

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



BM Retrofit Tool

Webbasierte Entscheidungshilfe für Biomasse-Nahwärmenetze Dokumentation

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



VORZEIGEREGION
ENERGIE

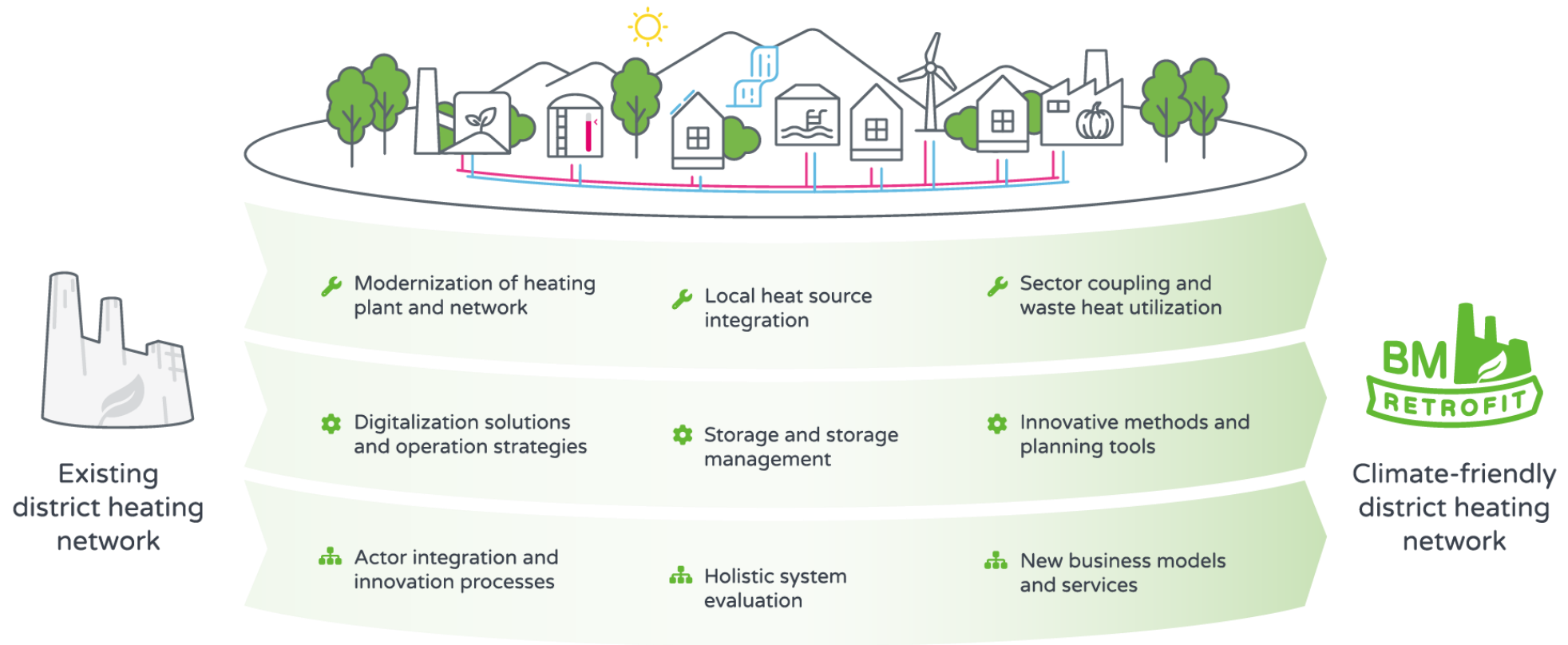


Projekt - BM Retrofit

- 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



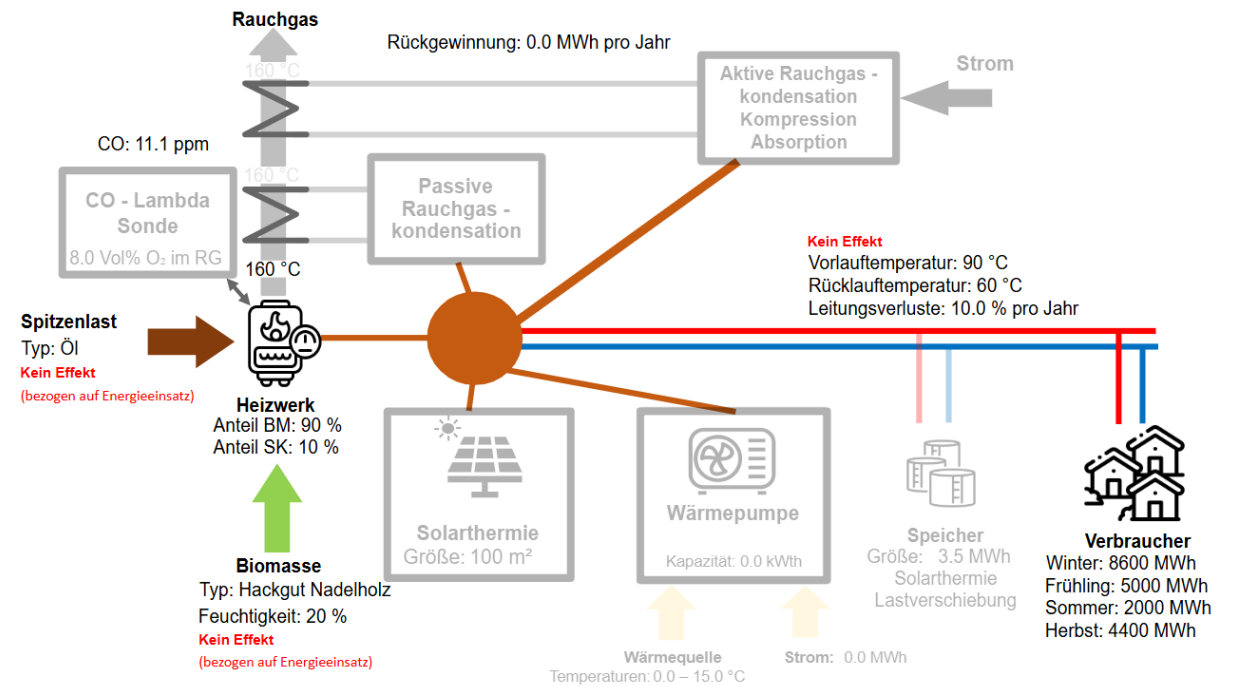
BM Retrofit Tool - Motivation

- 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 % ($\rightarrow Q_{\text{Verlust}}$)

