

Plasmasimulationen in Überspannungseinrichtungen

Mario Mürmann

1 Einleitung

Numerische Simulationen von Lichtbögen sind nach wie vor sehr anspruchsvoll. Auf physikalischer Seite sind dabei viele komplexe Phänomene geeignet zu berücksichtigen, die zudem teils starke Nichtlinearitäten aufweisen. Das physikalische Verhalten von Lichtbögen wird sowohl von der Gasdynamik, Turbulenz, Plasmachemie als auch von der Strahlung und der Wechselwirkung des Plasmas mit den Elektroden bestimmt. Ferner bilden sich hochkompressible Strömungsformen mit Temperaturen von einigen zehntausend Kelvin und Überdrücken von mehreren Atmosphären aus. Eine vollständige und umfassende Beschreibung dieser Effekte wird aus Sicht der Numerik nicht angestrebt. Vielmehr werden sie modellhaft über semi-empirische Modelle approximiert, deren Exaktheit und Gültigkeit naturgemäß begrenzt sind.

Ein Lichtbogen besteht im Wesentlichen aus einem elektrisch leitfähigen Gas, ein Plasma, in dem aufgrund der Ohmschen Verluste Wärme erzeugt wird, die überwiegend durch Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. Dabei verändert sich die chemische Zusammensetzung des Plasmas, wodurch das fluiddynamische, thermische und elektrische Verhalten des Plasmas variiert. Durch zusätzlichen Materialabbrand an Kontakten und Erosion eventuell vorhandenen Gehäusematerials wird das Plasma mit Fremdmolekülen angereichert, wodurch sich wiederum die Materialparameter ändern. Diese Prozesse finden auf sehr kleinen Zeitskalen statt und müssen bei der numerischen Simulation geeignet berücksichtigt werden.

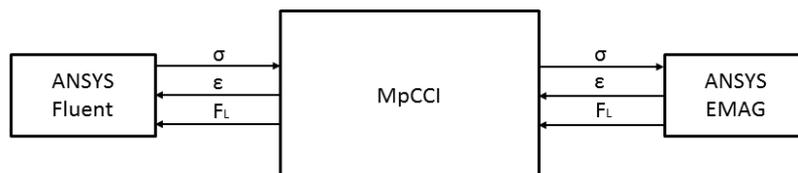
2 Numerik

Aus numerischer Sicht umfasst eine Simulation eines Lichtbogens daher mehrere Einzelsimulationen, die miteinander gekoppelt werden müssen. Insbesondere wird eine CFD-Simulation, die die Gasdynamik unter Berücksichtigung der chemischen Prozesse, der Turbulenz und des thermischen Verhaltens abbildet, mit einer elektromagnetischen Simulation gekoppelt. Eine weitere Kopplung mit einer strukturmechanischen Simulation zur Berücksichtigung eventueller Gehäuseverformungen ist ebenfalls denkbar, dies ist allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Die CFD-Simulation basiert üblicherweise auf der Finite-Volumen-Methode, die elektromagnetische Simulation auf der Finite-Element-Methode. In der vorliegenden Arbeit ist eine Kopplung von ANSYS Fluent mit ANSYS EMAG über das Softwarepaket MpCCI der Fraunhofer-Gesellschaft realisiert worden. Hier werden die Ohmschen Verluste sowie die Lorentzkraft basierend auf der numerischen Lösung in ANSYS EMAG berechnet und ANSYS Fluent als Quellterme zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zur Verfügung gestellt. Umgekehrt benötigt ANSYS EMAG zur Lösung der Maxwellgleichungen die elektrische Leitfähigkeit, die in ANSYS Fluent aufgrund der erhaltenen Temperatur- und Druckverteilung berechnet wird und an ANSYS EMAG via MpCCI übergeben wird. Sie bestimmt damit die Kopplung der Strömung mit dem elektromagnetischen Feld.

Der Abbrand von Kontakten sowie die Erosion von Gehäusematerial sind in der vorliegenden Arbeit bislang nicht berücksichtigt.

In Abbildung 1 ist die Kopplung und der Datenaustausch schematisch dargestellt.



σ : elektrische Leitfähigkeit

ϵ : Ohmsche Wärme

F_L : Lorentzkraft

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kopplung und des Datenaustauschs zwischen ANSYS Fluent und ANSYS EMAG via MpCCI.

