

Modellierung von Kaskadenschaltungen in nPro

Stand 30.06.2026

Werden mehrere Erzeuger gezielt verschaltet, spricht man von Kaskadierung. Dabei unterscheidet man zwischen **serieller und paralleler Kaskadierung**. Eine Kaskadierung kann einen effizienteren Betrieb ermöglichen oder überhaupt erst die Deckung des Bedarfs sicherstellen.

Was ist eine Kaskadierung von Erzeugern?

Bei der Kaskadierung von Erzeugern nutzt man die unterschiedlichen Betriebscharakteristika mehrerer Erzeuger möglichst effizient im Gesamtsystem. Bei paralleler Verschaltung deckt beispielsweise ein Erzeuger mit hohen Investitions-, aber niedrigen Betriebskosten die Grundlast ab, während ein zweiter Erzeuger mit niedrigen Investitions-, aber hohen Betriebskosten die Spitzenlast übernimmt. Bei serieller Verschaltung nutzt man dagegen unterschiedliche Temperaturniveaus zwischen den Erzeugern.

Was ist eine parallele Kaskade?

Von einer parallelen Kaskade spricht man, wenn mehrere Erzeuger auf dasselbe Temperaturniveau einspeisen und dabei je nach Lastanforderung unterschiedlich stark zum Einsatz kommen. Typischerweise ergänzen sich dabei Erzeuger mit gegensätzlichen Kostenstrukturen: Ein Erzeuger mit hohen Investitions-, aber niedrigen Betriebskosten (z. B. eine Wärmepumpe oder ein BHKW) deckt die Grundlast, während ein Erzeuger mit niedrigen Investitions-, aber hohen Betriebskosten (z. B. ein Spitzenlastkessel) nur bei Bedarfsspitzen zugeschaltet wird. Ziel ist es, die Vorteile beider Erzeugertypen so zu kombinieren, dass die Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum minimiert werden. Der Sonderfall mit genau zwei Erzeugern wird auch als *bivalent-paralleler Betrieb* bezeichnet.

Was ist eine serielle Kaskade?

Von einer seriellen Kaskade spricht man, wenn die erste Stufe Wärme auf einem bestimmten Temperaturniveau bereitstellt, das von einer zweiten Stufe weiter genutzt oder weiter angehoben wird. Ein typisches Beispiel ist die serielle Verschaltung einer Luftwärme- mit einer Booster-Wärmepumpe.

Anwendungsbeispiele in nPro

Im Folgenden wird anhand von zwei Beispielen gezeigt, wie sich die serielle und parallele Kaskade in nPro modellieren lassen.

A) Serielle Kaskade: Zwei Wärmepumpen zur Temperaturanhebung

Ein Anwendungsfall für die serielle Kaskade ist die Nutzung zweier Wärmepumpen zur Temperaturanhebung. In diesem Fall wird das von einer ersten Wärmepumpe bereitgestellte Temperaturniveau durch eine zweite Wärmepumpe weiter genutzt und angehoben. Da nPro bei der Deckung der Energiebedarfe ausschließlich mit Energiebilanzen arbeitet, wird diese Temperaturanhebung im Modell nicht direkt abgebildet, sondern ergibt sich implizit aus der energetischen Verschaltung der beiden Erzeuger und den jeweils hinterlegten COP-Werten.

Für diese Modellierung gibt es im Wesentlichen **zwei Möglichkeiten**: Entweder werden beide Wärmepumpen explizit modelliert, oder sie werden in *einer* Wärmepumpe zusammengefasst.

1. Möglichkeit: Explizite Modellierung beider Wärmepumpen

Sollen beide Wärmepumpen explizit modelliert werden, müssen die Luftwärmepumpe und zusätzlich die Booster-Wärmepumpe explizit ausgewählt werden, wie in Abbildung 1 dargestellt.

