

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung in die Problematik	1
2. Stand des Wissens	3
2.1. SF ₆ in der Hochspannungstechnik	4
2.1.1. Einsatzbereich von SF ₆	4
2.1.2. Physikalische Eigenschaften von SF ₆	6
2.1.3. Ursachen von Gaslecks	8
2.2. Die maximal zulässige Leckrate gemäss IEC	11
2.3. Heutige Methoden zur Bestimmung der Leckrate	11
2.3.1. Leckdetektion mittels Analyse der Umgebungsluft	11
2.3.2. Überwachung von Gasdruck und/oder Gasdichte	13
2.3.3. Messfehler von Druck- und Dichtesensoren	15
2.3.4. Heute angewandte Methoden zur Filterung der Fluktu- tationen	16
2.3.5. Leckdiagnose mittels Schwellwert	16
2.3.6. Bekannte statistische Methoden zur Filterung der Fluktuationen	18
2.4. Methoden zur Quantifizierung der Fluktuationen	20
2.4.1. Inhomogene Erwärmung als Ursache der Fluktu- tionen	20
2.4.2. Inhomogene Temperaturverteilung als Ursache der Fluktuationen	24
2.4.3. Wärmenetzmodelle	26
2.4.4. Numerische Strömungssimulationen	30
2.4.5. Methoden zur Messung des Geschwindigkeitsfeldes einer Strömung	32
2.5. Zusammenfassung des Wissensstandes	34
3. Aufgabenstellung	37

4. Analyse der Fluktuationsursachen	39
4.1. Analytische Quantifizierung der Druck- und Dichtefluktuationen	40
4.1.1. Einflussfaktoren auf Gasdruck und -Dichte	40
4.1.2. Einfluss der Messgrößenwahl auf die Art der Fluktuation	40
4.1.3. Variabilität des Gasvolumens	42
4.2. Temperaturverteilung und Strömungsfeld	47
4.2.1. Der Zylinderspalt als Modellfall	47
4.2.2. Grenzen der analytischen Untersuchung des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes	48
4.2.3. Methodik	48
4.3. Messung des Geschwindigkeitsfeldes	49
4.3.1. PIV-Versuchsaufbau	50
4.3.2. Dimensionsanalyse der Versuchsanordnung	51
4.3.3. Stationäres Geschwindigkeitsfeld im Querschnitt	52
4.3.4. Strömungsbilder im Querschnitt und instationäre Betrachtung	52
4.3.5. Erkenntnisgewinn durch die Particle Image Velocimetry	56
4.4. Numerische Strömungssimulationen	56
4.4.1. Motivation und Einschränkungen	56
4.4.2. Simulation der Luftströmung im Acrylmodell	57
4.4.3. Simulation der SF ₆ -Strömung in der GIS-Sammelschiene	62
4.4.4. Erkenntnisgewinn durch die Strömungssimulation	69
4.5. Experimentelle Untersuchung	70
4.5.1. Ziel der Experimente	70
4.5.2. Aufbau des Versuchsstandes	70
4.5.3. Übersicht über die durchgeführten Experimente	77
4.5.4. Messresultate	78
4.5.5. Erkenntnisgewinn durch die experimentelle Untersuchung	83
4.6. Vergleich der Labormessungen mit numerischen Strömungssimulationen	84
4.7. Zusammenfassung der Erkenntnisse und Konsequenzen	84
5. Modellbasierte Filterung der Messdaten	89
5.1. Modellbasierte Diagnosetechnik	90
5.2. Modellbasierte Diagnose zur Erkennung von Gaslecks	91
5.2.1. Untersuchte Ansätze	91

