

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



BM Retrofit Tool

Webbasierte Entscheidungshilfe für Biomasse-Nahwärmennetze
Dokumentation

Adam Burusz, Felix Hochwallner, Viktoria Illyes, Nicolas Marx, Ralf-Roman Schmidt, Lukas Kranzl, Aadit Malla, Joachim Kelz, Stefan Retschitzegger



VORZEIGEREGION
ENERGIE

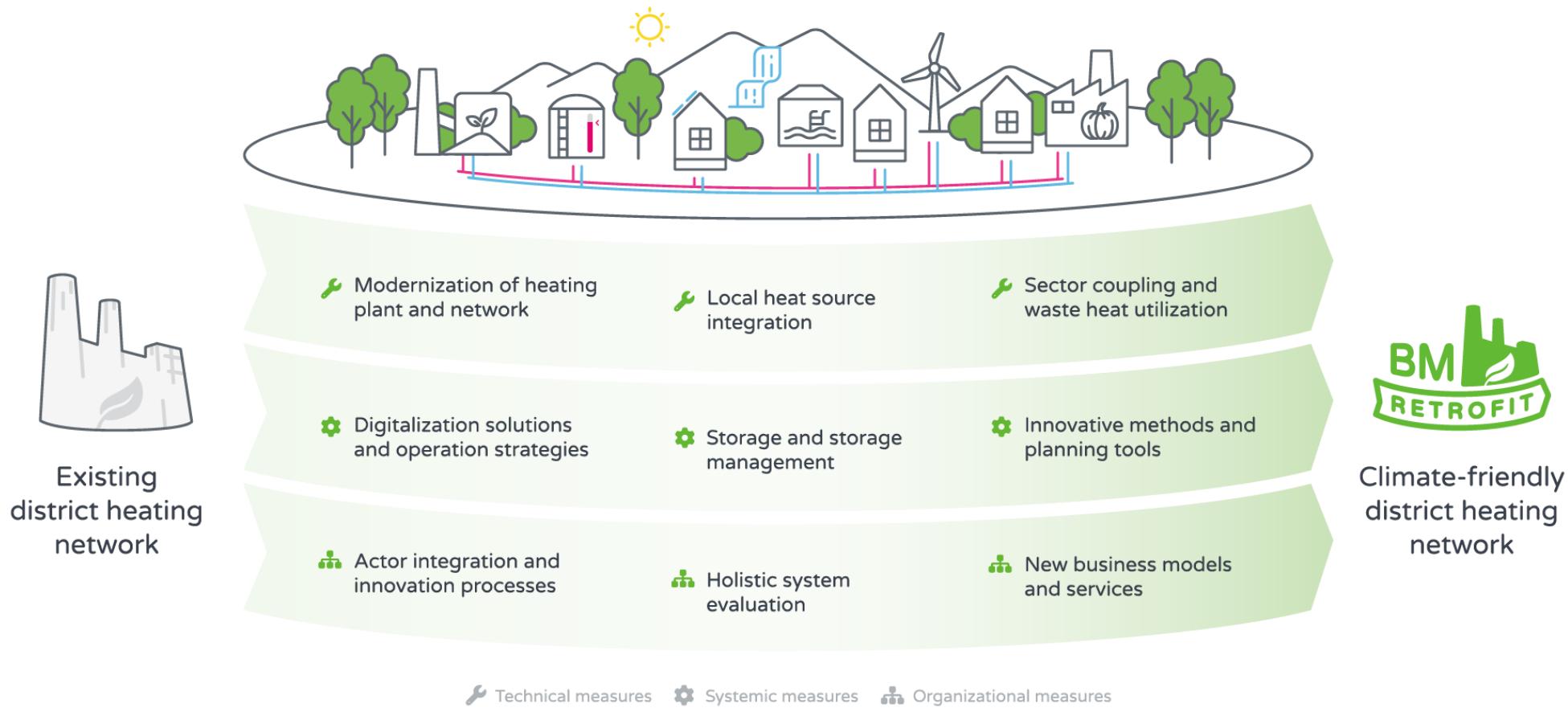


Projekt - BM Retrofit

- BM Retrofit widmet sich der Entwicklung und Demonstration ganzheitlicher Modernisierungskonzepte sowie dem Ausbau bestehender biomassebasierter Fernwärmenetze und -systeme.
- Dazu werden innovative technische Konzepte (z. B. Rauchgaskondensation, Wärmepumpen, Speichertechnologien) entwickelt und für eine effiziente Systemintegration optimiert.
- Der Ansatz von BM Retrofit ermöglicht somit die Realisierung eines nachhaltigen Gesamtenergiesystems.
 - mit erhöhter Gesamteffizienz und Flexibilität,
 - mit bestmöglicher Nutzung erneuerbarer und lokaler Energiequellen,
 - mit voller Ausschöpfung der Synergien bestehender Infrastrukturen
 - mit der Schaffung eines zukunftssicheren und widerstandsfähigen Systems.

BM Retrofit

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks

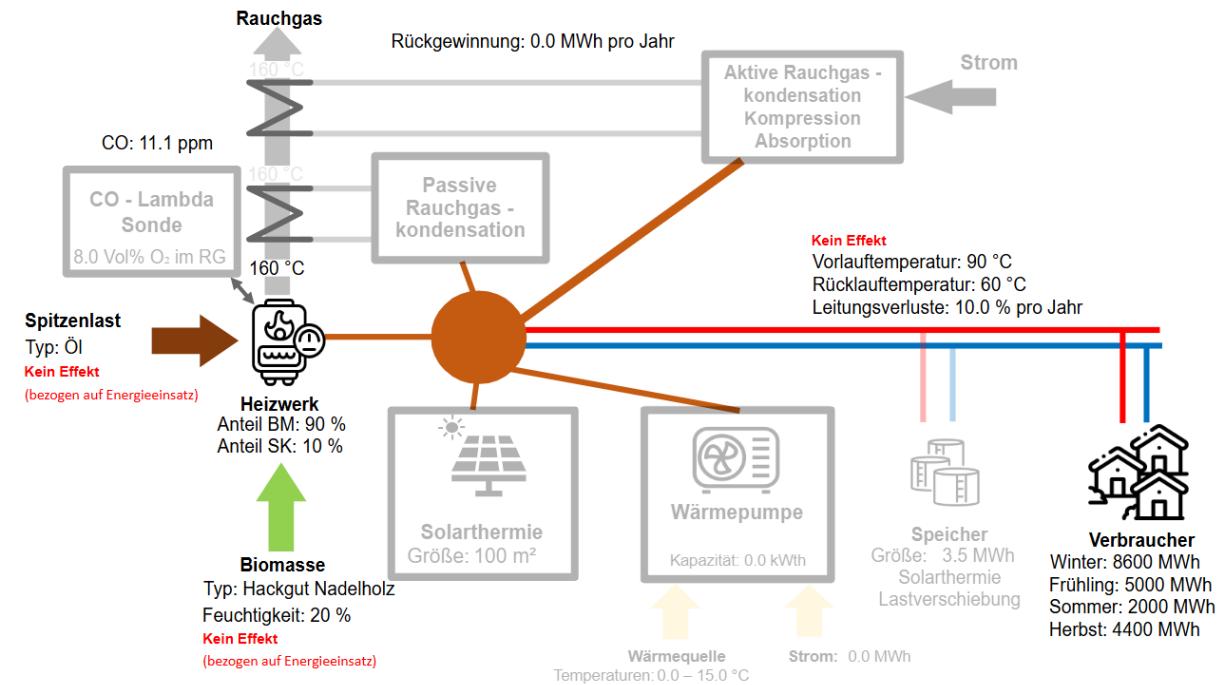


BM Retrofit Tool - Motivation

- Viele bestehende Biomasse-Wärmenetze benötigen Modernisierung (Effizienz, Kosten, Defossilisierung)
 - Frühe Entscheidungen sind oft komplex & datenintensiv
 - Web-Tool für schnelle Erstbewertung & Priorisierung von Retrofit-Optionen
 - Saisonale Analyse (Quartale) + erste Wirtschaftlichkeit via CAPEX / OPEX / Lebensdauer / Amortisationszeit
 - Ergebnisse als klare Kennzahlen & Visualisierungen (z. B. Biomasseverbrauch, Spitzenlast, Amortisationszeit, Kosten, Emissionen)
- Ziel: Potenziale schnell erkennen und Detailanalysen gezielt vorbereiten

Maßnahmen

- Wärmebedarf
 - Änderung der Netztemperaturen
- Erzeuger
 - Solarthermie (Speicher Boost → Solarthermie)
 - Kompressionswärmepumpe
- Speicher → Lastverschiebung wählen
- Biomasseverbrennung
 - CO – Lambda Sonde
 - Rauchgaskondensation passiv
 - Rauchgaskondensation aktiv
 - Absorptionswärmepumpe
 - Kompressionswärmepumpe



BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Heizwerk



VORZEIGEREGION
ENERGIE



Rohrleitungsverluste & Wärmebereitstellung

- Inputs:
 - Saisonaler Wärmebedarf (Kundenseitig) nach Standort
 - Benötigte Temperaturen (Kundenseitig)
 - Wärmeverlust / Jahr in % ($\rightarrow Q_{Verlust}$)
- Massenstrom: $m_{Kunde,i} = \frac{Q_{Kunde}}{c_p \cdot (T_{VL,SQ,Kunde,i} - T_{RL,SQ,Kunde,i})}$
- Faktor k: $k = \frac{Q_{Verlust}}{l \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{T_{VL,SQ,Kunde,i} + T_{RL,SQ,Kunde,i}}{2} - T_{Boden,i} \right)}$
- Verluste pro Saison: $Q_{Verlust,i} = l \cdot k \cdot \left(\frac{T_{VL,SQ,Kunde,i} - T_{RL,SQ,Kunde,i}}{2} - T_{Boden,i} \right)$
- Nötige Wärmebereitstellung (Erzeuger): $Q_{supply,i} = Q_{Kunde,i} + Q_{Verlust,i}$

$$\dot{q}_v = \frac{4 \pi \left(\frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo} \right)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln \left(\frac{r_M}{r_R} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left(\frac{4(h_0 + r_M)}{r_M} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left\{ \left[\left(\frac{2(h_0 + r_M)}{a + 2r_M} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} \right\}}$$

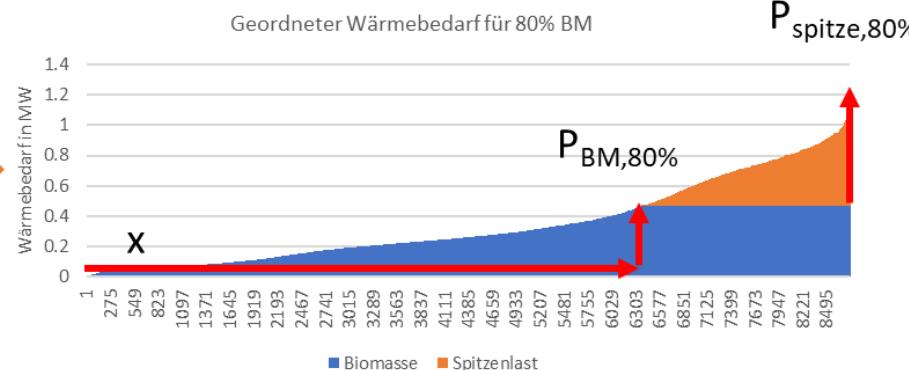
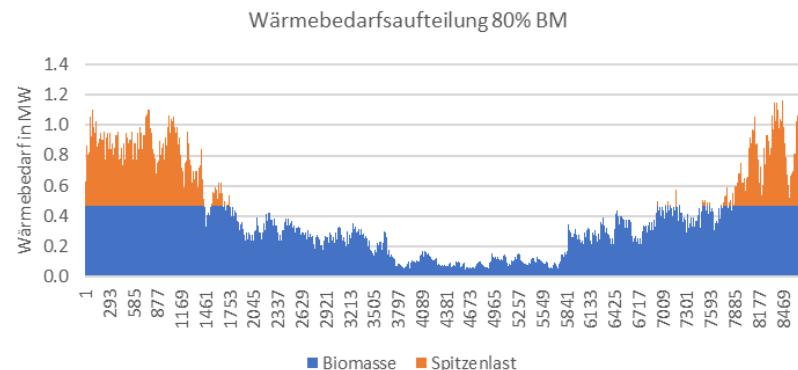
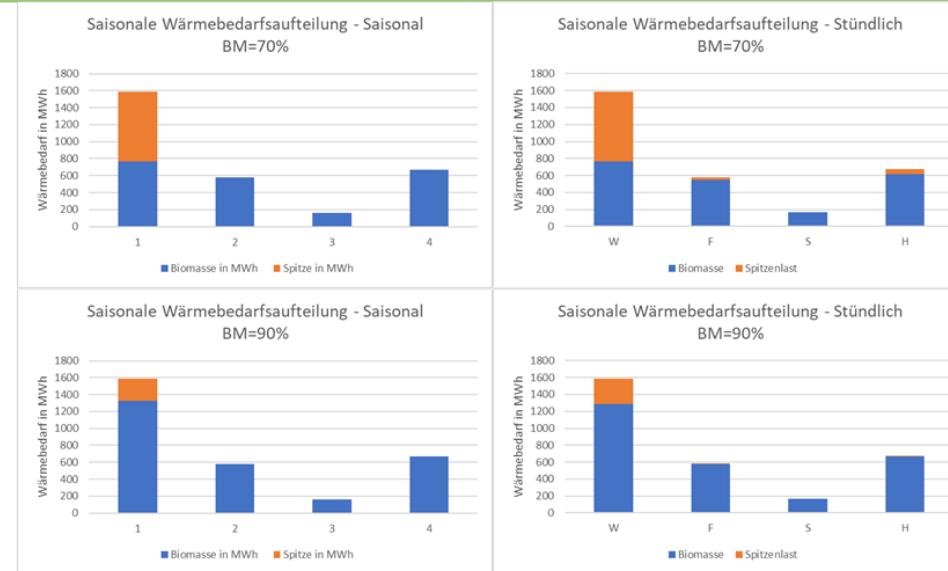
Faktor k

Rohrleitungsverluste

- Durch angepasstes ΔT ändert sich $\Delta T_{Boden} \rightarrow \Delta Q_{Supply}$
- Rohrleitungsverluste ergeben sich aus Faktor k
- Wärmeverluste: $Q_{Verlust,i,neu} = 1 \cdot k \cdot \left(\frac{T_{VL,Kunde,i,neu} + T_{RL,Kunde,i,neu}}{2} - T_{Boden,i} \right)$
- Wärmebereitstellung (Kunde): $Q_{Kunde,i,NEU} = Q_{Kunde,i,SQ}$
- Wärmebereitstellung (Erzeuger): $Q_{supply,i,NEU} = Q_{Kunde,i,SQ} + Q_{Verlust,i,NEU}$
- Wirtschaftlichkeit
 - $Annuität = CAPEX \cdot Annuitätenfaktor + OPEX_{Maßnahme} - Einsparung_Brennstoff$

Abschätzung der Leistungen

- Generisches Fernwärmeprofil Österreich*
- Deckung Jahresbedarf durch BM in % (User)
- $\frac{\text{Biomasseanteil}}{\text{Wärmebedarf}} = \frac{(8760-x) \cdot P_x + \sum_0^x P_i}{\text{Wärmebedarf}} \Rightarrow P_{\text{Biomasse}}$
- $P_{\text{Spitzenlast}} = P_{\text{MAX}} - P_{\text{Biomasse}}$
- $Q_{BM,i} = \min(Q_{\text{Supply},i}, P_{BM,i} \cdot \frac{h}{\text{Saison}})$
- $Q_{\text{Spitzenlast},i} = Q_{\text{Supply},i} - Q_{BM,i}$



* [Hotmaps open data repositories](#) (Anpassung auf Bundeslandebene möglich)

Wärmebedarf

Auswahl Bundesland:

Daten der Landeshauptstädte¹

Wärmebedarf pro Jahr

Wärmebedarf pro Quartal:

Verteilung basierend auf HGT
(Auswahl Bundesland) oder
Usereingabe

Heizwerk status quo

Standort

Salzburg (Salzburg)

Wärmebedarf pro Jahr [MWh]

2000

Wärmebedarf pro Quartal [MWh]

Winter

800

Sommer

220

Frühling

500

Herbst

460

¹Messdaten — ZAMG

Spezifikation Brennstoff & Spitzenlast

Wassergehalt der Biomasse in m%

Sauerstoffgehalt im RG in Vol%

Auswahl Brennstoff:

- Hackgut Nadelholz
- Hackgut Laubholz hart
 - Pellets

Deckung des Jahresbedarfs durch
Biomasse in % [kWh/kWh]

Spitzenlastkesseltyp:

- Öl
- Elektro
- Erdgas

Biomasse Wassergehalt [Massen %]

20

Sauerstoffgehalt im Rauchgas [Vol%]

5,0

Brennstoff Typ

Hackgut Nadelholz



Deckung durch Biomasse [%]

90

Spitzenlast Kessel

Öl



Definition der Systemtemperaturen

Definition des Status quo der Temperaturen auf der Abnehmerseite & Netzverluste

Wärmenetz status quo			
Temperatur Vorlauf [°C]			
Winter		Frühling	
90		90	
Sommer		Herbst	
90		90	
Temperatur Rücklauf [°C]			
Winter		Frühling	
60		60	
Sommer		Herbst	
60		60	
Netzverluste [%]			
10			

Wärmenetz neu			
Temperatur Vorlauf [°C]			
Winter		Frühling	
90		90	
Sommer		Herbst	
90		90	
Temperatur Rücklauf [°C]			
Winter		Frühling	
60		60	
Sommer		Herbst	
60		50	