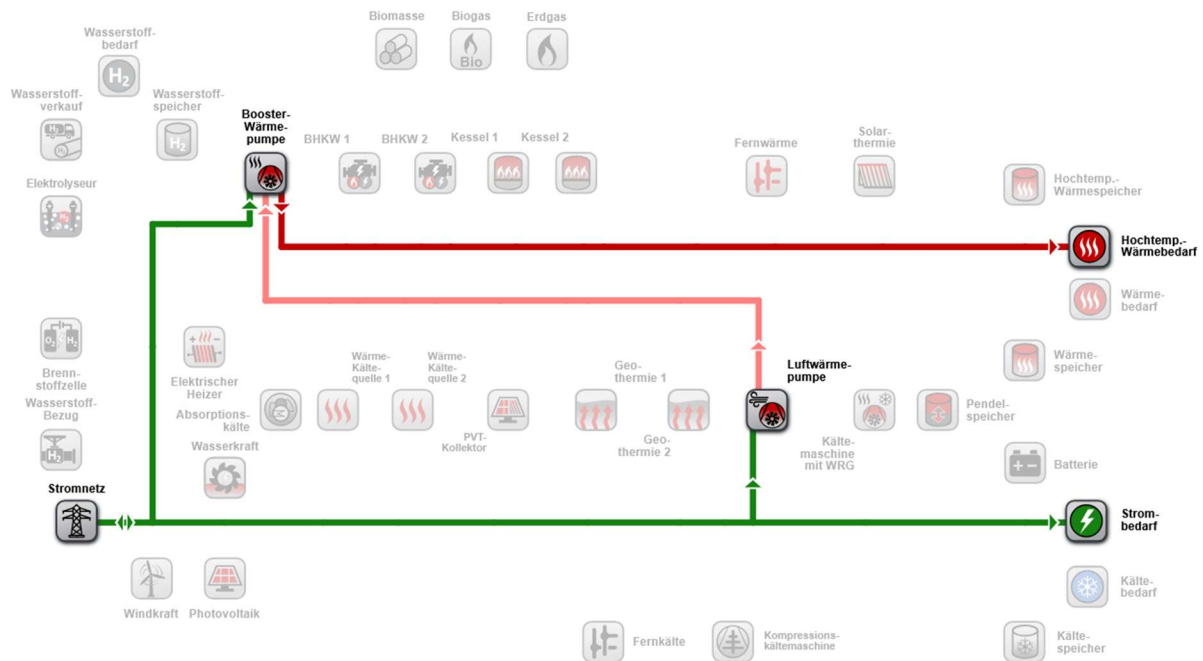


Abbildung 1: Serielle Kaskadierung zweier Wärmepumpen durch explizite Modellierung anhand einer zusätzlichen Booster-Wärmepumpe.

Am Verdampfer der Booster-Wärmepumpe liegt somit die Leistung der Luftwärmepumpe an. Für die Luftwärmepumpe muss ausgewählt werden, dass diese Niedertemperaturwärme erzeugt (s. Abbildung 2).

Luftwärmepumpe

Luftwärmepumpen nutzen Umgebungsluft als Wärmequelle/-senke, um mit Strom Wärme und/oder Kälte zu erzeugen.

Nennleistung

☐ Optimierungsbereich vorgeben
Die Nennleistung wird durch die Optimierungsrechnung ermittelt.

Nenn-COP (Nennbetriebspunkt) ?

COP (Wärme)

COP berechnen (Carnot) ⌵

Mittlere Effizienz (Gütegrad: 50 %) ⌵

Maximaler COP ?

Betriebsbeschränkungen

[Betriebsbeschränkungen definieren](#)

Keine Betriebsbeschränkungen aktiv.

Betriebsmodus

☒ Wärmepumpe kann heizen

☐ Wärmepumpe kann kühlen

☐ Erzeugt Hochtemp.-Wärme ?

☒ Erzeugt Niedertemp.-Wärme ?

☐ Erzeugt Wärme zur Regeneration

COP-Verläufe berechnen

OK

Abbildung 2: Eingabemaske des Luftwärmepumpen-Moduls, wobei diese nur Niedertemperatur-Wärme erzeugt.

