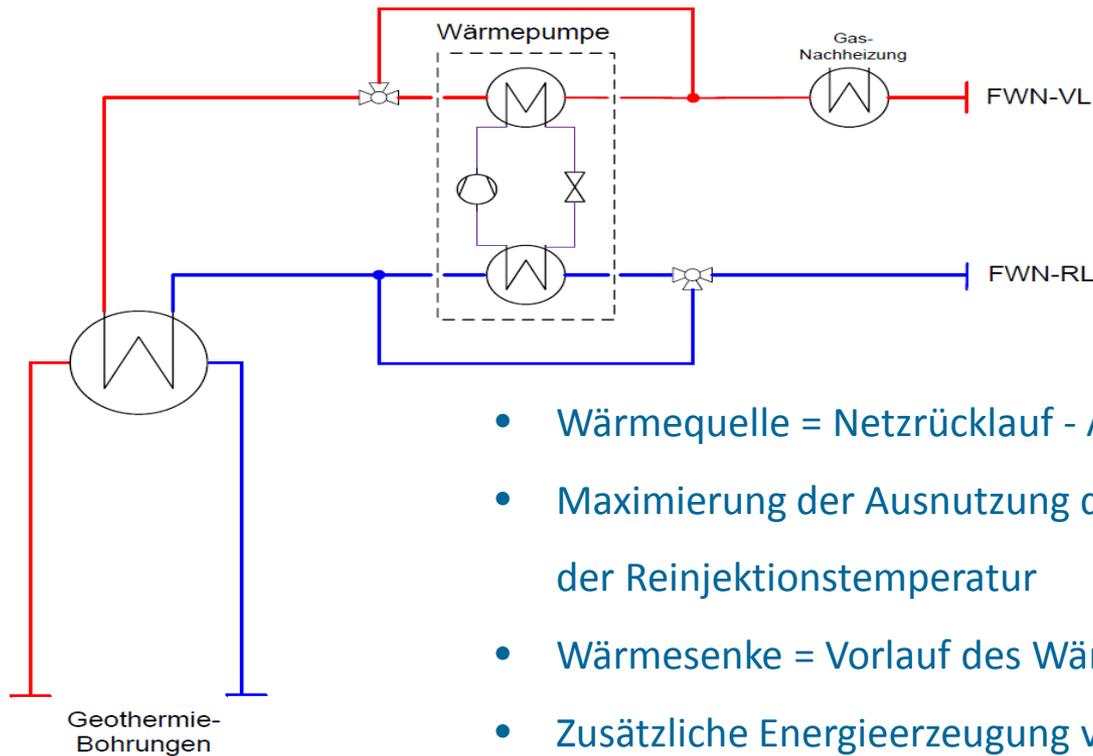
Prozent	70	80	90	95
40			2.1	
45				
50		35.6		1.5
55	0.2	4.9		
60	0.1	2.2	2.0	
65				
70				