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

Faktor k

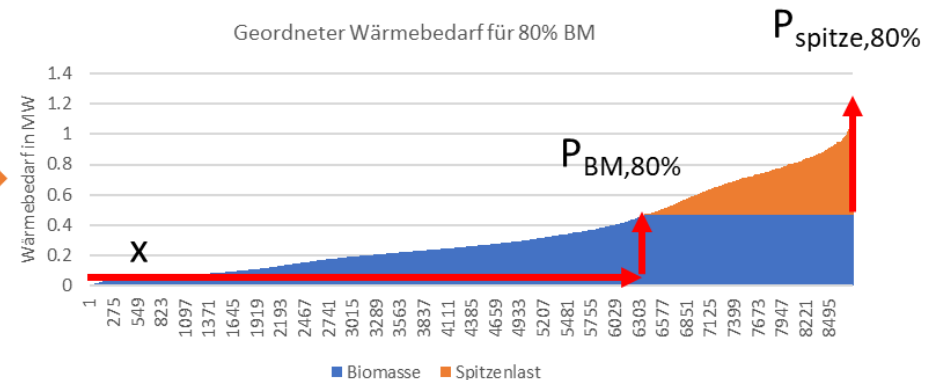
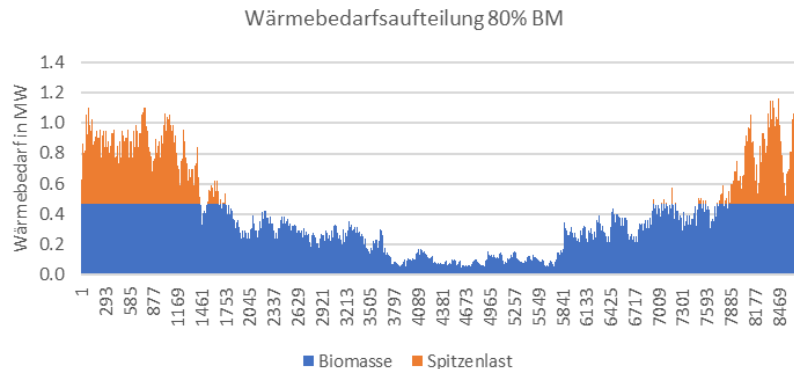
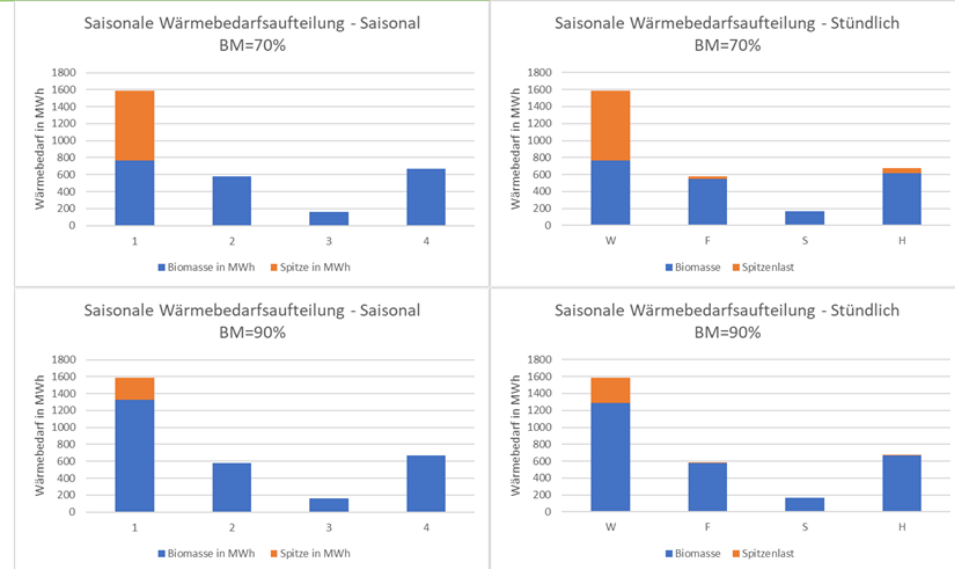
- Massenstrom: $m_{Kunde,i} = \frac{Q_{Kunde}}{c_p \cdot (T_{VLSQ_{Kunde},i} - T_{RLSQ_{Kunde},i})}$
- Faktor k: $k = \frac{Q_{Verlust}}{l \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{T_{VLSQ_{Kunde},i} + T_{RLSQ_{Kunde},i}}{2} - T_{Boden,i} \right)}$
- Verluste pro Saison: $Q_{Verlust,i} = l \cdot k \cdot \left(\frac{T_{VLSQ_{Kunde},i} - T_{RLSQ_{Kunde},i}}{2} - T_{Boden,i} \right)$
- Nötige Wärmebereitstellung (Erzeuger): $Q_{supply,i} = Q_{Kunde,i} + Q_{Verlust,i}$

Rohrleitungsverluste

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

Abschätzung der Leistungen

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



* [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 | Frühling | | |
| 800 | 500 | | |
| Sommer | Herbst | | |
| 220 | 460 | | |

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

Anpassung der Temperaturen

Wärmenetz status quo

Temperatur Vorlauf [°C]

