

Modellierung einer thermoölbetriebenen Absorptionskältemaschine zur Simulation eines anwendungsnahen Prozesskälte- und Heizkreises

Überblick

In dieser Arbeit wurde der Einsatz einer mit thermoölbetriebenen Absorptionskältemaschine (AKM) zur Kältebereitstellung und Heizunterstützung in einem industriellen Gießereibetrieb untersucht. Der direkte Betrieb der AKM mit Thermoöl erfordert eine spezifische Auslegung, die im Zuge dieser Arbeit genauer betrachtet und modelliert wurde. Die Simulation und Integration der AKM in einen Kältekreisverbund mit Kaltwasserspeicher wurde in MATLAB Simulink abgebildet und mit Hilfe einer dynamischen Simulation monatsweise Betrachtet.

Messdatenanalyse

Im ersten Schritt wurden die Messdaten zur Kälte- und Abwärmeleistung des Gießereibetriebs genauer untersucht. Diese Voruntersuchung hat gezeigt, dass es mit Hilfe einer 40 kW starken Absorptionskältemaschine und einem zusätzlichen Kaltwasserspeicher möglich sein sollte, den ganzjährige Kältebedarf zu etwa 95% zu decken. Als Wärmequelle für den Antrieb der AKM dient die Abwärme des Kupolofens. Aus der prozessinternen Abgaskühlung steht hier Thermoöl mit einer Temperatur von 230°C zur Verfügung.

Modellierung

Auf Grundlage dieser Ausgangsparameter wurde die spezifische Modellierung der AKM für den direkten Betrieb mit Thermoöl am Generator durchgeführt. Die hydrodynamischen und thermischen Eigenschaften des Thermoöls, als Wärmeträgerfluid im Generator, weisen dabei klare Betriebsgrenzen für das AKM-Modell auf. So sollte für die getroffene Auslegung die Rücklauftemperatur am Generator nicht unter 120°C fallen, da sonst die Bedingungen zur turbulenten Durchströmung des Wärmetauschers nicht mehr gewährleistet sind. Um die Gefahr von korrosiven Schäden zu vermeiden, sollte die

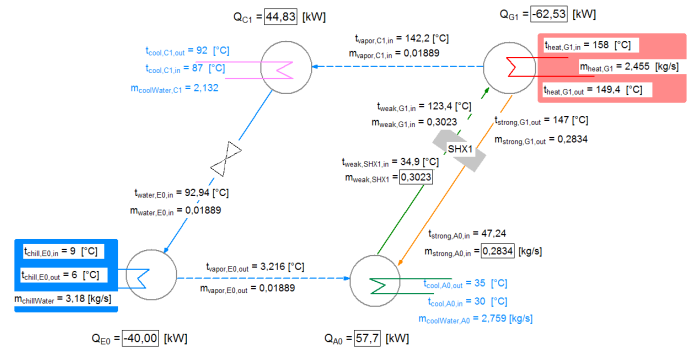


Abb. 2: Aufbau des AKM-Modells in EES, Betriebszustand $Q_{E0} = 40 \text{ kW}$, $T_{E0} = 10/6^\circ\text{C}$, $T_{C1} = 87/92^\circ\text{C}$ $T_{A0} = 30/35$

maximale Vorlauftemperatur 160°C nicht überschreiten. Das spezifische Modell (siehe Abb. 2) der AKM ermöglicht durch die hohen Generatortemperaturen die Auskopplung von Wärme im Temperaturbereich von $80 - 90^\circ\text{C}$ am Kondensator, die zur zusätzlichen Versorgung der Heizzentrale genutzt werden kann.

Simulation

Die Auslegung der AKM wurde schließlich mit Hilfe von Betriebskennfeldern abgebildet und in die Simulationssoftware MATLAB Simulink überführt. Zur dynamischen Simulation der AKM und des damit verbundenen Heiz- / Kühlkreises wurde ein Simulationsmodell in Simulink erstellt. Zur Simulation wurden reale Messdaten des Gießereibetriebs aus den Jahren 2015/2016 eingepflegt. Die Simulation des Kältekreises umfasst neben der AKM einen Kaltwasserspeicher (5m^3) und die bestehende KKM als Back-up-System. Da die Abwärme des Gießereiprozesses diskontinuierlich anfällt, zukünftig aber die Dauer der Nutzung mit Hilfe eines Prozesswärmespeichers verlängert wird, wurde der Betrieb der AKM in drei verschiedenen Betriebszenarien abgebildet und simuliert.

