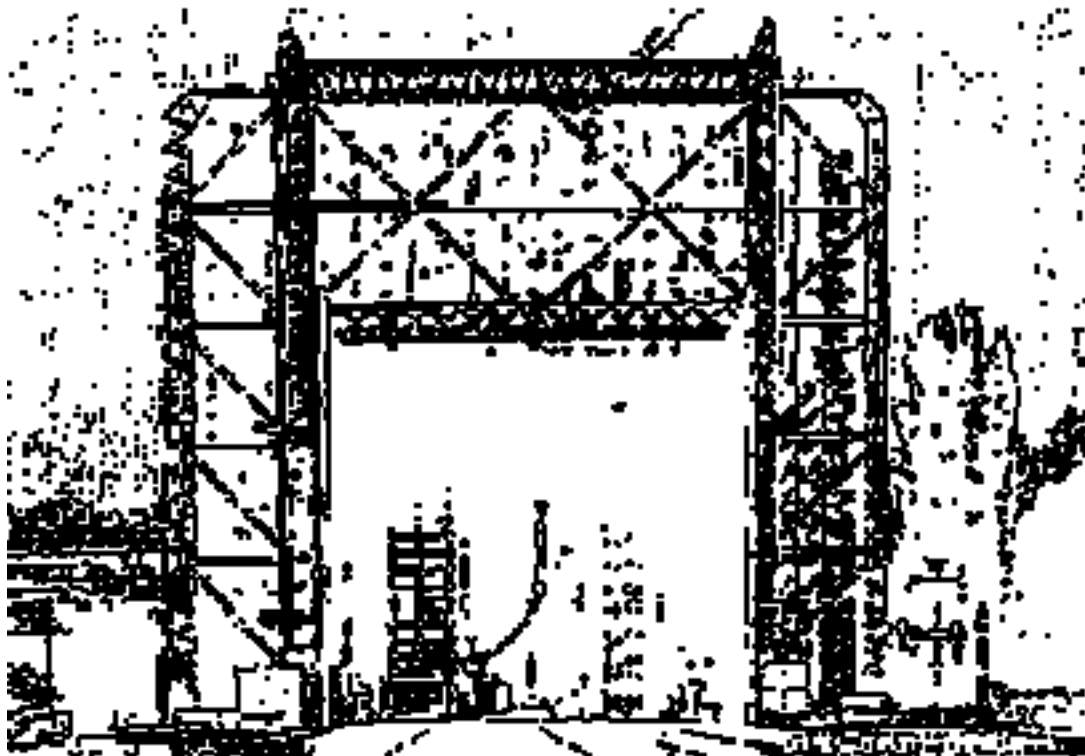


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

**HABILITATION**



INSTITUT FÜR  
**H**OCHSPANNUNGSTECHNIK  
UND **S**YSTEMMANAGEMENT



# **ANALYSE UND BEWERTUNG VON BETRIEBSMITTELN IN DER HOCHSPANNUNGSTECHNIK**

**eingereicht als  
Habitationsarbeit**

**an der Technischen Universität Graz**

**von**

**Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof SUMEREDER**

**eingereicht  
Graz, im Dezember 2008**

**2. überarbeitete Auflage  
Graz, im Jänner 2010**



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Das Lehrfach Hochspannungstechnik	4
1.2.1	Aufgaben, Anwendungen und Perspektiven der Hochspannungstechnik	5
1.2.2	Einteilung der Hochspannungstechnik	5
1.2.2.1	Elektrische Beanspruchung, Dimensionierung und Feldberechnung	7
1.2.2.2	Elektrische Festigkeit, Isolierstofftechnik	8
1.2.2.3	Hochspannungsprüftechnik	10
1.2.2.4	Hochspannungsmesstechnik	13
1.2.2.5	Diagnose und Monitoring	14
1.2.2.6	Instandhaltung und Zustandsbewertung	17
1.2.2.7	Managementmethoden	19
1.2.3	Entwicklung des Lehrfachs Hochspannungstechnik an der Technischen Universität Graz	20
1.3	Definition von Isolierung und Isolation	23
<b>2</b>	<b>TECHNOLOGIEENTWICKLUNG</b>	<b>25</b>
2.1	Technologische Entwicklung der Generatorisolierungen	27
2.1.1	Das VPI-Verfahren	30
2.1.1.1	Aufbau einer im VPI-Verfahren hergestellten Isolierung	32
2.1.1.2	Eingesetzte Bänder im VPI-Verfahren	33
2.1.2	Das RR-Verfahren	35
2.1.2.1	Aufbau einer im RR-Verfahren hergestellten Isolierung	36
2.1.2.2	Eingesetzte Bänder im RR-Verfahren	37
2.1.3	Trägermaterialien für Glimmer	38
2.1.3.1	Glasgewebe	38
2.1.3.2	Folien	39
2.1.3.3	Vliese	39
2.2	Technologische Entwicklung der Transformatorisolierungen	40
2.2.1	Flüssiggekühlter Transformatoren	40
2.2.1.1	Feste Isolierstoffe	40
2.2.1.2	Flüssige Isolierstoffe	42
2.2.2	Trockentransformatoren	43
2.2.3	Gasgefüllte Transformatoren	45
2.3	Technologische Entwicklung der Freileitungsisoliersysteme	46
2.3.1	Mastkonstruktionen und Mastwerkstoffe	46
2.3.2	Isolatoren und Armaturen	48
2.3.3	Überspannungsableiter	49
2.4	Technologische Entwicklung der Kabelisolierungen	50
2.4.1	Naturstoffisolierte Kabel	50
2.4.2	Papierisolierte Kabel	50
2.4.3	Kunststoffisolierte Kabel	51
2.4.4	Kunststoff-Papier-Laminat für höchste Spannungsebenen	51
2.4.5	Kabelgarnituren	52
2.5	Entwicklungstendenzen und neue Technologien	53
2.5.1	Gasisolierte Leitungen	54
2.5.2	Höchstspannungsleitungen	56