3 Materialmodelle

Um die sich mit Temperatur- und Druckverteilung ändernde chemische Zusammensetzung des Plasmas zu berücksichtigen, müssen für das in der Simulation verwendete Gas vorab thermodynamische Größen sowie Transportgrößen in Abhängigkeit von Temperatur und Druck erzeugt werden. Dieser Vorgang umfasst Berechnungen aus der statistischen Thermodynamik und der Quantenmechanik unter Annahme eines lokalen thermodynamischen Gleichgewichts (LTE). Für die CFD-Simulation werden die Größen Dichte, spezifische Enthalpie, Viskosität und thermische Leitfähigkeit benötigt. Für die elektromagnetische Simulation wird die elektrische Leitfähigkeit verwendet. Diese Daten können teils Veröffentlichen entnommen werden^{1,2}.

Ebenso müssen die Absorptionsdaten bezüglich der Strahlung vorab bekannt und geeignet aufbereitet sein, um in den jeweiligen Strahlungsmodellen in ANSYS Fluent verwendet werden zu können^{3,4}. Dazu werden die Absorptionsspektren des Gases in mehrere diskrete Frequenzbänder unterteilt und anschließend zu Absorptionskoeffizienten der diskreten Frequenzbänder geeignet gewichtet. Diese hängen dann wiederum von Druck und Temperatur ab. In Abbildung 2 ist das Absorptionsspektrum für Luft bei drei verschiedenen Temperaturen und einem Druck von 1 bar beispielhaft dargestellt. Diese Abbildung ist der Literatur entnommen³.

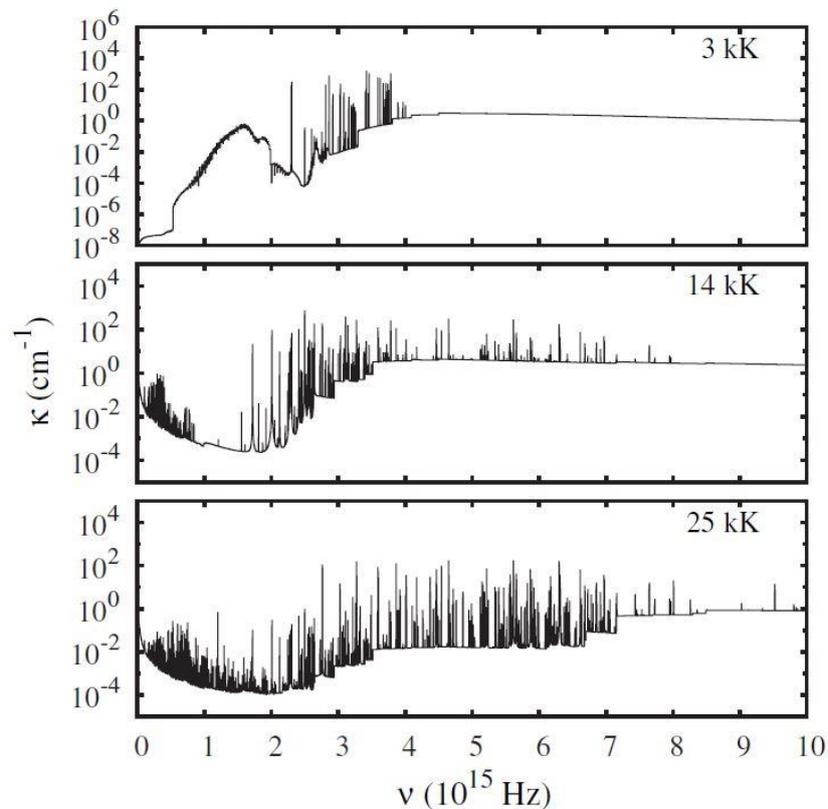


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung des Absorptionsspektrums von Luft bei drei verschiedenen Temperaturen und bei einem Druck von 1 bar. Diese Abbildung ist der Literatur entnommen³.

4 Simulationsumgebung

Das gekoppelte Simulationsmodell umfasst somit ein Modell in ANSYS Fluent und ein Modell in ANSYS EMAG.

Ersteres wurde mit zahlreichen in C programmierten, benutzerdefinierten Funktionen (UDFs) erweitert, um vor allem die Materialeigenschaften des Plasmas geeignet berücksichtigen zu können. Das Modell selbst muss über eine in Scheme programmierte Skriptdatei angesteuert werden, um den Datenaustausch via MpCCI zu ermöglichen. Die Simulation der Turbulenz wird mit dem k-epsilon-Modell realisiert, die Strahlung mittels der „Diskrete Ordinaten-Methode“. Die chemische Zusammensetzung des Plasmas ist bereits in den verwendeten Materialdaten berücksichtigt, so dass auf die Verwendung eines Mixture-Modells verzichtet werden kann.