Winter

90

Frühling

90

Sommer

90

Herbst

90

Temperatur Rücklauf [°C]

Winter

60

Frühling

60

Sommer

60

Herbst

60

Netzverluste [%]

10

Wärmenetz neu

Temperatur Vorlauf [°C]

Winter

90

Frühling

90

Sommer

90

Herbst

90

Temperatur Rücklauf [°C]

Winter

60

Frühling

60

Sommer

60

Herbst

50

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



Solarthermie



VORZEIGEREGION
ENERGIE

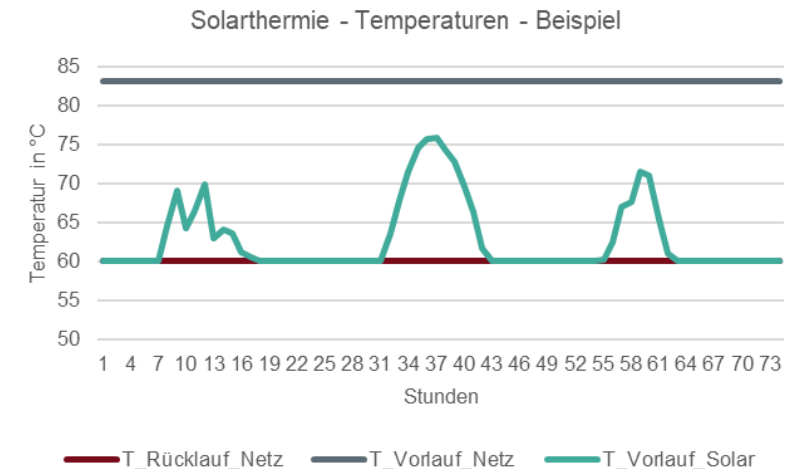


Solarthermie

- Die Integration von Solarthermieranlagen 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 Solarthermieranlagen 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

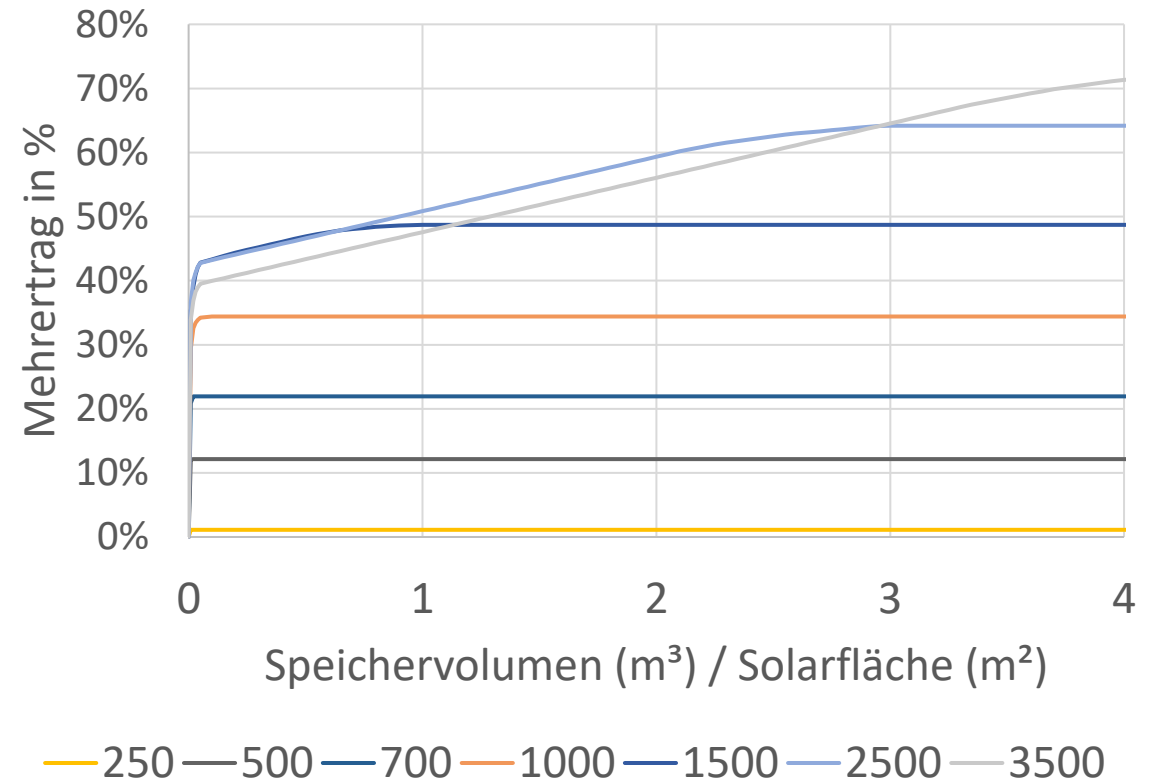
- Hintergrund
 - Nutzung von Solarthermie zur Anhebung des Rücklaufs
 - Solarthermie nützt als erstes den Rücklauf des Verbrauchers
- Maßnahme:
 - ZAMG Daten zu Globalstrahlung & Außentemperatur der 9 Landeshauptstädte
 - Stündliche Daten: Strahlung G & Außentemperatur T_A
 - Saisonale Daten: Rücklauftemperatur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



