

BERICHT

HEAT HIGHWAY

Regelungstechnische Untersuchung des
„HeatHighway kurz“ in Linz

Projektteam AIT:

Janik Trauner (Hauptbearbeitung)
Ralf-Roman Schmidt
Abdulrahman Dahash

Projektteam Linz AG:

Simon Glaser
Bernhard Kreindl
Peter Mühlsteiner
Gerhard Beer

Review: Johann Geyer (externer Berater)

20.09.2024
Version V1

Inhalt

1	Executive Summary.....	3
2	Einführung	4
2.1	Das Project HeatHighway	4
2.2	Herausforderung in der case study Linz	4
2.3	Aufgabenstellung im Rahmen dieses Reports	4
3	Modellierung „Heat Highway kurz“	5
3.1	Übersicht.....	5
3.2	Separate Modellierung Niedertemperatur Kreislauf	5
3.3	Industrieabwärmeequellen.....	6
3.4	Wärmepumpenkaskaden.....	6
3.4.1	Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade	7
3.4.2	Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade	7
3.5	Hydraulische Weiche	8
3.6	Kraftwerk Mitte	9
3.7	Speicher.....	10
3.8	Fernwärmenetz.....	10
3.9	Vereinfachung des Systems.....	10
4	Simulationen und Parameter	11
4.1	Regelung.....	11
4.2	Leistungen und Temperaturen.....	12
5	Ergebnisse.....	13
5.1	Nieder- und Mitteltemperatur Kreislauf.....	13
5.1.1	Wärmetauscher.....	14
5.1.2	Hydraulische Weiche	15
5.1.3	Wärmepumpen	17
5.2	Hochtemperatur- und Überschusdampf Kreislauf.....	22
5.3	Gesamter Kreislauf	23
6	Conclusio.....	24
7	Ausblick	24
8	Abbildungsverzeichnis.....	25
9	Tabellenverzeichnis.....	26

1 EXECUTIVE SUMMARY

Das Projekt Heat Highway untersucht interregionale Wärmeübertragungsnetze oder auch HeatHighway genannt, die über lange Strecken Verbrauchszentren und Industriestandorte verbinden, indem sie durch Gebiete mit anderen Wärmequellen und -senken verlaufen. Eine der im Projekt HeatHighway betrachteten case studies ist das Fernwärmenetz der Stadt Linz, bzw. die mögliche Einbindung unterschiedlicher Quellen industrieller Abwärme über einen Heathighway. In der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Variante „HeatHighway kurz“ werden Abwärmequellen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus eingebunden, die mit einer Wärmepumpenkaskade auf Netztemperaturen angehoben werden sollen. Ein wesentliches regelungstechnisches Problem hierbei ist, dass die Abwärmeleistung der Niedertemperatur-Abwärme schneller variiert, als die Kühlleistung der Wärmepumpenkaskade verändert werden kann.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein besseres Verständnis der Auslegung und des Regelverhalten des Systems „Heat Highway kurz“ and sich zu erhalten, sowie die Regelstrategie und das Betriebsverhalten der hydraulischen Weiche und der Wärmepumpenkaskaden zu verstehen und zu verbessern.

Hierfür wurden die einzelnen Komponenten, wie Nieder- und Mitteltemperatur Wärmepumpenkaskaden, hydraulische Weiche, sämtliche Wärmetauscher und Pumpen und alle dazugehörigen regelungstechnischen Überlegungen in der Simulationssoftware *Dymola* mithilfe der Modelliersprache *Modelica* abgebildet und diverse Fragestellungen bezüglich der hydraulischen Weiche, sowie der Regelungstechnik beantwortet. Es werden unterschiedliche Betriebsstrategien der hydraulischen Weiche untersucht und somit ein besseres Verständnis des Systems and sich, sowie der Regelstrategie und dem Betriebsverhalten der hydraulischen Weiche und der Wärmepumpenkaskaden erlangt.

Es ist außerdem erkenntlich geworden, dass der Betrieb der hydraulischen Weiche optimiert werden kann, indem das Ziel-Füllstandniveau proportional zum Massenstrom der zugehörigen Pumpe adjustiert wird. Dies führt zu einer Verkleinerung des notwendigen Weichenvolumens und zu einem besserem Regelverhalten. Dies funktioniert, da bei bereits hoher Leistung die Leistung nur mehr um einen geringen Wert erhöht werden kann und deshalb auch nur mehr eine kleine Weichenfüllstandsänderung nach oben auftreten kann. Selbes gilt für den Fall niedriger Leistung. Dadurch kann das Weichenvolumen theoretisch halbiert werden.

Mögliche nächste Schritte und weitere Untersuchungen inkludieren unter anderem die Integration des Kraftwerks Mitte des Speichers bis hin zu einer Erweiterung des Konzepts bis zum Kraftwerk Linz Süd zu einem „HeatHighway lang“.

2 EINFÜHRUNG

2.1 Das Project HeatHighway

Das Projekt Heat Highway untersucht interregionale Wärmeübertragungsnetze (Englisch: Heat Transfer Networks, HTN, oder auch HeatHighway genannt), die vier Bereiche kombinieren: industrielle Abwärme und andere nachhaltige Quellen, Fernwärmenetze, industrielle Prozesswärmesenken und Speicher. Diese HTNs verbinden Verbrauchszentren und Industriestandorte, indem sie durch Gebiete mit anderen Wärmequellen und -senken verlaufen.

Das Projekt HeatHighway wird vom Energieinstitut der Johannes-Kepler-Universität Linz koordiniert und durch den Klima- und Energiefonds Österreich und dem Bundesland Oberösterreich im Rahmen der Modellregion NEFI (New Energy For Industry) finanziert. Mehr Informationen zu dem Projekt finden Sie unter:

- [Projekt Übersicht \(Deutsch\)](#)
- [Projekt Website \(Deutsch\)](#)

2.2 Herausforderung in der case study Linz

Eine der im Projekt HeatHighway betrachteten case studies ist das Fernwärmenetz der Stadt Linz, bzw. die mögliche Einbindung unterschiedlicher Quellen industrieller Abwärme über einen sogenannten HeatHighway. Hierbei ist grundsätzlich der kurze und der lange HeatHighway zu unterscheiden. Während der lange HeatHighway vom Kraftwerk mitte bis zum Kraftwerk süd geht und diverse Abwärmequellen einbindet, inkludiert der kurze HeatHighway weniger Abwärmequellen und erzeugt keine Verbindung zum Kraftwerk süd. Da der lange HeatHighway einerseits eine genauere Abbildung des Linzer Fernwärmenetzes erfordert, und andererseits weitere hydraulische Fragestellungen aufwirft, soll aus Ressourcengründen im Rahmen des Projektes nur der kurze HeatHighway betrachtet werden.

Im HeatHighway kurz werden Abwärmequellen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus eingebunden, die mit einer Wärmepumpenkaskade auf Netztemperaturen angehoben werden sollen. Ein wesentliches regelungstechnisches Problem hierbei ist, dass die Abwärmeleistung der Niedertemperatur schneller variiert, als die Kühlleistung der Wärmepumpenkaskade verändert werden kann (bei gleichzeitig konstant gehaltenen Eingangs- und Ausgangstemperaturen). Da der Leistungsgradienten der Niedertemperatur nicht limitiert werden soll, also die Niedertemperatur-Abwärmequelle „beliebig“ schnell umschalten kann, soll eine hydraulische Weiche implementiert werden, um den – während eines Umschaltprozesses abweichenden – Massenstrom, welcher von Niedertemperatur-Abwärme und NTK vorgegeben wird, ausgleichen zu können.

2.3 Aufgabenstellung im Rahmen dieses Reports

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein besseres Verständnis der Auslegung und des Regelverhalten des Systems „Heat Highway kurz“ and sich zu erhalten, sowie die Regelstrategie und das Betriebsverhalten der hydraulischen Weiche und der Wärmepumpenkaskaden zu verstehen und zu verbessern.

3 MODELLIERUNG „HEAT HIGHWAY KURZ“

3.1 Übersicht

Die vollständige Beschreibung des kurzen Heat Highways setzt sich grundsätzlich aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Wärmetauscher der Industrieabwärmequellen (NT, MT, HT und ÜD)
2. Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK)
3. hydraulische Weiche (HW)
4. Kraftwerk Linz Mitte (KW)
5. Speicher (SP)
6. Linzer Fernwärmenetz (N)
7. sämtliche Pumpen P1.1, P1.2, P2, P3, P4, P5 und P6
8. Wärmetauscher des Kühlturms (K)

Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte Abbildung des kurzen Linzer Heat Highways. Wobei das Kraftwerk Linz Mitte als simpler Wärmetauscher und das Fernwärmenetz als Wärmesenke dargestellt ist. Außerdem wurden, damit das System nicht überbestimmt ist, Pumpen zusammengezogen.

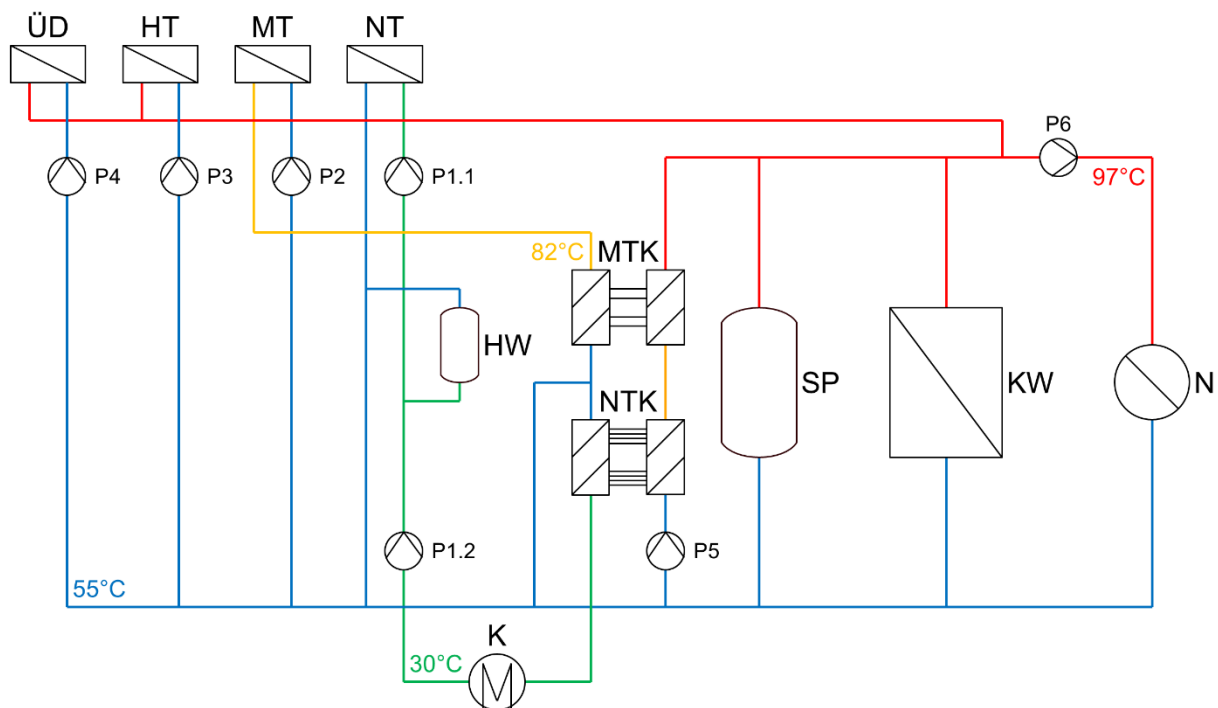


Abbildung 1: Vereinfachte Abbildung des kurzen Linzer Heat Highways. Zu sehen sind, von links nach rechts, die vier Wärmetauscher der Industrieabwärmequellen (ÜD, HT, MT und NT), die hydraulische Weiche (HW), die zwei Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK), der Speicher (SP), das Kraftwerk Linz Mitte (KW) und das Linzer Fernwärmenetz (N).

Die Analysen wurden mit der Modellierungssprache *Modelica* in der Simulationssoftware *Dymola* durchgeführt. Im Folgenden wird genauer auf die einzelnen Komponenten sowie deren Implementation in der Modellierungssprache *Modelica* bzw. der Simulationssoftware *Dymola* und deren Regelung eingegangen.

3.2 Separate Modellierung Niedertemperatur Kreislauf

Als erste Vereinfachung wurde der Niedertemperatur Kreislauf des „Heat Highway kurz“ herausgezogen und isoliert betrachtet. Abbildung 2 zeigt jenen Ausschnitt, welcher sich aus fünf grundlegenden Komponenten zusammensetzt.

