TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft, Professur für Verfahrenstechnik in Hydrosystemen

innovatION
Selektive Entfernung monovalenter Ionen aus salzhaltigen Wässern

Ausarbeitung eines Modells zur Strömungsmodellierung einer MCDI-Zelle zur Salzwasseraufbereitung

Masterarbeit von Franz, Manuel (August/2021)

Problemstellung & Zielsetzung

Im Forschungsprojekt innovatION werden selektive Membranen für einen spezifischen Rückhalt monovalenter Salze auf Basis der membrangestützten kapazitiven Dionisation (MCDI) entwickelt. Diese Membranen sollen in Labor- und Pilotanlagen getestet werden.

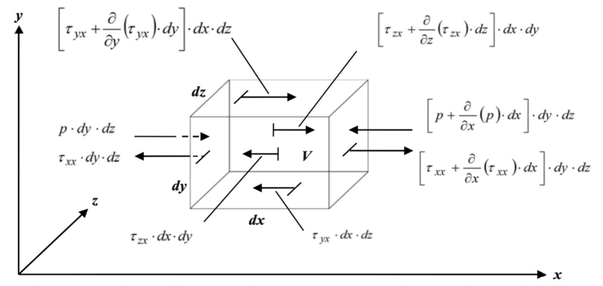
Die computergestützte Strömungsmodellierung (CFD) hat sich zu einem unverzichtbaren Analysewerkzeug der technisch-wissenschaftlichen Fachdisziplinen entwickelt. Deshalb sollte im Vorfeld des Laboranlagenbetriebs, durch die Entwicklung eines numerischen Strömungsmodells, die Durchströmung der MCDI-Testzelle simuliert werden.

Das Modell soll die Druckverluste für unterschiedliche Lastfälle, unter Berücksichtigung der eingebauten Spacer, berechnen. Des Weiteren sollten durch eine Variantenuntersuchung verschiedener Diffusorengeometrien die Druckverluste, bei gleichbleibenden Strömungsverhältnissen in der Zelle, reduziert werden. Die Erkenntnisse, die durch das CFD-Modell gewonnen werden, tragen zur Verbesserung der Energieeffizienz zukünftiger Anlagen bei.

Strömungstechnische Grundlagen

Die Grundlage der numerischen Modellierung von Fluidströmungen wird durch die fünf Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik repräsentiert. Masse- und Energieerhalt beschreiben mit entsprechenden Rand- und Anfangsbedingungen das sogenannte Strömungsproblem. Zur Abbildung des Einflusses des Temperarturfeldes auf das Geschwindigkeitsfeld ist die Berücksichtigung des Energiegehaltes notwendig. Die Herleitung dieser Gleichungen lässt sich an raumfesten Volumenelementen nachvollziehen.

- Masseerhalt $div\ \vec{v} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) = 0$
- Impulserhalt $\rho \cdot \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \cdot \Delta \mathrm{u} \qquad \rho \cdot \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \cdot \Delta \mathrm{v} \qquad \rho \cdot \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \cdot \Delta \mathrm{w}$
- Energieerhalt $\rho \cdot c_p \cdot \frac{D(T)}{Dt} = \lambda \cdot \Delta T + \rho \cdot v \cdot g_y + \Phi$

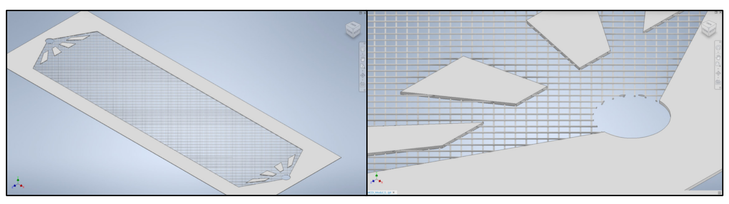


Bilanzierung der Kräfte in X-Richtung um ein raumfestes Volumenelement in einem kartesischen Koordinatensystem

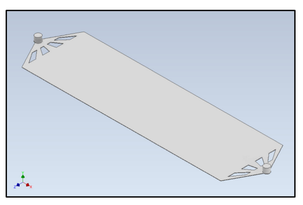
Zur Lösung der Erhaltungsgleichungen werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) verwendet und die Schließung der Turbulenz über das $k-\omega$ –Turbulenzmodell realisiert. Damit die zugrundeliegenden partiellen Differenzialgleichungen numerisch lösbar sind, muss das Untersuchungsgebiet räumlich diskretisiert werden, um ein lineares Gleichungssystem zu erhalten.

Aufbau des Strömungsmodells der MCDI-Testzelle

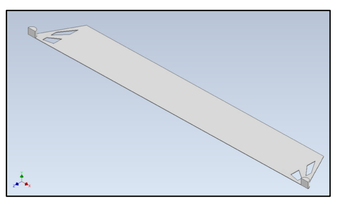
Die 3D-Geometrie wurde mit der Software Autodesk Inventor erzeugt und die Strömungssimulation mit Ansys Fluent durchgeführt. Um den Vernetzungsaufwand (Meshing) durch die feinen Spacerstrukturen in der Testzelle zu minimieren, wurden diese mit Hilfe der Ergun-Gleichungen durch ein poröses Medium ersetzt, wodurch auch die Symmetrie des Modells ausgenutzt werden konnte.