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

Verschiedene Flächen m^2 pro MW



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 m³/m²
 - 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



green
energy
lab.at

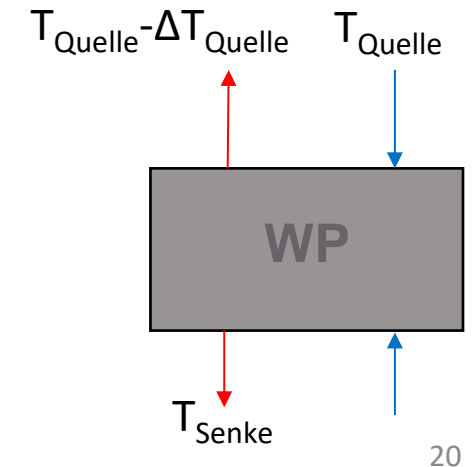
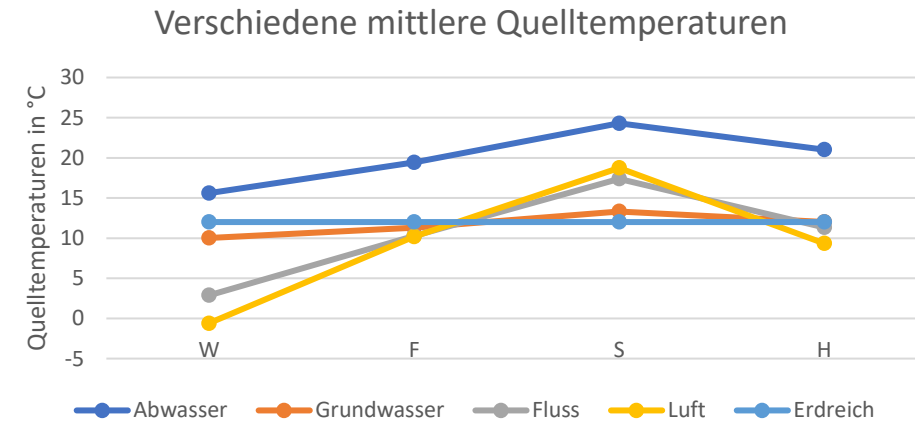


Wärmepumpe

- 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:
 - $Q_{WP,i} = \min \left(Q_{Supply,i}, P_{WP,i} \cdot \frac{h}{Saison} \right)$
 - Verdrängung von 1.) Spitzenlast 2.) Biomasse
 - Strombedarf mittels Carnot COP:
 - $COP = \frac{T_{Senke}}{T_{Senke} - (T_{Quelle} - \Delta T_{Quelle})} \cdot Gütegrad$
 - $\Delta T_{Quelle} = 8 \text{ K für Luft} / 5 \text{ K für andere}$



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

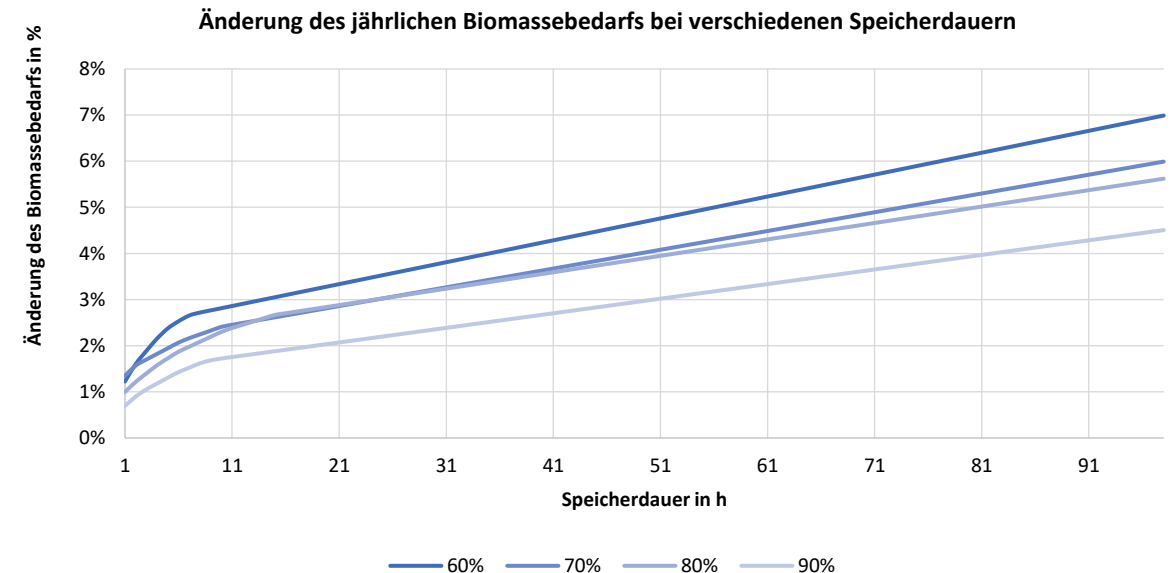
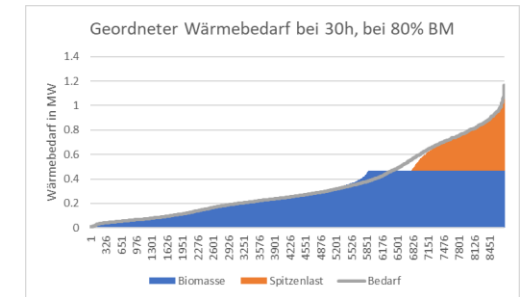
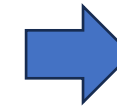
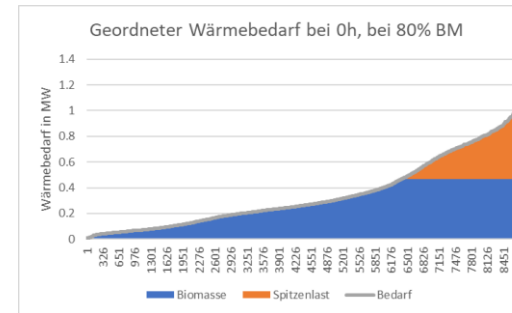


