

MODELLBASIERTE OPTIMIERUNG VON KÄLTEVERSORUNGSSYSTEMEN

Jörg BENTZ¹, Christian SCHWEIGLER¹

Einleitung

In Kälteversorgungssystemen werden mehrere Geräte im Verbund eingesetzt. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von Freiheitsgraden hinsichtlich der Betriebsweise der einzelnen Aggregate. Ein typischer Anwendungsfall findet sich z.B. beim Betrieb von Kältemaschinen in Verbindung mit Rückkühlwerken. Für die Betriebsoptimierung dieser Systeme können je nach Komplexität und Art der Zielstellung unterschiedliche Optimierungsprozeduren angewendet werden. Dabei ist die Betriebscharakteristik aller Aggregate in ausreichender Güte modellhaft abzubilden. Insgesamt besteht somit ein erheblicher Aufwand für den Aufbau und die Anwendung einer mathematischen Betriebsoptimierung komplexer Kälteversorgungssysteme. Im Rahmen dieser Untersuchung wird eine Methode aufgezeigt, die Anwendung von Optimierungsverfahren auch für kleinere Kälteversorgungssysteme verfügbar zu machen.

Methodik und Vorgehensweise

Es werden Simulationsmodelle mit unterschiedlicher Modellgenauigkeit für die verschiedenen Systemkomponenten von Kältesystemen entwickelt. Dabei können eine exakte physikalische Beschreibung oder unterschiedliche vereinfachte empirische Ansätze verwendet werden. Durch Anwendung der Komponentenmodelle in Verbindung mit geeigneten Optimierungsalgorithmen soll ermittelt werden, welche Modellgenauigkeit erforderlich ist, um eine verlässliche Aussage über die optimalen Betriebseinstellungen des Kältesystems mit möglichst geringem rechnerischem Aufwand treffen zu können. Um die Untersuchung möglichst vergleichbar und allgemeingültig zu halten, ist die Auswahl eines geeigneten Referenzsystems erforderlich. Das Festlegen der Rahmenbedingungen wie die geforderte Kälteleistung, die Topologie der Anlage oder die eingesetzten Technologien und Komponenten sind dafür der erste Schritt. Um eine für die Praxis relevante Situation darzustellen, sind Faktoren wie das Verhältnis zwischen den Investitionskosten und den Betriebs- und Unterhaltskosten, die Häufigkeit der Anwendung in der Praxis sowie die Verwendung von aktuellen Technologien wie frequenzgeregelter Antriebe ausschlaggebend. Unter Einbezug dieser Faktoren fällt die Wahl auf ein Referenzsystem aus dem Klimabereich, welches mit 290 kW Kälteleistung genügend Optimierungspotential bietet und den Einsatz der gängigsten Verdichtertechnologien, einschließlich der Anwendung drehzahl geregelter Antriebe zulässt. Den detaillierten Aufbau des gewählten Referenzsystems zeigt Abbildung 1.

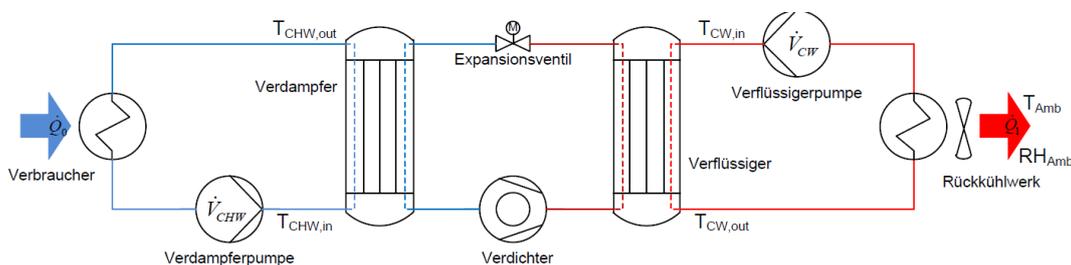


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Referenzsystems

Bei der Abbildung der Systemcharakteristik bzw. der Modellierung des Systems soll das angewandte Modellierungsverfahren so einfach wie möglich gehalten werden, da jede Erhöhung des Detaillierungsgrades des Modells mit einem höheren Aufwand bei der Erstellung und Parametrisierung mit sich bringt und eine höhere Rechenkapazität bei der Anwendung erfordert. Daher ist ein Hauptgegenstand der Untersuchung, die Klärung bis zu welchem Grad eine Erhöhung der Modellkomplexität sinnvoll ist.