2.5.3	Supraleitung	59
2.5.3.1	Flüssigstickstoff als Isoliermedium	59
2.5.3.2	Supraleitende Kabel	61
2.5.3.3	Supraleitende Energiespeicher (SMES)	62
2.5.3.4	Supraleitende Strombegrenzer (FCL)	64
2.5.3.5	Supraleitende Transformatoren und Maschinen	64
2.5.4	Nanotechnologie	65
2.5.4.1	Leiter mit niedrigem Widerstand	66
2.5.4.2	Isolierstoffe	68
<b>3</b>	<b>INSTANDHALTUNG</b>	<b>71</b>
<b>3.1</b>	<b>Begriffe der Instandhaltung</b>	<b>73</b>
<b>3.2</b>	<b>Instandhaltungsbedeutung</b>	<b>76</b>
3.2.1	Betriebswirtschaftliche Einflüsse auf die Instandhaltung	77
3.2.2	Volkswirtschaftliche Einflüsse auf die Instandhaltung	77
3.2.3	Technologische Einflüsse auf die Instandhaltung	78
3.2.4	Rechtliche Anforderungen	78
<b>3.3</b>	<b>Instandhaltungsziele</b>	<b>82</b>
<b>3.4</b>	<b>Instandhaltungsstrategien</b>	<b>83</b>
3.4.1	Ausfallsorientierte Instandhaltungsstrategie	85
3.4.2	Zeitorientierte Instandhaltungsstrategie	85
3.4.3	Zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie	86
3.4.4	Vorausschauende Instandhaltungsstrategie	87
3.4.5	Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltungsstrategie	88
3.4.6	Risikoorientierte Instandhaltungsstrategie	90
3.4.7	Auswahl der Instandhaltungsstrategie	90
<b>3.5</b>	<b>Instandhaltungskosten</b>	<b>93</b>
<b>3.6</b>	<b>Instandhaltungstätigkeiten</b>	<b>95</b>
3.6.1	IH von NS/MS-Freileitungen und Kabeln	95
3.6.2	IH von Transformatorstationen	96
3.6.3	IH von Umspannwerken	97
3.6.4	IH von HS-Leitungen	99
3.6.5	IH von Generatoren/Kraftwerken	99
<b>4</b>	<b>PRÜFSPANNUNGEN UND -ANLAGEN</b>	<b>101</b>
<b>4.1</b>	<b>Gleichspannung</b>	<b>101</b>
<b>4.2</b>	<b>Wechselspannung</b>	<b>103</b>
<b>4.3</b>	<b>Impulsförmige Spannung</b>	<b>106</b>
<b>5</b>	<b>TECHNISCHE DIAGNOSTIK</b>	<b>109</b>
<b>5.1</b>	<b>Elektrische Diagnosemethoden</b>	<b>111</b>
5.1.1	Spannungsprüfung, Durchschlagsverhalten	111
5.1.2	Isolationsstrom – Isolationswiderstand	113
5.1.2.1	Durchgangs- und Oberflächenwiderstand	113
5.1.2.2	Teilströme und deren Messung	114
5.1.2.3	Bestimmung des Feuchtezustands, Trockenheitsgrenze	118
5.1.3	Verlustfaktor und Kapazität	119