Output Optimierter Zustand: Insgesamt 5.7% der Erzeugung

Wärmeabgabe in den Speicher bei 50°C Quelltemperatur

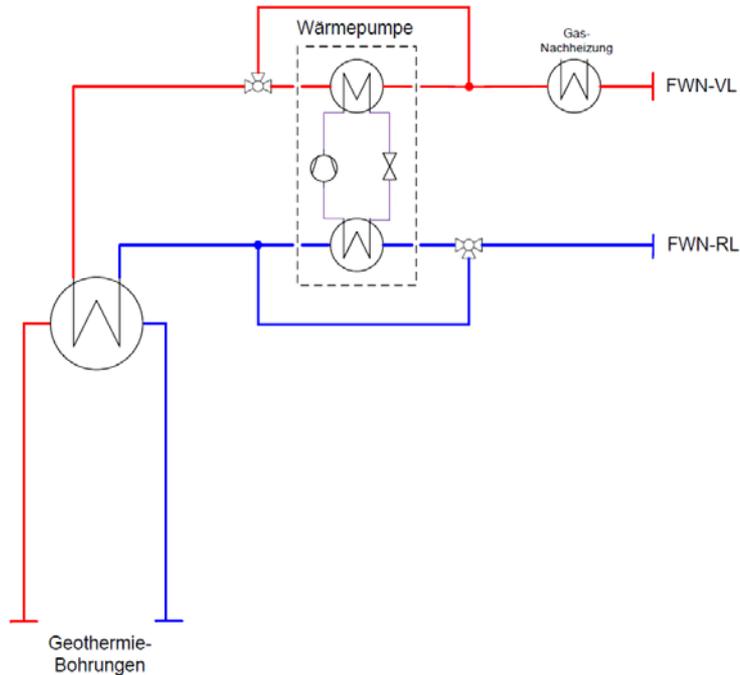
Summe: 4.50%

Prozent	70	80	90	95
40				
45				
50		2.0294		
55	0.6303	0.8935		
60	0.0994	0.4706	0.3681	
65				
70				