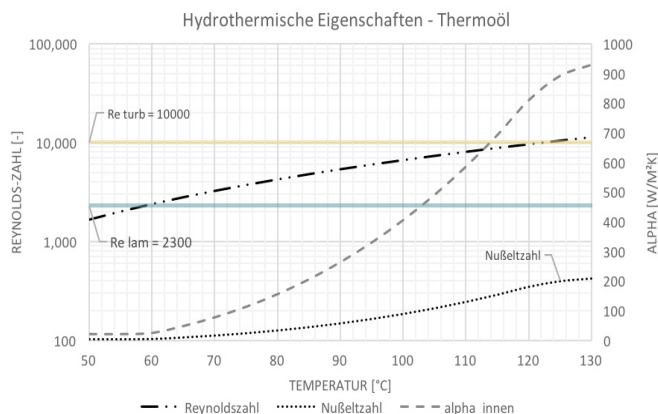


Abb. 1: Hydrodynamische Eigenschaften von Thermoöl für $\dot{m} = 0,614 \text{ kg/s}$ und $d_i = 28 \text{ mm}$

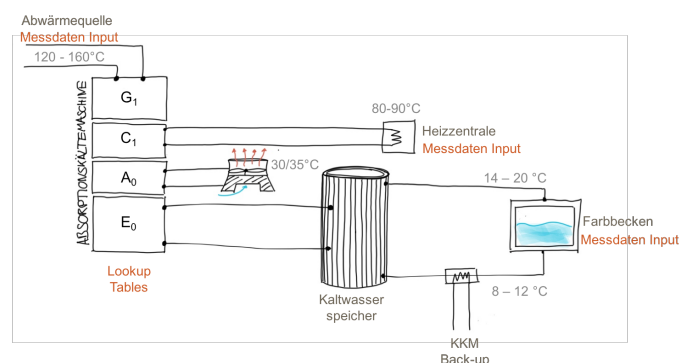


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Gesamtsystems (Kühl- und Heizkreis)

Betriebszenarien

Zum Betrieb der AKM wurden insgesamt drei Szenarien untersucht und simuliert. Diese Betriebsstrategien werden mit Hilfe einer simulationsinternen Regelung gesteuert:

- 1) idealer Betrieb der AKM (dauerhafte Wärmequelle vorhanden)
- 2) Betrieb nur während Ofenlaufzeit
- 3) Betrieb während Ofenlaufzeit und zusätzlich 10h Wärmespeicherbetrieb

Kühlbetrieb

Szenario 1 bildet den Idealfall mit kontinuierlicher Wärmeversorgung der AKM ab, die jährliche Kältelast kann hierbei zu 99% der Betriebsdauer gedeckt werden. Szenario 2 zeigt den Betrieb nur während des Ofenbetriebs. Hierfür können über ein Jahr gesehen nur 25% der Kältelast abgedeckt werden. Durch die zusätzliche Implementierung eines Prozesswärmespeichers in Szenario 3 kann der Deckungsgrad nahezu verdoppelt werden, womit gut 46% der Kältelast über das AKM-System abgedeckt werden können. Abbildung 4 zeigt die monatlichen Deckungsgrade aus der Simulation der Kältebereitstellung durch das AKM-System. Die grauen Balken zeigen die Ergebnisse für das Szenario 1, blau für Szenario 2 und gelb für Szenario 3. Zusätzlich ist die prozentuale Ofenlaufzeit (lila) pro Monat aufgetragen.

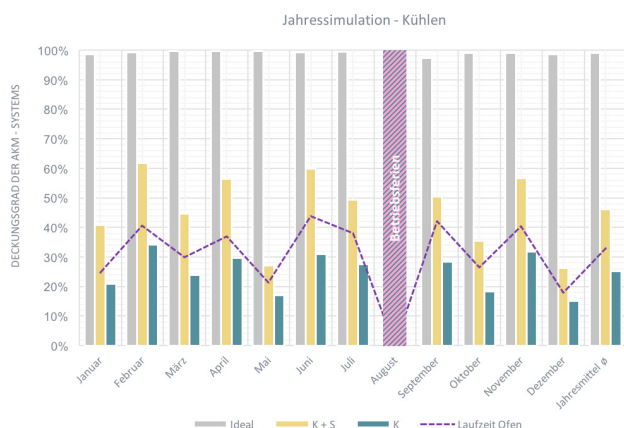


Abb. 4: Jahressimulation mit Monatsbilanz für alle drei Betriebszenarien zur Deckung der Kältelast und prozentuale Betriebsdauer des Kupolofens.

