

**Modellierung und Analyse der thermo-fluiddynamischen Vorgänge in Schaltschränken unter Berücksichtigung von Wärmestrahlung und Entropieproduktion**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte  
Abhandlung

Vorgelegt von

**Alexander Frank**

aus Waldachtal

Hauptberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. K. Spindler

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Laurien

Tag der mündlichen Prüfung: 21.02.2019

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)  
der Universität Stuttgart

2019

### **Kurzfassung**

Durch die fortschreitende Miniaturisierung der Elektronikkomponenten sind thermische Probleme eine Hauptursache für den Ausfall von Schaltschränken in der Fertigungstechnik. Um dieser Problematik zu begegnen, befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Modellierung und Simulation von thermo-fluiddynamischen Vorgängen in Schaltschränken.

Zu diesem Zweck wird die Open Source CFD-Bibliothek OpenFOAM angewendet und weiterentwickelt. Die turbulente Luftströmung im Schaltschrank wird mit dem SST-Modell modelliert, wobei zwei unterschiedliche Produktionsterme für Auftrieb untersucht werden. Neben Randbedingungen für die Klimatechnik werden Wandfunktionen für erzwungene Konvektionsströmungen implementiert. Zur Berechnung der Wärmestrahlung wird ein Sichtfaktormodell verwendet. Die hierfür erforderlichen Sichtfaktoren werden mit Hilfe eines neu-entwickelten Monte-Carlo-Verfahrens ermittelt. Um die Genauigkeit und die numerischen Eigenschaften der Sichtfaktormatrix zu verbessern, wird ein Glättungsverfahren implementiert.

Zur Validierung der Teilmodelle werden Testfälle aus der Literatur verwendet, wobei eine gute Übereinstimmung erzielt wird. Durch einen Vergleich mit Temperaturmessdaten, die an verschiedenen Positionen in einem Laborprüfstand erfasst werden, wird das Gesamtmodell verifiziert. Es wird dabei sowohl der Betrieb bei freier Kühlung als auch der Betrieb mit Klimatechnik untersucht. Die maximale Abweichung zwischen Messungen und Simulationen liegt im Bereich von 3.6 K. Es zeigt sich, dass beim untersuchten Schaltschrank bei freier Kühlung ca. 50 % des Wärmestroms von den elektronischen Bauteilen durch Strahlung übertragen wird.

Um den Schaltschrank-Betrieb energetisch zu optimieren, wird neben den Strömungsgrößen die lokale Entropieproduktion im Schaltschrank untersucht. Die Gleichungen für die lokale Entropieproduktion durch irreversible Wärmeleitung und Dissipation mechanischer Energie werden der Literatur entnommen und in OpenFOAM implementiert. Die Gleichungen für die Entropieproduktion durch Wärmestrahlung werden für das Sichtfaktormodell hergeleitet und ebenfalls implementiert. Anhand von Betriebssituationen mit und ohne Klimatechnik werden Optimierungspotentiale aufgezeigt und dadurch der praktische Nutzen der Methodik demonstriert. Es zeigt sich, dass die lokale Entropieproduktion einen tiefen Einblick in die Strömungs- und Wärmeübertragungsprozesse ermöglicht und dadurch wertvolle Informationen liefern kann.

**Abstract**

Due to the miniaturization progressing of the electronic components, thermal problems are a major cause for the failure of switch cabinets in manufacturing. Thus, the present work deals with the modeling and simulation of thermo-fluid dynamic processes in switch cabinets.

For this purpose, the open source CFD library OpenFOAM is applied and extended. The turbulent air flow in switch cabinets is modeled using the SST model, where two different production terms for buoyancy are investigated. Moreover, boundary conditions for air-conditioning components and wall functions for forced convection flows are implemented. Thermal radiation is calculated using a view factor model. The view factors required for this model are computed using a newly developed Monte Carlo method. In order to improve the accuracy and for numerical reasons, a smoothing algorithm is applied to the view factor matrix.

To validate the individual models, test cases from the literature are used, whereas a good agreement is achieved. The complete model is verified by comparison with temperature measurement data determined using a laboratory test rig. Both the operation with natural convection and the operation with an air-conditioning system are examined. The maximum deviation between measurements and simulations is in the range of 3.6 K. For the tested switch cabinet with natural convection, a ratio of about 50 % of the heat flow delivered by the electronic components is transferred by radiation.

In order to optimize the operation of the switch cabinet energetically, the local entropy generation is examined. The equations for local entropy production by irreversible heat conduction and dissipation of mechanical energy are taken from the literature and implemented in OpenFOAM. The equations for entropy production by thermal radiation are derived for the view factor model and are also implemented. On the basis of operating situations with and without air-conditioning components, optimization potentials are shown and thereby the practical use of the methodology is demonstrated. It has been shown that the local entropy production enables a deep insight into the flow and heat transfer processes and thereby providing valuable information.