5.2.2.	Annahmen	91
5.2.3.	Diagnose über eine Dichtemessung	92
5.2.4.	Diagnose über eine Druckmessung	94
5.3.	Das Druckmodell	96
5.3.1.	Theoretische Aspekte	96
5.3.2.	Voraussetzungen	98
5.3.3.	Gewichtungsalgorithmen	98
5.3.4.	Resultate und Beurteilung der Gewichtungsalgorithmen	103
5.4.	Bestimmung der Temperaturverteilung auf der Berandung	106
5.4.1.	Temperaturbestimmung mit Hilfe von Wärmenetzen	106
5.4.2.	Temperaturbestimmung durch Messung	107
5.5.	Fazit zur modellbasierten Leckdiagnose	109
6.	Schlussfolgerungen und Ausblick	111
Literatur		113
A.	Umweltaspekte	127
A.1.	Einleitung	127
A.2.	Hintergründe zur IEC-Norm	127
A.2.1.	Treibhauspotential	127
A.2.2.	Einfluss auf stratosphärisches Ozon	130
A.3.	Ersatz und Teilersatz von SF ₆	131
A.3.1.	Alternative Gase	131
A.3.2.	Beimischung anderer Gase zum SF ₆	132
B.	Details zur CFD-Simulation	135
B.1.	Grundlagen der Fluidodynamik	135
B.1.1.	Einleitung	135
B.1.2.	Erhaltungsgleichungen	135
B.1.3.	Navier-Stokes-Gleichungen	138
B.2.	Numerische Strömungssimulation	140
B.2.1.	Zweck numerischer Strömungssimulationen	140
B.2.2.	Diskretisierungsmethode	140
B.2.3.	Reynolds-Mittelung	141
B.3.	Details zu den durchgeführten CFD-Simulationen	141
B.3.1.	Verwendete Software	141
B.3.2.	Zeitauflösung	142
B.3.3.	Turbulenzmodell	143
B.3.4.	Geometrie	143

B.3.5.	Rechengitter	144
B.3.6.	Randbedingungen	146
B.3.7.	Stoffparameter SF ₆	150
B.3.8.	Computerhardware und Simulationszeit	152
C.	Experimente	153
C.1.	Aufbau des Versuchsstandes	153
C.1.1.	Mechanischer Aufbau des SF ₆ -Prüfobjekts	153
C.1.2.	Dichtesensorik	155
C.1.3.	Thermoelemente	156
C.1.4.	Drucksensor	157
C.1.5.	Strommessung	157
C.1.6.	Pyrradiometer	157
C.1.7.	Interfacebox	158
C.1.8.	Gasdichte Stecker	158
C.1.9.	Erzeugung des Laststroms	162
C.1.10.	Quarzstrahler zur Nachbildung des Sonneneinstrahlungseffektes	163
C.1.11.	Stellpulte	168
C.1.12.	Axiale Temperaturverteilung	169
C.1.13.	Software zur Steuerung des Versuchsstandes	169
C.2.	Übersicht über die Experimente	170
C.3.	Beschreibung der Experimente	173
C.3.1.	Experiment 1 – Lastsprung bei Nennstrom	173
C.3.2.	Experiment 2 – Test der Reproduzierbarkeit	175
C.3.3.	Experiment 3 – Lastsprung bei Sub-Nennstrom	176
C.3.4.	Experiment 4 – Lastsprung bei Überlast	177
C.3.5.	Experiment 5 – Lastsprung bei leicht reduziertem Druck	178
C.3.6.	Experiment 6 – Lastsprung bei stark reduziertem Druck	179
C.3.7.	Experiment 7 – Lastsprung bei ungenauer Horizontierung	180
C.3.8.	Experiment 8 – Laststrom bei vertikalem GIS-Element	181
C.3.9.	Experiment 9 – Lastprofil	182
C.3.10.	Experiment 10 – Sonneneinstrahlung in Mitteleuropa	183
C.3.11.	Experiment 11 – Sonneneinstrahlung äquatorial	184
C.3.12.	Experiment 12 – Sonneneinstrahlung Mitteleuropa mit Wolke	185
C.3.13.	Experiment 13 – Dauernennstrom plus Sonneneinstrahlung Mitteleuropa	186

C.3.14. Experiment 14 – Lastsprung plus Sonneneinstrahlung Mitteleuropa	187
C.3.15. Experiment 15 – Lastprofil plus Sonneneinstrahlung Mitteleuropa	188
D. Dimensionsanalyse	189
E. Studentenprojekte im Kontext der Arbeit	193