3 Versuchsplangestaltung

Zielsetzung

Ziel der experimentellen Untersuchung ist es die Einflüsse von Parameter auf Zielgrößen zu ermitteln. In der vorliegenden Untersuchung sind die Übertragungswerte für den Wassermassenstrom und die Wärme die Zielgrößen.

Die Wahl der Parameter unterliegt verschiedenen Einschränkungen. Die Parameter müssen durch den Prüfstand stationär und wiederholbar einstellbar sein. Außerdem ist es zielführend, wenn die Parameter ein einfach nachvollziehbares Modell der Zielgrößen ermöglichen. Das bedeutet, dass die folgenden drei Vorrausetzungen erfüllt werden:

1. Ein nachvollziehbarer physikalischer Zusammenhang zwischen Zielgröße und Parameter besteht und
2. alle Faktoren als Parameter definiert sind, die während der Versuche einen wesentlichen Einfluss auf die Zielgrößen nehmen
3. die Parameter möglichst unabhängig voneinander sind.

Die absolute Feuchte und relative Feuchte der Außenluft als zwei verschieden Parameter zu wählen ist beispielsweise nicht Sinnvoll. Beide Faktoren überschneiden sich stark in ihrer Wirkung auf die Zielgröße, da sie stark voneinander Abhängig sind.

Wenn ein für die Zielgröße relevanter Faktor nicht als Parameter definiert wird, wird der Einfluss des Faktors anderen Parametern zugeschrieben und verfälscht so das Bild. Werden Beispielsweise in einer Versuchsreihe unterschiedlich dicke Membranen verwendet, ist die Membrandicke ein Faktor der als Parameter betrachtet werden muss.

In dieser Arbeit sollen die Einflüsse unterschiedlicher Betriebszustände auf das Übertragungsverhalten der Membran untersucht werden.

Die Membraneigenschaften stellen einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Übertragungswerte dar. Daher sind die Temperatur und der Wassergehalt der Membran naheliegende Parameter. Entsprechen lässt sich eine mittlere thermodynamische Temperatur und eine mittlere thermodynamische Feuchte definieren. Diese Werte sind für das Verständnis des Membranverhalten sehr anschaulich. Sie lassen sich jedoch nicht angemessen in einen Versuchsplan integrieren. Am Prüfstand lassen die nur die Werte in der Außenluft und der Abluft definieren. Eine Variation der mittleren thermodynamischen Temperatur oder der mittleren thermodynamischen Feuchte sind auch von den Zuständen in der Zuluft oder der Fortluft abhängig. Sie lassen sich entsprechend nur in einem aufwändigeren „Hardware in the Loop“ – Experiment untersuchen.

Die Außenlufttemperatur und -feuchte bieten sich alternative Parameter an. Sie sind gut regelbar, gut interpretierbar und stellen absolute Bezugsgrößen dar.

Als wichtiger Einflussfaktor in nun noch der Zustand in der Abluft vorhanden. Um die Abluftzustände in die Parameterwahl zu integrieren bieten sich zwei Größen an:

1. die absoluten Größen (Ablufttemperatur und Abluftfeuchte), analog zur Außenluft
2. die Differenzen zwischen Außenluftwerten und Abluftwerten

Im vorliegenden Fall ist die zweite Möglichkeit die beste Option die Abluftbedingungen darzustellen. Sie bietet die Möglichkeit abzuschätzen welchen Einfluss die Übertragenen Wärmemengen und Massenströme auf den Übertragungsfaktor haben. Außerdem stellen sie eine anschauliche Größe dar.

Die absoluten Bedingungen eignen sich um ein rein empirische Modelle zu erstellen. Um zwischen den Einflüssen der absoluten Temperaturhöhe und der übertragenen Wärmemenge zu differenzieren, sind sie ungeeignet.

Die vereinfachte Mittelgröße stellt eine ebenfalls eine Option dar, den Einfluss der Membrantemperatur abzubilden. Die Temperatur und Feuchteübertragung verhält sich jedoch aufgrund der Kreuzstromübertragung örtlich nicht linear. Somit ist die Genauigkeit und die Aussagekraft dieser Vereinfachung ist begrenzt. Auch mit dieser Größe wäre es nicht möglich den Einfluss der übertragenen Ströme zu differenzieren, da sich eine Temperaturdifferenz nicht mehr unabhängig von der Mitteltemperatur definieren ließe.