5.1.3.1	Abhängigkeiten des Verlustfaktors	120
5.1.3.2	Verlustfaktormessung	121
5.1.4	Teilentladungsdiagnostik	123
5.1.4.1	Teilentladungsmessung	123
5.1.4.2	Teilentladungen in Generatorwicklungen	125
5.1.4.3	Interpretation von Teilentladungen	126
5.1.4.4	Klassifizierung und Beurteilung von TE-Fehlern in Wicklungen	127
5.1.4.5	Teilentladungsmesssysteme	130
5.1.5	Dielektrische Antwortfunktion im Zeit- und Frequenzbereich	130
5.1.5.1	Polarisationsmechanismen	130
5.1.5.2	Polarisations- Depolarisationsstrom Messung: PDC	134
5.1.5.3	Isothermal Relaxation Current: IRC	136
5.1.5.4	Recovery Voltage Method: RVM	138
5.1.5.5	Frequency Domain Spectroscopy: FDS	138
5.1.5.6	Kombinierte Messung im Zeit- und Frequenzbereich	140
5.1.5.7	Frequency Response Analysis: FRA	141
<b>5.2</b>	<b>Nichtelektrische Diagnostik</b>	<b>142</b>
5.2.1	Mechanische Diagnostik	142
5.2.1.1	Nutkeilsitzprüfung	142
5.2.1.2	Blechkpaketpressung	143
5.2.1.3	Körperschallanalyse	143
5.2.2	Thermische Diagnostik	145
5.2.2.1	Pyrometer	145
5.2.2.2	Infrarotthermografie	146
5.2.3	Magnetische Diagnostik	147
5.2.3.1	Ringprobe (Ring/Power Flux Test)	147
5.2.3.2	Streufussmessung (EL CID-Test)	148
5.2.4	Chemische Diagnostik	148
5.2.4.1	Kühlluftanalyse an Generatoren mittels Ozonmessung	149
5.2.4.2	Gas-in-Öl Analyse	152
5.2.4.3	Furananalyse (Furfurol-Bestimmung)	154
5.2.4.4	Feuchtigkeitsbestimmung mittels Karl-Fischer-Titration (KFT)	158
5.2.5	Akustische Diagnostik	159
5.2.6	Optische Diagnostik	160
<b>5.3</b>	<b>Diagnosemöglichkeiten an Hochspannungsbetriebsmittel</b>	<b>161</b>
5.3.1	Diagnosemethoden an Generatoren	161
5.3.2	Diagnosemethoden an Transformatoren	163
<b>6</b>	<b>ZUSTANDBEWERTUNG</b>	<b>165</b>
<b>6.1</b>	<b>Alterung von Isoliersystemen</b>	<b>165</b>
<b>6.2</b>	<b>Der Begriff der Alterung</b>	<b>166</b>
6.2.1	Elektrische Alterung	168
6.2.2	Thermische Alterung	169
6.2.3	Mechanische Alterung	170
6.2.4	Alterung durch Umgebungsbedingungen	171
<b>6.3</b>	<b>Der Begriff der Lebensdauer</b>	<b>171</b>
6.3.1	Technische und wirtschaftliche Lebensdauer	172
6.3.2	Restlebensdauer von Betriebsmitteln	173
<b>6.4</b>	<b>Lebensdauergesetze elektrischer Isolierstoffe</b>	<b>174</b>
6.4.1	Inverse Power Law	174
6.4.2	Arrhenius-Gesetz	177
6.4.3	Wirkungsweise von Arrhenius-Gleichung und „Inverse Power Law“	179
6.4.4	Multistress Alterung	180
6.4.5	Multifaktor-Alterungsmodelle	181

<b>6.5 Fehler- und Ausfallsstatistiken bei Generatoren</b>	<b>183</b>
6.5.1 Fehlerarten	183
6.5.2 Ausfall des Isolationssystems	185
6.5.3 Detailanalyse und Fehlerstatistik	187
6.5.4 Statistische Lebensdauer von Generatorwicklungen	189
6.5.5 Statistische Zuverlässigkeit und Fehlerrate von Generatorwicklungen	191
<b>6.6 Fehler- und Ausfallsstatistiken bei Transformatoren</b>	<b>193</b>
6.6.1 Fehlerarten und Ausfallsmechanismen	196
6.6.1.1 Isolationsfehler	196
6.6.1.2 Fehler in den Wicklungen	197
6.6.1.3 Fehler bei Stufenschalter	198
6.6.1.4 Teilentladungen	198
6.6.1.5 Fehler bei Durchführungen	198
6.6.1.6 Sonstige Fehlerarten	199
6.6.2 Detailanalyse einer Fehlerstatistik	201
6.6.2.1 Bestandsdaten, Fehlerarten	201
6.6.2.2 Ausfallsrate und zu erwartende Ausfälle	203
<b>6.7 Möglichkeiten und systematische Vorgangsweise für die Zustandsbewertung</b>	<b>206</b>
6.7.1 Zustandsbewertung anhand statistischer Daten	206
6.7.2 Zustandsbewertung mittels Kategorisierung und Gewichtung der Betriebsmitteleigenschaften	207
6.7.3 Zustandsbewertung durch Auswertung diagnostischer Messungen	209
6.7.4 Umfassende Zustandsbewertung	210
6.7.5 Abgrenzung zur Zuverlässigkeitsberechnung, Ausfalls- und Störstatistiken	211
<b>7 MANAGEMENT</b>	<b>213</b>
<b>7.1 Qualitätsmanagement</b>	<b>214</b>
7.1.1 Geschichte Entwicklung des Qualitätsmanagements	215
7.1.2 Grundgedanke des QM	217
7.1.3 Umsetzung	217
7.1.4 Nutzen	218
7.1.5 Regelkreis des Qualitätsmanagements	218
7.1.5.1 Qualitätsplanung	219
7.1.5.2 Qualitätslenkung	220
7.1.5.3 Qualitätsprüfung	220
7.1.5.4 Qualitätsverbesserung	221
7.1.5.5 Selbstbewertung und Bewertung im Wettbewerb (Benchmarking)	221
<b>7.2 Qualitätstechniken und Managementwerkzeuge</b>	<b>222</b>
7.2.1 Die Sieben Elementaren Qualitätstechniken (Q7)	223
7.2.1.1 Brainstorming, Brainwriting, Methode 635	223
7.2.1.2 Fehlersammelkarte (Fehlersammelliste, Datensammelblatt)	224
7.2.1.3 Histogramm	225
7.2.1.4 Korrelationsdiagramm	225
7.2.1.5 Paretodiagramm (Pareto-Analyse, ABC-Analyse)	227
7.2.1.6 Qualitätsregelkarte	228
7.2.1.7 Ursache-Wirkungs-Diagramm (Fishbone-Analyse oder Ishikawa-Diagramm)	229
7.2.2 Die Sieben Management Werkzeuge (M7)	230
7.2.2.1 Affinitätsdiagramm, Verwandtschaftsdiagramm	231
7.2.2.2 Relationendiagramm	232
7.2.2.3 Entscheidungsbaum, Baumdiagramm	234
7.2.2.4 Matrixdiagramm	235
7.2.2.5 Portfolio	236
7.2.2.6 Netzplan	237
7.2.2.7 Problem-Entscheidungs-Plan	239
7.2.2.8 Quality Function Deployment und House of Quality	240
7.2.3 Weitere angewandte Methoden	245