Das Simulationsmodell in ANSYS EMAG wird mit einer in APDL verfassten Skriptdatei angesteuert. In der vorliegenden Arbeit ist die Berechnung des elektrischen Potentials und der elektrischen Stromdichte stationär. Trotz der sehr flexiblen Möglichkeiten der verwendeten Skriptsprachen und des eleganten Datenaustausches durch Verwendung von MpCCI bleiben somit potentielle Fehlerquellen erhalten. Ein vereinfachtes Handling durch ein integrales Simulationstool existiert bislang nicht.

4.1 Simulationsmodell

Am Institut für Energietechnik (IET) der Hochschule für Technik in Rapperswil wurde eine Simulationsumgebung basierend auf ANSYS Fluent, ANSYS EMAG und MpCCI implementiert, mit der die gekoppelten Simulationen effizient durchgeführt werden können. Diese wurde bereits anhand einiger industrieller Anwendungen am IET getestet.

Als Beispiel wird in der vorliegenden Arbeit ein Überspannungsableiter der Firma Streamer International aus Sankt Petersburg betrachtet, in dem eine Funkenstrecke genutzt wird, um aus Blitzeinschlägen resultierende Überspannungen abzubauen⁵. Ziel der durchgeführten Simulationen war, das Löschverhalten des Lichtbogens in Abhängigkeit der Geometrie der Schaltkammer zu erforschen, nachdem dieser durch einen Blitzeinschlag gezündet wurde. Hierbei wird insbesondere ein effizienter und schneller Löschvorgang angestrebt, um das Hochspannungsnetz nach Ableiten der überschüssigen Energie nicht zu belasten. In Abbildung 3 ist das Simulationsmodell dargestellt. Dabei wurde eine Symmetrie des Aufbaus genutzt, so dass Rechenzeit eingespart werden konnte.

Auf Basis der durchgeführten Simulationen konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die in die Verbesserung des Produktdesigns eingeflossen sind.

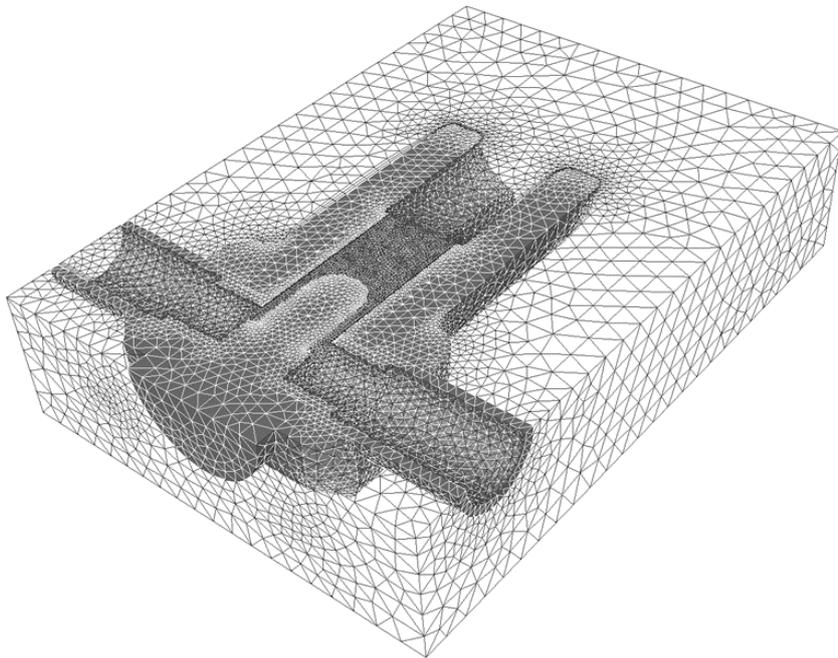


Abbildung 3: Darstellung des verwendeten Simulationsmodells. Dunkel eingefärbt ist eine Schaltkammer des Überspannungsableiters mit angeschlossenen Hohlkontakten. Die umgebende Luft ist hell eingefärbt.

5 Literatur

- [1] D'Angola, A., Colonna, G., Gorse, C., Capitelli, M.: "Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range", *European Physical Journal*, 2008, 129-150.
- [2] Shi-Qiang Chen, Hai-Xing Wang, Choueiri, E.Y.: "Two-Temperature Thermodynamic and Transport Properties of Hydrogen Plasmas", *IEPC*, 2011, 152.
- [3] Kloc, P., Aubrecht, V., Bartlova, M., Coufal, O.: "Radiation transfer in air and air-Cu plasmas for w-temperature profiles", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48-61.
- [4] Gleizes, A., Gonzales, J.J., Freton, P.: "Thermal plasma modelling", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, R153-R183.
- [5] Kozakov, R. et al., "Investigation of a Multi-Chamber System for Lightning Protection at Overhead Power Lines", *Plasma Physics and Technology*, 2, 2, 150-154.