Heizunterstützung

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der beiden AKM-Betriebszenarien, idealer Betrieb der AKM und Betrieb der AKM im Ofen- und Speicherbetrieb (K + S), bzw. (Betriebszenario 1 & 3). Die Säulen zeigen die absolute Menge an Kondensatorwärme pro Monat auf. Dabei wird zusätzlich zwischen der Wärmemenge während der Ofenlaufzeit (helle Balken) und der Wärmemenge, bei ausgeschaltetem Kupolofen (dunkle Balken) unterschieden. Die Gesamtwärmemenge für den AKM-Betrieb entfällt auf die gestapelte Menge aus hellen und dunklen Balken. Zusätzlich sind exemplarisch mögliche Deckungsgrade zur Heizunterstützung abgebildet.

Dabei wurden für eine maximal mögliche Nutzung der Wärmegewinne „max. Deckung (ideal)“ berechnet. Dieser liegt mit bis zu 23% weit über den realen Bedingungen, hierfür kann der Deckungsgrad „real Deckung (K+S)“ herangezogen werden. Dieser Deckungsgrad bildet die real nutzbaren Wärmegewinne am besten ab, er entspricht im Jahresmittel etwa 2% mit einer maximalen Deckung von bis zu 5% im Sommer.

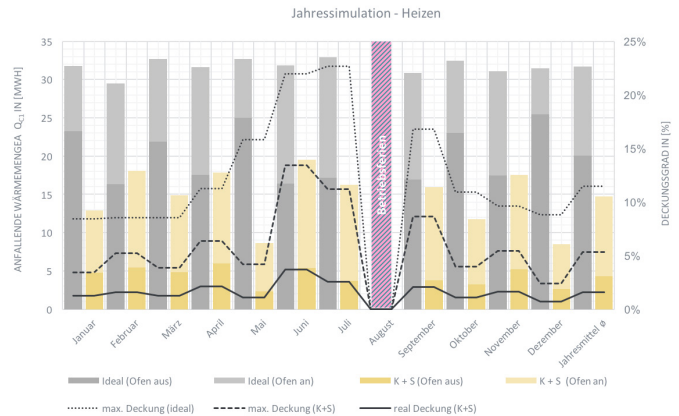


Abb. 5) Jahressimulation und Monatsbilanz der anfallenden Wärme am Kondensator (Q_{ct}) für die Betriebszenarien (1) und (3) & monatliche Deckungsgrade des Wärmebedarfs der Heizzentrale

Ausblick

Die Auswertung der drei Betriebszenarien zeigt, dass im Idealfall eine nahezu vollständige Deckung durch den AKM-Betrieb möglich wäre. Da jedoch die Ofenlaufzeit häufig deutlich unter dem geplanten Regelbetrieb liegt, reichen die Laufzeiten auch mit Speicher nicht aus um einen kontinuierlichen Betrieb der AKM zu gewährleisten. Dennoch lassen sich durch das Szenario 3 bereits rund 30 Tonnen CO_2 pro Jahr einsparen. Dieses Einsparpotential ließe sich noch durch eine kontinuierliche Wärmeversorgung des Generators (idealer Betrieb) z.B. mit Hilfe einer zusätzliche Wärmequelle deutlich steigern. Hierfür müsste die Sinnhaftigkeit einer zusätzlichen Versorgung der AKM mit Wärme z.B. aus der Gasbefuerung untersucht werden. Das derzeitige Simulationsmodell verfügt über eine vereinfachte Abbildung und Regelung des Wärmespeicherkonzepts mit der Regelung von einer 8 stündigen Beladung und 10 h Wärmeversorgung, dabei kann keine Teilladung des Wärmespeichers betrachtet werden. Um auch die Beladung des Wärmespeichers für kürzere Ofenlaufzeiten (< 8 h) zu berücksichtigen, müsste die Einbindung eines detaillierteren Wärmespeichermodells durchgeführt werden. Mit einem solchen Modell könnten dann auch die spezifische Speichercharakteristik, sowie Belade- und Entladezyklen real abbildet werden. Diese detailliertere Betrachtung würde erweiterte Laufzeiten der AKM, durch einen teilbeladenen Wärmespeicher abbilden können. Dadurch wäre es möglich die jährliche Deckung der Kälteleistung und Heizwärmeunterstützung der AKM noch zu erhöhen.