3D CAD-Geometrie der MCDI-Zelle mit Spacer (links) im Einlaufbereich (rechts)

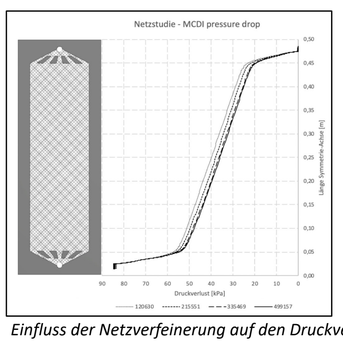
Simplifizierung
Ergun-Ansatz


negative CAD-Konstruktion der MCDI-Zelle

Ausnutzung der
Symmetrieebene

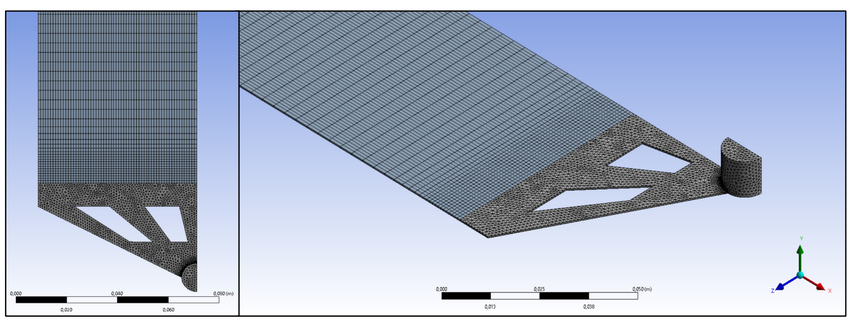

Schnitt entlang der Symmetrieachse

Die Auswertung der Netzqualitätsparameter von Ansys Meshing schlussfolgerte ein hybrides Netz mit unstrukturierten Gittern im Ein- und Auslaufbereich und einem blockstrukturierten Gitter im Mittelteil. Die Genauigkeit des hybriden Meshings wurde mit dem Rechenaufwand in einer Netzunabhängigkeitsstudie abgewogen.



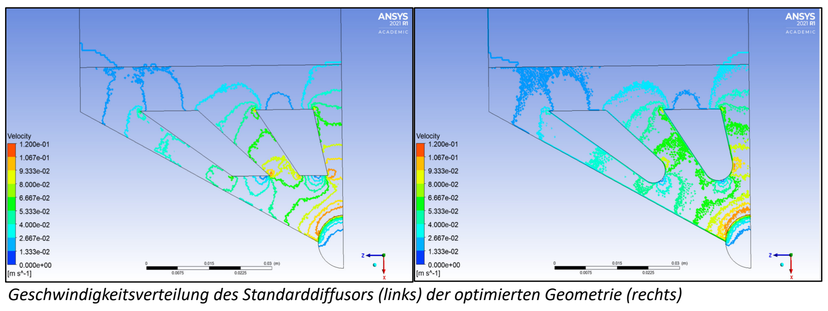
Einfluss der Netzverfeinerung auf den Druckverlust

Identifizierung des
finalen Netzes
(335469 Zellen)

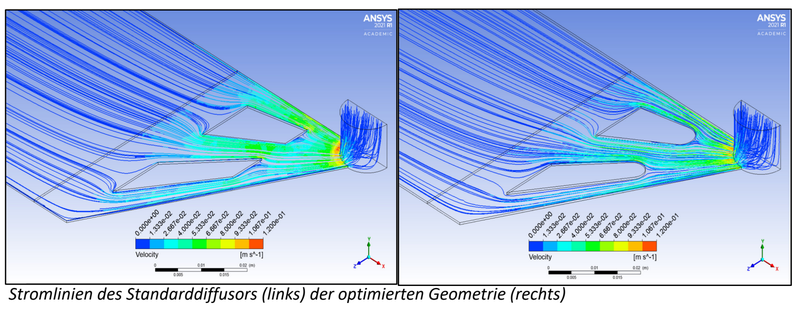

Hybrides Netz mit Hexaedern im Mittelteil und Tetraedern im Ein- und Auslaufbereich der MCDI-Zelle

Ergebnisse & Ausblick

Durch die grafische Auswertung der Ergebnisse konnte für die MCDI-Testzelle eine Durchfluss-Druckverlust Beziehung erstellt werden. In der Mehrzieloptimierung der Diffusorengeometrie konnte eine Effizienzsteigerung der Anlage erreicht werden. Mit der gewünschten gleichbleibenden Geschwindigkeitsverteilung (Isotachen) hinter den Diffusoren konnte durch die Geometrieoptimierung eine Druckverlustreduktion von 22,87% erzielt werden.



Geschwindigkeitsverteilung des Standarddiffusors (links) der optimierten Geometrie (rechts)



Stromlinien des Standarddiffusors (links) der optimierten Geometrie (rechts)

Die Minderung des Druckverlustes lässt sich auf die Eigenschaften der Stromlinien zurückführen. Bei gekrümmten Linien nimmt der Druck in zentripetaler Richtung zu. Die Stromlinien sind vor dem Standarddiffusor (*links*), wegen den frontal angeströmten Seiten, viel stärker gekrümmt als bei dem optimierten Diffusor (*rechts*). Die Reduktion des Druckverlustes der optimierten Geometrie lässt sich auf die Abnahme des zentripetalen Druckverlustes zurückführen.

Manuel Franz, 11.01.1991
- Abitur in Frankfurt am Main (2013)
- Bachelor of Science — Hydrowissenschaften (2018)
- Auslandsjahr — Yokohama 横浜国立大学 (2019/20)
- Master of Science — Wasserwirtschaft (2021)

Betreuer: M.Sc. David Schödel (Technische Universität Dresden)
M.Sc. Sibel Taş-Köhler (Technische Universität Dresden)

Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. André Lerch