Wärmespeicher

- **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 Volllaststunden 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 Volllaststunden 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 Modellfunktion 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 ± 3 % Kohlenstoff (C),
 - 6 ± 1 % Wasserstoff (H) und
 - 44 ± 3 % Sauerstoff (O) (Massenanteil).
 - Der restliche Anteil entfällt auf anorganische Asche.
- Beispiel ($x=1, y=1.44, z=0.66$):
 - $aO_2 + a \frac{0.79}{0.21} N_2 + CH_{1.44}O_{0.66} + w_w H_2O = CO_2 + bH_2O + c_N N_2 + dO_2$
 - Annahme: Ideale Verbrennung (kein NO_x , CO, C (Ruß))
 - Schwefel andere Mineralien werden vernachlässigt → Asche
 - Wasserstoff: $1.44 + 2 w_w = 2 b$
 - 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 per cent)

| 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: $\eta_K = 100\% - q_A - q_{ST}$

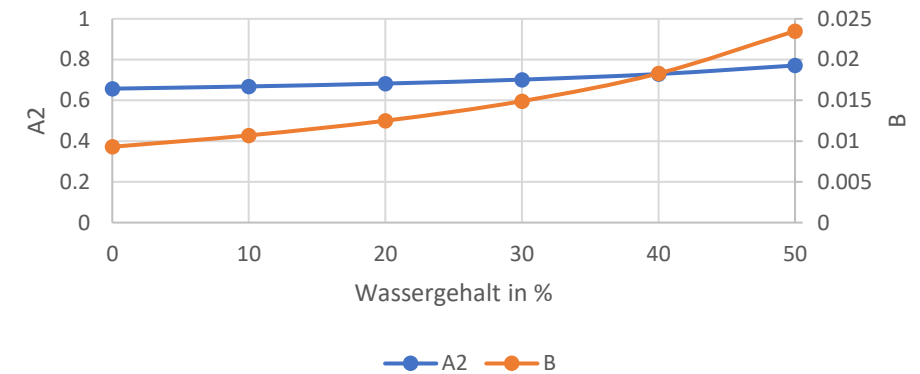
[*field-guide-heating-measurement-technology.pdf](https://www.feld-guide-heating-measurement-technology.pdf)

[**formelheft_maerz_2019_tfbs_bautechnik.pdf](https://www.formelheft_maerz_2019_tfbs_bautechnik.pdf)