<b>7.3</b>	<b>Risikomanagement</b>	<b>245</b>
7.3.1	Risikoarten	246
7.3.2	Risikokategorien	248
7.3.2.1	Marktrisiken	248
7.3.2.2	Finanzrisiken	249
7.3.2.3	Organisationsrisiken	249
7.3.2.4	Rechtliche Risiken	249
7.3.2.5	Politische Risiken	250
7.3.2.6	Managementrisiken	251
7.3.2.7	Produktion und Logistikrisiken	251
7.3.2.8	Forschungs- und Entwicklungsrisiken	252
7.3.2.9	Umweltrisiken	253
7.3.2.10	Wetterrisiken	253
7.3.2.11	Risiken aus der Informationstechnologie	254
7.3.2.12	Technische Risiken	255
<b>7.4</b>	<b>Risikomanagementprozesse</b>	<b>255</b>
7.4.1	Risikoidentifikation	257
7.4.2	Risikoanalyse und Risikobewertung	259
7.4.2.1	Risikomatrix	259
7.4.2.2	Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse	261
7.4.2.3	Die Fehlerbaum- und Auswirkungsanalyse	262
7.4.2.4	Vergleich der Risikoanalysemethoden	266
7.4.3	Risikobewertung	267
7.4.4	Risikobewältigung	269
7.4.4.1	Vermeiden	270
7.4.4.2	Reduzieren	271
7.4.4.3	Übertragen	271
7.4.4.4	Akzeptieren	271
7.4.5	Risikohandhabung	272
7.4.5.1	Zuverlässigkeitsorientierte Strategie	272
7.4.5.2	Schadensausmaßorientierte Strategie	274
7.4.5.3	Risikoorientierte Strategie	275
7.4.5.4	Vergleich der Strategien	275
7.4.5.5	Weitere Strategien	276
7.4.6	Risikoüberwachung	276
7.4.6.1	Überwachung der Risikobewältigungsmaßnahmen	277
7.4.6.2	Überwachung der Risikomanagementprozesse	277
<b>8</b>	<b>UMFASSENDE ZUSTANDBEWERTUNG UND RISIKOANALYSE VON GENERATOREN UND TRANSFORMATOREN</b>	<b>279</b>
<b>8.1</b>	<b>Umfassende Zustands- und Risikobewertung von Generatoren</b>	<b>279</b>
8.1.1	Maschinenpark	280
8.1.2	Bewertung der Betriebsmitteldaten	281
8.1.2.1	Altersstruktur und Betriebsstunden	281
8.1.2.2	Anlaufvorgänge und äquivalente Betriebsstunden	284
8.1.2.3	Grobabschätzung des Zustands	286
8.1.2.4	Isoliersystem	288
8.1.2.5	Löttechnik	291
8.1.2.6	Zustandskennzahlen Betriebsmitteldaten	292
8.1.3	Bewertung der technischen Diagnostik	294
8.1.3.1	Isolationswiderstandsmessung (IR)	295
8.1.3.2	Verlustfaktormessung ( $\tan \delta$ , TD)	299
8.1.3.3	Teilentladungsmessung (TE)	305
8.1.3.4	Zustandskennzahlen technische Diagnostik	309
8.1.4	Bewertung der visuellen Inspektion	311
8.1.5	Gesamtzustand	315
8.1.6	Risikoanalyse	316
8.1.6.1	Risikodefinition, Risikoarten	316

8.1.6.2	Risikobewertung, Risikomatrix	317
8.1.6.3	Interpretation der Risikoanalyse	319
8.1.7	Empfohlene Instandhaltungsintervalle und -maßnahmen	320
8.1.7.1	Optimierung der Instandhaltungsstrategie	320
8.1.7.2	Erneuerungsstrategie	320
<b>8.2</b>	<b>Umfassende Zustands- und Risikobewertung von Transformatoren</b>	<b>321</b>
8.2.1	Bewertung der Betriebsmitteldaten	322
8.2.1.1	Altersstruktur	322
8.2.1.2	Zustandskennzahlen Betriebsmitteldaten	324
8.2.2	Bewertung der technischen Diagnostik	325
8.2.2.1	Bewertung der chemisch-physikalischen Ölanalyse	326
8.2.2.2	Bewertung der Gas-in-Öl Analyse	330
8.2.2.3	Bewertung der Furananalyse	333
8.2.2.4	Zustandskennzahlen technische Diagnostik	334
8.2.3	Bewertung der visuellen Inspektion	336
8.2.4	Gesamtzustand	336
8.2.5	Risikoanalyse	337
8.2.5.1	Risikodefinition, Risikoarten	338
8.2.5.2	Risikobewertung, Risikomatrix	338
8.2.5.3	Interpretation der Risikoanalyse	341
8.2.6	Empfohlene Instandhaltungsintervalle und -maßnahmen	341
<b>9</b>	<b>RESÜMEE UND AUSBLICK</b>	<b>345</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>349</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 *Motivation und Zielsetzung*