Für beide Wärmepumpen können jeweils eigene Betriebsbedingungen sowie Kosten definiert werden. Da die Booster-Wärmepumpe ausschließlich einen Hochtemperatur-Wärmebedarf deckt, muss sichergestellt sein, dass der Wärmebedarf dem (dunkelroten)

Hochtemperatur-Bedarf zugeordnet ist. Dies wird abhängig vom Projekttyp unterschiedlich realisiert:

- Quartiersprojekt: Im Wärmebedarf muss eine geringe *Grenztemperatur* eingestellt werden (z.B. 10 °C), sodass der gesamte Wärmebedarf dem (dunkelroten) Hochtemperatursektor zugeordnet wird.
- Einzelgebäude-Projekte: Über die beiden Checkbox-Felder im Wärmebedarf muss der Raumwärme- und Trinkwarmwasserbedarf dem HT-Sektor zugeordnet werden.
- Energiezentralen-Projekt: Das Lastprofil muss im Hochtemperatur-Wärmebedarf hochgeladen werden.

Neben der Luftwärmepumpe als erster Stufe können auch (mehrere) andere Erzeuger als Wärmequelle für die zweite Stufe genutzt werden, etwa die Wärme-/Kältequelle, die Geothermie oder PVT-Kollektoren.

2. Möglichkeit: Gemeinsame Modellierung

Alternativ können beide Wärmepumpen als eine Einheit betrachtet werden. Hierfür wird beispielsweise nur die Luftwärmepumpe ausgewählt (s. Abbildung 3), der anschließend Betriebsbedingungen zugewiesen werden, die beide Stufen gemeinsam abbilden. Entscheidend ist bei dieser Variante, dass insbesondere der COP so eingestellt wird, dass er beide Stufen repräsentiert.

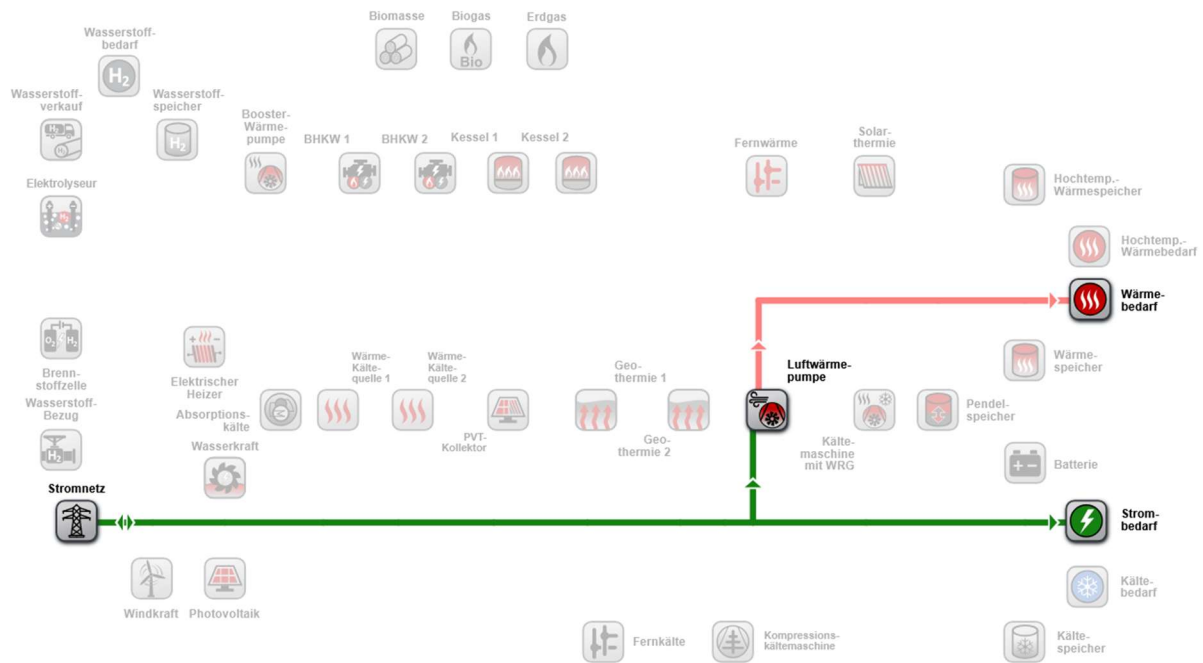


Abbildung 3: Serielle Kaskadierung zweier Wärmepumpen durch Zusammenfassung der Kenndaten in einer einzigen Luftwärmepumpe.