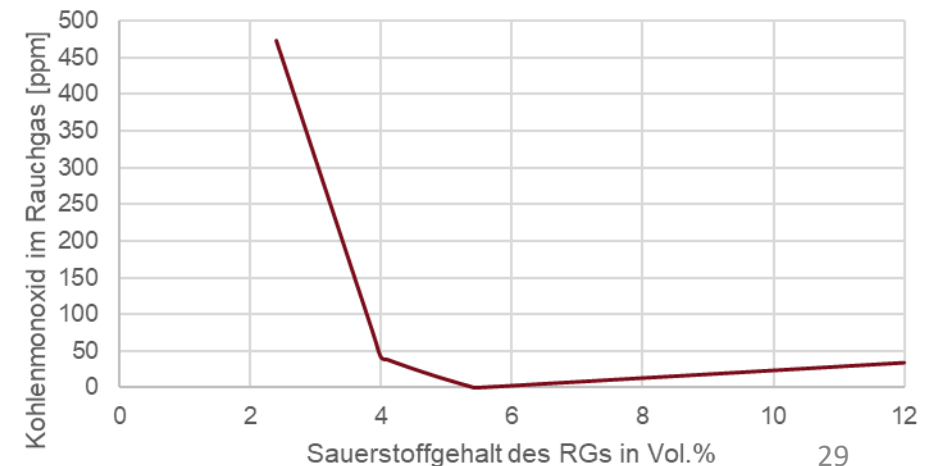
FT... Rauchgastemperatur

AT...Verbrennungslufttemperatur = 25°C

Werte zur Bestimmung der Abgasverluste



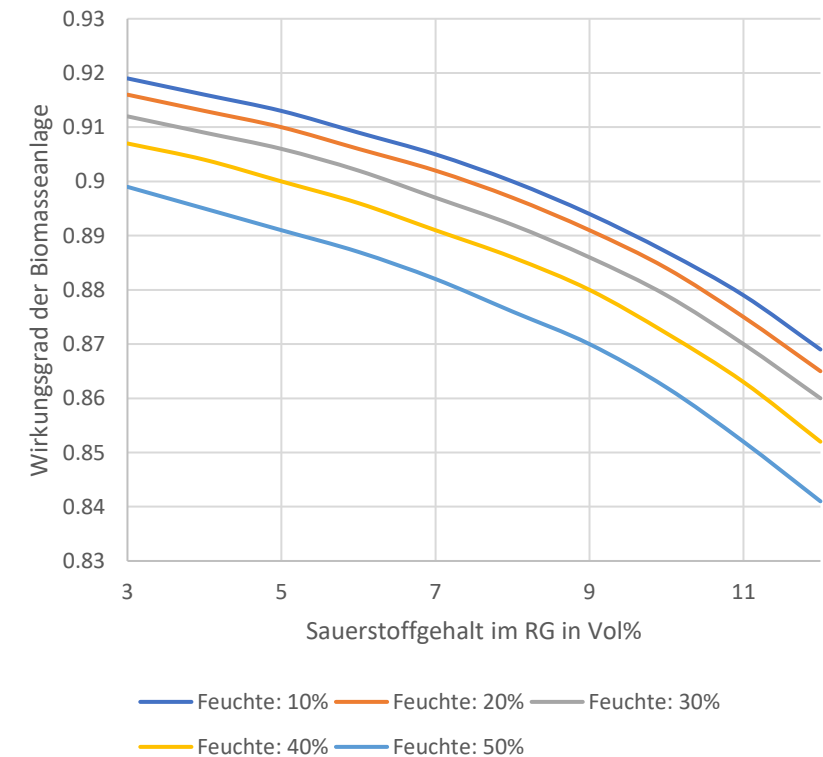
CO-λ-Charakteristik



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

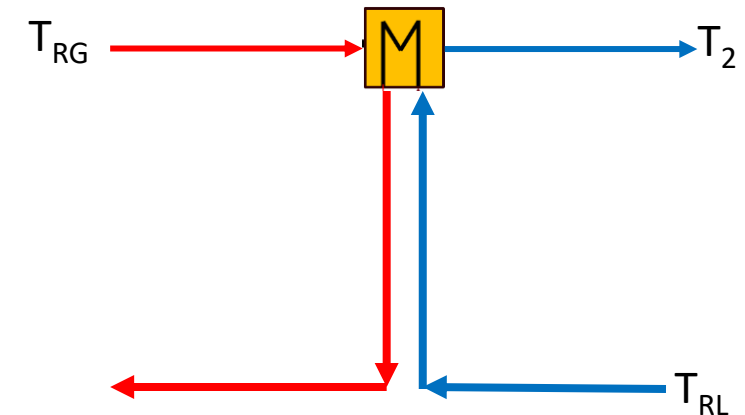
- Bitte prüfen Sie vor Aktivierung die Eignungskriterien der Passiven Rauchgaskondensation sorgfältig:
- Das Rauchgas wird über den Netzzrücklauf abgekühlt: $T_2 \approx T_{RL} + \Delta T$
- Kondensation (latente Wärme) entsteht nur, wenn **T_2 unter den Taupunkt** fällt.
- Je niedriger die Rücklauftemperatur, 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

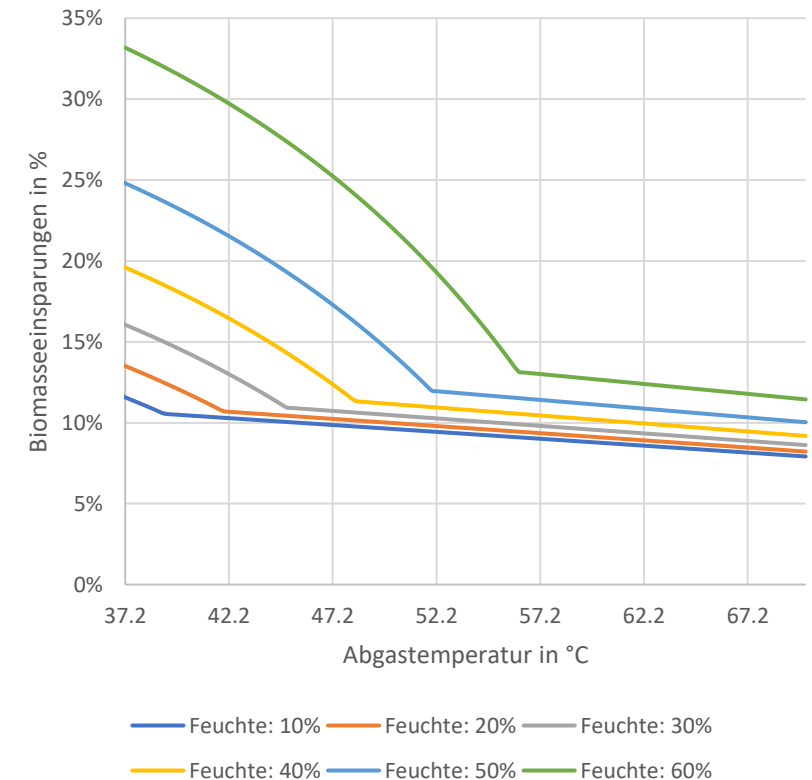
- $T_2 = T_{RL} + \Delta T_{Wärmetauscher}$



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



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



Aktive Rauchgaskondensation Absorptionswärmepumpe



VORZEIGEREGION
ENERGIE



green
energy
lab.at



AIT
AUSTRIAN INSTITUTE
OF TECHNOLOGY
TOMORROW TODAY

Aktive Rauchgaskondensation

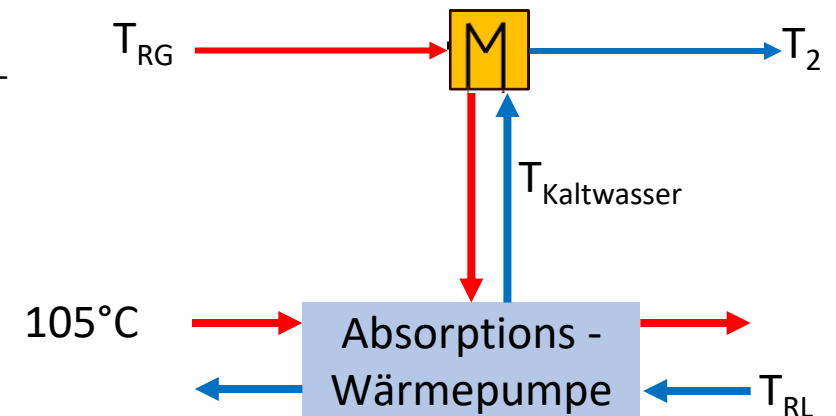
- Bitte prüfen Sie vor Aktivierung die Eignungskriterien der Aktiven Rauchgaskondensation sorgfältig:
 - Kesselgröße: > 1 MW empfohlen, optimal > 3 MW
 - Brennstoff Wassergehalt: > 30 % (kein hartes Limit, aber günstig)
 - Rücklauftemperatur (T_{RL}): < 60 °C (idealerweise), < 90 °C möglich
 - Vorlauftemperatur (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, LUVÖ (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 $m_{condensate}^{water}$:
 - 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.