Die Feuchte-Parameter können entweder über die relative Feuchte oder die absolute Feuchte definiert werden. In der Literatur wird der Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und Konzentration in der Membranoberfläche über die relative Feuchte definiert. Wie in Kapitel… beschrieben, geschieht dies auf Grund physikalischer Grundlagen. Daher folgt auch die Richtung des Massenstroms dem Gradienten der relativen und nicht der absoluten Feuchte. Daher ist die relative Feuchte in diesem Fall die bessere Parmetergröße (sieht auch nächster Abschnitt, Richtung der Ströme).

Es ergeben sich entsprechend die Außenlufttemperatur T\_AUL, die Temperturdifferenz delta T = T\_ABL-T\_AUL, die Außenluftfeuchte PHI\_AUL und die Feuchtedifferenz delta\_PHI = PHI\_ABL-PHI\_AUL als Parameter für das Experiment.

Verteilung der Versuchspunkte

Für die Verteilung der Versuchspunkte ist zuerst der Versuchsraum festzulegen. Der Versuchsraum legt die Grenzen fest, in denen die Parameter variiert werden. Die Grenzen des Versuchsraumes werden in diesem Fall von den Möglichkeiten des Prüfstandes und physikalischen Eigenschaften einer Wasser-Luft-Lösung vorgegeben.

Prüfstandsseitig ergibt sich eine Grenze bei niedrigen Temperaturen und niedrigen relativen Feuchten. Diese ist stark von den Umgebungsbedingungen und den aktuell abrufbaren Leistungen der Fernkälte abhängig. Abbilung… zeigt eine gemessene Versuchsreihe. Anhand der Messung wurde der Mögliche Versuchsraum auf dieser Seite abgeschätzt.

Eine hohe Luftfeuchte in der Abluft bei geringen Temperaturen ist mit dem vorliegenden Prüfstand ebenfalls nicht realisierbar. Zum einen erhöht sich die Temperatur im Vergleich zur Außenlufttemperatur durch Wärmeübertragung aus der Umgebung. Dies geschieht unabhängig von der gewünschten Wärmeübertragung im Enthalpieübertrager. Zusätzlich wird Wärme durch den Verdampfer der AHU1 (der Gebäudesimulation) eingetragen. Der Wärmeübertrager, der zur Kühlung der AHU1 dient wird mit Fernkälte gekühlt. Das Kühlwasser hat am Eintritt in den Wärmeübertrager eine Temperatur von ca. acht bis neun Grad Celsius. Diese damit ist es nur möglich Temperaturen über 10 Grad Celsius zu kühlen. Dem Wärmübertrager ist ein Luftbefeuchter nachgeschaltet, der die Lufttemperatur weiter erhöht, wenn er Wasserdampf einbringt.

Eine weitere Grenze ergibt sich durch die Feuchtesensoren. Ab ca. 95 % relativer stellt sich eine längerfristige Ungenauigkeit in den Sensoren. Bereits ab 90 % sinkt die Genauigkeit der Sensoren deutlich. Weshalb für den Versuchsplan eine relative Luftfeuchtigkeit von 90 % als obere Grenze zielführend ist.

Eine Physikalische Grenze stellt die Sättiungskurve im Molierdiagramm dar. Ein Phasenwechsel des Wassers stellt ein diskretes Ereignis dar, welches nicht als Parameter erfasst ist. Somit verfälscht es erheblich die ermittelten Einflüsse der anderen Parameter und ist zu vermeiden. Dies geschieht, wenn die Temperatur in einem Luftstrom fällt. Bei Unterschiedlichen Außenluft und Ablufttemperaturen sink die Temperatur beim durchlaufen des Enthalpieübertragers in einem der Luftströme. Bei einer hohen relativen Feuchte dieses Luftstroms beim Eintritt in den Enthalpieübertrager kommt es zum auskondensieren des Wassers. Bei welchen Betriebsbedingungen die Sättigungskurve überschritten wird, ist ohne bekannte Übertragungswerte nicht bestimmbar. Der Versuchsplan ist Anhand der Höhe von Temperaturdifferenz und Feuchtedifferenz dahingehend abschätzt.