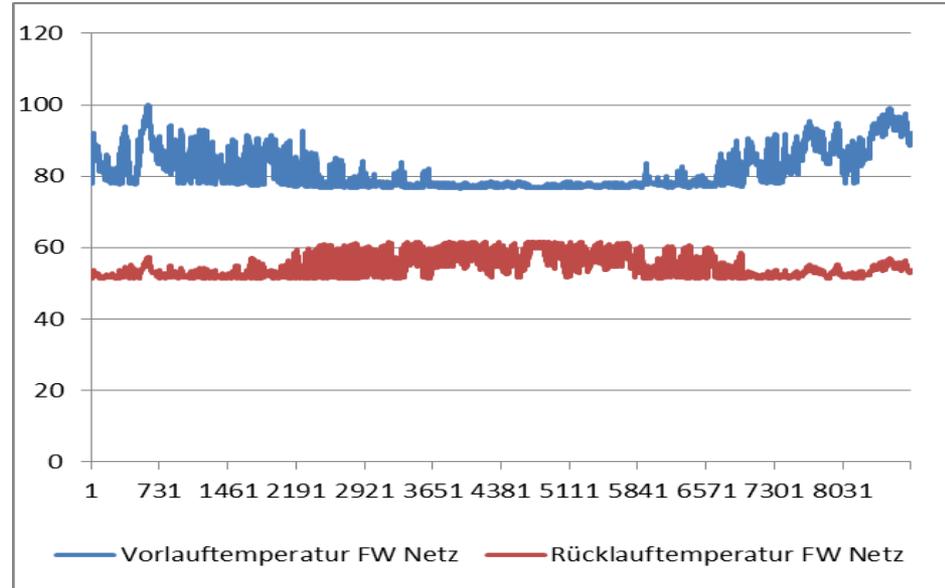


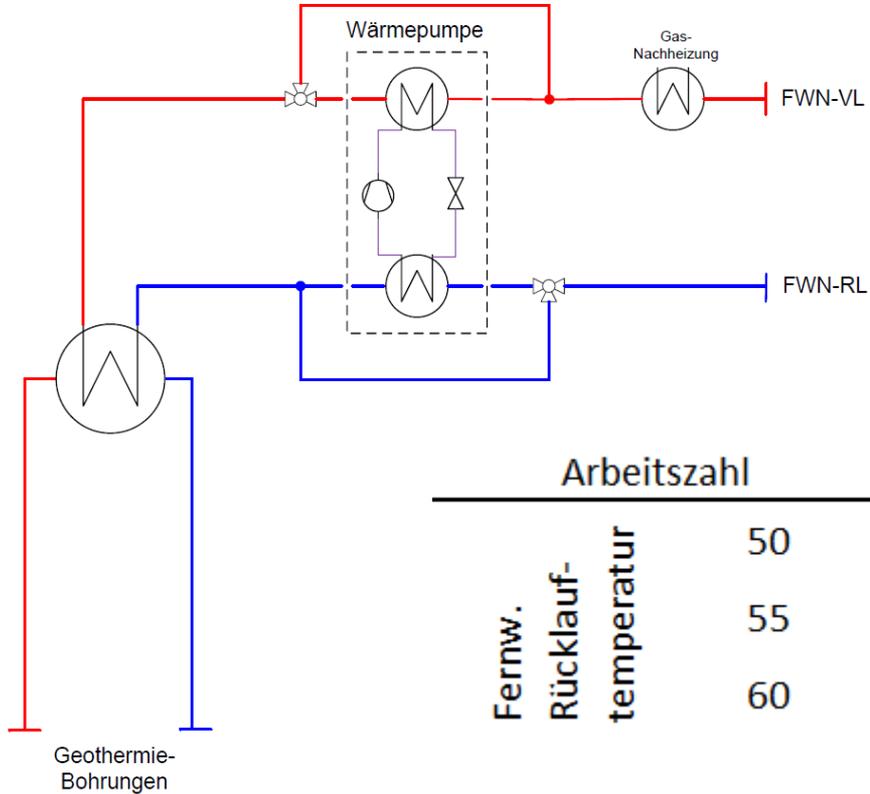
- Wärmequelle = Netzurücklauf - Abkühlung des Netzurücklaufes
- Maximierung der Ausnutzung der Geothermiebohrung – Reduktion der Reinjektionstemperatur
- Wärmesenke = Vorlauf des Wärmenetzes
- Zusätzliche Energieerzeugung von ca. 2 MW
- Herausforderung: hohe Temperatur der Wärmesenke – Leistungszahl der Wärmepumpe, neue WP-Technologien

WP kann sowohl im Speicher als auch wie im Schema betrieben werden.



- Geothermie mit 80° C verfügbar
→ muss nachgeheizt werden
- Geothermie, Gaskessel vorhanden
- Wärmepumpe und Wärmespeicher kostenbasiert installiert
- Wärmespeicher (95° C) mit 19 Speicherschichten (5° C Stufen) simuliert

