

Dipl.-Ing. Carsten Trinitis, München

**Feldoptimierung von  
dreidimensionalen  
Isoliersystemen in der  
Hochspannungstechnik**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **242**

---

## INHALT

Formelzeichen und Abkürzungen .....	IX
1. Aufgabenstellung .....	1
2. Einleitung .....	3
3. Berechnung elektrischer Felder .....	6
3.1 Datenvorverarbeitung .....	9
3.2 Feldberechnung .....	9
3.2.1 Ersatzquellenverfahren .....	10
3.2.2 Das Ersatzladungsverfahren .....	12
3.2.3 Flächenladungsverfahren .....	15
3.2.4 Die Boundary-Element Methode .....	16
4. Optimierung hochspannungstechnischer Bauteile .....	18
4.1 Bisherige Forschungsarbeiten zur Optimierung .....	18
4.1.1 Optimierung der elektrischen Feldstärke .....	18
4.1.1.1 Die Formeln von Spielrein .....	18
4.1.1.2 Verfahren zur Optimierung von Elektrodenkon- turen .....	20
4.2 Anwendbarkeit auf dreidimensionale Systeme .....	28
5. Mathematische Optimieralgorithmen .....	29
5.1 Grundbegriffe der mathematischen Optimierung .....	29
5.2 Verwendete Optimieralgorithmen .....	35
5.2.1 Direkte Suchmethoden .....	35
5.2.1.1 Nelder-Mead Simplexmethode .....	35
5.2.1.2 Die Hooke-Jeeves Methode .....	37
5.2.1.3 Methoden mit konjugierten Richtungen .....	39
5.2.1.4 Powell's Method .....	41
5.2.2 Methoden mit Gradienteninformation .....	43
5.2.2.1 Numerische Differentiation .....	43
5.2.2.2 Methoden mit konjugierten Gradienten .....	44
5.2.2.3 Variable-Metric Methoden (Quasi-Newton Ver- fahren) .....	46
5.2.2.4 Simulated Annealing .....	49

5.3	Evolutionenprogramme .....	51
5.3.1	Genetische Operatoren .....	53
5.3.2	Genetische Codierung des Entwurfsparameterraumes .....	54
6.	Künstliche neuronale Netze .....	56
6.1	Hintergrund der Untersuchung .....	56
6.2	Prinzip und Funktionsweise .....	56
6.2.1	Aufbau neuronaler Netze .....	56
6.2.2	Funktionsweise neuronaler Netze .....	58
6.2.3	Der Lernvorgang in neuronalen Netzen .....	59
6.2.4	Mathematische Beschreibung .....	62
6.2.4.1	Initialisierungsfunktion .....	62
6.2.4.2	Die Aktivierungsfunktion .....	62
6.2.4.3	Die Übertragungsfunktion .....	64
6.2.4.4	Die Fehlerfunktion .....	64
6.2.4.5	Algorithmen zur Änderung der Gewichte .....	64
6.2.5	Vereinfachen von Netzwerktopologien mittels Netzwerk-Pruning .....	67
7.	Werkzeuge und Anwendungsbeispiele zur automatischen Optimierung hochspannungstechnischer Bauteile .....	68
7.1	Zielsetzung .....	68
7.2	Modellierung zweidimensionaler und rotationssymmetrischer Anordnungen .....	73
7.2.1	Parametrisierung einer dreiphasigen Sammelschiene .....	74
7.3	Modellierung dreidimensionaler Anordnungen .....	78
7.3.1	Einsatz von CAD-Systemen .....	78
7.3.2	Zur dreidimensionalen Feldberechnung einsetzbare CAD-Modelliersysteme .....	79
7.3.3	Optimierung einfacher dreidimensionaler Anordnungen ohne parametrisches Modelliersystem .....	79
7.3.3.1	Optimierung eines dreiphasigen Sammelschienenabschlusses mit FAM .....	80
7.3.3.2	Optimierung eines Transformatorschutzringes mit FAM .....	81
7.3.4	Einsatz von parametrischen Modelliersystemen .....	82
7.3.4.1	Das Modelliersystem Pro/Engineer .....	82
7.3.4.2	Einsatz von Pro/Engineer zur Felddoptimierung .....	82
7.3.5	Erstellung einer menügesteuerten Benutzeroberfläche zur automatischen Optimierung .....	84

8.	Strategien zur Beschleunigung der Feldberechnung .....	88
8.1	Einsatz von effizienten Matrixsolvern .....	88
8.2	Vermeiden redundanter Berechnungen .....	89
8.3	Parallelisierung der Processing- und Post-Processing Phase .....	92
8.3.1	Programmiermodelle .....	92
8.3.2	Die Programmierumgebung PVM .....	93
8.3.3	Parallelisierung der numerischen Feldberechnung .....	93
8.3.4	Benchmark-Tests mit Parallelisierung .....	96
8.3.5	Bewertung der Parallelisierung .....	100
9.	Optimierungsergebnisse .....	101
9.1	Optimierung einer dreiphasigen Sammelschiene .....	101
9.1.1	Optimierung mit der Nelder-Mead Simplexmethode .....	102
9.1.2	Optimierung mit der Hooke-Jeeves Methode .....	104
9.1.3	Optimierung mit Powell's Method .....	106
9.1.4	Optimierung mit dem Fletcher-Reeves Algorithmus .....	108
9.1.5	Optimierung mit dem Polak-Ribiere Algorithmus .....	110
9.1.6	Optimierung mit dem Davidon-Fletcher-Powell Algorithmus .....	112
9.1.7	Optimierung mit Simulated-Annealing .....	114
9.1.8	Ergebnisse mit Evolutionsprogrammen .....	115
9.2	Optimierung eines dreiphasigen Sammelschienenabschlusses .....	117
9.2.1	Vergleich der Optimieralgorithmen für den dreiphasigen Sammelschienenabschluß .....	118
9.2.2	Untersuchung der Eignung neuronaler Netze .....	119
9.3	Optimierung eines Transformatorschutzringes .....	121
9.4	Optimierung einer Transformatorausleitung .....	123
10.	Resümee .....	127
10.1	Kopplung zwischen parametrischer Modellierung und numerischer Feldberechnung .....	127
10.2	Beschleunigung eines einzelnen Optimierschrittes .....	128
10.2.1	Methoden zur Beschleunigung der numerischen Feldberechnung .....	128
10.3	Vergleich der verschiedenen Optimieralgorithmen .....	131
10.3.1	Verwendete Optimieralgorithmen .....	131
10.3.2	Testbeispiele .....	132
10.3.3	Bewertung der Algorithmen für die Felddoptimierung .....	

---

	.....	134
10.3.4 Eignung von Evolutionsstrategien	.....	137
10.3.5 Eignung von künstlichen neuronalen Netzen	.....	137
11. Zusammenfassung und Ausblick	.....	138
11.1 Zusammenfassung	.....	138
11.2 Ausblick	.....	139
Literatur	.....	141