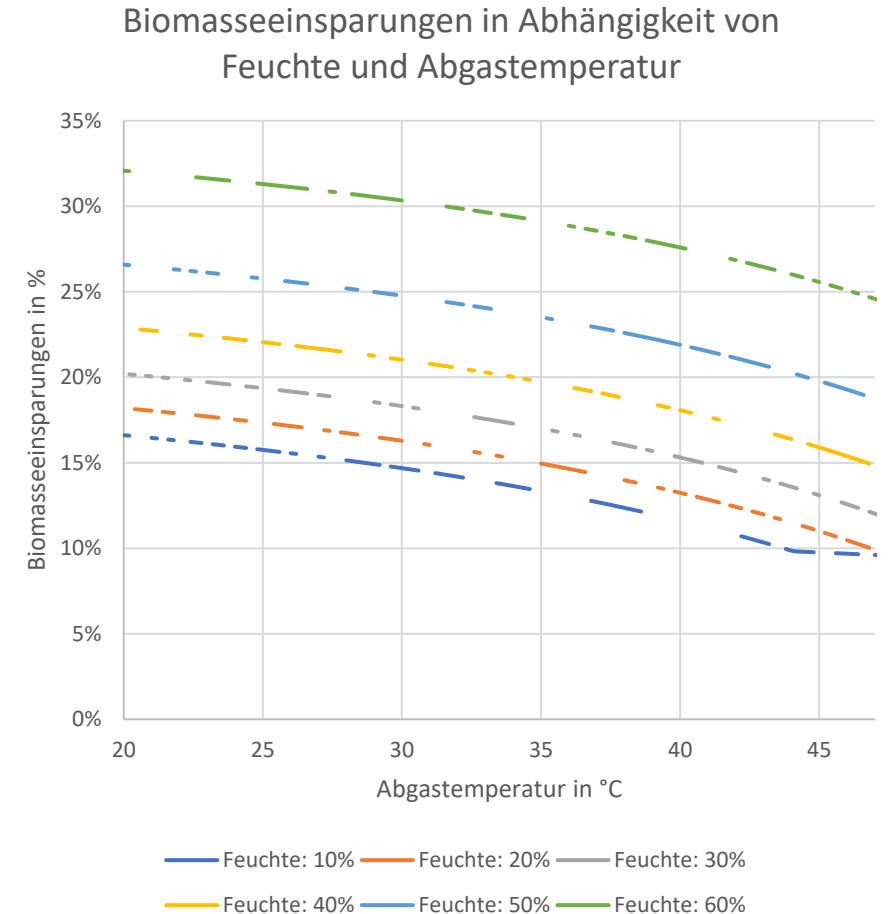
• Aktive Rauchgaskondensation (Absorptionswärmepumpe)

- Empirische Werte von StepsAhead
- $T_{Kaltwasser} = T_{RL} - 20^\circ \text{ C}$
- $T_2 = T_{Kaltwasser} + \Delta T_{Wärmetauscher}$



Fazit Aktive RGK mit Absorptionswärmepumpe

- Nutzt Wärme aus Rauchgasen unterhalb Rücklauftemperatur zur Rückgewinnung
- Kaltes Wasser ($\approx T_{RL} - 20\text{ °C}$) 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

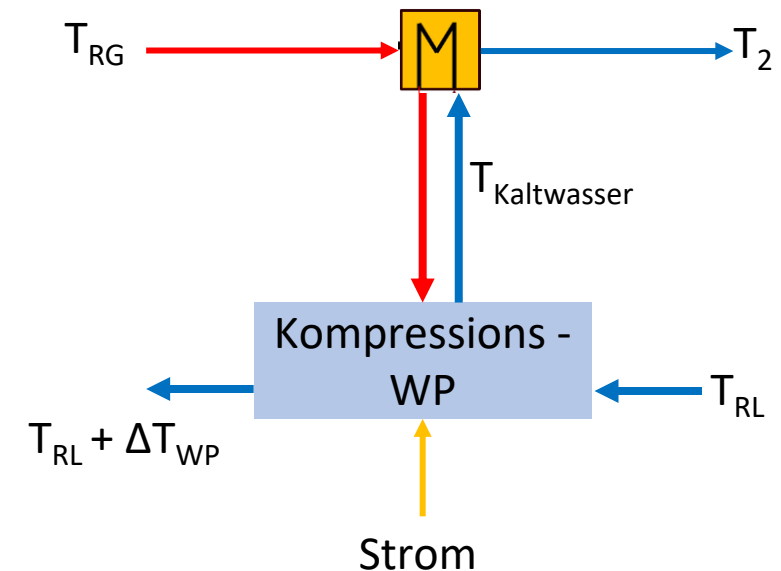


Rauchgaskondensation - Kompression

- Hintergrund
 - Rauchgaskondensation → Energierückgewinnung
- Maßnahme
 - Siehe Absorptionswärmepumpe
 - Userinputs:
 - Abkühlung unter Rücklauf um ΔT_{RG}
 - Erwärmung des Rücklaufs um ΔT_{WP}
 - Carnot COP Berechnung