Der COP der aggregierten Stufe berechnet sich aus den beiden COPs der Einzelstufen (COP_1, COP_2) zu:

$$COP_{ges} = \frac{1}{1 - \frac{1}{COP_2} + \frac{1}{COP_1}}$$

Bei hinterlegten COP-Tabellen (aus Datenblättern) können die stündlich-aufgelösten jährlichen COP-Profile zunächst im Tool vorberechnet und in Excel exportiert werden; anschließend kann in Excel über den oben dargestellten Zusammenhang das stündliche COP-Profil des Gesamtprozesses berechnet werden. Dieses kann dann mit der Option „Zeitreihe hochladen“ als COP-Profil in den Wärmepumpen-Einstellungen hinterlegt werden.

B) Parallele Kaskade: Verschaltung von Wärmepumpe und Kessel zur gemeinsamen Bedarfsdeckung

Ein Anwendungsfall für die parallele Kaskade ist die gemeinsame Versorgung eines Wärmebedarfs durch eine Wärmepumpe und einen Kessel. In diesem Fall decken beide Erzeuger unabhängig voneinander einen gewissen Anteil des Wärmebedarfs.

Für diese Modellierung gibt es im Wesentlichen **zwei Möglichkeiten**:

- a) Entweder beide Erzeuger decken ohne weitere Einschränkungen denselben Bedarf und die Aufteilung des Einsatzes erfolgt eigenständig durch die Optimierung anhand der hinterlegten Kosten- und Betriebsparameter, oder
- b) der Bedarf wird vorab in einen Niedertemperatur- und einen Hochtemperaturanteil aufgeteilt, sodass bspw.
 - die Wärmepumpe den Niedertemperaturanteil (z. B. Raumwärme) und der Kessel den Hochtemperaturanteil (z. B. Trinkwarmwasser) deckt,
 - die Wärmepumpe die Grundlast und der Kessel die Spitzenlast deckt, oder
 - die Wärmepumpe den Wärmebedarf bis zu einer bestimmten (Grenz-)temperatur deckt und der Kessel den übrigen Bedarf oberhalb dieser Temperatur.

1. Möglichkeit: Erzeugeraufteilung durch Optimierungsrechnung

Für diese Möglichkeit der parallelen Kaskadierung von zwei oder mehr Erzeugern werden diese über die Benutzeroberfläche einfach der Erzeugerstruktur hinzugefügt, wie Abbildung 4 im Ergebnis für einen Kessel und eine Luftwärmepumpe zeigt.