Anpassung der Temperaturen

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Solarthermie



VORZEIGEREGION
ENERGIE

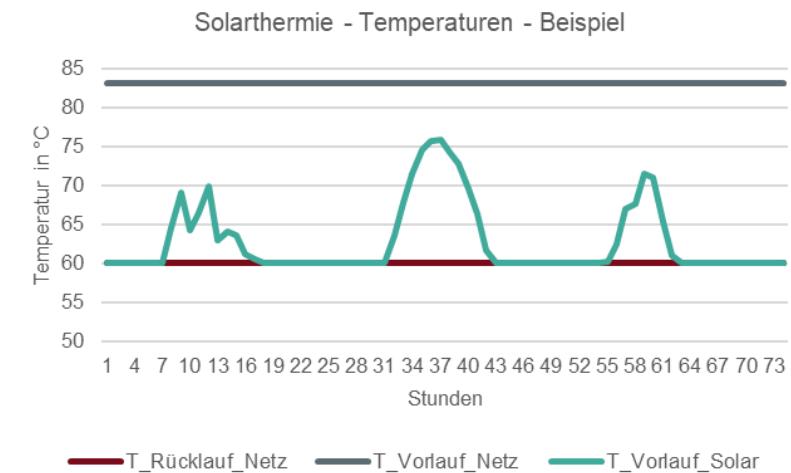


Solarthermie

- Die Integration von Solarthermieanlagen in Wärmenetze erfordert eine sorgfältige Planung:
- Bei hohem solarem Deckungsanteil wird in der Regel ein thermischer Speicher benötigt, um das Missverhältnis zwischen Solarwärmeerzeugung und Wärmebedarf auszugleichen (z. B. Tag/Nacht, Sommer/Winter).
- Je nach Einbindung (zentrale Einspeisung, Rücklauf/Vorlauf oder Kesselvorwärmung) können sich unterschiedliche Anforderungen an Vor- und Rücklauftemperaturen ergeben.
- In BM Retrofit wurden Solarthermieanlagen erfolgreich zur Abdeckung der Sommerlast und zur Unterstützung der Heizperiode eingesetzt.
- Für die Auslegung und Fördermöglichkeiten stehen Programme (z. B. Klima- und Energiefonds) zur Verfügung, deren Anforderungen (Beratungsgespräche, Monitoring) zu beachten sind.
- Diese Punkte sollten vor der Aktivierung sorgfältig geprüft und mit dem Anlagenbauer abgestimmt werden, um eine effiziente Integration der Solarthermie in das Wärmenetz sicherzustellen.

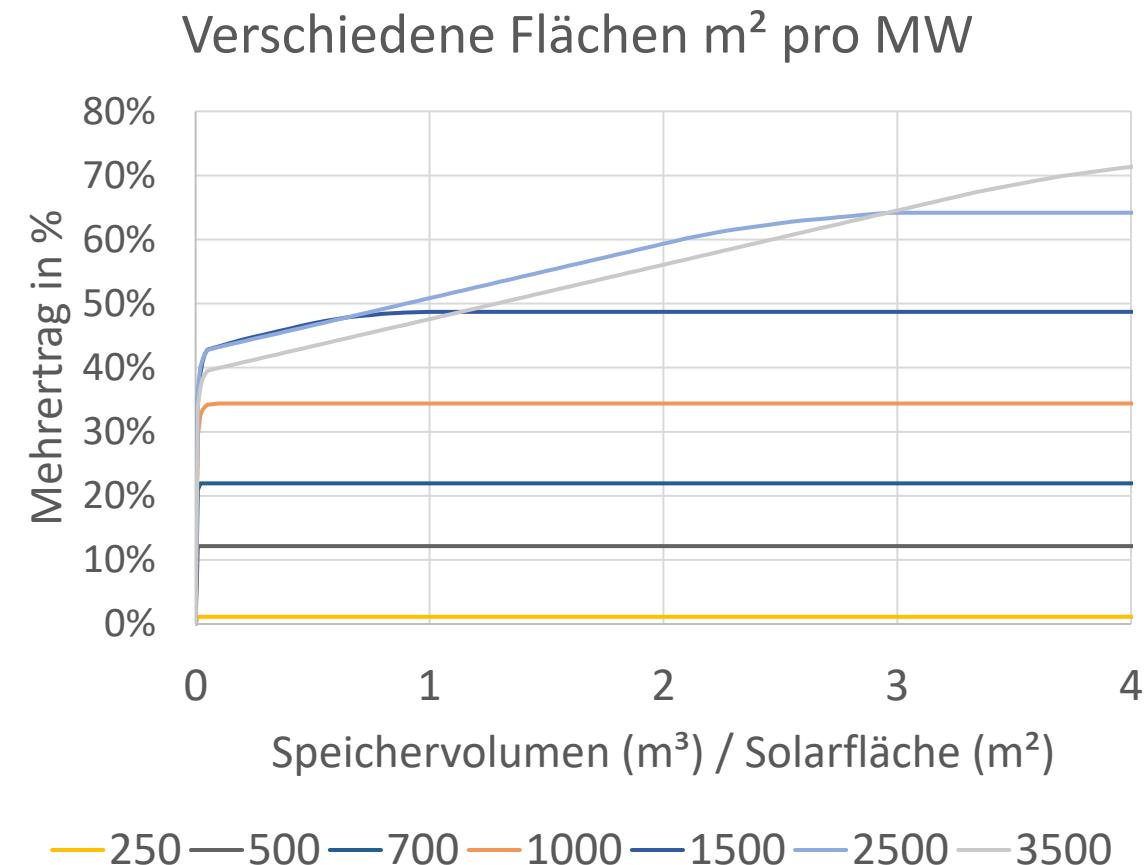
Solarthermie

- Hintergrund
 - Nutzung von Solarthermie zur Anhebung des Rücklaufs
 - Solarthermie nützt als erstes den Rücklauf des Verbrauchers
- Maßnahme:
 - ZAMG Daten zu Globalstrahlung & Außentemperatur der 9 Landeshauptstädte
 - Stündliche Daten: Strahlung G & Außentemperatur T_A
 - Saisonale Daten: Rücklauftemperatur ($T_{RL,i}$), Massenstrom (m_i)
 - Kollektordaten: Fläche A
 - Berechnung von solarer Vorlauftemperatur ($T_{VL,S}$)
 - $m_i \cdot cp \cdot (T_{VL,S,i} - T_{RL,i}) = \left(\eta_0 - \frac{a_1 \cdot (T_{M,i} - T_A)}{G} - \frac{a_2 \cdot (T_{M,i} - T_A)^2}{G} \right) \cdot G \cdot A$
 - $T_M = \frac{T_{VL,S} + T_{RL}}{2}$
 - $T_{VL,i,Netz} \geq T_{VL,S,i} \geq T_{RL,i}$
 - $Q_{Solar,i} = m_i \cdot cp \cdot (T_{VL,S,i} - T_{RL,i}) \rightarrow$ Aggregation pro Quartal



Wärmespeicher – Solarthermie

- Hintergrund
 - Nutzen eines Wärmespeichers um solaren Ertrag zu erhöhen
- Maßnahme
 - Abschätzung des jährlichen Effekts
 - Gegeben:
 - Solarthermie pro installierter Leistung in m^2/MW
 - Speichervolumen wird variiert (m^3/m^2)
 - Bedarf ist irgendwann gedeckt → wie viel mehr kann ich über das Jahr von der gegebenen Solarfläche nutzen?
 - Vereinfachungen:
 - Unendlich schnelles Laden/Entladen
 - Keine Speicherverluste
 - Verteilung gleich auf die Saisonen



Fazit

- Solarthermie – Fazit
 - Ertrag sinkt mit steigenden Netztemperaturen → geringere Effizienz
 - Solarertrag \propto Fläche und Strahlungsangebot, limitiert durch Rücklauftemperatur
 - CAPEX/OPEX steigen mit Fläche, aber spezifische Kosten sinken
 - Sommererträge oft ungenutzt ohne Speicher
 - Wirtschaftlich vorteilhaft bei niedrigen Vorlauftemperaturen
 - Hohe Solarfläche senkt Biomasseeinsatz, steigert CAPEX
- Wärmespeicher – Solarthermie – Fazit
 - Speicher steigert nutzbare Solarenergie (Boost-Faktor)
 - Mehrertrag steigt mit Speichergröße, sättigt ab ca. $2-3 \text{ m}^3/\text{m}^2$
 - CAPEX \propto Speichergröße, OPEX kaum beeinflusst
 - Wirtschaftlich nur bei hohem Solarertrag sinnvoll
 - Starker Effekt bei niedrigen Rücklauftemperaturen
 - Speicher erhöht Solar-Deckungsgrad, aber mit Investitions-Trade-off

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Kompressionswärmepumpe mit externer Quelle



VORZEIGEREGION
ENERGIE

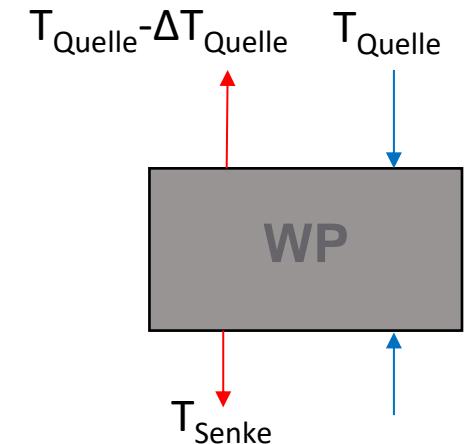
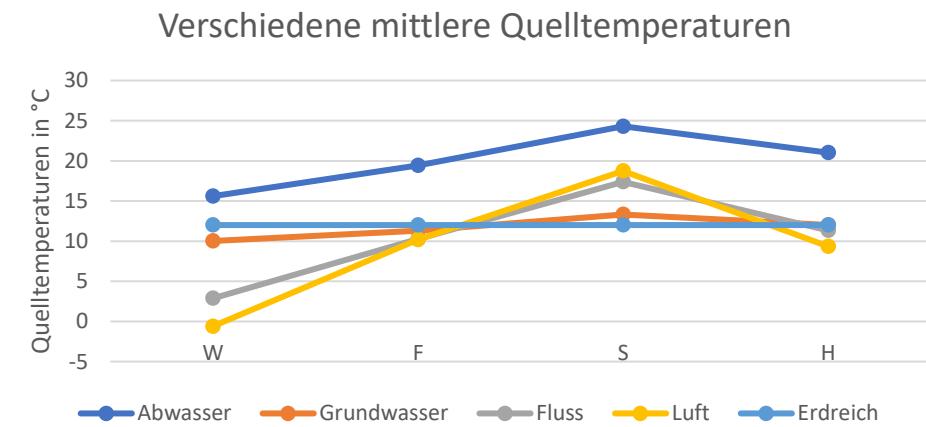


Wärmepumpe

- Folgende Punkte sollten vor Aktivierung beachtet werden:
 - Geeignete Wärmequelle (z. B. Abwärme oder Rücklaufwasser) ist vorhanden.
 - Temperaturniveau der Wärmequelle möglichst niedrig (COP steigt mit niedrigem Temperaturniveau).
 - Die gewünschte Vorlauftemperatur liegt idealerweise unter 100 °C (höhere Temperaturen sind möglich, jedoch mit Effizienzverlusten).
 - Elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors berücksichtigen.
 - Hydraulische Einbindung in das Wärmenetz prüfen (Rücklauf oder Vorlauf geeignet?).
 - Regelung bei Kombination mit Rauchgaskondensation beachten.
- Diese Punkte sollten insbesondere in bestehenden Anlagen gemeinsam mit dem Anlagenbauer geprüft und abgestimmt werden, um eine stabile und effiziente Funktion sicherzustellen.