1. Wärmetauscher der Niedertemperatur-Abwärme (NT)
2. zwei Pumpen (P1.1 und P1.2)
3. hydraulische Weiche (HW)
4. Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK) – Verdampferseite
5. Wärmetauscher des Kühlturms (K)

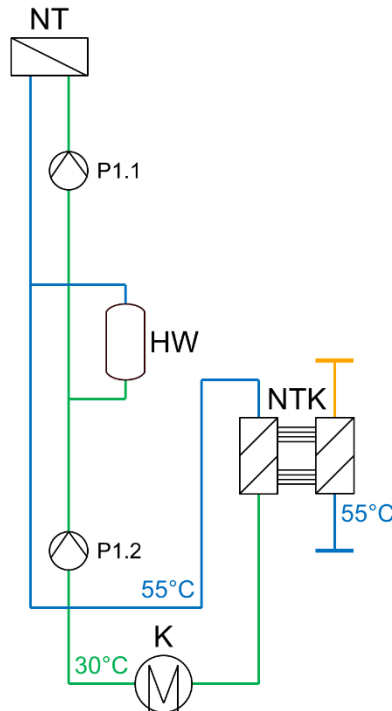


Abbildung 2: Vereinfachter Ausschnitt des kurzen Linzer Heat Highways. Zu sehen ist der Niedertemperatur Kreislauf, beginnend vom Wärmetauscher der Niedertemperatur-Abwärme (NT), weiter zu der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK) über die Nachkühlung (K) zurück zur NT. Eine hydraulische Weiche (HW) ist zwischen Ein- und Ausgang der NT verbaut, um einen schnellen Lastwechsel gewährleisten zu können. Die zwei Pumpen P1.1 und P1.2 geben die jeweiligen Massenströme vor.

Bei der Modellierung des Niedertemperatur Kreislaufs konnten bereits wesentliche Aspekte adressiert werden. Mit Hilfe des externen Beraters Johann Geyer wurden der genaue Betrieb der hydraulischen Weiche, beider Wärmepumpenkaskaden, sowie die Regelstrategie konkretisiert. Dadurch konnte auch die explizite Implementation in *Dymola* durchgeführt werden. Durch die Simulation wurde anschließend auch das mathematisch-bestimmte Volumen der hydraulischen Weiche getestet, sowie der Betrieb beider Wärmepumpenkaskaden fixiert. (Einzelheiten in den folgenden Sektionen).

3.3 Industrieabwärmequellen

In der vereinfachten Betrachtung sind dies einfache Wärmetauscher mit variablem Quellmassenstrom, welcher zum Beispiel die veränderliche Industrieabwärmeleistung darstellt. Die quellseitige Temperatur ist auf eine Grädigkeit von 3°C fixiert und wird als konstant angenommen. Lediglich der Massenstrom variiert und führt zu einer Änderung in der Abwärmeleistung.

Die Heat-Highway-seitigen Pumpen der Wärmetauscher (P1.1, P2, P3 und P4) sind über den zugehörigen Quell-Massenstrom der Wärmetauscher geregelt. Solange die Grädigkeit und die Eingangstemperatur des Wärmetauschers gleichbleiben, ist somit auch die Ausgangstemperatur auf den passenden Wert fixiert. In der Simulation wird die Industrieabwärmeleistung durch ein vorgegebenes Profil definiert. Der Rest des Systems passt sich dann durch sämtliche Regelmechanismen entsprechend an.

3.4 Wärmepumpenkaskaden

Um die Mittel- und Niedertemperatur nutzen zu können, muss diese vor dem Einspeisen in das Fernwärmenetz auf die Vorlauftemperatur gebracht werden.

In diesem Fall wird dies mithilfe zweier Wärmepumpenkaskaden erreicht. Eine Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade (MTK), bestehend aus zwei Wärmepumpen (WP01 und WP02) und eine Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK), bestehend aus vier Wärmepumpen (WP03.1–WP03.4). Abbildung 3 zeigt die Verschaltung der beiden Kaskaden.

Die einzelnen Wärmepumpen sind in Serie verschaltet. Jede Wärmepumpe hat jeweils eine Pumpe für Kondensator und Verdampfer, welche auf einen konstanten Massenstrom geregelt ist. Zusätzlich sorgt jeweils ein Nebenschluss über die Ein- und Ausgänge der Kondensatorseite der einzelnen Wärmepumpen für variablen Massenstrom über die gesamte Kondensatorseite der Kaskade. Dasselbe gilt für die Verdampferseite.

In dieser Verschaltung stehen für die Kaskaden folgende Freiheitsgrade zur Verfügung:

- 1) Massenstrom über gesamte Kondensatorseite
- 2) Massenstrom über gesamte Verdampferseite
- 3) Leistung der Verdichter jeder Wärmepumpe in der Kaskade (In der momentanen Regelstrategie werden in erster Vereinfachung die Verdichter aller Wärmepumpen einer Kaskade parallel geregelt)

Im *Dymola* Modell wurden für die einzelnen Wärmepumpen jene mit einer Carnot-Wirkungsgrad-adjustierten Leistungskurve gewählt. Der verwendete COP ist 30% des Carnot-COPs, welcher sich aus den Temperaturniveaus dynamisch ergibt. Die Pumpen von Kondensator- und Verdampferseite werden auf den Massenstrom des jeweiligen Kreislaufs geregelt (siehe Tabelle 1).

3.4.1 Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade

Die MTK besteht aus zwei Wärmepumpen (WP01 und WP02). Sie wird verdampferseitig mit der Mitteltemperatur (82°C) versorgt. Mithilfe der Verdichter wird die Ausgangstemperatur der Verdampferseite auf 55°C (Rücklauf) geregelt.

Da die Kondensatorseite beider Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK) seriell verschaltet ist (siehe Abbildung 3), ist der kondensatorseitige Massenstrom beider Kaskaden gleich. Dieser Massenstrom wird von der Pumpe am Eingang der Kondensatorseite der NTK (Pumpe P5) vorgegeben, welche auf eine Ausgangstemperatur der MTK von 97°C (Vorlauf) geregelt ist.

3.4.2 Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade

Die NTK besteht aus vier Wärmepumpen (WP03.1–WP03.4). Sie wird verdampferseitig mit dem Rücklauf und dem Ausgang der Verdampferseite der MTK gespeist. Gleich wie bei der MTK wird hier mithilfe der parallel geregelten Verdichter die Ausgangstemperatur fixiert. In dem Fall der NTK auf die Niedertemperatur (30°C).

Kondensatorseitig wird der Rücklauf (55°C) eingespeist und über NTK und MTK auf den Vorlauf (97°C) aufgeheizt.

Dies wird, wie bereits erwähnt, mithilfe von Pumpe P5 erreicht.

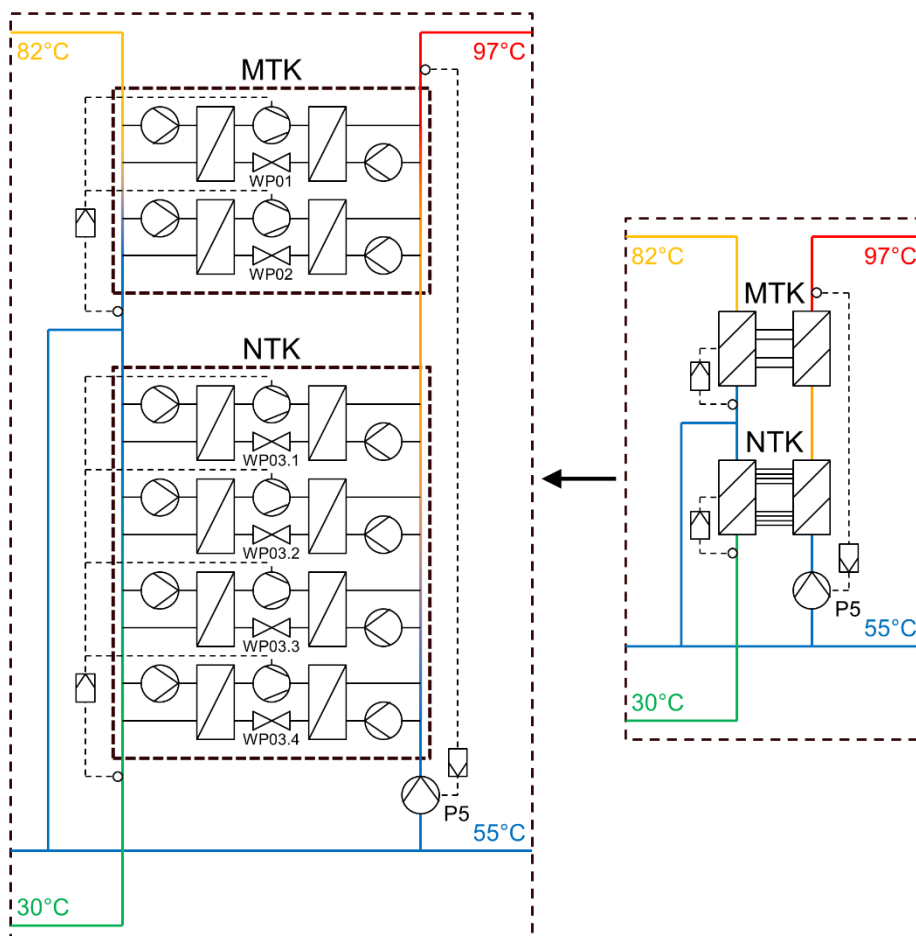


Abbildung 3: Verschaltung der zwei Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK). Verdampfer und Kondensator werden beide über Pumpen mit konstantem Massenstrom gespeist und sind jeweils mit einem Nebenschluss versehen, sodass die Differenz der

Massenströme ausgeglichen werden kann. WP01 und WP02 sind für die Kühlung von der Mitteltemperatur (82°C) auf den Rücklauf (55°C) zuständig. WP03.1–WP03.4 sind für die Kühlung von Rücklauf (55°C) auf Niedertemperatur (30°C) zuständig. Die Senkenseite der gesamten Kaskade hebt einen Teil des Rücklaufs (55°C) auf den Vorlauf (97°C) an.

3.5 Hydraulische Weiche

Die Funktion dieser hydraulischen Weiche ist im Wesentlichen das Entkoppeln eines Kreislafs, in welchem es notwendig ist, zwei unterschiedliche Massenströme an bestimmten Zeitpunkten zu haben. Die Differenz dieser zwei Massenströme wird dann über die Weiche ausgeglichen (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). Solange die Weiche mit Wasser der passenden Temperatur gefüllt ist, wird Wasser mit der jeweils passenden Temperatur auf der Seite des Massenstrommangels eingespeist und liefert in Folge den gewünschten Massenstrom in der jeweiligen Leitung. Nachdem sich wieder ein Gleichgewicht eingestellt hat, sind die Massenströme auf beiden Seiten gleich und über die Weiche fließt kein weiteres Wasser. Solange die Pumpen nicht auf Vollast laufen, kann eine geringe Massenstromdifferenz in eine beliebige Richtung zwischen den zwei Kreisen erzeugt werden, welche die Weiche wieder auf den gewünschten Füllstatus (z.B.: 50%) füllt.

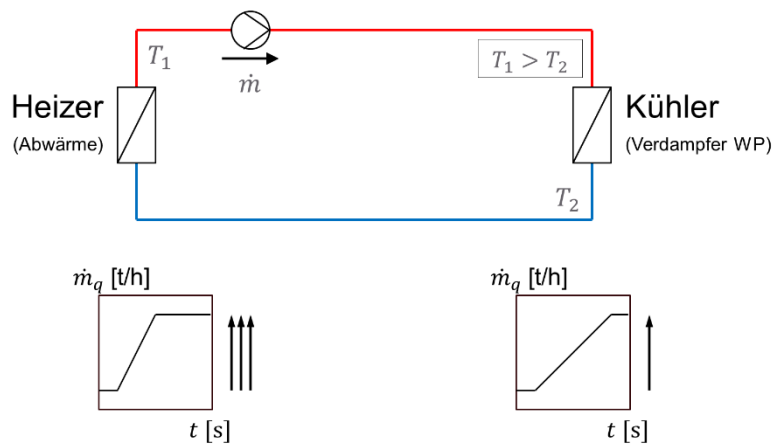


Abbildung 4: Konfiguration ohne hydraulische Weiche mit unterschiedlichen Gradienten des Heizers und des Kühlers. Der Kühler auf der rechten Seite regelt zu langsam hoch, wodurch die Ausgangstemperatur des Kühlers T_2 ansteigt. t ist die Zeit, \dot{m} ist der Massenstrom der Pumpe, \dot{m}_q ist der Quell-Massenstrom des Heizers bzw. des Kühlers und T_1 ist die Ausgangstemperatur des Heizers.