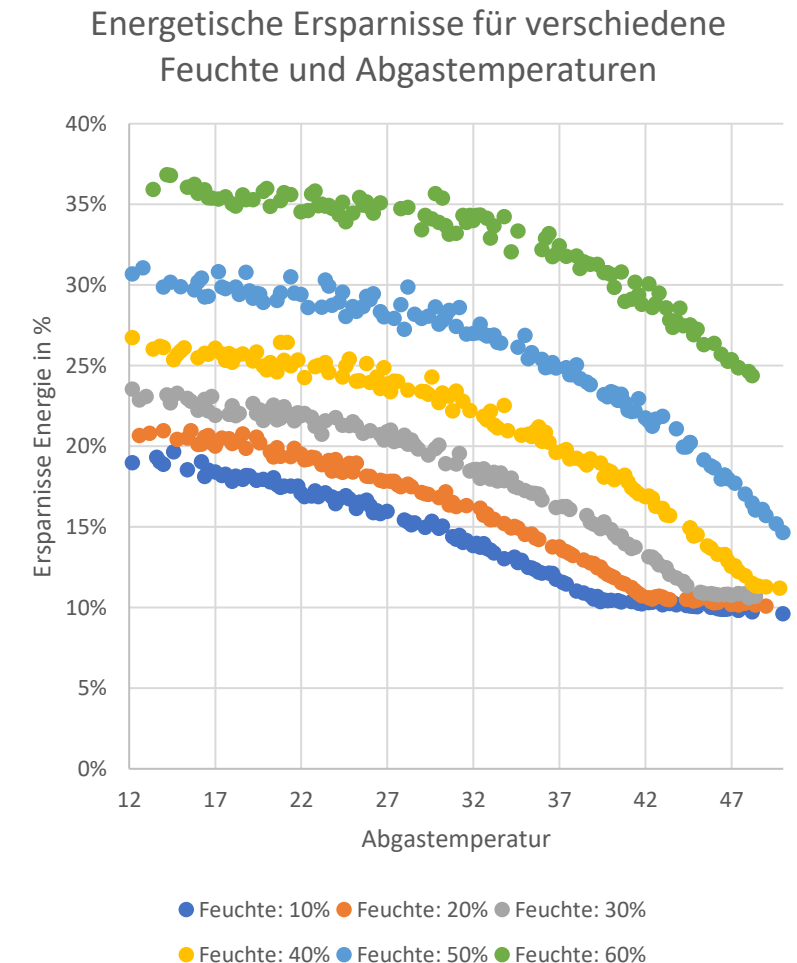
- Aktive Rauchgaskondensation (Kompression)

- $T_{Kaltwasser} = T_{RL} - \Delta T_{RG}$
- $T_2 = T_{Kaltwasser} + \Delta T_{Wärmetauscher}$



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



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
 - $$\text{Annuität} = \text{CAPEX} \cdot \text{Annuitätenfaktor} + \text{O\&M}_{\text{Maßnahme}} - \text{Brennstoffkosteneinsparung}_{\text{Spitze}} - \text{Brennstoffkosteneinsparung}_{\text{Biomasse}}$$
- 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

Winter

1408

Frühling

736

Sommer

288

Herbst

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

90

Frühling

90

Sommer

90

Herbst

90

Temperatur Rücklauf in °C

Winter

60

Frühling

60

Sommer

60

Herbst

60

Netzverluste in %

15 ▼

Testcase Steiermark

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

☒ Passive Rauchgaskondensation

Temperatur Rauchgas in °C

160

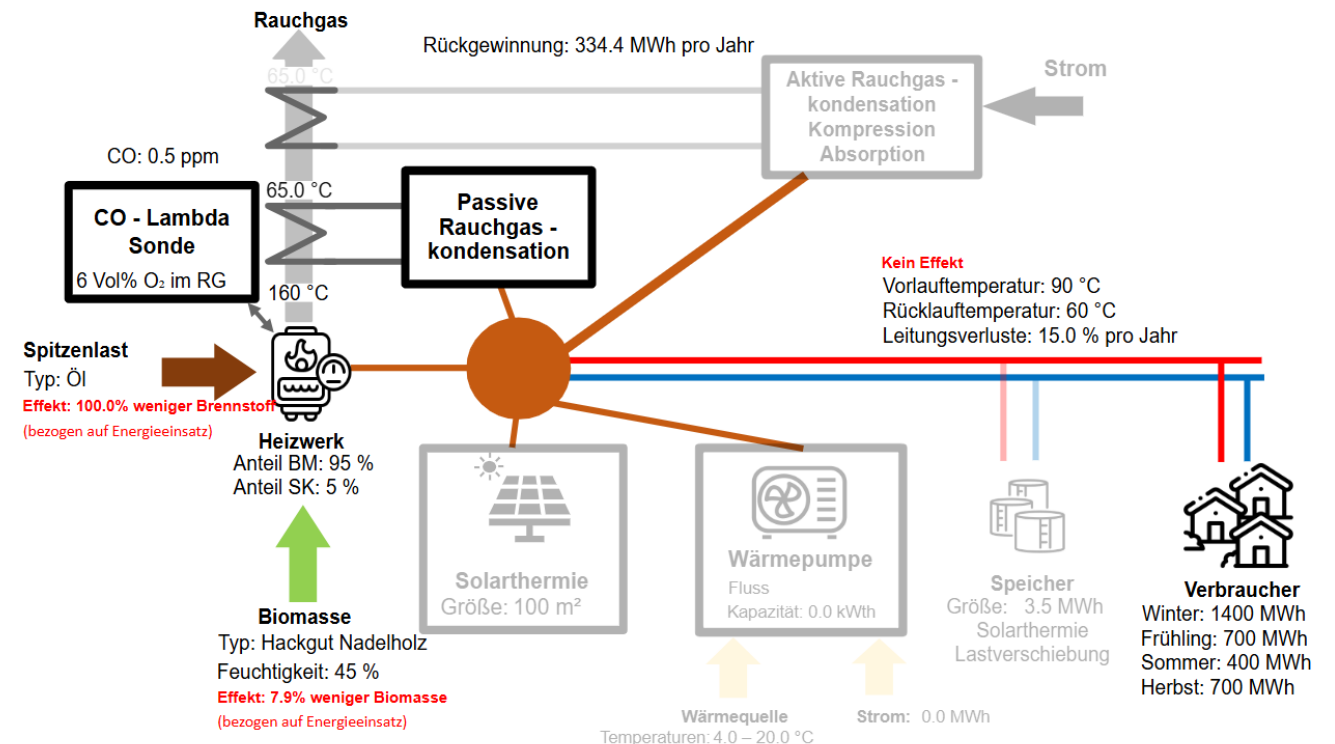
Wärmetauscher Grädigkeit in K

5

☐ Aktive Rauchgaskondensation

☐ Kompressionsswärmepumpe

☒ CO/Lambda Sonde



Testcase Steiermark

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

Wirtschaftlichkeit Parametern

| | |
|---|-----|
| 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



Project consortium BM-Retrofit

Research instituts



Knowhow and technology provider



Energy suppliers and DH operators