Kompressionswärmepumpe

- Hintergrund
 - Anhebung des Rücklaufs um ΔT_{RL} durch Wärmepumpe
- Maßnahme:
 - Angabe von ΔT_{RL} pro Saison
 - Wärmebereitstellung:
 - $Q_{WP,i} = \min(Q_{Supply,i}, P_{WP,i} \cdot \frac{h}{Saison})$
 - Verdrängung von 1.) Spitzenlast 2.) Biomasse
 - Strombedarf mittels Carnot COP:
 - $COP = \frac{T_{Senke}}{T_{Senke} - (T_{Quelle} - \Delta T_{Quelle})} \cdot \text{Gütegrad}$
 - $\Delta T_{Quelle} = 8 \text{ K für Luft} / 5 \text{ K für andere}$



Fazit Wärmepumpe

- Hebt Rücklauftemperatur an, reduziert Bedarf an Spitzenlast und Biomasse
- Nutzen hängt stark von Quellentemperatur und Netztemperatur ab
- Höherer COP bei niedriger Senkentemperatur und stabiler Quelle
- Elektrischer Mehrbedarf steigt mit Temperaturhub
- CAPEX \propto installierter thermischer Leistung, OPEX dominiert durch Stromkosten
- Wirtschaftlich bei günstiger Strombeschaffung oder hoher Brennstoffeinsparung

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Wärmespeicher Lastverschiebung



VORZEIGEREGION
ENERGIE

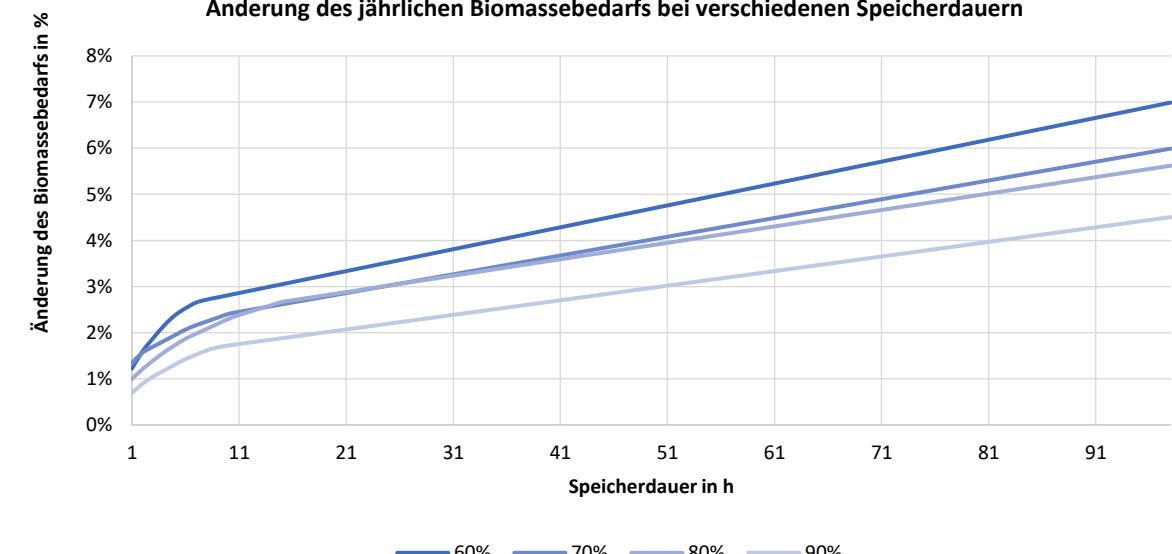
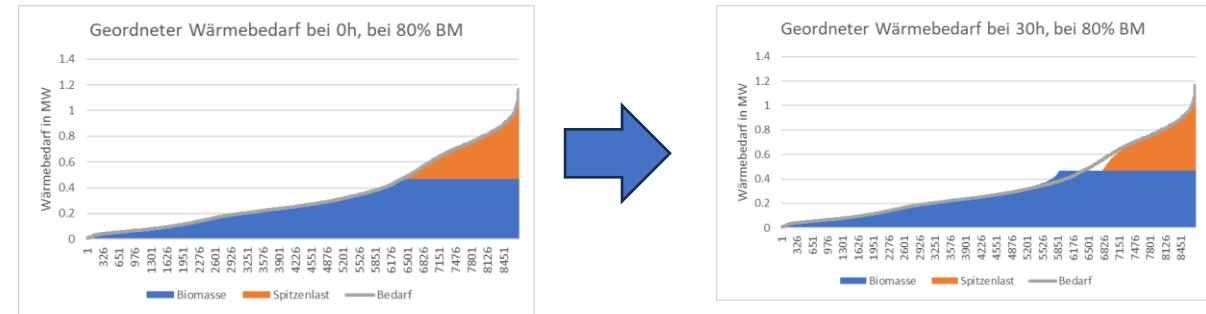


Wärmespeicher

- Bitte prüfen Sie vor Aktivierung die Eignungskriterien für Wärmespeicher sorgfältig:
 - Üblicherweise werden Wasserspeicher eingesetzt.
 - Dimensionierung: Speichervolumen sollte mindestens 1 Stunde bezogen auf die Nennleistung des Holzkessels betragen (besser mehr bei hoher Lastflexibilität).
 - Hydraulische Einbindung: Pufferspeicher helfen Lastspitzen auszugleichen und die Emissionen sowie den Verschleiß zu reduzieren.
 - Für Anlagen mit Warmwasserbereitung, Prozesswärme oder Außenschwimmbädern können größere Speicherkapazitäten erforderlich sein.
 - Temperaturschichtung und Ladezustand sind wichtige Faktoren für einen effizienten Speicherbetrieb (mindestens 5 Temperaturfühler).
 - Platzbedarf und bauliche Gegebenheiten berücksichtigen (z. B. oberirdisch oder unterirdisch, Heizhausintegration).
- Diese Punkte sollten in Abstimmung mit dem Anlagenbauer geprüft werden, um eine effiziente und emissionsarme Funktion zu gewährleisten.

Wärmespeicher – Lastverschiebung

- Hintergrund
 - Nutzung eines Wärmespeichers zur Erhöhung der Vollaststunden des Biomassekessels und zur Reduktion des Spitzenlastkessels
- Maßnahme:
 - Abschätzung des jährlichen Effekts
 - Speicherdauer - Auswahl: 0 h – 98 h
 - Speicherkapazität: Installierte Leistung (MW) x Speicherdauer (h)
 - Variation Biomasseanteil (0 -100 %, 1% Schritte)
 - Steigerung der Vollaststunden der BM
 - Annahmen:
 - Thermische Verluste werden vernachlässigt
 - Speicherung beliebig lange



Fazit Wärmespeicher

- Erhöht Vollaststunden der Biomasseanlage → geringere Spitzenlastnutzung
- Biomasseanteil wird vorgegeben und bestimmt Speicherwirkung
- Längere Speicherdauer → geringere Spitzenlast, höherer CAPEX
- Speicherverluste werden vernachlässigt, OPEX kaum verändert
- Wirtschaftlich bei hoher Auslastung der BM und schwankender Nachfrage
- Investitionskosten \propto Speichervolumen, Einsparungen \propto verdrängte Spitzenlast