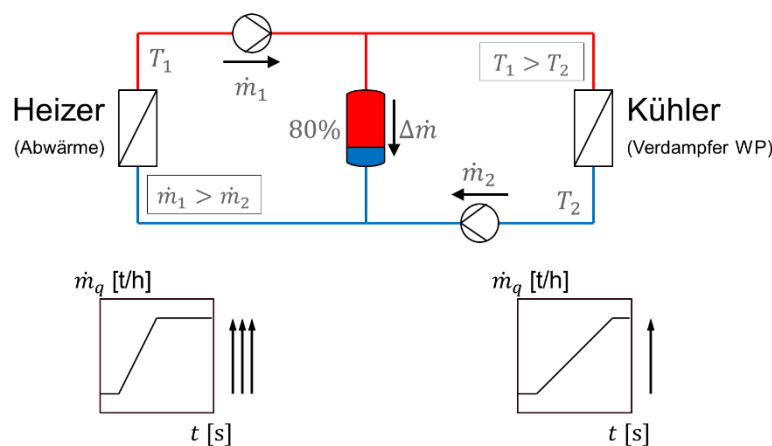


Abbildung 5: Funktionsprinzip der hydraulischen Weiche. Heizer und Kühler mit unterschiedlichen Gradienten. Die Differenz der zwei Massenströme fließt über die Weiche und verändert den Füllstand der Weiche. Das warme Wasser wird beim Umschaltprozess in der hydraulischen Weiche quasi „zwischenlagert“ und im Falle des inversen Umschaltprozesses wieder „herausgenommen“. t ist die Zeit, \dot{m}_1 und \dot{m}_2 sind die Massenströme der zwei Pumpen, $\Delta\dot{m} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$ ist die Massenstromdifferenz zwischen den zwei Kreisen, \dot{m}_q ist der Quell-Massenstrom des Heizers bzw. des Kühlers, T_1 ist die Ausgangstemperatur des Heizers und T_2 ist die Ausgangstemperatur des Kühlers.

Falls der Weichenfüllstand immer auf 50% zurückgeregelt werden soll, gibt folgende Gleichung ein ideales, minimales Volumen der Weiche an:

$$V_{\text{Weiche}} \geq \frac{(t_2 - t_1)(\dot{m}_{\text{max}} - \dot{m}_{\text{min}})}{\rho_{\text{Wasser}}}$$

Mit den zwei unterschiedlichen Umschaltzeiten t_1 und t_2 (wobei gilt: $t_2 > t_1$), des maximalen und minimalen Massenstroms \dot{m}_{max} und \dot{m}_{min} und der Dichte von Wasser $\rho_{Wasser} \approx 1 \text{ t/m}^3$.

Mit den Daten der Simulation ergibt sich folgendes minimales Weichenvolumen von:

$$V_{Weiche \min} \approx (10 \text{ min} - 5 \text{ min}) \cdot (100\% - 20\%) \cdot 689 \text{ m}^3/\text{h} \approx 46 \text{ m}^3$$

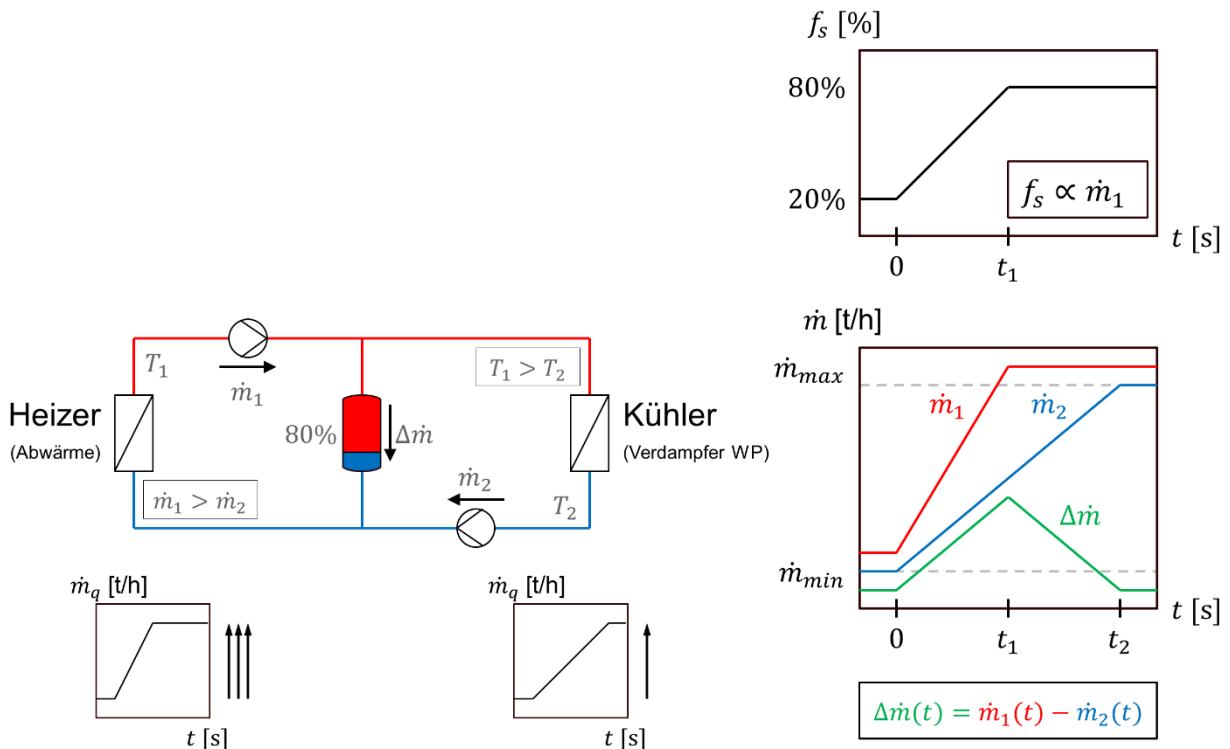


Abbildung 6: Füllstrategie, wobei der Sollwert des Füllstands f_s nicht konstant gehalten wird, sondern proportional zum sich schneller ändernden Massenstrom gehalten wird.

t ist die Zeit, t_1 und t_2 sind die jeweiligen Umschaltzeiten des Heizers und Kühlers, \dot{m} ist der Massenstrom, $\dot{m}_1(t)$ und $\dot{m}_2(t)$ sind die Massenströme der jeweiligen Pumpen, $\Delta\dot{m}(t)$ ist die Massenstromdifferenz zwischen den zwei Kreisen, \dot{m}_q ist der Quell-Massenstrom des Heizers bzw. des Kühlers, \dot{m}_{max} und \dot{m}_{min} sind der maximale und minimale Massenstrom von $\dot{m}_1(t)$ und $\dot{m}_2(t)$, T_1 ist die Ausgangstemperatur des Heizers und T_2 ist die Ausgangstemperatur des Kühlers.

Falls angenommen wird, dass der Weichenfüllstand proportional zum Massenstrom der schneller schaltenden Pumpe (P1.1 im Modell) gehalten wird, kann die zuvor ausgerechnete Untergrenze für das Volumen der Weiche halbiert werden:

$$V_{Weiche} \geq \frac{(t_2 - t_1)(\dot{m}_{max} - \dot{m}_{min})}{2 \rho_{Wasser}}$$

$$V_{Weiche \min} \approx (10 \text{ min} - 5 \text{ min}) \cdot (100\% - 20\%)/2 \cdot 689 \text{ m}^3/\text{h} \approx 23 \text{ m}^3$$

Im Modell wurde die hydraulische Weiche als ein Rohr, mit einem großem Außendurchmesser (DN600), welches in 81 Teilstücke geteilt ist, dargestellt. Zwischen jeden dieser Teilstücke wird die Temperatur gemessen, um die Grenzschicht zwischen der heißen und kalten Seite der hydraulischen Weiche lokalisieren zu können.

Es wurden zwei Weichenstrategien simuliert:

1. Statische Weichenstrategie: Weichenfüllstände Sollwert von 50%
2. Dynamische Weichenstrategie: Weichenfüllstände Sollwert, welcher vom Massenstrom der Pumpe P1.1 linear abhängig ist und sich zwischen 20 und 80% bewegt (siehe Abbildung 6).

Um für die erste Weichenstrategie einen Puffer von ca. 20% nach oben und unten zu haben, wurde ein Volumen von 60 m^3 in der Simulation gewählt. Dieses Volumen wurde auch für die Simulation der zweiten Strategie beibehalten.

3.6 Kraftwerk Mitte

Das Kraftwerk Linz Mitte wird im vereinfachten Schema (siehe Abbildung 1) als simpler Wärmetauscher abgebildet. Jedoch ist dies eine starke Vereinfachung. Die verschiedenen Druckverluste, Druckhübe, Temperaturniveaus werden hier komplett vernachlässigt. Sie werden mithilfe einer Gesamtpumpe und einem großen Wärmetauscher dargestellt.

In einer vereinfachten Betrachtung mit Fokus auf den kurzen Heat Highway kann das Kraftwerk auch mit dem Netz zu einem Verbraucher zusammengefasst werden, welcher nur die Wärmeleistung der Industrieabwärme abbildet.

Im *Dymola* Modell ist das Kraftwerk nicht integriert.

3.7 Speicher

Der Speicher ist so an das System gekoppelt, dass er etwaige Unterschiede der Masseströme aus den Erzeugeranlagen und dem Fernwärmenetz kompensiert und er entsprechend gefüllt oder geleert wird.

Im *Dymola* Modell ist der Speicher nicht integriert.

3.8 Fernwärmenetz

Geplant ist, dass der Vorlauf aus dem Heat Highway in das Kraftwerk Linz Mitte direkt vor den Netzpumpen eingespeist wird.

Im vereinfachten Schema wird das Fernwärmenetz als einfacher Verbraucher dargestellt und die Netzpumpen zu einer Pumpe zusammengefasst.

In Realität ist das Netz ein sehr komplexer Teil dieses Systems und ist deswegen nur schwer zu vereinfachen.

Im *Dymola* Modell ist das Fernwärmenetz nicht integriert.

3.9 Vereinfachung des Systems

Da in erster Instanz die Regelkreise der Industrieabwärme getestet wurden, wurden Kraftwerk, Speicher und Netz durch Druckrandbedingungen an den Vorlauf- und Rücklaufeinspeisepunkten ersetzt (siehe Abbildung 7). Wichtig zu beachten ist die Verschiebung der Einspeisung der Industrieabwärme. Die eigentliche Einspeisung wäre nach dem Kraftwerk und dem Speicher, vor den Netzpumpen (siehe Abbildung 1). Um die vereinfachten Druckrandbedingungen machen zu können, wurde diese Einspeisung vor das Kraftwerk und den Speicher versetzt (siehe Abbildung 7).

Beim Rücklauf herrscht ein Ruhedruck von $p_{RL} = 6$ bar. Es wurde angenommen, dass in erster Näherung derselbe Druck vor den Netzpumpen herrscht. Abbildung 7 zeigt das vereinfachte Schema samt Visualisierung der Regelkreise.

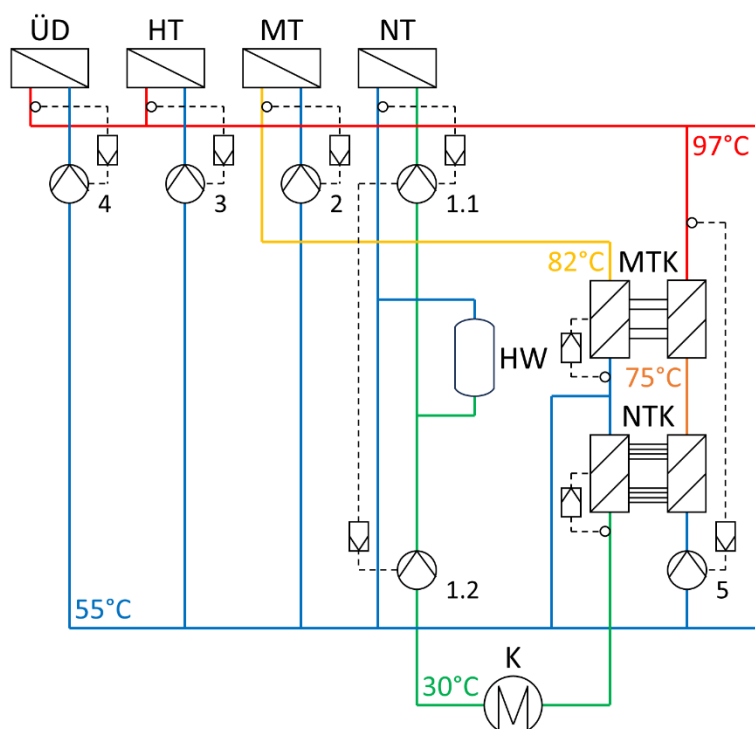


Abbildung 7: Vereinfachte Netzeinspeisung samt visualisierte Regelkreise. Wichtig zu beachten ist die Verschiebung der Einspeisung in den Vorlauf der Wärmepumpenkaskade von vor dem Linz Mitte Kraftwerk und Speicher hin zur Einspeisung des Vorlaufs des Heat Highways.