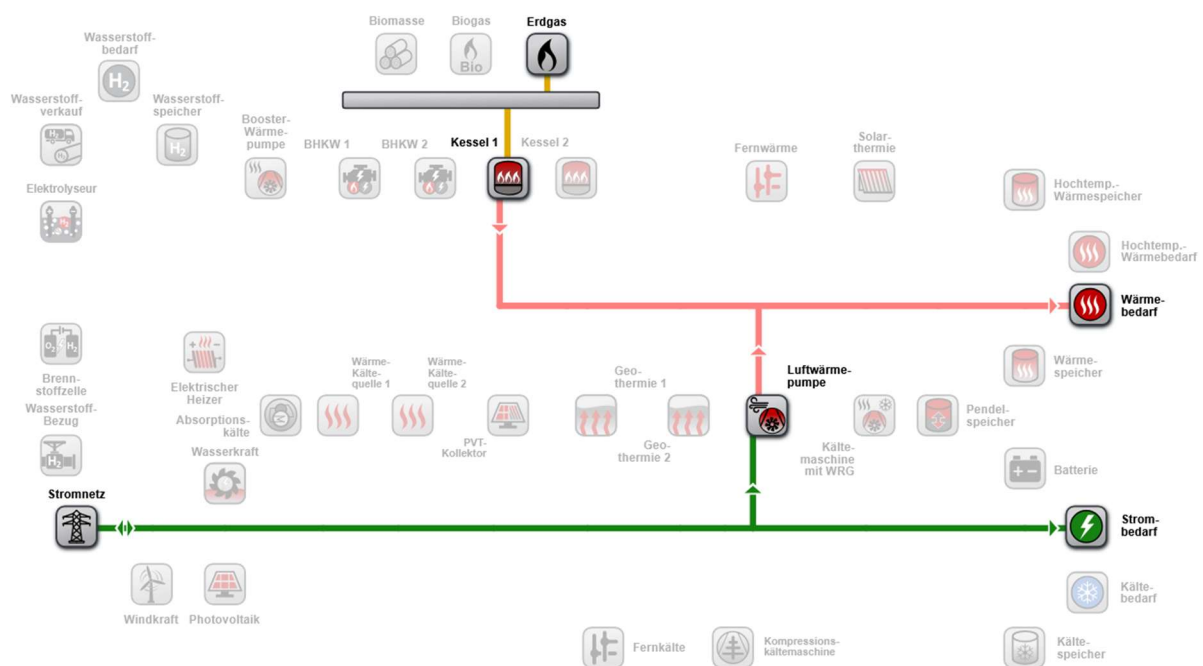


Abbildung 4: Parallele Kaskadierung von Luftwärmepumpe und Kessel. Welcher Erzeuger welchen Bedarf deckt wird durch die Optimierung nach kostenoptimalen Kriterien entschieden.

Die Zuordnung der zeitlich aufgelösten Lastdeckung der einzelnen Erzeuger erfolgt dann durch die Optimierungsrechnung nach (in der Regel) kostenoptimalen Kriterien. Diese Art der parallelen Kaskadierung ist der Standardfall.

2. Möglichkeit: Bedarfsdeckung durch Aufteilung und Zuordnung zu Nieder- und Hochtemperatur-Wärmebedarf

Für diese Art der parallelen Kaskadierung muss der Wärmebedarf in einen Nieder- und Hochtemperaturbedarf aufgeteilt und die Erzeuger den entsprechenden Bedarfen zugeordnet werden.

Die Aufspaltung in Nieder- und Hochtemperaturbedarf erfolgt je nach Projekttyp unterschiedlich:

- **Quartiersprojekt:** Der in der Quartiersberechnung ermittelte Wärmebedarf kann im Energiezentralen-Modul direkt über ein Temperaturband (konstant oder per Zeitreihe) in einen Nieder- und Hochtemperaturbereich aufgeteilt werden, siehe hierzu Abbildung 5. Wenn beispielsweise die Luftwärmepumpe den Rücklauf bis zu 65 °C anheben soll und der Rest über einen Kessel erfolgen soll, wird als Grenztemperatur 65 °C gewählt.

