

# Modellierung und Simulation von Adsorptionskältemaschinen

J. Becker, L. Böse, F. Opferkuch\*

## Ziele der Arbeit

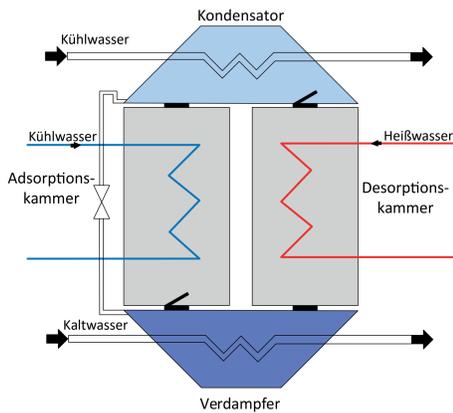


Abb. 1: Prinzipskizze einer Adsorptionskältemaschine

Die Bereitstellung von Kälte erfolgt überwiegend mit Kompressionskältemaschinen. Insgesamt besitzen derartige Anlagen bei der Kälteerzeugung einen sehr hohen elektrischen Energiebedarf. Kälte im Gebäudebereich wird meistens dann benötigt, wenn hohe Außentemperaturen und/oder eine hohe Außenluftfeuchte vorliegt. An diesen Tagen besteht oftmals ein Überangebot von Wärme, da die Wärme aus abwärmeintensiven Prozessen nicht zu Heizzwecken verwendet wird. Ein Beispiel hierfür sind Blockheizkraftwerke, die auch an warmen Sommertagen zur Stromerzeugung in Betrieb sind. Adsorptionskälteanlagen bieten eine Möglichkeit, die Abwärme zur Kältebereitstellung unter niedrigen elektrischen Energiebedarf zu verwenden. Die geringe Zahl an Referenzanlagen ist ein Indikator für den Forschungsbedarf im Bereich dieser Technologie.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Prozess der Kaltwasserbereitstellung in der Adsorptionskältemaschine, durch ein Modell thermodynamisch und physikalisch zu beschreiben und anschließend in der Programmiersprache Modelica dynamisch zu simulieren. Die für die Performance der Adsorptionskältemaschine entscheidenden Parameter wie Zyklusdauer, Desorptionstemperatur und Adsorbensmasse, werden identifiziert und die physikalische Plausibilität nachgewiesen.

## Modellierung des thermischen Verdichters

Die Adsorption eines Moleküls an einen Feststoff ist abhängig von Druck und Temperatur und läuft solange ab, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, in dem keine weiteren Moleküle mehr adsorbiert werden. Das Dubininmodell stellt einen bewährten Ansatz zur Beschreibung von Adsorptionsprozessen in mikroporösen Feststoffen dar. Die charakteristischen Stoffdaten von typischen Adsorbentien wie Silikagel SG123 und Zeolith 13X sind bekannt und werden im Modell des thermischen Verdichters hinterlegt.

Um das thermodynamische Verhalten der Anlage dynamisch berechnen zu können, wird ein Modell benötigt, das die Kinetik des Prozesses beschreibt. In den Mikroporen des Adsorbens finden viele verschiedene überlagerte Diffusionsmechanismen (Abb. 2) statt, deren Diffusionskoeffizienten nur schwer zu bestimmen sind. Daher wird der Linear Driving Force Ansatz verwendet, der die Änderung der Beladung nach der Zeit vereinfachend berechnet. Die anschließende Implementierung dieser Modellansätze in Modelica führt zu einem System gekoppelter Differentialgleichungen. Diese werden mit dem Programm Dymola gelöst und durch dynamische Simulationen werden Zustandsgrößen wie Druck und Temperatur zu jedem Zeitschritt berechnet und zur Lösung des Gesamtmodells an andere Komponenten übergeben.