4 SIMULATIONEN UND PARAMETER

Wie bereits erwähnt wurde des Linzer „HeatHighway kurz“ in *Dymola* modelliert und eine Reihe von thermohydraulischen Simulationen durchgeführt. Mit besonderem Fokus auf das dynamische, hydraulische Verhalten, um Massenströme bei Lastwechsel an den verschiedenen Punkten im System abbilden zu können.

Da noch keine Betriebsdaten in das Modell eingebaut wurden, wurden die Leistung der Abwärmequellen vorgegeben. Um die Funktionalität und Robustheit der Regelungstechnik zu testen wurden die Abwärmequellen zwischen 100% und 20% Leistung mit deren maximalen Umschaltgradienten betrieben. Dafür wurde ein Zeitraum von 16 Stunden gewählt, wobei jede Stunde ein Umschaltprozess einer oder mehrerer der vier Abwärmequellen durchgeführt wird. Diese Umschaltprozesse wurden so konzipiert, dass jede mögliche Kombination simuliert wird.

Die folgende Tabelle beschreibt diese kombinatorische Anordnung:

Zeit [h]	NT-Leistung [%]	MT-Leistung [%]	HT-Leistung [%]	ÜD-Leistung [%]
1	100	100	100	100
2	20	100	100	100
3	100	20	100	100
4	20	20	100	100
5	100	100	20	100
6	20	100	20	100
7	100	20	20	100
8	20	20	20	100
9	100	100	100	20
10	20	100	100	20
11	100	20	100	20
12	20	20	100	20
13	100	100	20	20
14	20	100	20	20
15	100	20	20	20
16	20	20	20	20

Tabelle 1: Leistungsverläufe der vier verschiedenen Industrieabwärmequellen.

4.1 Regelung

Die Regelung wird in fast allen Fällen (mit Ausnahme der hydraulischen Weiche) mit PI-Reglern durchgeführt.

Für die erste vereinfachte Betrachtung des Netzes ist diese eine vergleichsweise schnelle Lösung das grundlegende Verhalten der einzelnen Regelkreise zu testen und zu konzipieren.

Außerdem führt die Implementierung eines simplen PI- bzw. P-Reglers im Vergleich zu komplexeren Reglern nur zu einer überschaubaren Erhöhung der Simulationszeit des Modells.

4.2 Leistungen und Temperaturen

Die folgende Tabelle zeigt alle relevanten Größen, welche für die Simulation ausgewählt wurden. Die meisten wurden vom bereits existierenden Konzept entnommen.

Alle Größen – besonders Abwärmeleistungen – sind keinesfalls fixiert und wurden für die Simulation aus den Planungskonzepten entnommen.

Industrieabwärme					
Name	Leistung	Eingang	Ausgang	Gradient	
NT	20 MW	30°C	55°C	5 min	
MT	16,4 MW	55°C	82°C	10 min	
HT	14,8 MW	55°C	97°C	10 min	
ÜD	28 MW	55°C	97°C	10 min	
Wärmepumpenkaskaden					
Name	Leistung	Kondensatorseite Eingang	Kondensatorseite Ausgang	Verdampferseite Eingang	Verdampferseite Ausgang
NTK	20 MW	55°C	~75°C	55°C	30°C
MTK	16,4 MW	~75°C	97°C	82°C	55°C
Hydraulische Weiche					
Volumen	Start-Füllstand	Obere Temperatur	Untere Temperatur		
150 m ³	80% oder 50%*	55°C	30°C		
Pumpen					
Name	Nominaler Massenstrom		Gradient		
NT: P1.1	689 t/h		5 min		
NT: P1.2	689 t/h		10 min		
MT: P2	523 t/h		10 min		
HT: P3	303 t/h		10 min		
ÜD: P4	574 t/h		10 min		
NTK: Interne Pumpen	689 t/h		10 min		
MTK: Interne Pumpen	523 t/h		10 min		
WPK-Kondensatorseite: P5	1177 t/h		10 min		
Leitungen (DN600)					
Nominaler Massenstrom	Innendurchmesser		Rauigkeit		
2376 t/h	595,80 mm		0,1 mm		

Tabelle 2: Zusammenfassung aller relevanten Größen, welche für die Simulation ausgewählt wurden bzw. für die Beschreibung des kurzen Heat Highways relevant sind. Die meisten wurden vom bereits existierenden Konzept entnommen.

* Je nach Füllstrategie: 80%, wenn die Weiche P1.1 nachregelt. 50%, wenn die Weiche konstant auf 50% geregelt ist.

5 ERGEBNISSE

In den folgenden Sektionen werden die Ergebnisse der Simulationen dargestellt und auf einige Punkte genauer eingegangen.

Solange nicht explizit erwähnt wird, dass es sich um die statische Weichenstrategie handelt, wurden die Simulationsergebnisse mit dynamischer Weichenstrategie verwendet. Der Grund ist, dass die Regelkreise des dynamischen Weichenstands weniger Temperaturabweichungen bei den Wärmepumpenkaskaden erzeugen (genauer dazu in 5.1.2 Hydraulische Weiche).

5.1 Nieder- und Mitteltemperatur Kreislauf

Im Niedertemperatur Kreislauf wird das Verhalten der Pumpe P1.1 und P1.2, der hydraulischen Weiche und der NTK von dem vorgegebenen Verlauf von Nieder- und Mitteltemperatur bestimmt.

Der Kühlturm ist im Modell so implementiert, dass er auf eine Ausgangstemperatur von 30°C regelt. Im Normalfall würde der Kühlturm nur dann betrieben werden, wenn die NTK nicht genug Kühlleistung aufbringen kann, um den Rücklauf (55°C) auf die Niedertemperatur (30°C) zu kühlen. Da diese Nachkühlung für die regelungstechnische Betrachtung des Gesamtsystems wenig Rolle spielt, wurde er in den Simulierten Szenarien nicht verwendet.

Im Mitteltemperatur Kreislauf wird das Verhalten der Pumpe P2 und der MTK von dem vorgegebenen Verlauf von Nieder- und Mitteltemperatur bestimmt.

Die Abbildungen der Nieder- und Mitteltemperatur Kreisläufe sind alle auf einen Zeitausschnitt von 0,5 h bis 4,5 h abgebildet. Die Reduktion des 16 h Intervalls auf ein 4 h Intervall wurde gemacht, da nur die Nieder- und Mitteltemperatur direkt gekoppelt sind und sich die Leistungsverläufe alle 4 h wiederholen (siehe Tabelle 1, Spalten *NT-Leistung [%]* und *MT-Leistung [%]*).

5.1.1 Wärmetauscher

Abbildung 8 zeigt Ein- und Ausgangstemperaturen und Massenströme der Wärmetauscher von NT und MT. Wie zu erwarten, sind die Temperaturen nahezu konstant, was der guten Nachregelung der Verdichterleistungen von NTK und MTK zu verdanken ist (genauerer, siehe 5.1.3 Wärmepumpen).

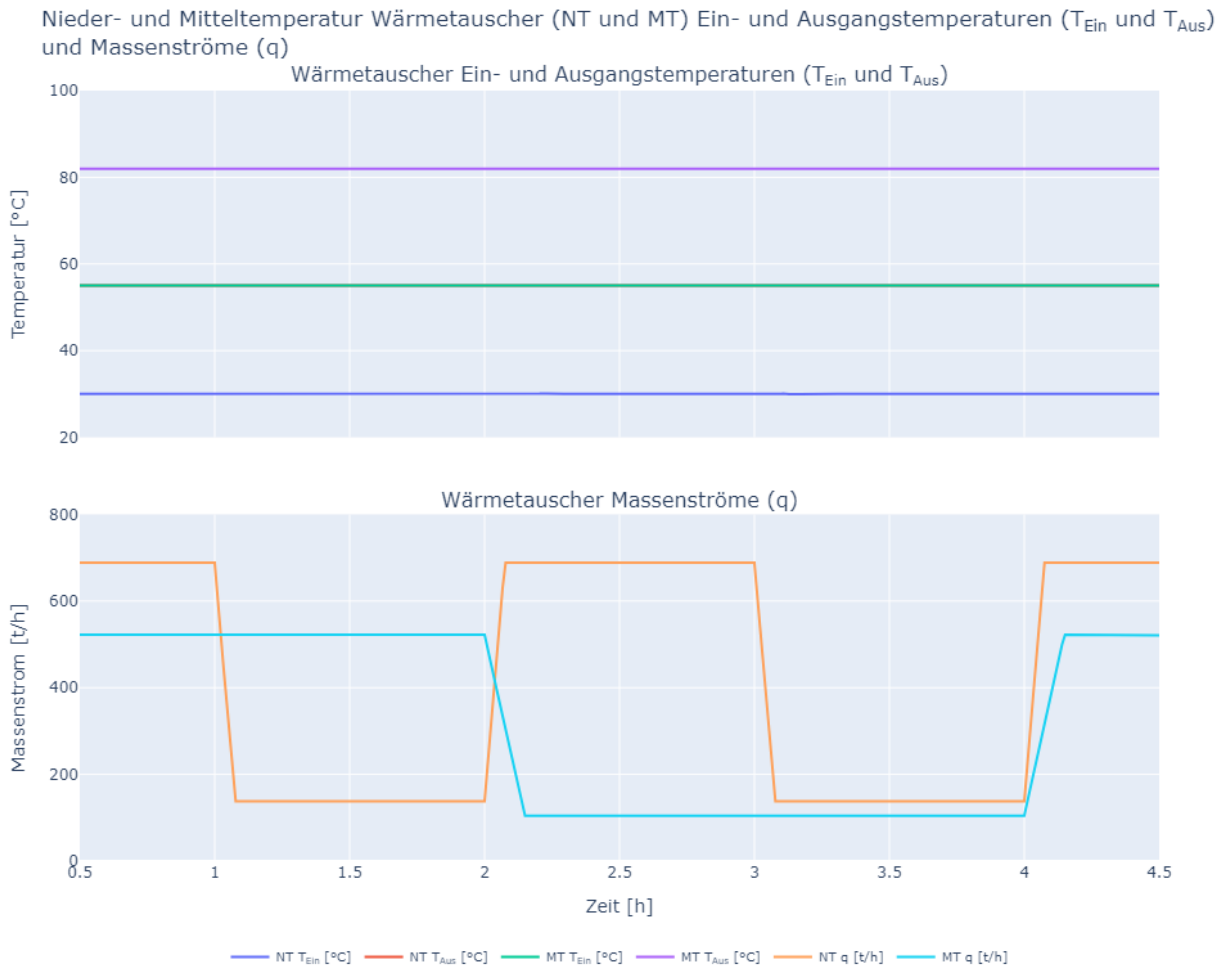


Abbildung 8: Ein- und Ausgangstemperaturen und Massenströme der Wärmetauscher vom Nieder- und Mitteltemperatur Kreislauf. Quell-Massenströme wurden in der Simulation vorgegeben.

5.1.2 Hydraulische Weiche

Abbildung 9 zeigt den Weichenfüllstand und den Massenstrom der Niedertemperaturpumpen P1.1 und P1.2. Pumpe P1.1 folgt der Niedertemperatur-Abwärme mit einem Gradienten von 5 Minuten und Pumpe P1.2 folgt Pumpe P1.1 mit einem Gradienten von 10 Minuten. Wobei nach dem Umschaltprozess Pumpe P1.2 eine Massenstromdifferenz zu P1.1 aufbaut, um die Weiche wieder auf den Sollwert des Füllstandes zurückzubringen.

In einer ersten Simulation wurde die statische Weichenstrategie implementiert. Wie bereits erwähnt, ist hier der Sollwert des Weichenfüllstandes auf 50% fixiert. Nach dem ersten Umschaltprozess (bei Stunde 1) wird durch die Regelung der Pumpe P1.2 der Füllstand wieder auf 50% gefüllt. Beim anschließenden Hochschalten (bei Stunde 2) wird der Füllstand wieder verschoben, kann hier jedoch nicht zurückgeregelt werden, da keine Differenz der Massenströme aufgebaut werden kann, da P1.1 schon im Nennbetrieb ist und P1.2 einen noch höhere Massenstrom erzeugen müsste.