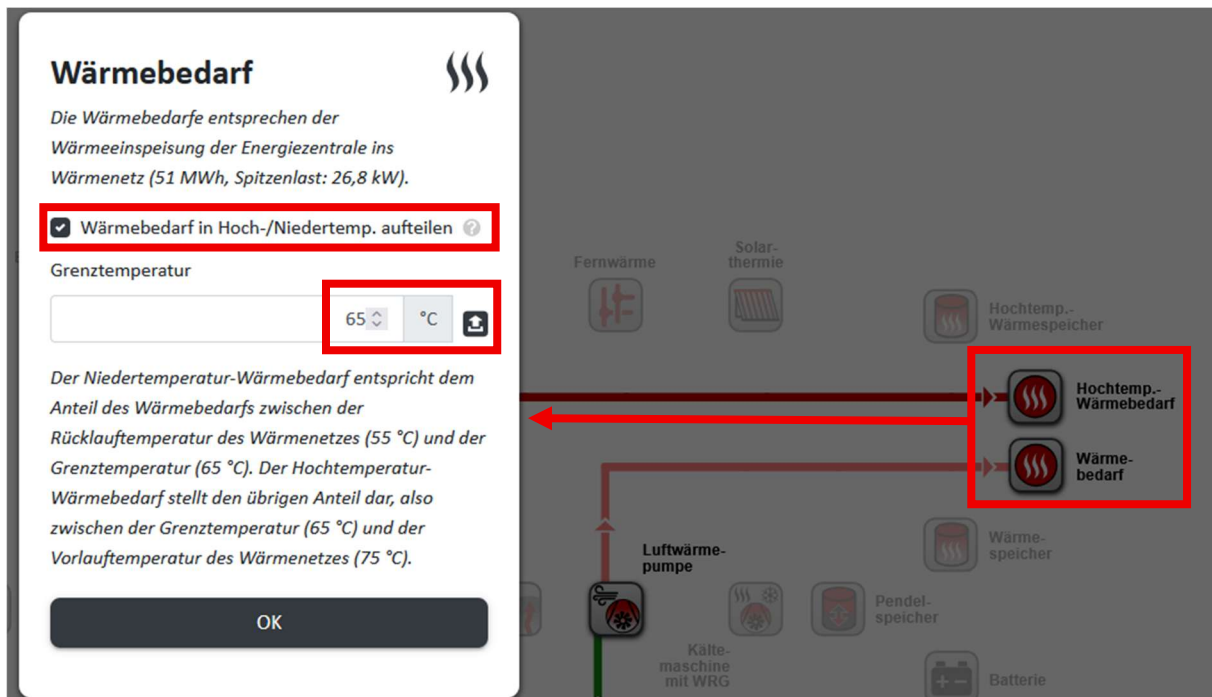


Abbildung 5: Aufteilung des Wärmebedarfs in einen Nieder- und Hochtemperaturanteil für das Quartiers-Projekt durch Eingabe einer Grenztemperatur.

- **Einzelgebäude-Projekt:** Der in der Lastprofil-Berechnung ermittelte Wärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser kann im Energiezentralen-Modul dem jeweiligen Bedarf direkt zugeordnet werden. In Abbildung 6 ist beispielsweise gezeigt, dass dem (Niedertemperatur-)Wärmebedarf Raumwärme- und Trinkwarmwasserbedarf zugeordnet sind. Durch Abwahl eines dieser Bedarfe wird dieser automatisch dem Hochtemperatur-Wärmebedarf zugeordnet.

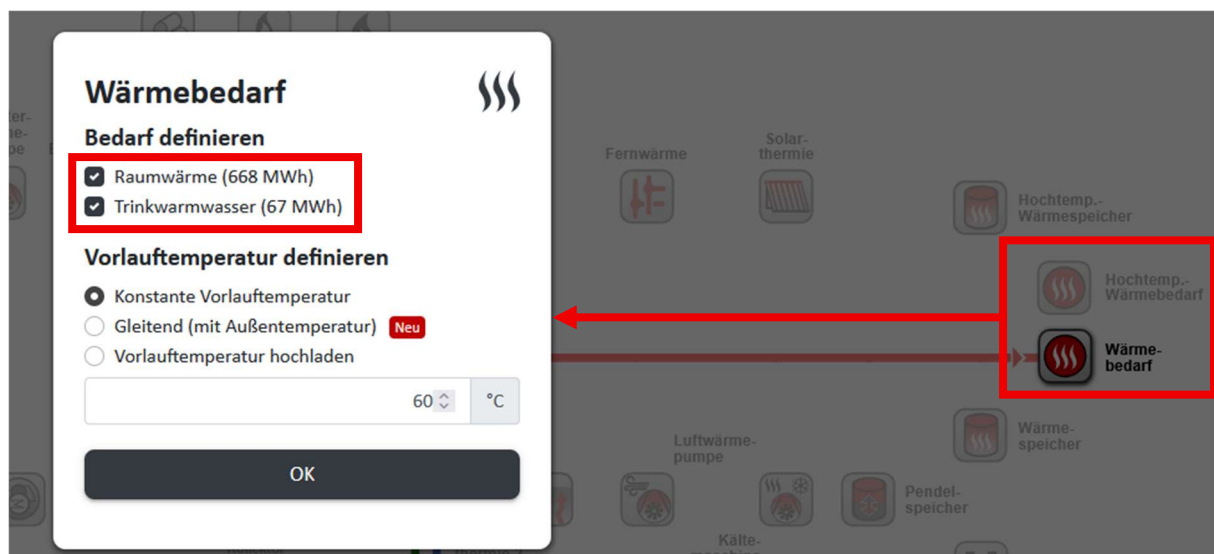


Abbildung 6: Aufteilung des Wärmebedarfs in einen Nieder- und Hochtemperaturanteil für das Einzelgebäude-Projekt durch aktive Auswahl der entsprechenden Wärmebedarfe.