Abb. 2: Granuliertes Silikagel -Kugelgröße 2-3mm- (links) und Teilschritte der Adsorption (rechts)

## Simulationsergebnisse

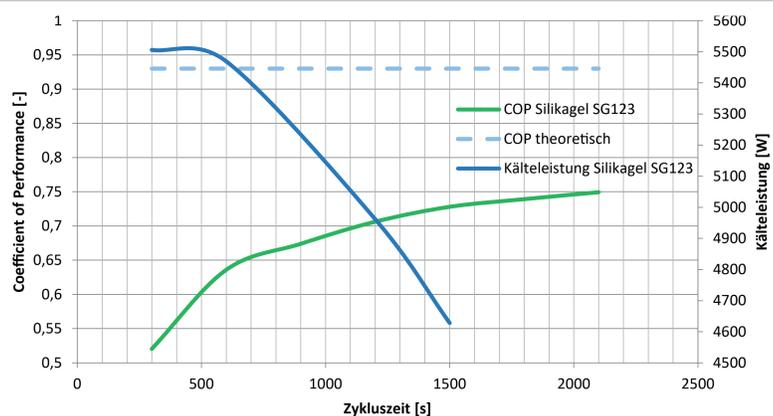


Abb. 3: Coefficient of Performance und simulierte Kälteleistung in Abhängigkeit der Zykluszeit

Der Coefficient of Performance (COP) der Adsorptionskältemaschine steigt mit einer längeren Zykluszeit an. Auch bei unendlicher Verweilzeit ist der COP durch ein theoretisches Maximum begrenzt. Im realen Prozess wirken die Kinetik des Adsorptionsprozesses und die Speicherung der zugeführten Wärme im Adsorbens und den Wärmeübertragern als limitierende Faktoren für die Effizienz der Anlage.

Die Kälteleistung ist wiederum bei kürzeren Zykluszeiten größer als bei längeren, da der pro Zyklus durchschnittlich verdampfte Massenstrom größer ist. Bei der Auslegung und Bestimmung der Zykluszeit einer Adsorptionskältemaschine, muss eine Abwägung zugunsten der beiden Performancekriterien erfolgen, damit die benötigte Kälteleistung möglichst effizient zur Verfügung gestellt werden kann.

## Nutzen und Anwendung

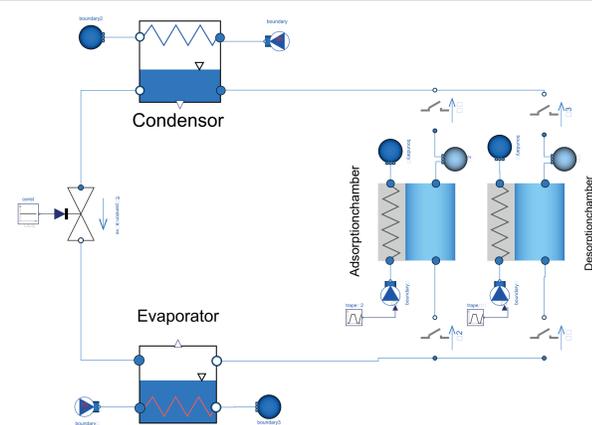


Abb. 4: Darstellung des Gesamtaufbaus in Dymola

Alle modellierten Komponenten wurden zu einem Gesamtmodell der Adsorptionskältemaschine zusammengefügt. Die Simulation liefert physikalisch plausible Ergebnisse. Durch die Verschaltung mit weiteren Teilmodellen aus der Gebäudetechnik, kann die Versorgung eines Gebäudes mit Wärme und Kälte komplett abgebildet werden. Diese sogenannten Systemsimulationen liefern Ergebnisse, die für die Auslegung und für die apparative Ausführung aufschlussreich sind.

### Anwendungsbeispiel:

Hallenbäder besitzen einen hohen Wärme- und Kältebedarf. Durch die geschickte Verschaltung eines Blockheizkraftwerks mit einer Adsorptionskältemaschine, kann die Aufheizung der Becken und die Entfeuchtung der Hallenluft effizient und ressourcenschonend erfolgen.

\*Prof. Dr.-Ing. Frank Opferkuch, Nuremberg Campus of Technology, frank.opferkuch@th-nuernberg.de