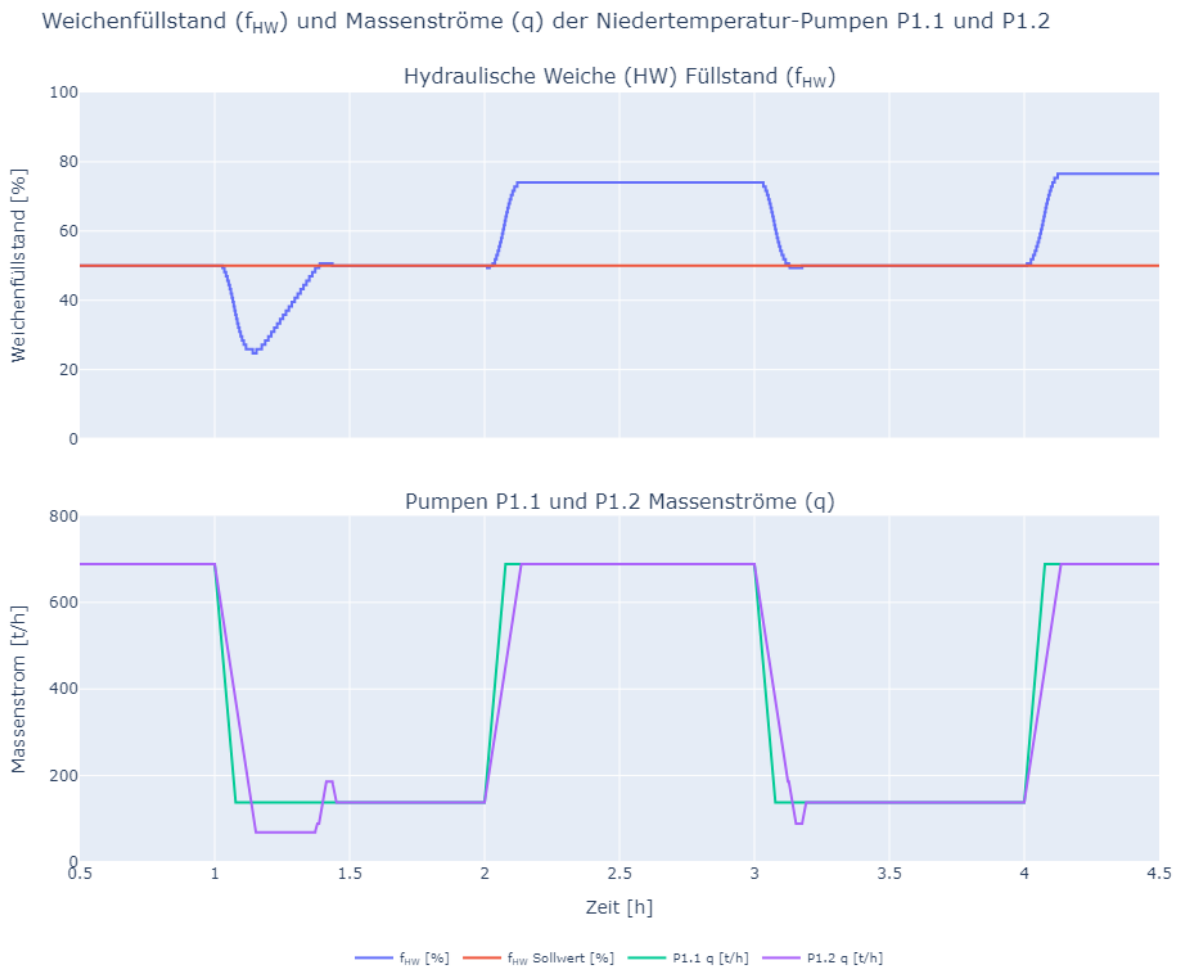


Abbildung 9: Verhalten des Weichenfüllstands beim Umschalten zwischen 100% und 20% Abwärmeleistung im Verhältnis zu den Massenströme der Niedertemperatur Pumpen P1.1 und P1.2. Der Sollwert des Füllstandes ist auf 50% fixiert.

In einer anderen Simulation wurde die dynamische Weichenstrategie simuliert. Wie bereits erwähnt, ist hier der Sollwert des Weichenfüllstands proportional zum Massenstrom der Pumpe P1.1. Abbildung 10 zeigt, wie sich der Weichenfüllstand und die Massenströme verhalten. Der Sollwert folgt folgender Gleichung:

$$f_s(t) = \frac{q_{1.1}(t)}{q_{1.1 \max} - q_{1.1 \min}} \cdot 0.6 + 0.2$$

Mit dem momentanen Weichenfüllstand-Sollwert $f_s(t)$, dem momentanen Massenstrom der $q_{1.1}(t)$, dem maximalen Massenstrom $q_{1.1 \max} = 689 \text{ t/h}$ und dem minimalen Massenstrom $q_{1.1 \min} = 0.2 \cdot 689 \text{ t/h}$ der Pumpe P1.1.

Durch diese lineare Abhängigkeit kann das Volumen der hydraulischen Weiche, wie bereits erwähnt, besser ausgenutzt werden, und in Folge auch ohne Verlust der Funktionalität verkleinert werden.

Des Weiteren verursacht die dynamische Weichenstrategie, im Vergleich zur statischen, ein besseres Einschwingen der Pumpe P1.2, was dazu führt, dass die Leistung des Verdichters der NTK besser geregelt wird.

Aus diesem Grund wurden, mit Ausnahme der vorherigen Abbildung, die Ergebnisse der Simulation mit dynamischer Weichenstrategie verwendet.

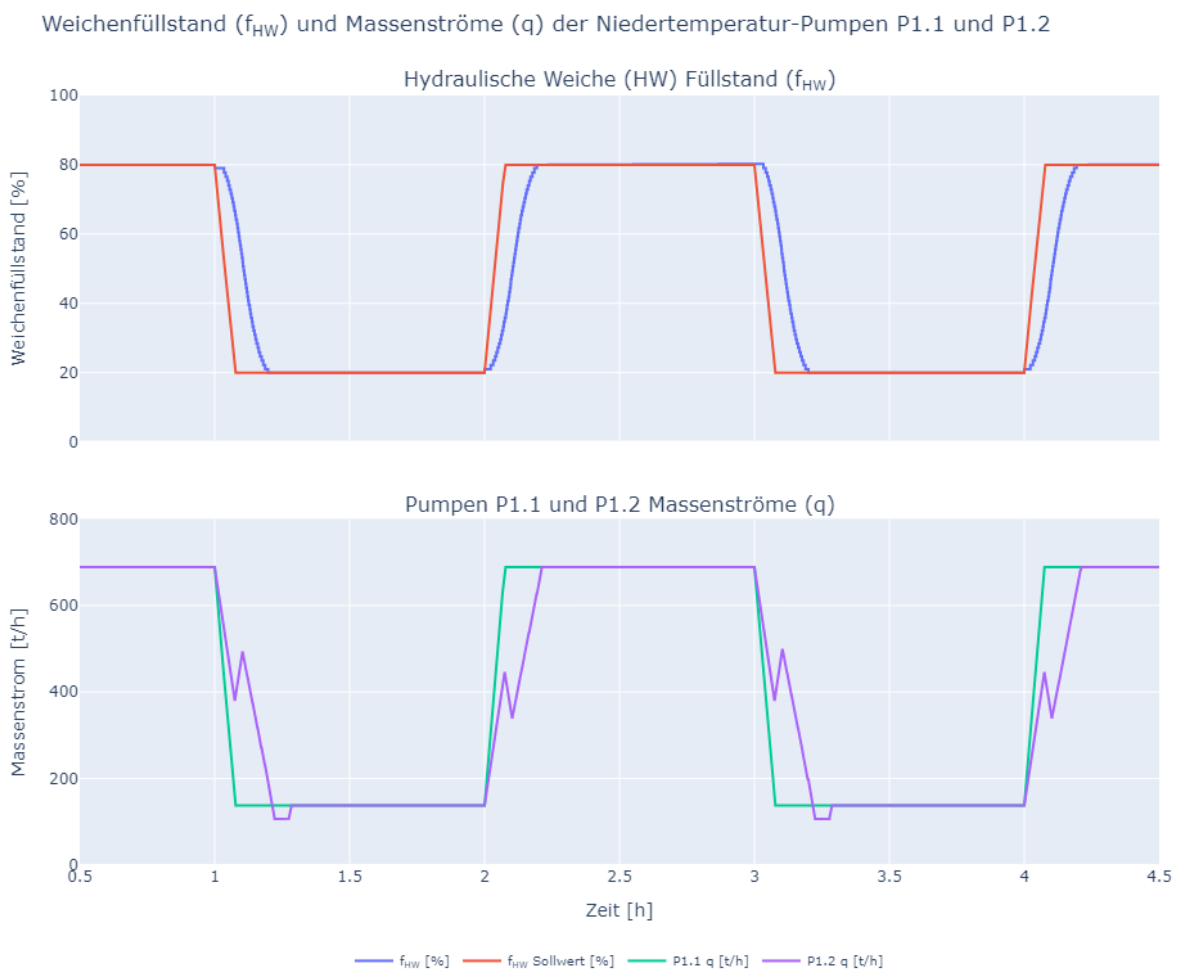


Abbildung 10: Verhalten des Weichenfüllstands beim Umschalten zwischen 100% und 20% Abwärmeleistung im Verhältnis zu den Massenströme der Niedertemperatur Pumpen P1.1 und P1.2. Der Sollwert des Füllstands folgt dem Verlauf von Pumpe P1.1.

5.1.3 Wärmepumpen

Abbildung 11 zeigt Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseite der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade.

Zu beobachten ist die schwankende Ausgangstemperatur der Kondensatorseite, wonach die Kondensatorseite der Mitteltemperaturwärmepumpenkaskade folgt, welche nach entsprechendem Aufheize anschließend in den Vorlauf einspeist. Der Massenstrom der Verdampferseite folgt dem Niedertemperatur-Abwärmeverlauf. Wobei der Leistungsverlauf des Verdichters dem Massenstrom der Verdampferseite folgt. Der Verlauf des Massenstroms der Kondensatorseite ist mit der Mitteltemperatur gekoppelt und folgt der Gesamtleistung von Nieder- und Mitteltemperatur-Abwärme.

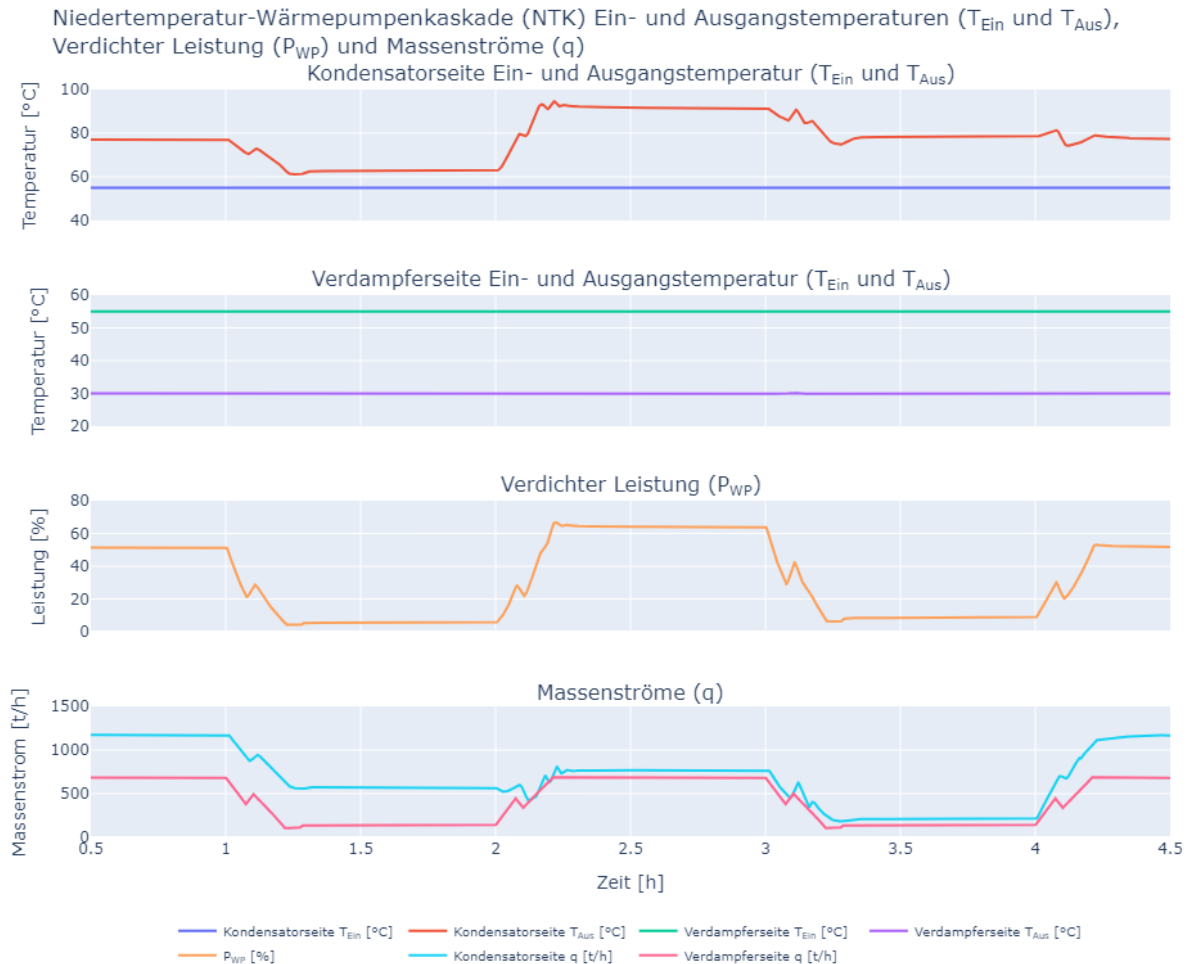


Abbildung 11: Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseite der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK).