- **Energiezentralen-Projekt:** Bedarfsprofile müssen hier direkt hochgeladen werden und können entsprechend separat für Nieder- und Hochtemperatur-Wärmebedarf angepasst werden, wie in Abbildung 7 zu sehen.

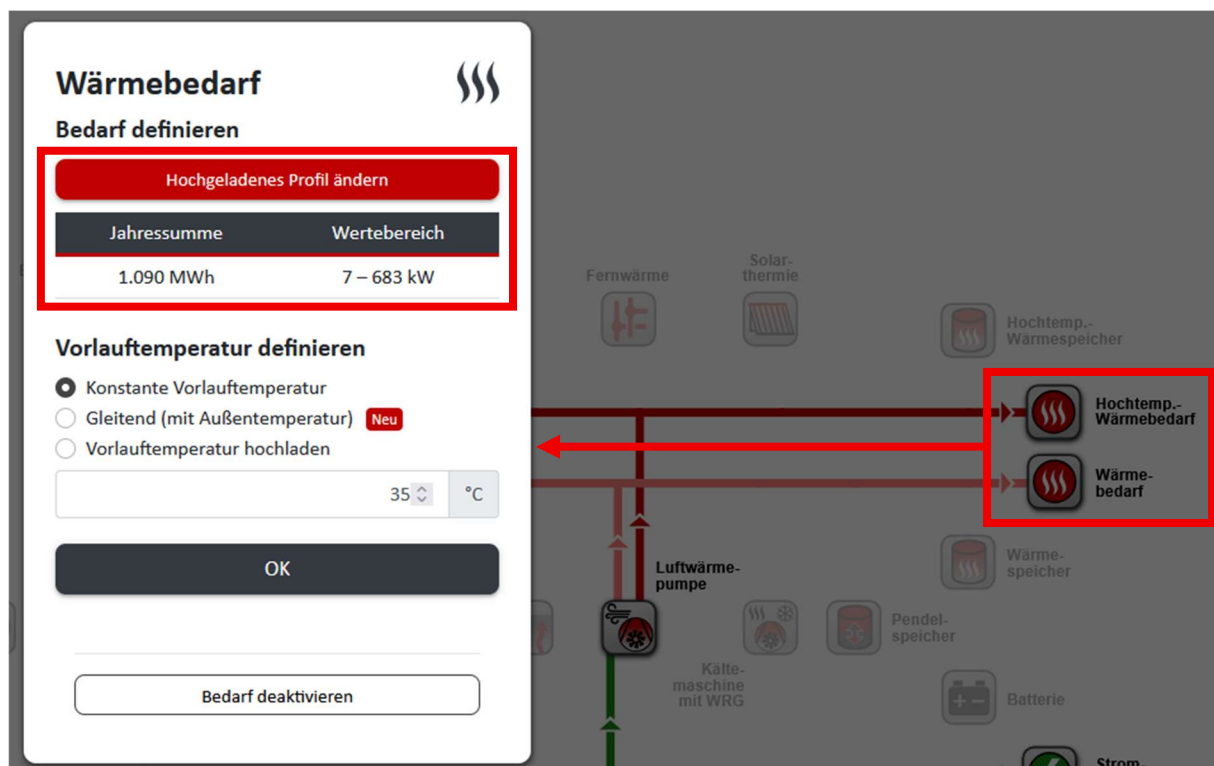


Abbildung 7: Definition von Nieder- und Hochtemperatur-Wärmebedarfe durch aktives Ändern der entsprechenden Profile in der Benutzeroberfläche.