¹ Hochschule München, Bereich Versorgungs- und Gebäudetechnik / Competence Center Energieeffiziente Gebäude und Quartiere, Lothstraße 34, 80335 München, Tel.: +49 89 1265-4384, joerg.bentz@hm.edu

Auf der Suche nach geeigneten Modellierungsverfahren für die Kompressionskältemaschine wurden zwei relevante grundsätzlich unterschiedliche Modellansätze untersucht. Einem detaillierten semi-empirischen physikalischen Modell steht ein stark vereinfachtes und generalisiertes Modell gegenüber. Im semi-empirischen physikalischen Modell werden die wichtigsten Komponenten, wie der Verdichter oder das Rückkühlwerk, auf der Basis von empirisch erhobenen Daten modelliert, dargestellt durch mehrdimensionale Polynomfunktionen. Diese werden in ein reduziertes Anlagenmodell eingearbeitet, das die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge beinhaltet. Dadurch wird eine vergleichsweise hohe Genauigkeit des Modells mit begrenztem Modellierungsaufwand erzielt. Das stark vereinfachte Modell hingegen besteht nur aus grundlegenden Zusammenhängen, welche die Charakteristik der Systemkomponenten mit vereinfachten Gleichungen abbilden. Die Randbedingungen für den Betrieb des Kältesystems bestehen in der geforderten Kälteleistung, der aktuellen Außentemperatur und der Solltemperatur der Kältelieferung über den Kaltwasserkreis. Als Freiheitsgrade für die Optimierung des Anlagenbetriebs können die Kühlwassertemperatur und die Volumenströme der Wasserkreise über die Antriebe des Kühlturmventilators und der Umwälzpumpen beeinflusst werden. In Verbindung damit ergibt sich eine Variation des Leistungsbedarfs für den Verdichter des Kältekreislaufs. Für die Anwendung innerhalb eines quadratischen Optimierungs-Algorithmus muss die durch die verschiedenen Modelle dargestellte Betriebscharakteristik der Kältemaschine jeweils in mehrdimensionale Polynomfunktionen zweiten Grades überführt werden. Dies erfolgt mit Hilfe eines Regressionsverfahrens.

Vergleich der Modelle

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der Aussagen unterschiedlicher Modelle für die Kältemaschine bezüglich der Kälteleistungszahl (EER-Werte) bei einer Variation der Kühlwasseraustrittstemperatur. Als Referenz dienen die Betriebsdaten eines Auslegungsprogrammes, welche einen realen Anlagenbetrieb abbilden. Sowohl die Modelle als auch das aus dem Semi-Empirischen Modell erstellte Polynom 2. Grades stimmen sehr gut überein. Nur im Bereich sehr niedriger Kühlwassertemperaturen ergibt sich eine auf Sicherheitsfaktoren im Auslegungsprogramm zurückzuführende Abweichung. Abbildung 3 zeigt die relative Abweichung zum Auslegungsprogramm. Die größere Abweichung des Polynoms 2. Grades im Vergleich zu den beiden anderen Modellen lässt sich durch die Ungenauigkeit der Regression begründen. Jedoch wurde bei dieser Untersuchung eine maximale Abweichung von lediglich 7 % identifiziert. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass auch ein in seiner Komplexität enorm verringertes Modell zu ausreichend genauen Simulationsergebnissen führen kann.

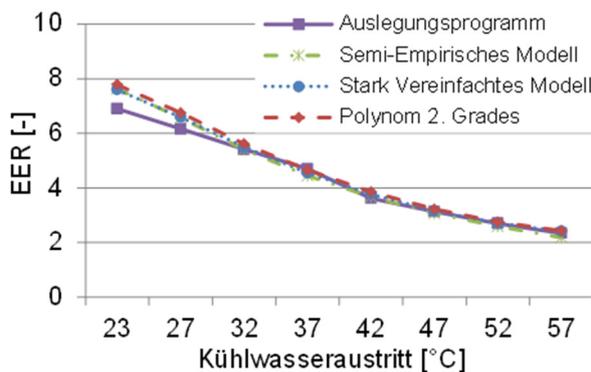


Abbildung 2: EER-Verlauf KM, 290kW/6°C

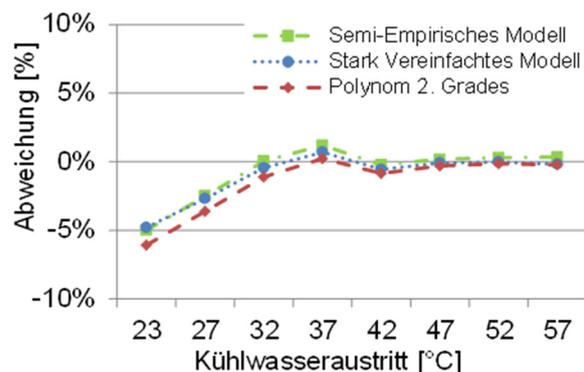


Abbildung 3: Abweichungen zu Auslegungsprogramm

Ausblick

Aufgrund einer hohen Variantenvielfalt der Kälteversorgungssysteme wird ein modularer Aufbau der Modelle entwickelt. Hier soll es möglich sein, ein individuelles Systemmodell mit wenig Aufwand zu erstellen und geeignete gemischt-ganzzahlige Optimierungsalgorithmen anzuwenden.