Abbildung 12 zeigt die kondensator- und verdampferseitigen Ein- und Ausgangstemperaturen der einzelnen Wärmepumpen der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade. Unterschiede in den Ausgangs- und Eingangstemperaturverläufen der nachfolgenden Wärmepumpen in der Kaskade kommen von der Rückmischung über die Nebenschlüsse.

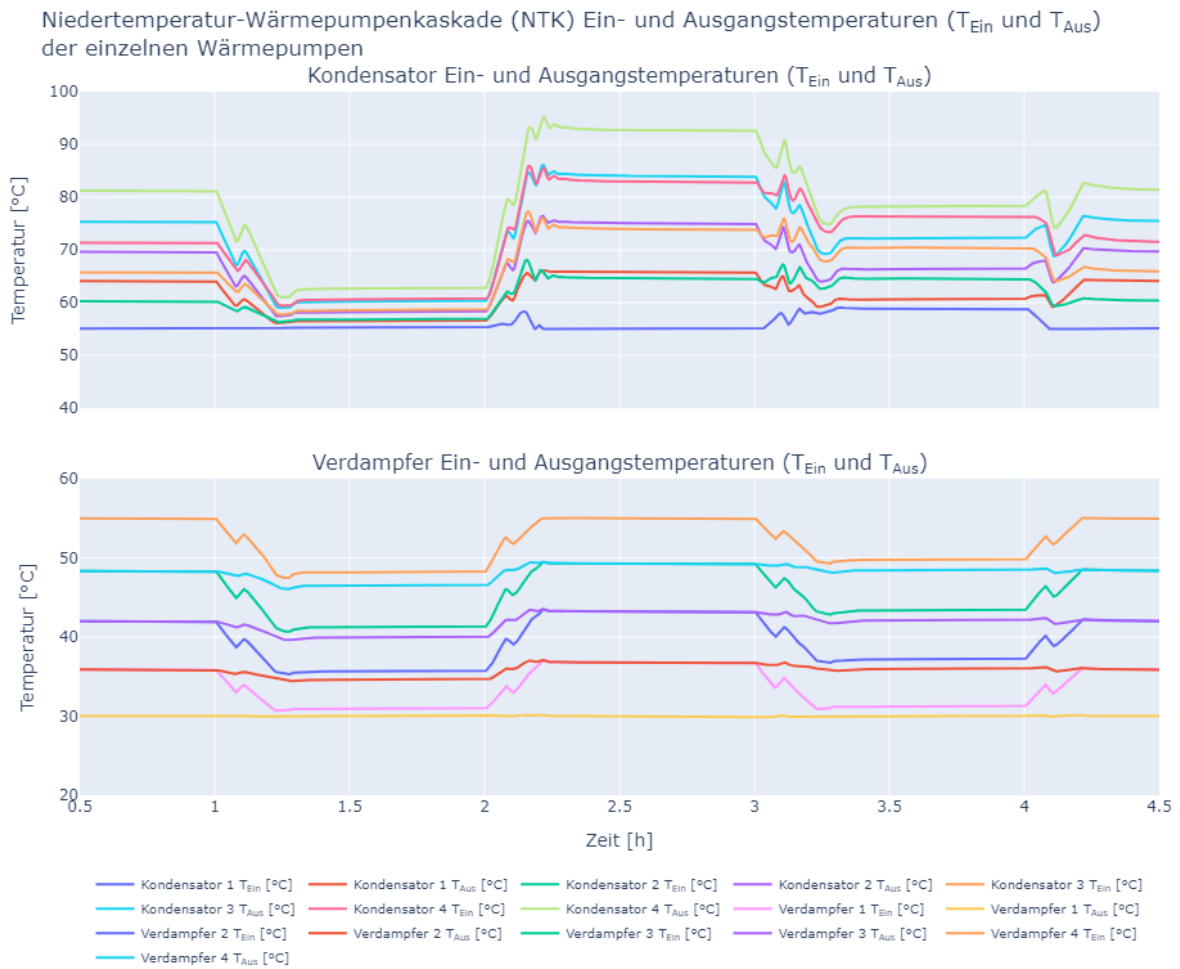


Abbildung 12: Kondensator- und verdampferseitigen Ein- und Ausgangstemperaturen der einzelnen Wärmepumpen der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK).

Abbildung 13 zeigt Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseite der Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade. Zu beobachten ist die schwankende Eingangstemperatur der Kondensatorseite, welche der Kondensatorseite der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade folgt. Der Massenstrom der Verdampferseite folgt dem Mitteltemperatur-Abwärmeverlauf. Der Verlauf des Massenstroms der Kondensatorseite ist mit der Niedertemperatur gekoppelt und folgt der Gesamtleistung von Nieder- und Mitteltemperatur-Abwärme und ist so geregelt, dass die Vorlauftemperatur (97°C) am Ausgang der Kondensatorseite erreicht wird.

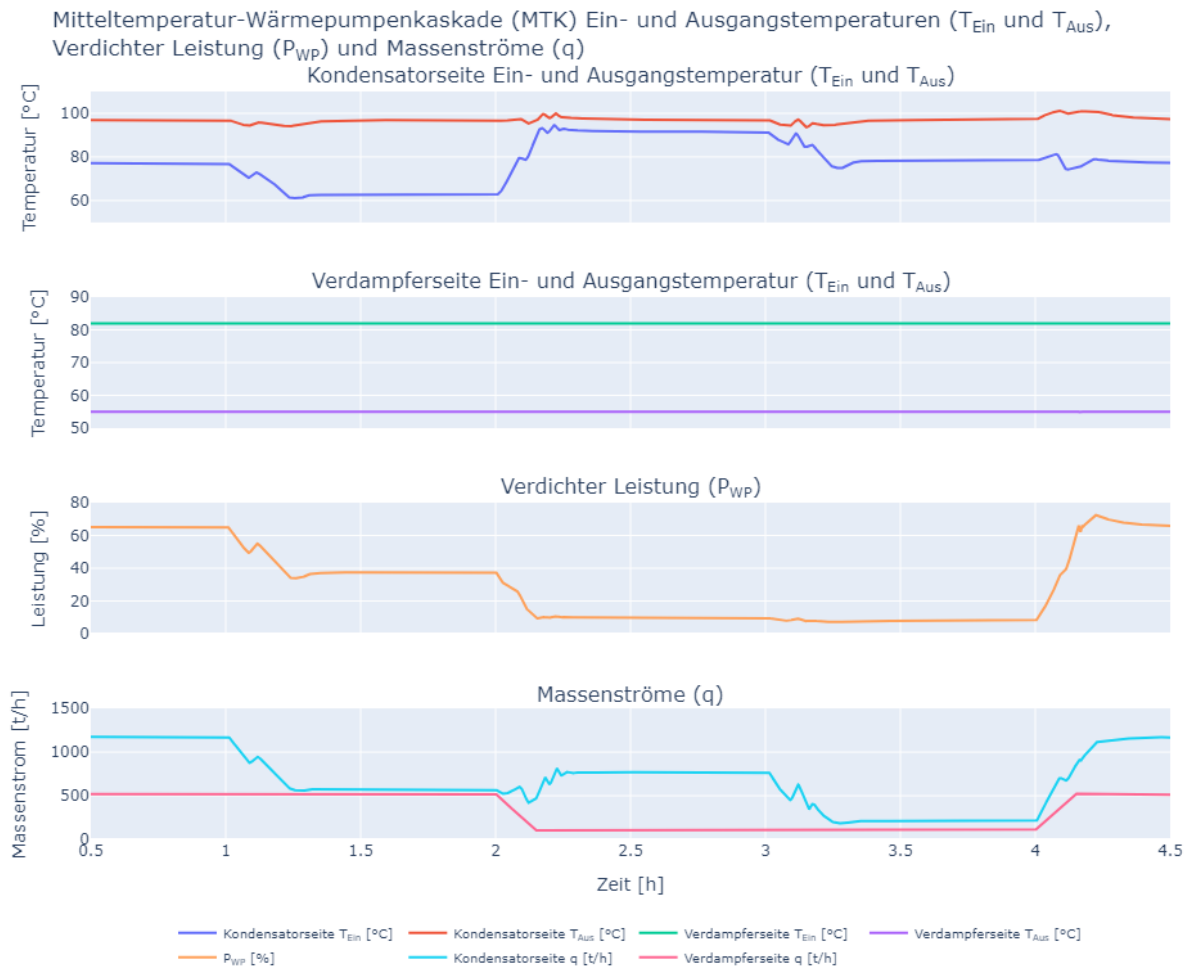


Abbildung 13: Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseite der Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade (MTK).

Abbildung 14 zeigt die kondensator- und verdampferseitigen Ein- und Ausgangstemperaturen der einzelnen Wärmepumpen der Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade. Unterschiede in den Ausgangs- und Eingangstemperaturverläufen der nachfolgenden Wärmepumpen in der Kaskade kommen von der Rückmischung über die Nebenschlüsse.

Zu beachten ist auch, dass an den Ein- und Ausgängen der einzelnen Wärmepumpen der Kaskade, eine höhere Temperatur als der Vorlauf (97°C) erreicht werden kann. Dies kommt davon, dass bei niedrigerem kondensatorseitigen Massenstrom, die kondensatorseitige Ausgangstemperatur der MTK, auf die geregelt wird, durch die Rückmischung runtergekühlt wird.

Je nachdem welche Wärmepumpen verwendet werden, kann dies über die maximal zulässigen Temperaturen liegen und es müsste ein zusätzlicher Regelmechanismus integriert werden, welcher zum Beispiel den Massenstrom der Kondensatorseite entsprechend anpasst.

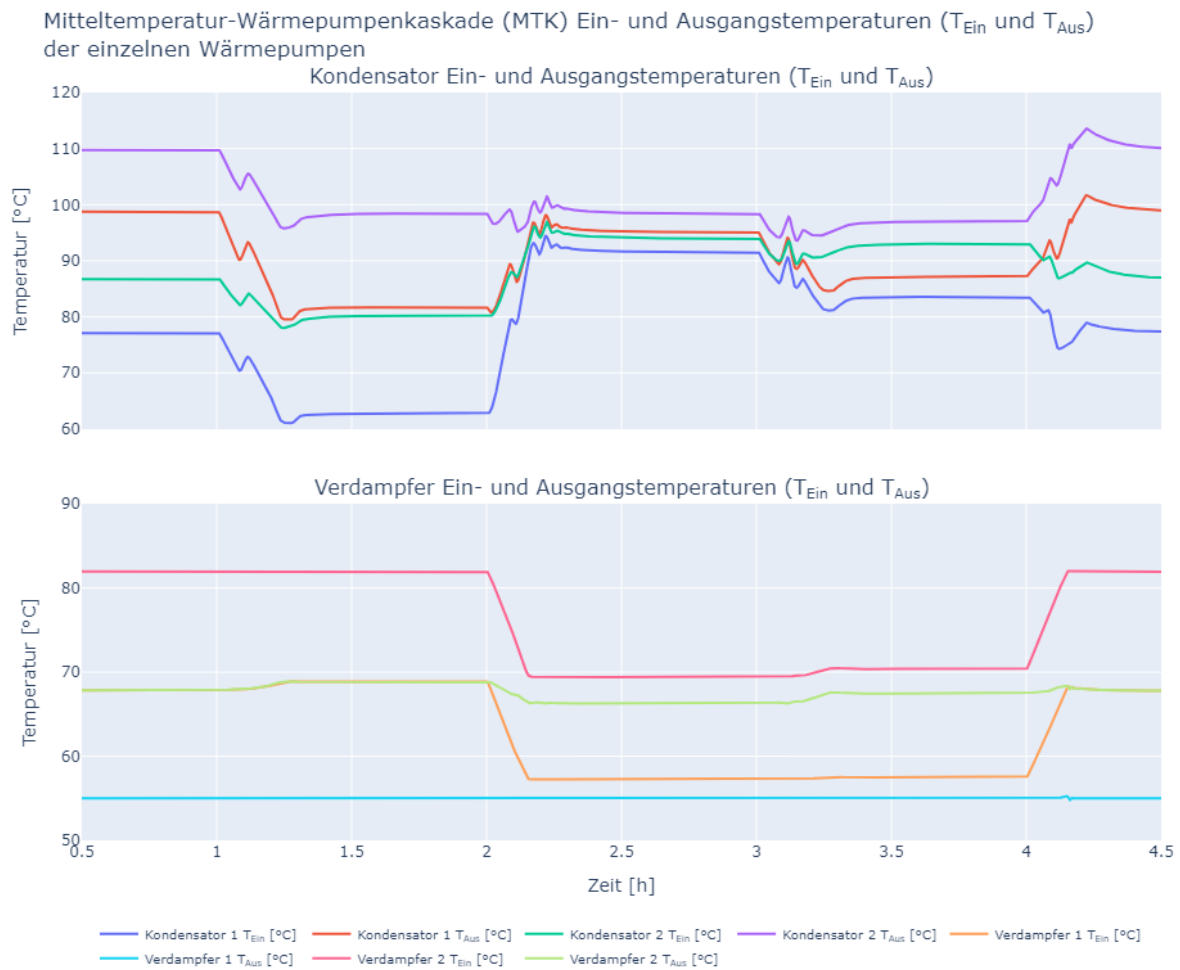


Abbildung 14: Kondensator- und verdampferseitige Ein- und Ausgangstemperaturen der einzelnen Wärmepumpen der Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade.