Diese Habilitation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der Technischen Universität Graz in den Jahren 2004 bis 2008 entstanden. Während meiner wissenschaftlichen Forschungsarbeit, Lehr- und Drittmitteltätigkeit konnte ich in vielen Bereichen der Energietechnik einen tiefen Einblick in die umfangreiche Thematik der Hochspannungstechnik und deren Managementmethoden erlangen. In dieser Habilitation sollen sämtliche Themen zur Zustandsbewertung, Qualitätsbeurteilung und Zuverlässigkeit elektrischer Geräte und deren Komponenten aufgezeigt, diskutiert und zusammengefasst werden, wobei versucht wurde auf bekannte bzw. konventionelle Methoden einzugehen und neue aufzuzeigen bzw. deren Anwendbarkeit gegenüberzustellen.

Das Thema dieser Habilitation wurde mit „**Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik**“ gewählt, obwohl das titulierte Thema viel tief greifender und weit reichender ist als eine klassische Beschreibung einzelner Methoden von diagnostischen Messungen oder Bewertungswerkzeugen und Managementprozessen. Die Zielsetzungen dieser Arbeit sollen vor allem in den Zusammenhängen dieser überschneidenden Problemstellungen und der Verdeutlichung eines notwendigen Gesamtkonzeptes zur Erlangung eines zuverlässigen und störungsfreien Betriebs in einem wettbewerbsorientierten Elektrizitätsmarkt gesehen werden.

Als Basis für diese Habilitation wurden fundierte wissenschaftliche Quellen wie Dissertationen, Habilitationen, die klassischen Bücher der Hochspannungstechnik oder Zeitschriftenartikel und Publikationen von Fachvorträgen herangezogen. Darauf aufbauend wurden Ergebnisse aus messtechnischen Untersuchungen und selbst recherchierten Statistiken eingebaut, die so manchmal neue Erkenntnisse brachten und den Wandel der Technologie und die geänderte Philosophie des Geräteeinsatzes widerspiegeln. Vorweg muss hier auf die durch die Liberalisierung des Elektrizitätsmarkts hervorgerufenen Änderungen in vielen Bereichen hingewiesen werden. Jahrzehntelange bestehende Strukturen in der Organisation und Budgetplanung von Energieunternehmen und den damit unmittelbar

verbundenen Eingriffen in die Instandhaltung, den Betrieb und die Belastung von Hochspannungsgeräten wurden durch eine EU-Richtlinie aufgebrochen und haben eine Art Strategieänderung in vielen Bereichen notwendig gemacht. Wenngleich wirtschaftswissenschaftliche „Spielregeln“ an konjunkturelle Anforderungen und rechtliche Rahmenbedingungen an Grundsätzen der europäischen Union angepasst werden können, so lassen sich bislang Betriebsmittel nur bis an den Rand ihrer physikalische Grenzen dimensionieren und betreiben, was zumeist mit einer Verkürzung der Lebensdauer und somit einer Reduktion der Zuverlässigkeit verbunden ist.

Zu Beginn soll das Lehrfach Hochspannungstechnik dargestellt und in einem historischen Überblick die Entwicklungsgeschichte von Hochspannungsgeräten gezeigt werden. Im speziellen werden Generatoren, Transformatoren und Leitungen herausgegriffen, die verwendeten Systeme, Materialien und Konstruktionen gegenübergestellt und der Stand der Technik, neue Technologien und mögliche Entwicklungspotenziale aufgezeigt.

Ein wesentlicher Teil dieser Habilitation stellt jenes Kapitel dar, welches die methodische Vorgangsweise der Zustandsbewertung ausführlich dargelegt. Für die Zustandsbewertung sind sowohl die Resultate von diagnostischen Messungen, die Betriebsbedingungen und die Betriebsmitteldaten als auch das Wissen über Alterungsmechanismen, die das Lebensdauerverhalten bestimmen, dominierend, denen ebenso ein Kapitel eingeräumt wird. Das Um und Auf einer qualitativ hochwertigen Zustandsbewertung sind die diagnostischen Messungen an Hochspannungsgeräten und die Interpretation der Messergebnisse. Neben den klassischen Messmethoden und Messgeräten für die Zustandsbeurteilung wird besonders auf neue eingegangen und deren Einsatzmöglichkeiten und Aussagekraft gegenübergestellt. Die Ursachen der Alterungsmechanismen werden physikalisch modelliert und deren Einfluss auf die Lebensdauer in Form von Lebensdauerkurven dargestellt.