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



CO/Lambda Sonde



VORZEIGEREGION
ENERGIE



CO/Lambda

- Bitte prüfen Sie vor Aktivierung die Eignungskriterien der CO/Lambda Sonde sorgfältig:
 - Sauerstoffregler: Sollwert ist frei vorgebar
 - Sauerstoffregler: Sollwert wird erreicht
 - Sauerstoffregler: Stellgerät vorhanden (z. B. Sekundärluftventilator oder Brennstoffzufuhr)
 - Rauchgasrezirkulation vorhanden
 - Feuerraumtemperaturregler: Sollwert wird erreicht
- Diese Kriterien sollten erfüllt sein oder individuell geprüft werden, damit die CO/Lambda-Regelung wirksam eingesetzt werden kann.
- **Zusätzliche Hinweise zur CO/Lambda-Optimierung:**
 - Ein abgesenkter Sauerstoffgehalt im Rauchgas kann den Wirkungsgrad erhöhen, jedoch bei zu geringer Feuerraumtemperatur hohe CO-Emissionen verursachen.
 - Probleme wie Ascheaustrag mit undichtem Schieber und teilweise niedrige Feuerraumtemperaturen können die Effizienz der CO/Lambda-Regelung beeinträchtigen.
 - Softwareseitige IF-ELSE-Verknüpfungen in der Steuerung können die Anpassung des O₂-Sollwertes erschweren und die Betriebsflexibilität einschränken.
 - Die Modelfunktion der CO-Lambda-Charakteristik reagiert empfindlich auf Parameteranpassungen; eine stabile und ausreichend hohe Feuerraumtemperatur ist entscheidend.
 - Eine starke Absenkung des Rest-O₂ kann den Unterdruckregler an die oberen Grenzen seiner Leistungsfähigkeit bringen und zu Betriebsinstabilitäten führen.
 - Individuelle Lösungen (je nach Hersteller, Anlagentyp und Automatisierung) sollten mit dem Anlagenbauer abgestimmt werden, um eine stabile und emissionsarme Funktion sicherzustellen

Physikalische Abbildung der Verbrennung

- Alle gängigen Holzarten bestehen zu etwa:
 - $50 \pm 3\%$ Kohlenstoff (C),
 - $6 \pm 1\%$ Wasserstoff (H) und
 - $44 \pm 3\%$ Sauerstoff (O) (Massenanteil).
 - Der restliche Anteil entfällt auf anorganische Asche.
 - Beispiel ($x=1$, $y=1.44$, $z=0.66$):
 - $aO_2 + a\frac{0.79}{0.21}N_2 + CH_{1.44}O_{0.66} + w_wH_2O = CO_2 + bH_2O + c_NN_2 + dO_2$
 - Annahme: Ideale Verbrennung (kein NO_x , CO, C (Ruß))
 - Schwefel andere Mineralien werden vernachlässigt → Asche
 - Wasserstoff: $1.44 + 2w_w = 2b$
 - Sauerstoff: $2a + 0.66 + w_w = 2 + b + 2d$
 - Stickstoff: $a\frac{0.79}{0.21} = c_N$
 - Externer Input:
- w_w = Aus Wassergehalt von Holz (Eingabe in Gew.%) (Wassergehalt Luft wird vernachlässigt)
- d = Aus Sauerstoffgehalt im RG berechnen (Sauerstoffgehalt im RG in Vol%)

Table 3. Ultimate analysis of wood (dry, ash-free weight percent)

Element	Average of 11 hardwoods ^a	Average of 9 softwoods ^a	Oak bark ^b	Pine bark ^b
C	50.2	52.7	52.6	54.9
H	6.2	6.3	5.7	5.8
O	43.5	40.8	41.5	39.0
N	0.1	0.2	0.1	0.2
S	—	0.0	0.1	0.1

^aTillman *et al.* (1981).

^bAnon. (1972b).

CO-Lambda Sonde & Wirkungsgrad

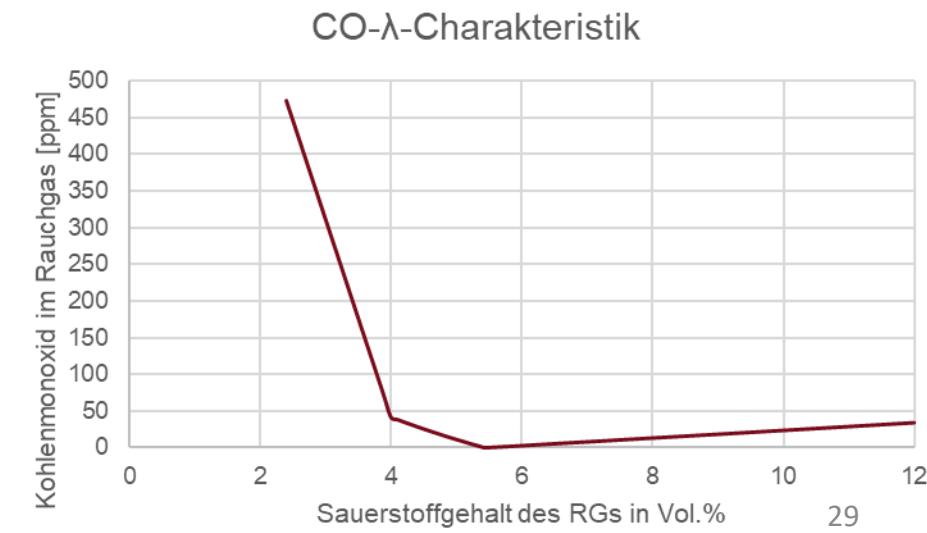
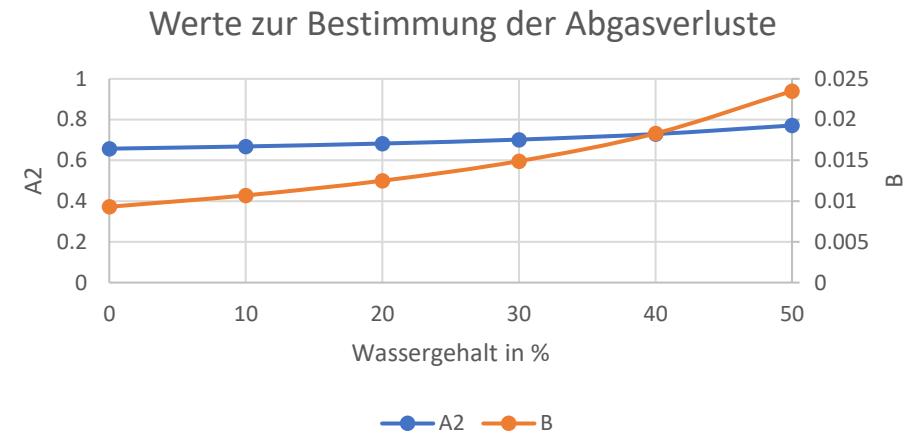
- Hintergrund
 - Reduktion der CO-Emissionen & Optimierung des Wirkungsgrades
- Maßnahme
 - Veränderung des Sauerstoffgehalts im Rauchgas
 - Interpolierte Werte aus Messungen (für CO Wert)
 - Feuerungstechnischer Wirkungsgrad*,** η_F
 - $q_A = (FT - AT) \cdot \left(\frac{A_2}{21\%-O_2} + B \right)$
 - $\eta_F = 100\% - q_A$
 - Strahlungsverluste: $q_{ST} \sim 2\%$
 - Kesselwirkungsgrad: $\eta_K = 100\% - q_A - q_{ST}$

[*field-guide-heating-measurement-technology.pdf](#)

[**formelheft_maerz_2019_tfbs_bautechnik.pdf](#)

FT... Rauchgastemperatur

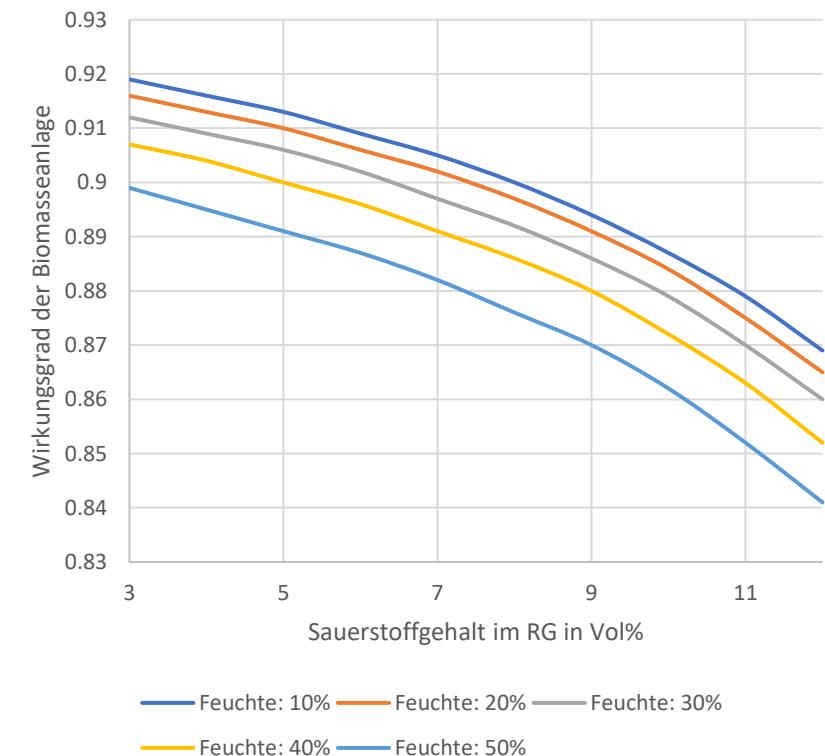
AT... Verbrennungslufttemperatur = 25°C



Fazit CO Lambda

- Sauerstoffgehalt im Rauchgas (λ) steuert Verbrennungsqualität und CO-Ausstoß
- Niedriger O₂-Anteil → höherer Wirkungsgrad, aber Risiko erhöhter CO-Werte
- Hoher O₂-Anteil → stabiler Betrieb, jedoch mehr Abgasverluste
- Optimales λ reduziert Brennstoffverbrauch und verbessert BM-Effizienz
- Wassergehalt des Holzes beeinflusst optimalen λ -Wert
- Effizienzverbesserung wirkt sich nur über Brennstoffkosten auf OPEX aus

Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Sauerstoff und Feuchte



BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Passive Rauchgaskondensation



VORZEIGEREGION
ENERGIE

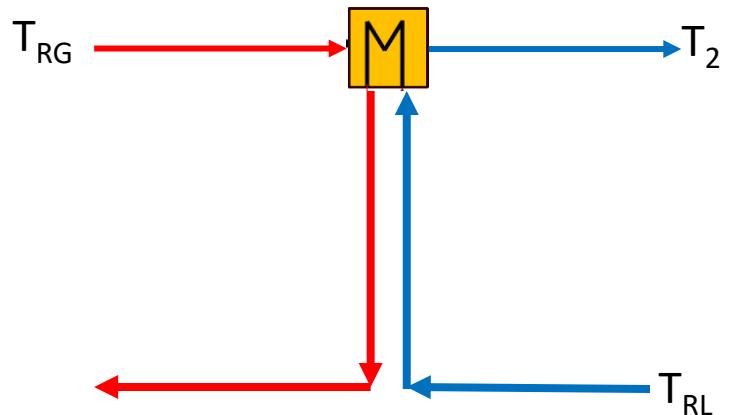


Passive Rauchgaskondensation

- Bitte prüfen Sie vor Aktivierung die Eignungskriterien der Passiven Rauchgaskondensation sorgfältig:
- Das Rauchgas wird über den Netzrücklauf abgekühlt: $T_2 \approx T_{RL} + \Delta T$
- Kondensation (latente Wärme) entsteht nur, wenn **T_2 unter den Taupunkt fällt**.
- Je niedriger die Rücklauftemperatur, desto höher die Wärmerückgewinnung.
- Höhere Brennstofffeuchte erhöht das Kondensationspotenzial.
- Kondensat kann Korrosion/Wartungsaufwand verursachen (Ableitung/Material beachten).
- Diese Kriterien sollten erfüllt sein oder individuell geprüft werden, damit die Maßnahme wirksam eingesetzt werden kann.

Rauchgaskondensation

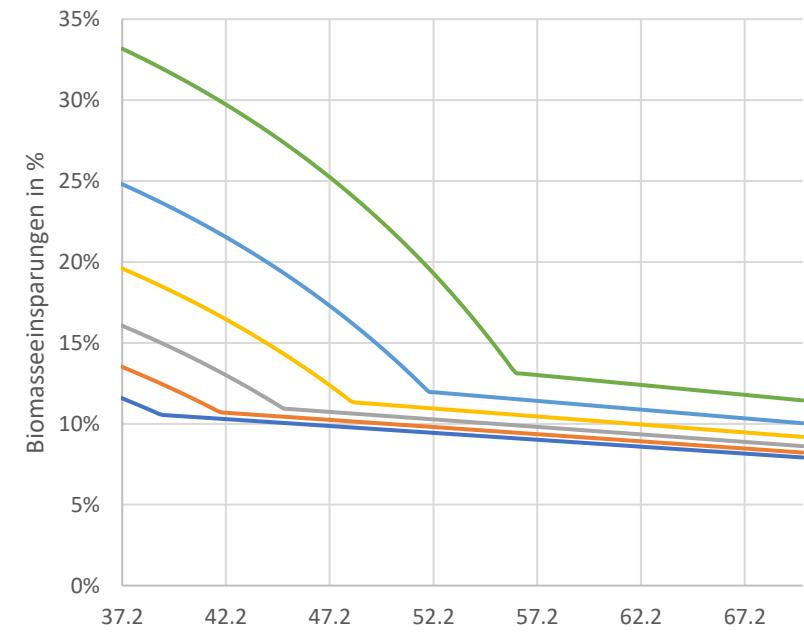
- Hintergrund
 - Kondensation mit dem Rücklauf zur Energierückgewinnung aus dem Rauchgas
- Maßnahme
 - 1 kg Rauchgas wird von Temperatur $T_1 \rightarrow T_2$ abgekühlt ($T_2 < T_1$).
 - $\Delta E = c_{p,fluegas}(m_0 - m_{condensate}^{water})(T_1 - T_2) + m_{condensate}^{water}L_{cond}$
 - Berechnung von $m_{condensate}^{water}$:
 - Sättigungslinie:
 - Feuchtegehalt(T)-Kurve für gesättigtes Rauchgas.
 - Berechnung des Dampfdrucks von Wasser mit der August-Roche-Magnus-Gleichung (ARM).
 - Partialdruck des Wassers:
 - $p_{ARM}(T)$: Partialdruck von Wasserdampf im Rauchgas.
 - Molanteil des Wassers:
 - Verhältnis des Partialdrucks: $b_{max} = \frac{P_{ARM}(T)}{P_{amb}-P_{ARM}(T)}(1 + c_N + d)$
 - Kondensation:
 - Überschüssiger Wasserdampfanteil über b_{max} kondensiert.
 - Masse des kondensierten Wassers hängt direkt von der Temperatur ab.
- Passive Rauchgaskondensation
 - $T_2 = T_{RL} + \Delta T_{Wärmetauscher}$



Fazit Passive Rauchgaskondensation

- Rückgewinnung latenter Wärme durch Kondensation von Wasserdampf im Rauchgas
- Zusätzlicher Energiegewinn \propto Holzfeuchte und Temperaturdifferenz ($T_1 - T_2$)
- Hohe Feuchte \rightarrow mehr Kondensat \rightarrow höhere Rückgewinnung
- Wirksamkeit begrenzt durch Rücklauftemperatur, da $T_2 = T_{RL} + \Delta T$
- CAPEX \propto Wärmetauschergröße, OPEX gering (nur Reinigung/Wartung)
- Wirtschaftlich vorteilhaft bei niedriger Rücklauftemperatur und feuchtem Brennstoff

Biomasseeinsparungen in Abhängigkeit von Feuchte und Abgastemperatur



— Feuchte: 10% — Feuchte: 20% — Feuchte: 30%
— Feuchte: 40% — Feuchte: 50% — Feuchte: 60%

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Aktive Rauchgaskondensation Absorptionswärmepumpe



VORZEIGEREGION
ENERGIE

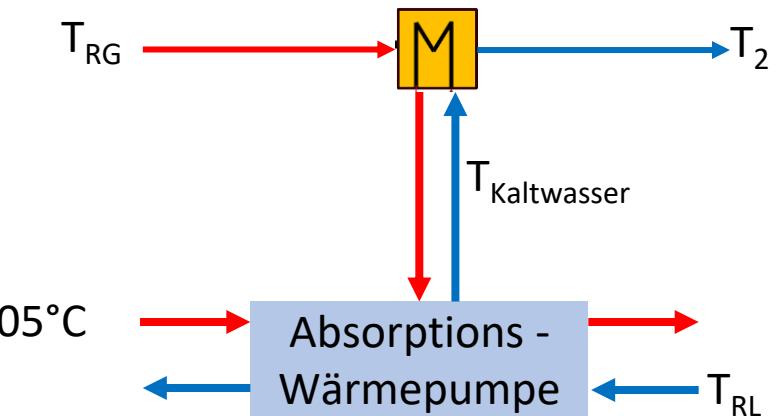


Aktive Rauchgaskondensation

- Bitte prüfen Sie vor Aktivierung die Eignungskriterien der Aktiven Rauchgaskondensation sorgfältig:
 - Kesselgröße: > 1 MW empfohlen, optimal > 3 MW
 - Brennstoff Wassergehalt: > 30 % (kein hartes Limit, aber günstig)
 - Rücklauftemperatur (T_{RL}): < 60 °C (idealerweise), < 90 °C möglich
 - Vorlauftemperatur (T_{VL}): < 100 °C
 - Rest O₂ Rauchgas: ~6 %
 - Temperatur Antriebswärme: ≥ 105 °C
 - Platzbedarf: RGK sollte nahe Kessel/Kamin stehen
 - Mit/ohne ECO: Effizienz steigt mit ECO, aber nur leicht
- Diese Kriterien sollten erfüllt sein oder individuell geprüft werden, damit die Aktive Rauchgaskondensation wirksam eingesetzt werden kann.
- **Zusätzliche Hinweise:**
 - Wirkungsgradsteigerung: Wärmerückgewinnung kann Rauchgastemperaturen von 120–160 °C auf < 20 °C absenken.
 - Hauptkomponenten: Economiser, Wärmetauscher, Kondensator, LUVO (Luftvorwärmer)
 - Je niedriger die Rücklauftemperatur, desto höher der Ertrag.
 - Mehr Wasserdampf im Rauchgas = höherer Ertrag (Taupunkt steigt mit Wassergehalt und sinkt mit Höhe).
 - Aktive Rauchgaskondensation kann die Wärmerückgewinnung auf über 30 % steigern.
 - Absorptions-WP: Wärmegetriebene Maschine, Kompressions-WP: stromgetrieben (oft wirtschaftlich schwieriger).