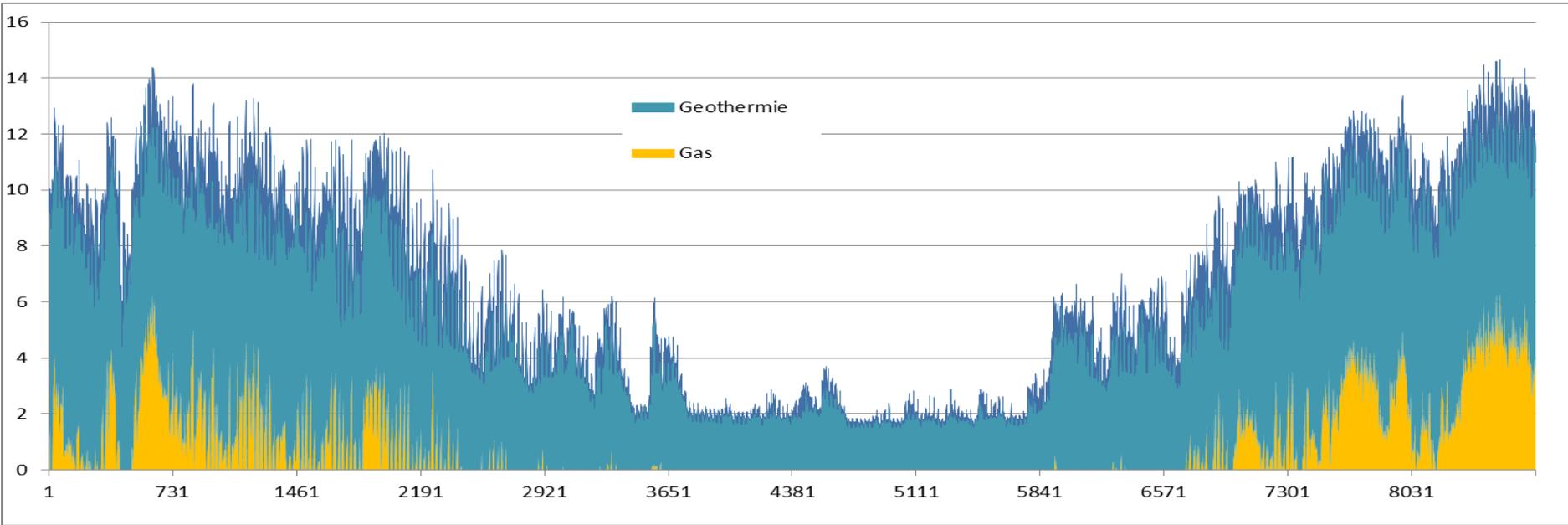




Simulierte Arbeitszahlen für Wärmepumpen
in relevantem Arbeitsbereich (Abkühlung
Wärmequelle von 50 auf 35 Grad, Ammoniak)

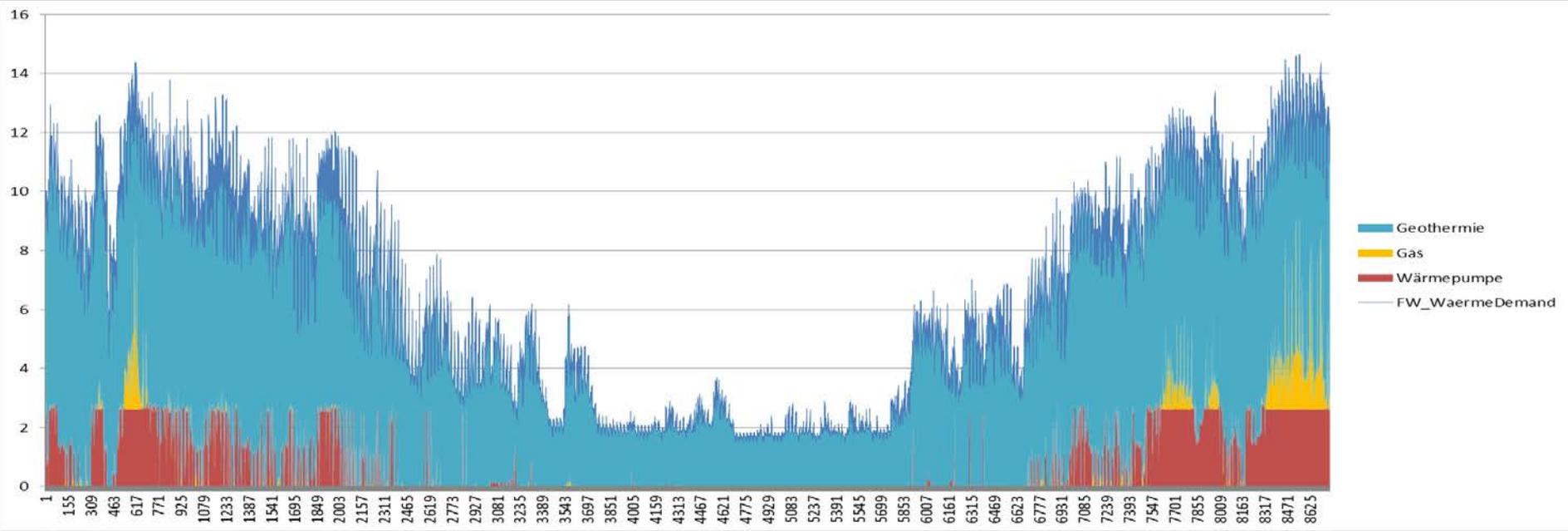
Arbeitszahl		Fernwärme-Vorlauftemperatur			
		80	85	90	95
Fernw. Rücklauf- temperatur	50	4.4	4.0	3.6	3.2
	55	4.6	4.1	3.7	3.4
	60	4.6	4.1	3.7	3.4

Simulation: FW Netz mit Geothermie und Gaskessel



- Gaskessel: 7.8 GWh (=14% der FW-Erzeugung)