**Inhaltsverzeichnis**

|  |     |
|--|-----|
| Kurzfassung.....   | I   |
| Abstract.....  | II  |
| Inhaltsverzeichnis.....  | III |
| Nomenklatur.....   | VI  |
| 1 Einleitung.....  | 1   |
| 1.1 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....                                   | 2   |
| 2 Modellierung der Luftströmung im Schaltschrank.....                        | 5   |
| 2.1 Turbulenzmodellierung (Reynolds Averaged Navier Stokes).....             | 8   |
| 2.1.1 SST- Turbulenzmodell.....  | 11  |
| 2.1.2 SST-Turbulenzmodell für Auftriebsströmungen.....                       | 12  |
| 2.2 Randbedingungen und Modellierung des wandnahen Strömungsbereichs.....    | 13  |
| 2.2.1 Temperatur-Randbedingungen für die Klimatechnik.....                   | 14  |
| 2.2.2 Temperatur-Randbedingungen für Wände des Schaltschranks.....           | 15  |
| 2.2.3 Temperatur-Randbedingungen für passive und aktive Bauteile.....        | 19  |
| 2.2.4 Modellierung des wandnahen Bereichs bei erzwungener Konvektion.....    | 21  |
| 2.2.5 Modellierung des wandnahen Bereichs bei freier Konvektion.....         | 27  |
| 2.3 Numerische Diskretisierungsverfahren.....                                | 27  |
| 2.4 Validierung der Strömungsmodelle.....                                    | 32  |
| 2.4.1 Freie Konvektion.....  | 32  |
| 2.4.2 Erzwungene Konvektion.....   | 35  |
| 3 Modellierung der Wärmestrahlung im Schaltschrank.....                      | 38  |
| 3.1 Das Sichtfaktormodell.....   | 40  |
| 3.2 Berechnung der Sichtfaktoren mit Hilfe eines Monte-Carlo-Verfahrens..... | 44  |
| 3.3 Glättungsverfahren für die Sichtfaktormatrix.....                        | 55  |
| 3.4 Verifikation der Sichtfaktorberechnung.....                              | 57  |
| 4 Modellierung der lokalen Entropieproduktion.....                           | 62  |
| 4.1 Lokale Entropieproduktion im Strömungs- und Temperaturfeld.....          | 62  |
| 4.2 Entropieproduktion durch Wärmestrahlung an den Wänden.....               | 64  |
| 4.3 Verifikation der Berechnung der Entropieproduktion.....                  | 68  |
| 4.3.1 Lokale Entropieproduktion aufgrund von irreversibler Wärmeleitung..... | 69  |
| 4.3.2 Lokale Entropieproduktion aufgrund von Dissipation.....                | 72  |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.3.3 | Entropieproduktion aufgrund von Wärmestrahlung .....   | 73  |
| 5     | Laborprüfstand zur Validierung der Simulationen.....   | 76  |
| 5.1   | Steuerung der Verlustleistungen der virtuellen Bauteile.....   | 77  |
| 5.2   | Messtechnik und Messunsicherheiten.....  | 79  |
| 5.2.1 | Systematische Messabweichungen der Lufttemperatursensoren .....  | 81  |
| 5.2.2 | Systematische Messabweichungen der Wandtemperatursensoren .....  | 84  |
| 5.2.3 | Zufällige Messabweichungen der Temperatursensoren .....  | 86  |
| 5.2.4 | Volumenstroms und Kälteleistung des Dachkühlgeräts.....  | 87  |
| 6     | Vergleich zwischen Simulation und Experiment .....   | 93  |
| 6.1   | Schaltschrank-Betrieb bei freier Kühlung.....  | 94  |
| 6.1.1 | Gitterabhängigkeit der Lösung.....   | 97  |
| 6.1.2 | Optimierung der Bauteilanordnung.....  | 99  |
| 6.2   | Schaltschrank-Betrieb mit Dachkühlgerät .....  | 101 |
| 6.2.1 | Optimierung der Strömungsführung .....   | 105 |
| 7     | Zusammenfassung und Ausblick .....   | 109 |
|       | Literaturverzeichnis.....  | 112 |
|       | Anhang .....   | 122 |
| A.1   | Halton-Folge .....   | 122 |
| A.2   | Gleichungen für die Sichtfaktoren des leeren Schaltschranks .....  | 124 |
| A.3   | Positionen der virtuellen Bauteile im Laborschaltschrank.....  | 125 |
| A.4   | Stoffdaten der virtuellen Bauteile .....   | 127 |
| A.5   | Bestimmung der Messabweichung durch Strahlung für die Lufttemperatursensoren...<br>.....                                   | 128 |
| A.6   | Zufällige Messabweichungen für die Wandtemperatursensoren und die Sensoren zur<br>Bestimmung der Umgebungstemperatur ..... | 130 |
| A.7   | Herleitung Sichtfaktormodell.....  | 131 |