Absorption - Rauchgaskondensation

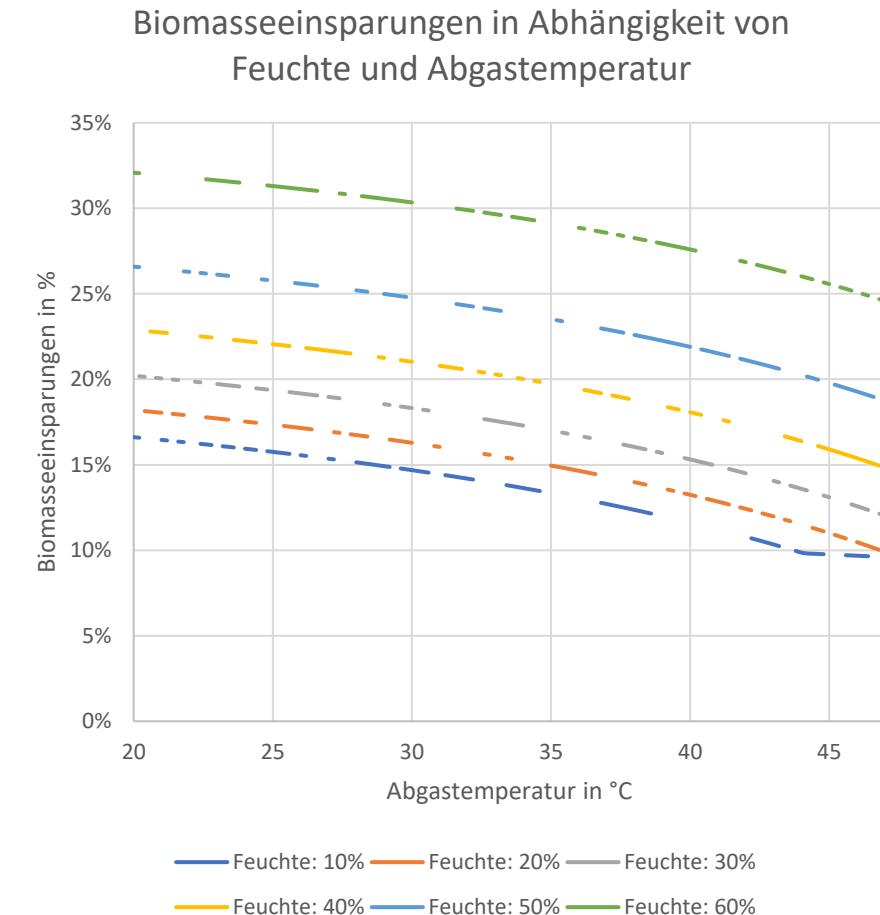
- Hintergrund
 - Rauchgaskondensation → Energierückgewinnung
- Maßnahme
 - 1 kg Rauchgas wird von Temperatur $T_1 \rightarrow T_2$ abgekühlt ($T_2 < T_1$).
 - $\Delta E = c_{p,fluegas}(m_0 - m_{condensate}^{water})(T_1 - T_2) + m_{condensate}^{water}L_{cond}$
 - Berechnung von $m_{condensate}^{water}$:
 - Sättigungslien:
 - Feuchtegehalt(T)-Kurve für gesättigtes Rauchgas.
 - Berechnung des Dampfdrucks von Wasser mit der August-Roche-Magnus-Gleichung (ARM).
 - Partialdruck des Wassers:
 - $p_{ARM}(T)$: Partialdruck von Wasserdampf im Rauchgas.
 - Molanteil des Wassers:
 - Verhältnis des Partialdrucks: $b_{max} = \frac{P_{ARM}(T)}{P_{amb}-P_{ARM}(T)}(1 + c_N + d)$
 - Kondensation:
 - Überschüssiger Wasserdampfanteil über b_{max} kondensiert.
 - Masse des kondensierten Wassers hängt direkt von der Temperatur ab.
- Aktive Rauchgaskondensation (Absorptionswärmepumpe)
 - Empirische Werte von StepsAhead
 - $T_{Kaltwasser} = T_{RL} - 20^\circ C$
 - $T_2 = T_{Kaltwasser} + \Delta T_{Wärmetauscher}$



105°C

Fazit Aktive RGK mit Absorptionswärmepumpe

- Nutzt Wärme aus Rauchgasen unterhalb Rücklauftemperatur zur Rückgewinnung
- Kaltes Wasser ($\approx T_{RL} - 20^\circ\text{C}$) ermöglicht tiefere Kondensation und höheren Ertrag
- Hoher Anteil latenter Wärme
- Biomasseeinsparung steigt mit Brennstofffeuchte und sinkender Abgastemperatur
- CAPEX höher durch zusätzliche Absorptions-WP, OPEX moderat (Antriebswärme)
- Wirtschaftlich bei feuchtem Brennstoff und ganzjährig hohem Rücklaufbedarf



BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Aktive Rauchgaskondensation Kompressionswärmepumpe

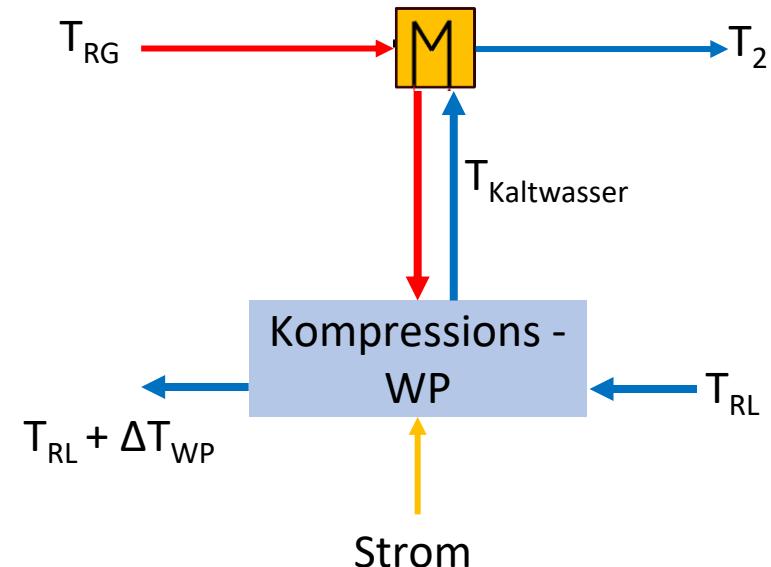


VORZEIGEREGION
ENERGIE



Rauchgaskondensation - Kompression

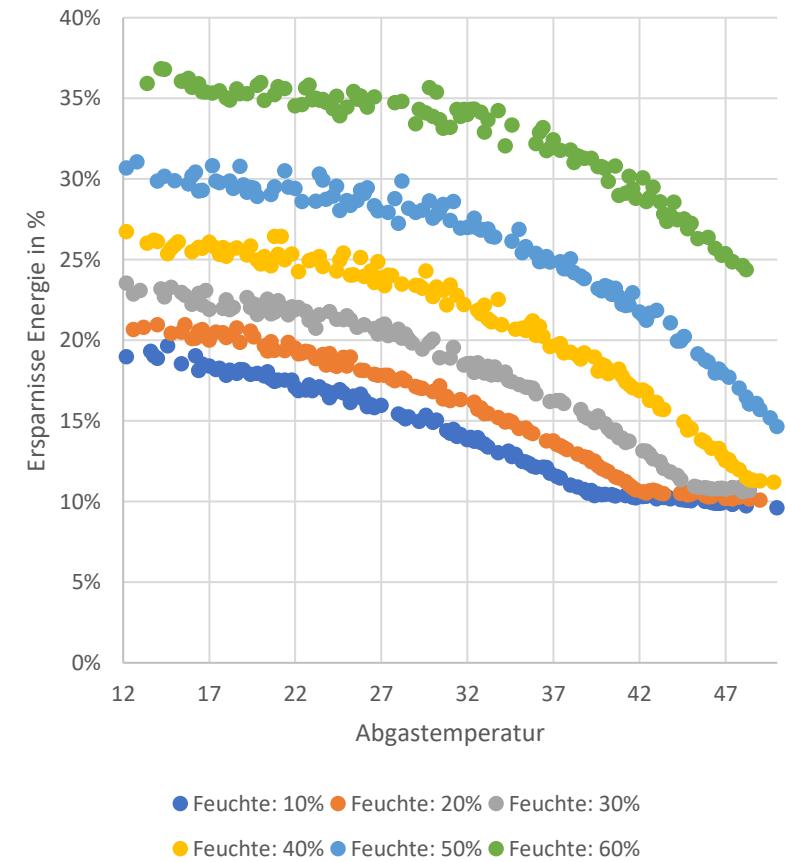
- Hintergrund
 - Rauchgaskondensation → Energierückgewinnung
- Maßnahme
 - Siehe Absorptionswärmepumpe
 - Userinputs:
 - Abkühlung unter Rücklauf um ΔT_{RG}
 - Erwärmung des Rücklaufs um ΔT_{WP}
 - Carnot COP Berechnung
- Aktive Rauchgaskondensation (Kompression)
 - $T_{Kaltwasser} = T_{RL} - \Delta T_{RG}$
 - $T_2 = T_{Kaltwasser} + \Delta T_{Wärmetauscher}$



Fazit Aktive RGK – Kompressionswärmepumpe

- Nutzt elektrische Wärmepumpe zur zusätzlichen Absenkung der Abgastemperatur
- Kombiniert sensible und latente Wärmegewinnung mit elektrischer Antriebsenergie
- Höhere Effizienz als passive RGK, aber abhängig vom Strompreis
- Energieeinsparung \propto Brennstofffeuchte und \propto Temperaturdifferenz ΔT_{RG}
- CAPEX höher (Wärmepumpe + Wärmetauscher), OPEX dominiert durch Stromkosten
- Wirtschaftlich nur bei moderaten Strompreisen und hoher Wärmerückgewinnung

Energetische Ersparnisse für verschiedene Feuchte und Abgastemperaturen



BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Wirtschaftlichkeitsberechnung