Nachdem die Nieder- und Hochtemperaturbedarfe definiert wurden, müssen diese den Erzeugern zugewiesen werden. Abbildung 8 zeigt beispielsweise, wie der Kessel dem Hochtemperatur-Wärmebedarf zugeordnet wird. Abbildung 9 zeigt das finale Schaltbild in nPro.

Erdgas-Kessel 1

Kessel erzeugen Wärme und können Erdgas, Biogas oder Biomasse als Brennstoff nutzen.

Nennleistung

☐ Optimierungsbereich vorgeben

Die Nennleistung wird durch die Optimierungsrechnung ermittelt.

Technische Parameter

Thermischer Wirkungsgrad ?

Betriebsbeschränkungen

Betriebsbeschränkungen definieren

Keine Betriebsbeschränkungen aktiv.

Betriebsmodus

☒ Erzeugt Hochtemp.-Wärme ?

☐ Erzeugt Niedertemp.-Wärme ?

Brennstoff

OK

Abbildung 8: Eingabemaske des Kessel-Moduls, wobei dieser nur Hochtemperatur-Wärme erzeugt.

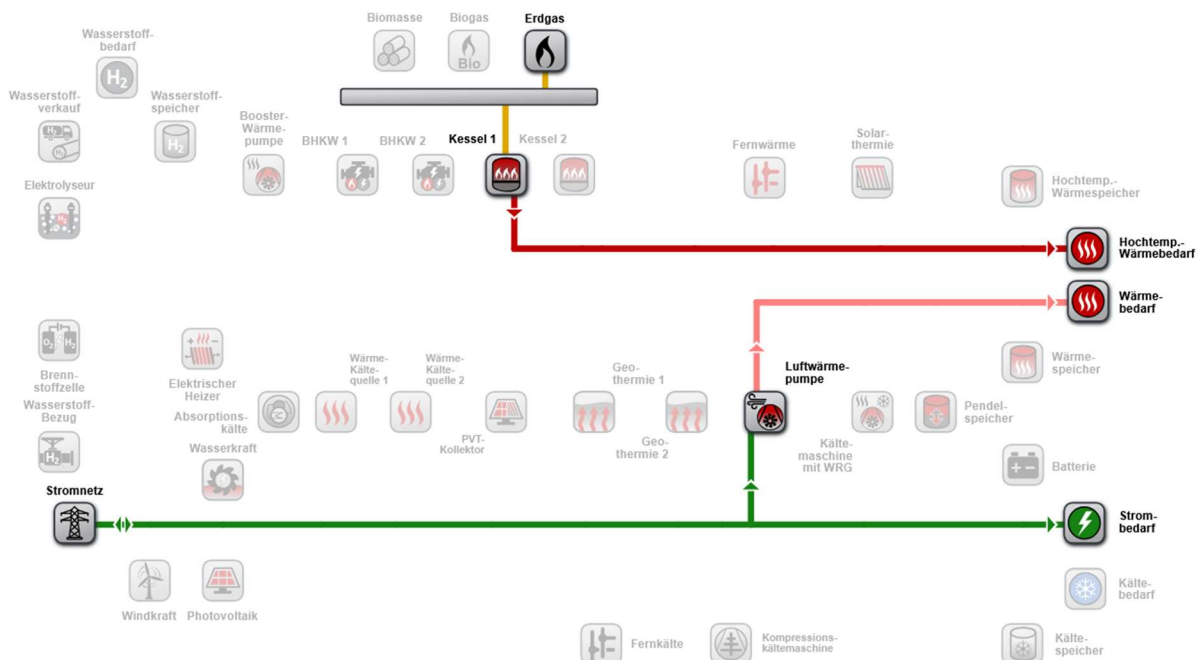


Abbildung 9: Parallele Kaskadierung von Luftwärmepumpe und Kessel. Die Zuordnung der Erzeuger zu den jeweiligen Bedarfen erfolgt aktiv.

Durch die Optimierung werden Kessel und Luftwärmepumpe so dimensioniert, dass diese die jeweiligen Bedarfe decken können. Eine Hinzunahme weiterer Erzeuger pro Wärmebedarf ist möglich.