Simulation: FW-Netz mit Geothermie und Gaskessel

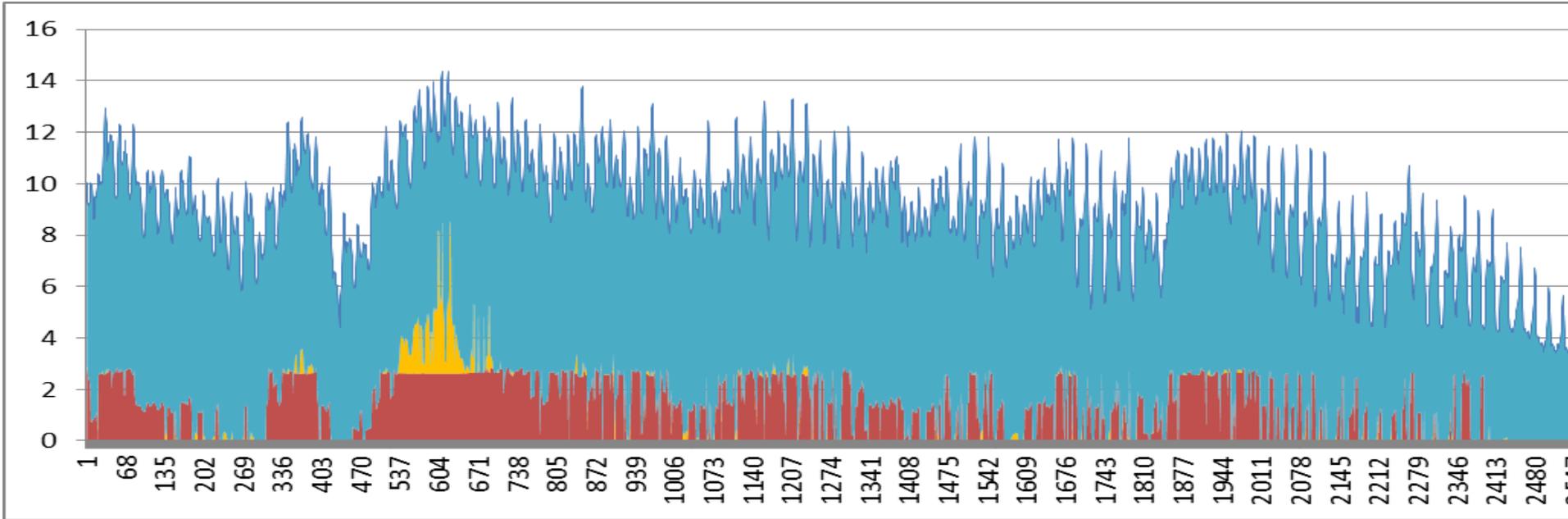


Annahmen: Gaskessel und Geothermie vorhanden

Optimierungsergebnisse:

- Wärmepumpe: 0.7MWelec, AZ 3,8 mit 2570 VLS
- Speichergröße: 1400 m³ oder 7h des mittleren Winterwärmebedarfes
- Gaskessel Erzeugung: 1,3 GWh
- 6,4 GWh Gas eingespart = 11.4% des FW-Bed., jetzt Geo+WP

Simulation: FW-Netz mit Geothermie und Gaskessel



- Wärmepumpen flexibel simuliert in Energiemarktmodell
- Szenario DE+AT -84% CO₂-Emissionen in den Sektoren Strom, Wärme und PKW-Verkehr
- In den dargestellten FW-Netztypen erreichen Wärmepumpen 11-22% Anteil an der FW-Erzeugung.
- Die Arbeitszahl hängt von den VL-, RL- und Quelltemperaturen ab:
in den analysierten FW-Netztypen AZ: 3.8 – 5.8
- Elektroheizkessel (bei 180€/kW) tragen nur <0.2% zur FW-Erzeugung bei.
- Wärmespeicher sind so dimensioniert, dass sie 7-32 h des mittleren Winterfernwärmebedarfes speichern können

Ende