

**Numerische Simulation
strömungsmechanischer Vorgänge in
SF₆-Hochspannungsleistungsschaltern**

Frank Reichert



Universitätsverlag Ilmenau
2015

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Habilitation vorgelegen.

- | | |
|---------------|--|
| 1. Gutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger
(Technische Universität Ilmenau) |
| 2. Gutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
(Technische Universität Braunschweig) |
| 3. Gutachter: | Prof. Dr. rer. nat. habil. André Thess
(Technische Universität Ilmenau) |

Tag der Verteidigung: 16. Juli 2014

Mit freundlicher Unterstützung der Siemens AG

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-116-4 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2015100026

Coverfoto: Integration von computergestützter Modellierung der Strömungsvorgänge in der Unterbrechereinheit eines SF₆-Selbstblausschalters und analytischer Modellierung des Schaltmechanismus während der Simulation einer Kurzschlussabschaltung (links: Momentaufnahme der Temperaturverteilung, rechts: Schema des Federspeichermechanismus)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Simulation bei SF ₆ –Hochspannungsleistungsschaltern	1
1.2	Ziel und Inhalt der Habilitationsschrift	6
2	Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung	9
3	Modellbildung der physikalischen Prozesse	13
3.1	Abgrenzung des physikalischen Gesamtsystems	13
3.1.1	Strukturierung des Systems der Polsäule beim Blaskolbenschalter . .	14
3.1.2	Strukturierung des Systems der Polsäule beim Selbstblasschalter . . .	16
3.2	Teilsystem Antrieb und Schaltermechanik	19
3.2.1	Vorgabe eines Geschwindigkeitsverlaufes	19
3.2.2	Modellierung eines Antriebssystems	20
3.2.2.1	Bestimmung der Druckkraft	24
3.2.2.2	Bestimmung der Dämpferkraft	24
3.2.3	Modellierung der Ventiloperation	25
3.2.3.1	Nachbildung der Bewegung der Ventilplatte	25
3.2.3.2	Nachbildung des Stoßvorganges beim Anschlag der Ventilplatte	27
3.3	Teilsystem Strömungsgeometrie	29
3.3.1	Modellierung des Bewegungsablaufes der Unterbrechereinheit	29
3.3.1.1	Nachbildung beim Blaskolbenschalter	29
3.3.1.2	Nachbildung beim Selbstblasschalter	30
3.4	Teilsystem Gasströmung	32
3.4.1	Besonderheiten der Gasströmung in Hochspannungsleistungsschaltern	32
3.4.2	Der Strömungsvorgang in Düsenanordnungen	33
3.4.2.1	Signifikante Merkmale der Düsenströmung	33
3.4.2.2	Analytische Beschreibung der Düsenströmung	34
3.4.3	Ausbreitung von Expansions- und Stoßwellen	38
3.5	Teilsystem Schaltlichtbogen	42
3.5.1	Das Lichtbogenplasma	42
3.5.2	Ansatz und Annahmen bei der Modellierung des Lichtbogens	43
3.5.3	Strukturierung des Modells des Lichtbogens	44
3.5.4	Das elektrische Modul	46
3.5.4.1	Vorgabe einer gemessenen Lichtbogenleistung	46
3.5.4.2	Vorgabe einer konstanten Stromdichte	47
3.5.4.3	Lösung der Stromkontinuitätsgleichung	47