Um diese Tendenzen wissenschaftlich zu hinterlegen, werden Statistiken herangezogen, wobei hierbei zu unterscheiden ist zwischen Statistiken, die systembezogen oder komponentenbezogen erstellt sind. In der

Hochspannungstechnik sind jedenfalls die komponentenbezogenen von höherer Bedeutung, da diese eine unmittelbare Aussage über die Qualität und Zuverlässigkeit des betrachteten Objekts liefern. Leider werden zumeist nur systembezogene Statistiken erfasst und öffentlich zugänglich gemacht, deren Informationsgehalt für Betreiber von elektrischen Netzen wesentlich ist. Basierend auf den Kenntnissen der Statistik können Ausfalls- und Zuverlässigkeitsanalysen erstellt werden. Es wird daher ein spezielles Augenmerk auf komponentenbezogene Lebensdaueranalysen gelegt und versucht das Lebensdauerverhalten mathematisch zu formulieren.

Für weiterführende Analysen sind anhand der vorliegenden Daten aussagekräftige Kenngrößen zu definieren, die durch entsprechende Gewichtung der untersuchten Parameter Berücksichtigung finden. Die Bedeutung des Qualitätsmanagements wird durch Methoden zur Verbesserung bzw. Optimierung von Arbeitsprozessen und Analysen von Untersuchungsergebnissen deutlich gemacht. Spezielle Anwendungsfälle und deren Einfluss in der Hochspannungstechnik werden exemplarisch herausgearbeitet, beispielsweise soll an dieser Stelle das so genannte Benchmarking als Qualitätsmanagementmethode genannt werden.

Auch auf den Bereich des Risikomanagements soll ein Blick geworfen werden, da sich dieser Themenbereich zunehmend in der Energietechnik etabliert bzw. festgesetzt hat. Zuerst werden relevante Risikoarten und Auswirkungen von potenziellen Störquellen aufgezeigt, die anhand der Methoden des Risikomanagements zu analysieren und bewältigen sind. Verschiedene Möglichkeiten zur Risikobewertung und -handhabung werden aufgezeigt sowie Strategien zur Risikobewältigung dargestellt.

Den Abschluss dieser Arbeit bilden zwei umfangreiche Praxisbeispiele zur Vorgangsweise der umfassenden Zustandsbewertung und Risikoanalyse von elektrischen Betriebsmitteln. Einerseits werden die Generatoren einer Kraftwerksgruppe und andererseits die Transformatoren eines Industrienetzes bewertet.

## 1.2 Das Lehrfach Hochspannungstechnik

Die Hochspannungstechnik ist ein Teilgebiet der Elektrotechnik, wobei es Überschneidungen mit anderen technischen Studienrichtungen gibt. Die Position der Hochspannungstechnik in der Lehre und speziell in der elektrischen Energietechnik hat in den letzten Jahren insofern einen Wandel durchgemacht, als das Interesse der Industrie aufgrund der zunehmenden Investitionen gestiegen ist und der Studentenzustrom einen Anstieg verzeichnen kann. Aufgrund der überschneidenden Wissensgebiete ist ein Einblick in die Grundlagen anderer technischer Studien erforderlich. Inhalt des Fachgebiets sind sowohl die theoretischen mathematischen und materialwissenschaftlichen Grundlagen (Physik, Chemie, Elektronik, Maschinenbau usw.) als auch die Anwendungen im energietechnischen Sektor (Dimensionierung, Feldberechnung, Versuchs- und Prüftechnik usw.) bis hin zu den höchsten Spannungsebenen. Im Bereich der Isolierstoffe wird das Gebiet der Materialwissenschaften und des Maschinenbaus berührt, wobei chemische und physikalische Grundlagen eine wichtige Rolle spielen. Für die Dimensionierung, Berechnung und Simulation sind mathematische Grundlagen und die Feldtheorie unerlässlich. Für die Mess- und Prüftechnik wird die Kenntnis elektronischer Bauteile und der Datenübertragung sowie der Informationstechnologie vorausgesetzt. In einigen Teilgebieten spielt auch die Umwelt- und Verfahrenstechnik eine wichtige Rolle.