Aufgrund der Sättigungskurve sind vier mögliche Abläuft des Stoff- und Wärmetransports möglich. Im ersten Szenario tritt heiße, feuchte Luft in den Kanal 1 des Enthalpieübertragers und kalte trockene Luft in Kanal 22. Es folgen ein Wassermassenstrom und ein Wärmestrom von Kanal 1 in Kanal 2 auf Grund der Gradienten. In einem zweiten Szenario sind die Bedingungen zwischen Kanal 1 und 2 umgekehrt. Entsprechend laufen auch die Ströme in die entgegengesetzte Richtung.

In einem 3 Szenario entsteht ein Wassermassenstrom von Kanal 1 nach Kanal 2 und der Wärmestrom verläuft in die Gegenrichtung. Dies kann auftreten, wenn Kanal 1 einen feucht kalten Luftstrom führt und Kanal 2 einen warmen trockenen. Auch dieses Szenario kann in umgekehrte Richtung ablaufen.

Außerdem besteht die Möglichkeit, dass der Wassermassenstrom im Verlauf des Übertragers seine Richtung umkehrt. Bedingungen dafür sind eine geringere Feuchte und höhere Temperatur in einem Kanal. Außerdem ist Feuchtedifferenz zwischen Kanal 1 und 2 gering und die Temperaturdifferenz hoch. Daher fällt die Temperatur im vorher warmen Kanal stark ab. Die Feuchte kann in diesem Luftstrom auf Grund der fallenden Temperatur so stark abfallen, dass sich der Massenstrom umkehrt.

Im Versuchsplan soll nur eines der beschriebenen Szenarien untersucht werden. Ein Wechsel des Szenarios innerhalb eines Versuchsplanes würde ein diskretes Ereignis darstellen und müsste entsprechend als neuer Parameter eingeführt werden.

Innerhalb der vorgegebenen Grenzen ist der Versuchsraum möglichst groß zu wählen. Das heißt die Versuchspunkte liegen so weit auseinander wie möglich. Ein großer Versuchspunktabstand reduziert den Einfluss des Statistischen Rauschens. Als statistisches Rauschen werden Messungenauigkeiten und teilweise Einflüsse durch Störgrößen bezeichnet. Die Extrapolation eines empirischen Modells führt außerdem in hohem Maß zu Ungenauigkeiten. Daher erhöht ein großer Versuchsraum den Anwendungsrahmen des resultierenden Modells.

Viele Versuchspläne, die den DOE-Methoden unterliegen, verlangen eine besondere Orientierung im Raum und eine lassen sich nur bedingt an die Versuchspunkte anpassen. Solche Versuchspläne sind zum Beispiel Box Behnke, Faktorielle oder Zentral-Zusammengesetzte Versuchspläne. Dies wird in Abbilung … deutlich. Um die beispielsweise die Haupteffekte genau zu ermitteln, ist zumindest eine Anordnung der Versuchspunkte orthogonal zur Achse des Entsprechenden Parameters notwendig. Diese Versuchspläne decken bei den engen und unsymmetrischen Grenzen nur einen sehr engen Versuchsraum ab.

Eine Lösung dieses Problems bietet der D-Optimale Versuchsplan. D-Optimale Versuchspläne können flexibel angepasst werden und nachträglich erweitert werden. Somit stellen sie eine gute Lösung für das vorliegende Problem dar.

Zur Generierung eines D-Optimalen Versuchsplans wird die Determinante des Versuchsplans maximiert beziehungsweise das Minimum ihrer Inversen.

Zur Bewertung des Versuchsplanes werden drei Bewertungsgrößen genutzt. Diese Bewertungsgrößen sind die Bedingungsgröße, die D-Optimalität und die Hebelwirkung.

Die D-Optimalität

[nach dem Axiom von Karl Weierstraß gilt für eine lineare Abbildung von R^n nach R^n, dass das Volumen der abgebildeten Menge dem Volumen der abbildenden Teilmenge von R^n multipliziert mit dem Betrag der Determinante der abbildenden Matrix ]