Abbildung 15 zeigt die Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseiten von NTK und MTK in einer Abbildung. Zu beobachten ist die schwankende Zwischentemperatur der Kondensatorseite. Veranschaulicht sind außerdem nochmals die Massenströme der Verdampferseiten, welche den Abwärmeverläufen folgen und der Massenstrom der Kondensatorseite, welcher der Gesamtleistung von Nieder- und Mitteltemperatur-Abwärme folgt.

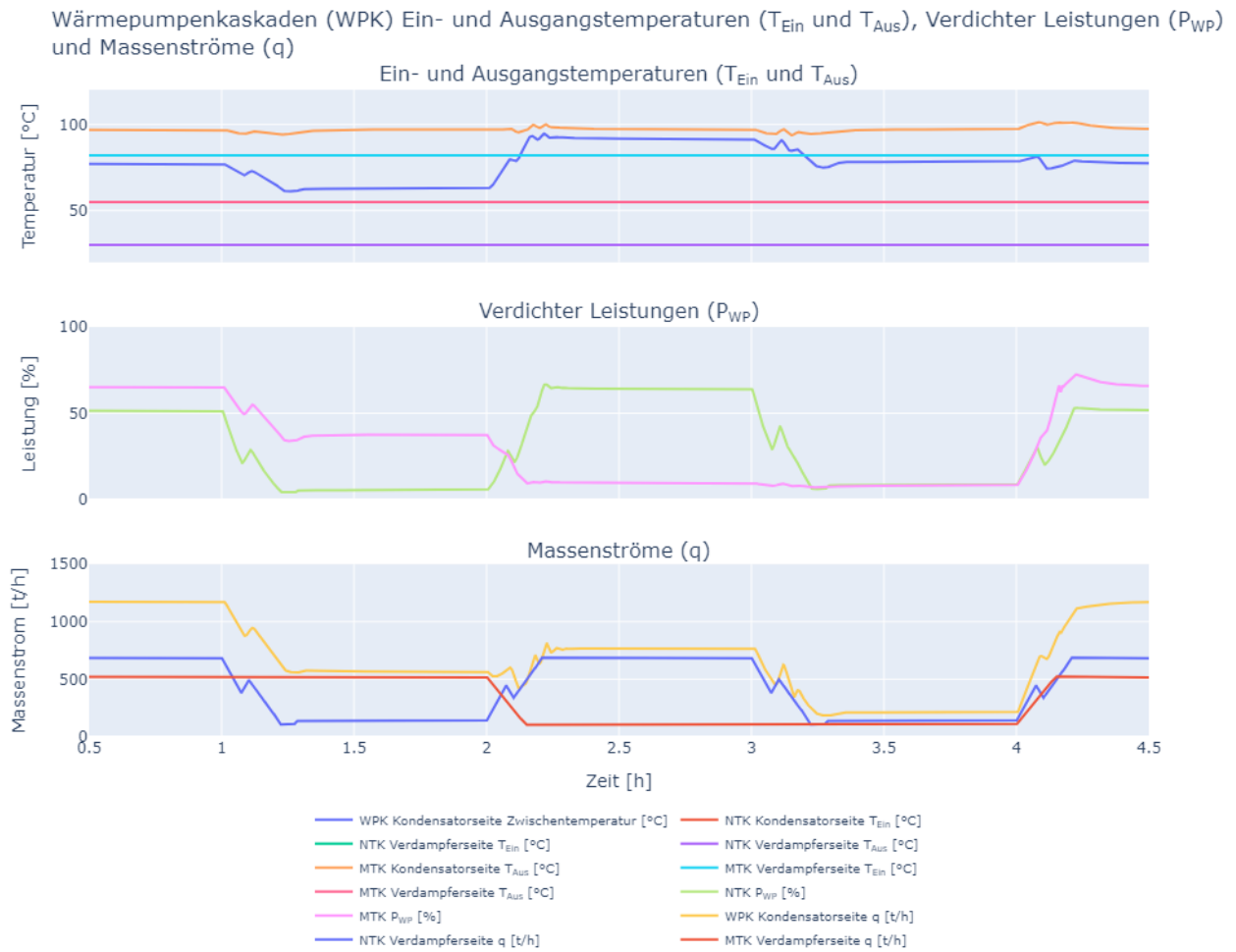


Abbildung 15: Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseiten der Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK).

5.2 Hochtemperatur- und Überschussdampf Kreislauf

Die Massenströme schalten zwischen 100% und 20% Abwärmeleistung mit einem Gradienten von 10 Minuten um. Die Hochtemperatur alle 4 Stunden und der Überschussdampf alle 8 Stunden.

Abbildung 16 zeigt die Ein- und Ausgangstemperaturen und Quell-Massenströme der Wärmetauscher der Hochtemperatur- und Überschussdampf-Abwärme.

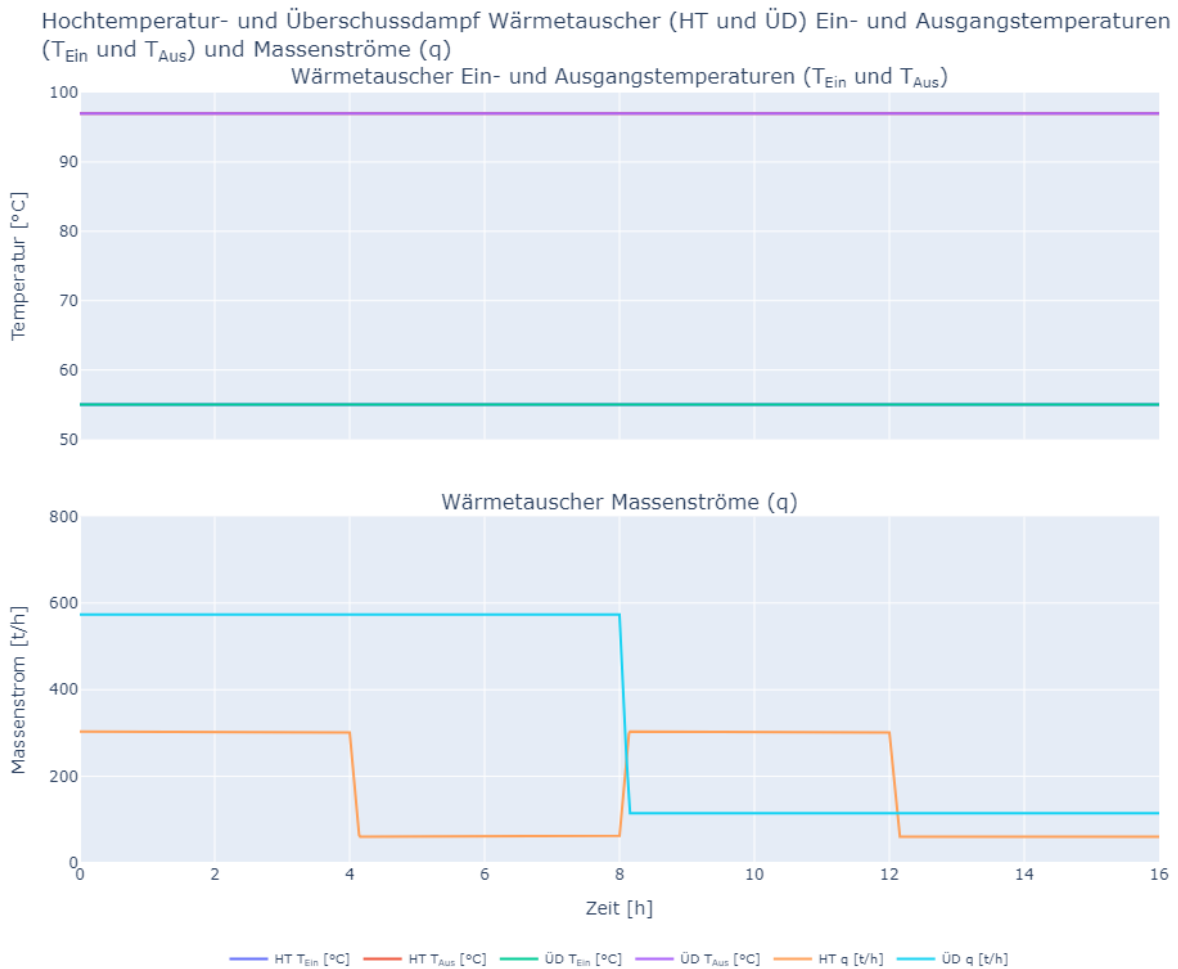


Abbildung 16: Ein- und Ausgangstemperaturen und Quell-Massenströme der Wärmetauscher der Hochtemperatur- und Überschussdampf-Abwärme. Die Quell-Massenströme wurden in der Simulation vorgegeben.

5.3 Gesamter Kreislauf

Abschließend zeigt Abbildung 17 die Massenström aller Pumpen und jedes Wärmetauschers der Industrieabwärme über die gesamte Dauer der Simulation.

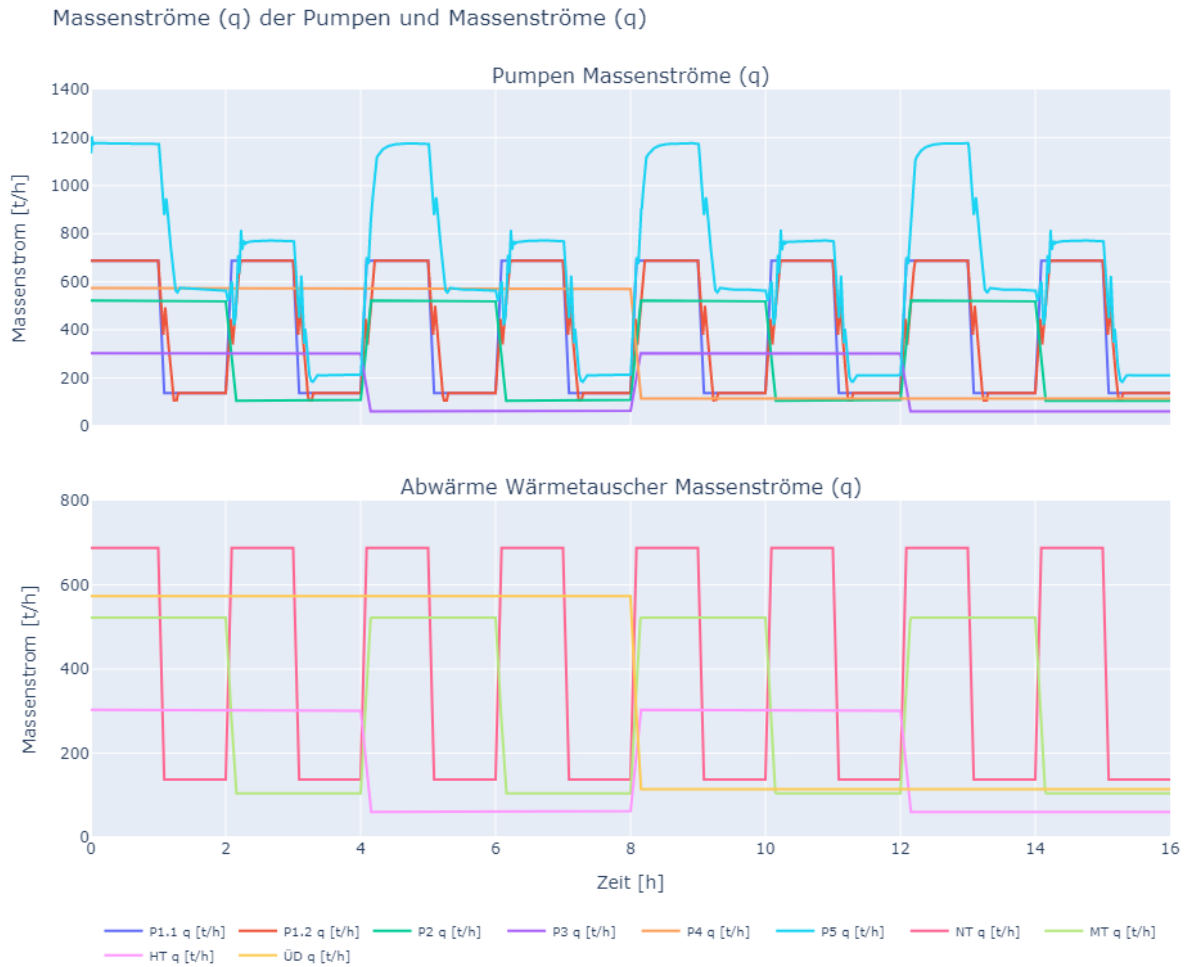


Abbildung 17: Massenströme aller Pumpen und jedes Wärmetauschers der Industrieabwärme im Heat Highway Kurz.