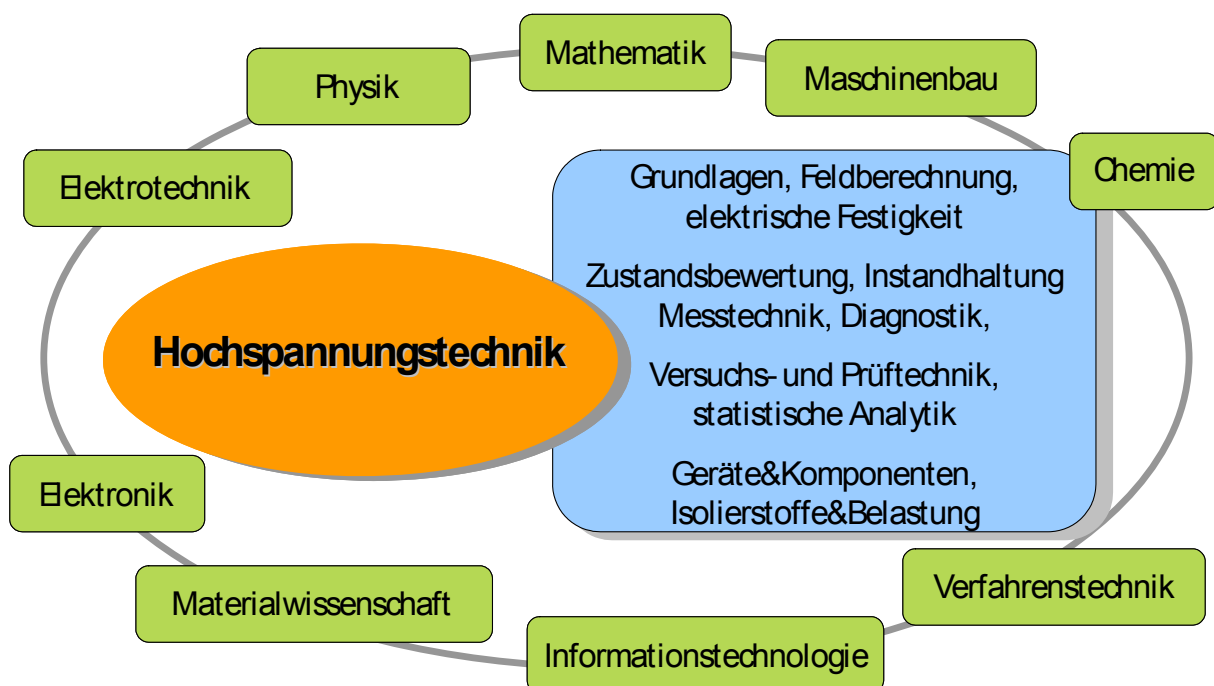


Abbildung 1-1: Position der Hochspannungstechnik

Die Abbildung 1-1 soll einen Überblick über die überschneidenden Wissensgebiete der Hochspannungstechnik geben.

### **1.2.1 Aufgaben, Anwendungen und Perspektiven der Hochspannungstechnik**

Das Fachgebiet der Hochspannungstechnik beschäftigt sich mit der Entstehung und der Erzeugung sowie der Beherrschung hoher Spannungen, deren unterschiedlichen Erscheinungsformen in der Natur und in elektrischen Anlagen, den Auswirkungen auf die eingesetzten Geräte, der Beeinflussung der Umwelt sowie der Konstruktion von Geräten, ferner der Auswahl und Dimensionierung der eingesetzten Materialien. In der Vergangenheit wurde der Schwerpunkt auf die Dimensionierung von Komponenten und deren Prüfung gesetzt. Neuerdings ergeben sich Anforderungen zur Zustandsbewertung und zur Evaluierung der Restlebensdauer, die mittels Monitoring und technischer Diagnostik umgesetzt werden sollen. Ein wesentlicher Punkt ist auch die Art des Betriebs und der Instandhaltung der Geräte, die durch unterschiedliche Managementmethoden durchgeführt werden können.

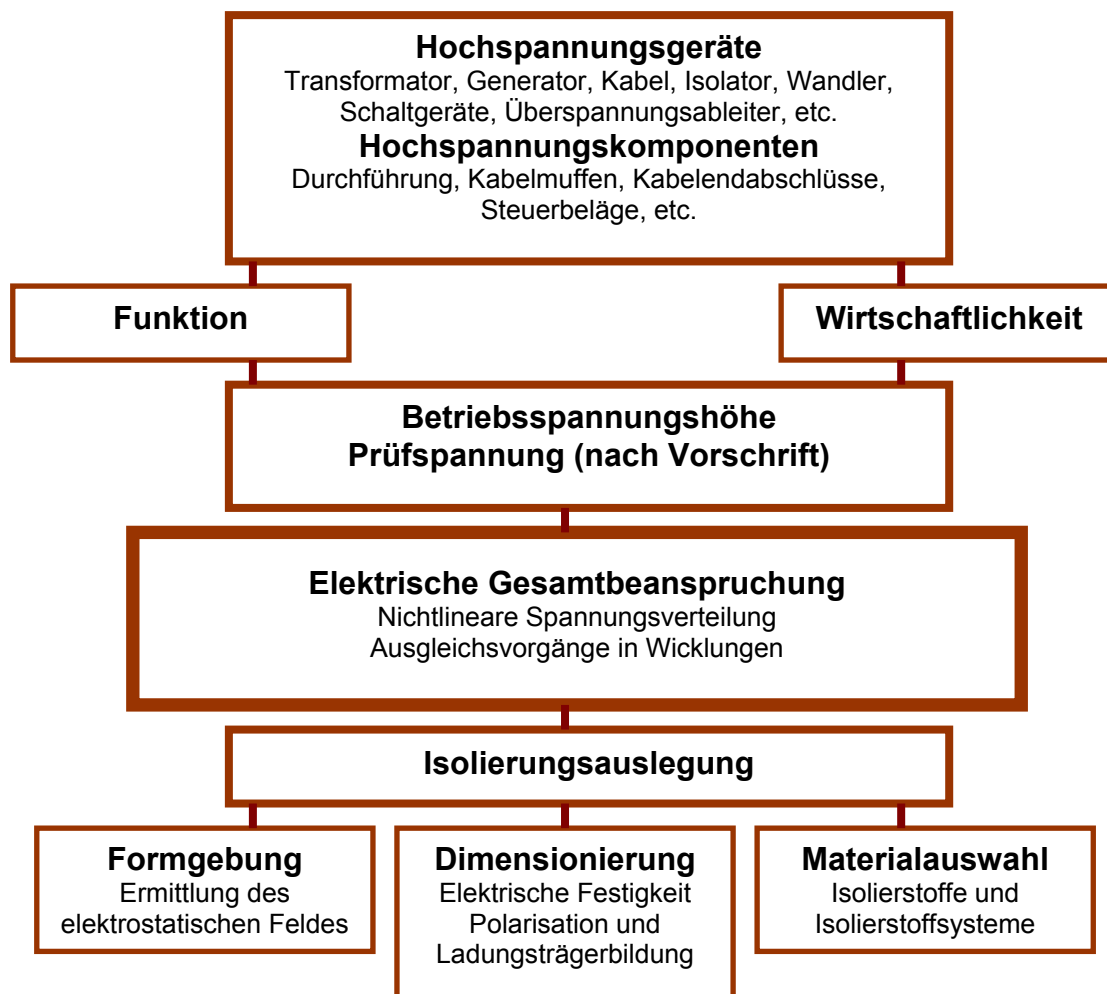
Neben diesen Anwendungen im Bereich der elektrischen Energietechnik sind auch noch jene zu erwähnen, die zu anderen Wissensgebieten bzw. Technologien zu zählen sind. Die Elektrofilter beispielsweise werden mit hohen Gleichspannungen versorgt, um die Abluft von Industrieanlagen oder Tunnels zu reinigen. Im medizintechnischen Bereich werden Röntgenapparate oder Geräte für die bildgebende Diagnostik eingesetzt, die mit Hochspannungskomponenten betrieben werden. Aber auch in der Unterhaltungselektronik ist bei Bildröhren oder Kopierern und Druckern Hochspannungstechnik für gewisse Baugruppen gefragt.