3.5.4.4	Integration der radialen Leitfähigkeitsverteilung	50
3.5.5	Das magnetische Modul	50
3.5.5.1	Amperesches Gesetz	50
3.5.5.2	Vektorpotentialansatz	51
3.5.5.3	Biot-Savart-Formulierung	52
3.5.5.4	Hybrider Ansatz	54
3.5.5.5	Überprüfung der verschiedenen Ansätze zur Berechnung des magnetischen Feldes	55
3.5.6	Das Strahlungsmodul	58
3.5.6.1	Grundlagen der Simulation des Strahlungstransportes mit CFD-Programmen	58
3.5.6.2	Ausgewählte Strahlungsmodelle	61
3.5.6.3	Funktionalität der Strahlungsmodelle	63
3.5.6.4	Hybrider Ansatz	66
3.5.7	Das Abbrandmodul	67
3.5.7.1	1-Spezies-Abbrandmodell	68
3.5.7.2	2-Spezies-Abbrandmodell	69
3.6	Teilsystem Wiederverfestigung	70
3.6.1	Modul für die thermische Phase	70
3.6.2	Modul für die dielektrische Phase	72
3.6.2.1	Modell zur Beurteilung der dielektrischen Beanspruchung	73
3.6.2.2	Modell zur Berechnung der Durchschlagspannung nach Seeger	74
3.7	Teilsystem Externer Stromkreis	76
3.7.1	Modellierung von Einschwingvorgängen	76
3.7.2	Überprüfung des Simulationsmodells zur Berechnung des Einschwingvorganges im Hochspannungskreis	77
4	Simulation zur Validierung der Teilmodelle	79
4.1	Simulation des Strömungsvorganges in einem hydraulischen Dämpfer	80
4.1.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	80
4.1.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	82
4.2	Simulation von Düsenströmungen	84
4.2.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	84
4.2.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	86
4.2.2.1	Druckverteilung in der Lavaldüse nach Leseberg	86
4.2.2.2	Iterations- und Diskretisierungsfehler für die Lavaldüse nach Leseberg	87
4.3	Simulation des Strömungsvorganges in einem Stoßwellenrohr	88
4.3.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	88
4.3.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	90
4.4	Simulation von Plasmaströmungen	91
4.4.1	Simulation von wandstabilisierten Lichtbögen	92
4.4.1.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	92
4.4.1.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	94
4.4.2	Simulation von frei brennenden Lichtbögen	96

4.4.2.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	96
4.4.2.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	98
4.4.3	Simulation von konvektionsstabilisierten Lichtbögen	101
4.4.3.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	101
4.4.3.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	103
5	Simulation von Ausschaltvorgängen	107
5.1	Simulation von Leerschaltungen mit dem dynamischen Antriebsmodell	107
5.1.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	107
5.1.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	109
5.1.2.1	Einfluss der Kraftkomponenten	111
5.1.2.2	Besonderheiten des Verlaufes der Geschwindigkeit der Unterbrechereinheit	112
5.2	Simulation von Kurzschlussabschaltungen mit dem dynamischen Antriebsmodell	113
5.2.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	113
5.2.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	114
5.2.2.1	Rückwirkung des Schaltlichtbogens auf den Antrieb	114
5.2.2.2	Einfluss des Schaltlichtbogens auf die Ventiloperation	115
5.3	Simulation von Kurzschlussabschaltungen mit dem vereinfachten Lichtbogenmodell	116
5.3.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	117
5.3.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	120
5.3.2.1	Einfluss des Düsenabbrandes	120
5.3.2.2	Einfluss von Isolier- und Hilfsdüse	122
5.3.2.3	Einfluss des Stromverlaufes	124
5.3.2.4	Betrachtungen zur Wiederverfestigung beim Klemmenkurzschluss	126
5.3.2.5	Betrachtungen zur Wiederverfestigung beim Abstandskurzschluss	128
5.4	Simulation von Kurzschlussabschaltungen mit dem komplexen Lichtbogenmodell	131
5.4.1	Lösungsbereich und Einstellungen des Simulationsmodells	131
5.4.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse	134
5.4.2.1	Verteilung des elektrischen Potentials und die daraus resultierende Verlustleistung	134
5.4.2.2	Druckaufbau und Heißgasströmung in der Unterbrechereinheit	134
5.4.2.3	Einfluss des Strahlungsmodells auf die Berechnungszeit	136
5.4.2.4	Einfluss der Zeitschrittgröße auf die Simulationsergebnisse	137
6	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Formelzeichen und Abkürzungen	143
	Abbildungsverzeichnis	150

X

Tabellenverzeichnis 155

Literaturverzeichnis 156