VORZEIGEREGION
ENERGIE



Wirtschaftlichkeitsberechnung

- Angabe von Energiepreisen in €/MWh
 - Strom / Biomasse / Brennstoff
- Angabe von Diskontierungsfaktor
- Pro Maßnahme
 - Spezifische CAPEX / O&M / Lebensdauer
- Berechnung der Annuität
 - $$\text{Annuität} = \text{CAPEX} \cdot \text{Annuitätenfaktor} + O\&M_{\text{Maßnahme}} - \text{Brennstoffkosteneinsparung}_{\text{Spitze}} - \text{Brennstoffkosteneinsparung}_{\text{Biomasse}}$$
- Ergebnisse:
 - CAPEX / O&M / Stromkosten / Einsparung Biomasse / Einsparung Spitzelast / Amorisationszeit

BM Retrofit – Development and demonstration of holistic retrofitting concepts for biomass-based district heating networks



Testcase



VORZEIGEREGION
ENERGIE



Testcase Steiermark

- Heizwerk Status Quo
 - Standort: Steiermark (Graz)
 - Wärmebedarf pro Jahr [MWh]: 3200
 - Wärmebedarf pro Quartal [MWh]
 - 1400 / 700 / 400 / 700
 - Brennstoff / Abgas
 - Biomasse Wassergehalt [%]: 45
 - Sauerstoffgehalt im Rauchgas [Vol%]: 7
 - Brennstoff Typ: Hackgut Nadelholz
 - Deckung durch Biomasse [%]: 95
 - Spitzenlast Kessel: Öl
- Wärmenetz Status Quo
 - Temperatur Vorlauf [°C]
 - 90/90/90/90
 - Temperatur Rücklauf [°C]
 - 60/60/60/60
 - Netzverluste [%]: 15

▼ Heizwerk Status Quo

Standort	Steiermark (Graz)								
Wärmebedarf pro Jahr in MWh	3200								
Wärmebedarf pro Quartal in MWh	<table border="1"> <tr> <td>Winter</td> <td>Frühling</td> </tr> <tr> <td>1408</td> <td>736</td> </tr> <tr> <td>Sommer</td> <td>Herbst</td> </tr> <tr> <td>288</td> <td>736</td> </tr> </table>	Winter	Frühling	1408	736	Sommer	Herbst	288	736
Winter	Frühling								
1408	736								
Sommer	Herbst								
288	736								
Biomasse Wassergehalt [Massen %]	45								
Sauerstoffgehalt im Rauchgas in Vol%	7								
Brennstoff Typ	Hackgut Nadelholz								
Deckung durch Biomasse in %	95								
Spitzenlast Kessel	Öl								

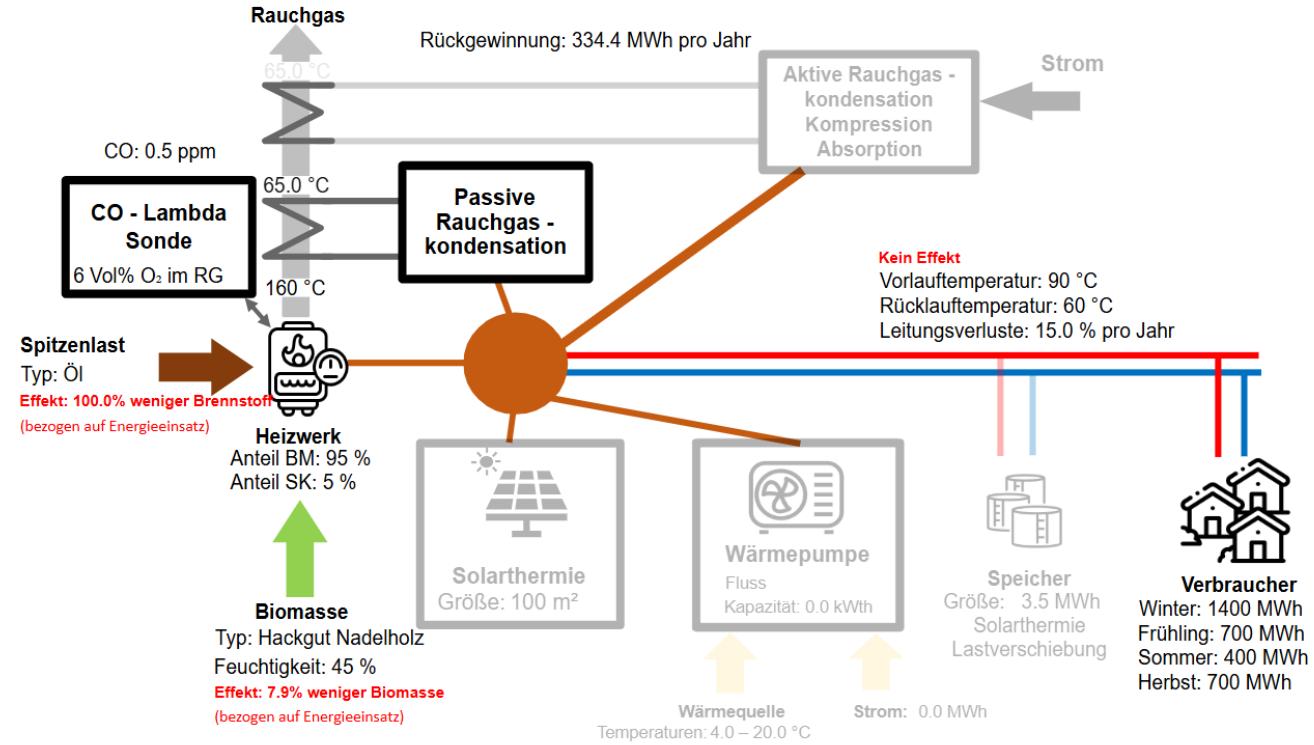
▼ Wärmenetz Status Quo

Temperatur Vorlauf in °C	
Winter	Frühling
90	90
Sommer	Herbst
90	90
Temperatur Rücklauf in °C	
Winter	Frühling
60	60
Sommer	Herbst
60	60
Netzverluste in %	15

Testcase Steiermark

- Maßnahmen
 - Passive RG Kondensation
 - Rauchgastemperatur: 160°C
 - Grädigkeit: 5K
 - CO/Lambda Sonde

<input checked="" type="checkbox"/> Passive Rauchgaskondenstation
Temperatur Rauchgas in °C
160
Wärmetauscher Grädigkeit in K
5
<input type="checkbox"/> Aktive Rauchgaskondensation
<input type="checkbox"/> Kompressionswärmepumpe
<input checked="" type="checkbox"/> CO/Lambda Sonde



Testcase Steiermark

- Wirtschaftlichkeit Parameter
 - CAPEX Leitung [€/m]: 800
 - Diskontierungsfaktor [%]: 5
 - Strompreis [€/MWh]: 150
 - Biomassepreis [€/MWh]: 40
 - Spitzenlast-Brennstoffpreis [€/MWh]: 70

Wirtschaftlichkeit Parameter

Diskontierungsfaktor in % 5

Strom Preis in EUR/MWh 150

Biomasse Preis in EUR/MWh 40

Spitzenlast-Brennstoff Preis in EUR/MWh 70

Passive Rauchgaskondensation

CAPEX in EUR/kW

2000

O&M in EUR/MWh

5

Lebensdauer in Jahren

22

Aktive Rauchgaskondensation

Kompressionswärmepumpe

CO/Lambda Sonde

CAPEX in EUR

12000

O&M in EUR/Jahr

150

Lebensdauer in Jahren

10

Testcase Steiermark

▼ Wärmebedarfsdeckung NEU - Inklusive aller
Maßnahmen

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Wärmebedarf (Kundenseitig)	1400.0 MWh	700.0 MWh	400.0 MWh	700.0 MWh
Rohrleitungsverluste	120.0 MWh	120.0 MWh	120.0 MWh	120.0 MWh
Solarenergie	0.0 MWh	0.0 MWh	0.0 MWh	0.0 MWh
Wärmepumpe	0.0 MWh	0.0 MWh	0.0 MWh	0.0 MWh
Biomasseerzeugung	1385.4 MWh	744.1 MWh	471.9 MWh	744.1 MWh
Peaklastproduktion	0.0 MWh	0.0 MWh	0.0 MWh	0.0 MWh
Rauchgaskondensation	134.6 MWh	75.9 MWh	48.1 MWh	75.9 MWh

▼ CO/Lambda

	Vorher	Nachher
Wirkungsgrad Biomasse	0.8870	0.8916
CO [ppm]	5.8	0.5

▼ Rauchgaskondensation

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Latente Wärme [MWh]	0.0	0.0	0.0	0.0
Sensible Wärme [MWh]	134.6	75.9	48.1	75.9
Gesamtwärme [MWh]	134.6	75.9	48.1	75.9

Ergebnisse

Gesamt CAPEX
134.800 EUR

Gesamt O&M
1.822 EUR / Jahr

Stromkosten
0 EUR / Jahr

Einsparung Biomasse:
12.940 EUR / Jahr

Einsparung Spitzenlast:
5.406 EUR / Jahr

Ersparnis (annualisiert)
5.641 EUR / Jahr

Statische Amortisationszeit
8.2 Jahre



VORZEIGEREGION
ENERGIE



green
energy
lab.at



Project consortium BM-Retrofit

Research instituts



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Knowhow and technology provider



Energy suppliers and DH operators