6 CONCLUSIO

Das Projekt Heat Highway untersucht interregionale Wärmeübertragungsnetze, auch HeatHighway genannt. In der case study Fernwärmenetz Linz sollen unterschiedlicher Quellen industrieller Abwärme über einen sogenannten HeatHighway eingebunden werden, die mit einer Wärmepumpenkaskade auf Netztemperaturen angehoben werden sollen. Ein wesentliches regelungstechnisches Problem hierbei ist, dass die Abwärmeleistung der Niedertemperatur schneller variieren, als die Kühlleistung der Wärmepumpenkaskade verändert werden kann (bei gleichzeitig konstant gehaltenen Eingangs- und Ausgangstemperaturen).

Durch das Aufbauen der Simulation in Modelica/ Dymola wurde ein besseres Verständnis des Systems and sich, sowie der Regelstrategie und dem Betriebsverhalten der hydraulischen Weiche und der Wärmepumpenkaskaden erlangt.

Es ist außerdem erkenntlich geworden, dass der Betrieb der hydraulischen Weiche noch verfeinert werden kann, indem das Ziel-Füllstandniveau proportional zum Massenstrom der zugehörigen Pumpe adjustiert wird. Dies führt zu einer Verkleinerung des notwendigen Weichenvolumens und zu einem besserem Regelverhalten. Dies funktioniert, da bei bereits hoher Leistung die Leistung nur mehr um einen geringen Wert erhöht werden kann und deshalb auch nur mehr eine kleine Weichenfüllstandsänderung nach oben auftreten kann. Selbes gilt für den Fall niedriger Leistung. Dadurch kann das Weichenvolumen theoretisch halbiert werden.

7 AUSBLICK

Mögliche nächste Schritte und weitere Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. **Realitätsnahe Daten Wärmepumpe:** Die Integration von Daten einer geeigneten, am Markt verfügbaren Wärmepumpe in das Modell, um das dynamische Verhalten des COPs in verschiedenen Konfigurationen bestimmen zu können.
2. **Abbildung Kraftwerk Linz Mitte:** Die Integration des Linz Mitte Kraftwerks samt Speicher wäre eine weitere sinnvolle Erweiterung des Modells, wobei das Kraftwerk in der momentanen Konfiguration mit den Druck-Randbedingungen noch keinen wirklichen Effekt haben würde. Außer im Kontext eines Betriebsverlaufs, wo das Zusammenspiel von Industrieabwärme mit dem Dynamischen Verhalten des Kraftwerks betrachtet werden will.
3. **Speicherintegration:** Der Speicher wäre auch nur in einer Konfiguration sinnvoll, in welcher auch das Netz integriert ist, beziehungsweise mindestens mit einem vorgegebenen Massenstrom am Netzeinspeisepunkt. Da durch die verschiedenen Massenströme die Differenz, ähnlich wie bei der hydraulischen Weiche, über den Speicher ausgeglichen wird.
4. **Abbildung Rohrsystem:** Durch die Verfeinerung aller Druckabfälle kann auch ein guter Überblick über die Druckverhältnisse im Industrieabwärme-System geschaffen werden. Dazu wäre das Simulationsmodell mit einer möglichst realitätsnahen Abbildung des gesamten Rohrsystems samt Armaturen und Apparaten zu ergänzen.
5. **Nutzung Monitoring-Daten:** Mit genaueren Netzdaten und einem groben Modell des Linz Mitte Kraftwerks sowie Betriebsdaten der einzelnen Komponenten wäre eine dynamisch-realistische Abbildung des Betriebs der Erweiterung möglich.
6. **Integration Fernwärmenetz:** Als wesentlich komplexer, stellte sich die Integration des Fernwärmenetzes dar, da zumindest ein Datensatz für Wärmeleistung- und „Druck“-Nachfrage notwendig wäre, um das Netz halbwegs akkurat in das Modell integrieren zu können.
 - a. Bisläng wurde deshalb in erster Vereinfachung simple Druck-Randbedingungen verwendet. Bei gleichbleibender Regelstrategie bleibt auch die Komplexität des Systems (im Bezug auf die Simulationszeit und die Konvergenz der Lösung), auf einem überschaubaren Niveau.
7. **Abbildung Kraftwerk Linz Süd:** Integration Schlussendlich ist die Integration des Kraftwerks Linz Süd, wie im Konzept des „HeatHighway lang“ beschrieben, eine zusätzliche, mögliche Erweiterung des Systems.

8 ABILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Vereinfachte Abbildung des kurzen Linzer Heat Highways. Zu sehen sind, von links nach rechts, die vier Wärmetauscher der Industrieabwärmequellen (ÜD, HT, MT und NT), die hydraulische Weiche (HW), die zwei Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK), der Speicher (SP), das Kraftwerk Linz Mitte (KW) und das Linzer Fernwärmenetz (N).....	5
Abbildung 2: Vereinfachter Ausschnitt des kurzen Linzer Heat Highways. Zu sehen ist der Niedertemperatur Kreislauf, beginnend vom Wärmetauscher der Niedertemperatur-Abwärme (NT), weiter zu der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK) über die Nachkühlung (K) zurück zur NT. Eine hydraulische Weiche (HW) ist zwischen Ein- und Ausgang der NT verbaut, um einen schnellen Lastwechsel gewährleisten zu können. Die zwei Pumpen P1.1 und P1.2 geben die jeweiligen Massenströme vor.	6
Abbildung 3: Verschaltung der zwei Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK). Verdampfer und Kondensator werden beide über Pumpen mit konstantem Massenstrom gespeist und sind jeweils mit einem Nebenschluss versehen, sodass die Differenz der Massenströme ausgeglichen werden kann. WP01 und WP02 sind für die Kühlung von der Mitteltemperatur (82°C) auf den Rücklauf (55°C) zuständig. WP03.1–WP03.4 sind für die Kühlung von Rücklauf (55°C) auf Niedertemperatur (30°C) zuständig. Die Senkenseite der gesamten Kaskade hebt einen Teil des Rücklaufs (55°C) auf den Vorlauf (97°C) an.....	7
Abbildung 4: Konfiguration ohne hydraulische Weiche mit unterschiedlichen Gradienten des Heizers und des Kühlers. Der Kühler auf der rechten Seite regelt zu langsam hoch, wodurch die Ausgangstemperatur des Kühlers T_2 ansteigt. t ist die Zeit, m ist der Massenstrom der Pumpe, m_q ist der Quell-Massenstrom des Heizers bzw. des Kühlers und T_1 ist die Ausgangstemperatur des Heizers.....	8
Abbildung 5: Funktionsprinzip der hydraulischen Weiche. Heizer und Kühler mit unterschiedlichen Gradienten. Die Differenz der zwei Massenströme fließt über die Weiche und verändert den Füllstand der Weiche. Das warme Wasser wird beim Umschaltprozess in der hydraulischen Weiche quasi „zwischengelagert“ und im Falle des inversen Umschaltprozesses wieder „herausgenommen“. t ist die Zeit, m_1 und m_2 sind die Massenströme der zwei Pumpen, $\Delta m = m_1 - m_2$ ist die Massenstromdifferenz zwischen den zwei Kreisen, m_q ist der Quell-Massenstrom des Heizers bzw. des Kühlers, T_1 ist die Ausgangstemperatur des Heizers und T_2 ist die Ausgangstemperatur des Kühlers.....	8
Abbildung 6: Füllstrategie, wobei der Sollwert des Füllstands f_s nicht konstant gehalten wird, sondern proportional zum sich schneller ändernden Massenstrom gehalten wird. t ist die Zeit, t_1 und t_2 sind die jeweiligen Umschaltzeiten des Heizers und Kühlers, m ist der Massenstrom, m_1t und m_2t sind die Massenströme der jeweiligen Pumpen, Δmt ist die Massenstromdifferenz zwischen den zwei Kreisen, m_q ist der Quell-Massenstrom des Heizers bzw. des Kühlers, m_{max} und m_{min} sind der maximale und minimale Massenstrom von m_1t und m_2t , T_1 ist die Ausgangstemperatur des Heizers und T_2 ist die Ausgangstemperatur des Kühlers.	9
Abbildung 7: Vereinfachte Netzeinspeisung samt visualisierte Regelkreise. Wichtig zu beachten ist die Verschiebung der Einspeisung in den Vorlauf der Wärmepumpenkaskade von vor dem Linz Mitte Kraftwerk und Speicher hin zur Einspeisung des Vorlaufs des Heat Highways.....	10
Abbildung 8: Ein- und Ausgangstemperaturen und Massenströme der Wärmetauscher vom Nieder- und Mitteltemperatur Kreislauf. Quell-Massenströme wurden in der Simulation vorgegeben.	14
Abbildung 9: Verhalten des Weichenfüllstands beim Umschalten zwischen 100% und 20% Abwärmeleistung im Verhältnis zu den Massenströme der Niedertemperatur Pumpen P1.1 und P1.2. Der Sollwert des Füllstands ist auf 50% fixiert.	15
Abbildung 10: Verhalten des Weichenfüllstands beim Umschalten zwischen 100% und 20% Abwärmeleistung im Verhältnis zu den Massenströme der Niedertemperatur Pumpen P1.1 und P1.2. Der Sollwert des Füllstands folgt dem Verlauf von Pumpe P1.1.....	16
Abbildung 11: Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseite der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK).....	17
Abbildung 12: Kondensator- und verdampferseitigen Ein- und Ausgangstemperaturen der einzelnen Wärmepumpen der Niedertemperatur-Wärmepumpenkaskade (NTK).....	18
Abbildung 13: Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseite der Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade (MTK).....	19

Abbildung 14: Kondensator- und verdampferseitige Ein- und Ausgangstemperaturen der einzelnen Wärmepumpen der Mitteltemperatur-Wärmepumpenkaskade.	20
Abbildung 15: Ein- und Ausgangstemperaturen der Kondensator- und Verdampferseiten der Wärmepumpenkaskaden (NTK und MTK).	21
Abbildung 16: Ein- und Ausgangstemperaturen und Quell-Massenströme der Wärmetauscher der Hochtemperatur- und Überschussdampf-Abwärme. Die Quell-Massenströme wurden in der Simulation vorgegeben.	22
Abbildung 17: Massenströme aller Pumpen und jedes Wärmetauschers der Industrieabwärme im Heat Highway Kurz.	23

9 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Leistungsverläufe der vier verschiedenen Industrieabwärmequellen.	11
Tabelle 2: Zusammenfassung aller relevanten Größen, welche für die Simulation ausgewählt wurden bzw. für die Beschreibung des kurzen Heat Highways relevant sind. Die meisten wurden vom bereits existierenden Konzept entnommen. * Je nach Füllstrategie: 80%, wenn die Weiche P1.1 nachregelt. 50%, wenn die Weiche konstant auf 50% geregelt ist.	12

AIT AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY GMBH

Giefinggasse 4, 1210 Wien, Österreich

www.ait.ac.at

Ralf-Roman Schmidt
Senior Research Engineer
Integrated Energy Systems
Center for Energy
ralf-roman.schmidt@ait.ac.at

Abdulrahman Dahash
Scientist
Thermal Energy Systems
Center for Energy
abdulrahman.dahash@ait.ac.at

Janik Trauner
Praktikant
Integrated Energy Systems
Center for Energy
janik.trauner@ait.ac.at