Es ist also ersichtlich, dass in den letzten Jahren das klassische Bild der Hochspannungstechnik um eine Vielzahl von neuen Themen, Praktiken und Messmethoden erweitert wurde. Die Hochspannungstechnik ist daher ein fachgebietsübergreifendes Lehrfach, das von den Grundlagen der Elektrotechnik über chemische und physikalische Vorgänge, bis hin zur Materialwissenschaften einen breiten Bogen spannt.

### **1.2.2 Einteilung der Hochspannungstechnik**

Das Lehrfach Hochspannungstechnik wird klassischer Weise in mehrere Fachbereiche eingeteilt. Die Prüf- und Versuchstechnik beinhaltet die Spannungserzeugung und die Hochspannungsmesstechnik samt technischer

Diagnostik sowie statistische Bewertung der Versuchsergebnisse. Der Bereich Hochspannungsgeräte beinhaltet die Material- und Isolierstofftechnik, Formgebung, Dimensionierung, Feldberechnung und elektrische Festigkeit. Das Teilgebiet Gesamtbeanspruchung umfasst die Auseinandersetzung mit sämtlichen Belastungsarten während des Betriebs und im Störfall aufgrund von inneren und äußeren Überspannungen sowie Gegenmaßnahmen und die Isolationskoordination. Am Institut werden auch noch folgende Gebiete der Hochspannungstechnik zugeordnet: Hochstromtechnik, Umwelttechnik sowie Managementmethoden.



**Abbildung 1-2: Teilgebiete der Hochspannungstechnik**

In dieser Habilitation wird der Schwerpunkt auf den Stand der Technik gelegt, ebenso sollen neue technische Möglichkeiten und Methoden aufgezeigt werden. Im Folgenden sollen die einzelnen Themenbereiche dargestellt, inhaltlich präsentiert und der eigene Lehr- und Forschungsbereich vorgestellt werden.



### **1.2.2.1 Elektrische Beanspruchung, Dimensionierung und Feldberechnung**

Hochspannungsbetriebsmittel sind unterschiedlichsten Beanspruchungen ausgesetzt, wobei in der Hochspannungstechnik die elektrische Beanspruchung besondere Behandlung findet. Neben den Grundlagen des elektrischen Felds und dessen mathematischer Beschreibung mittels Feldtheorie nach Maxwell wird auch die Art der Feldbelastung unterschieden. Die elektrischen Felder werden eingeteilt in statische und stationäre, quasistationäre und nichtstationäre Felder. Die Isoliersysteme von Hochspannungsgeräten unterliegen daher sehr unterschiedlichen Anforderungen, die Geräte müssen daher entsprechend der jeweiligen Beanspruchung dimensioniert werden.

Ein Schwerpunkt der Forschungstätigkeit stellt die kombinierte Beanspruchung durch unterschiedliche Größen dar. So sind die komplexen Zusammenhänge elektrischer, thermischer und mechanischer Belastungen unter Einwirkung diverser Umweltparameter zumeist nur auf experimentellem Weg erfassbar und beschreibbar. Nur in wenigen Fällen kann auf physikalische Gesetzmäßigkeiten zurückgegriffen werden, als Beispiel soll die Druckabhängigkeit des Gasdurchschlags und der Beschreibung mittels Paschengesetz erwähnt werden. Vielfältige Untersuchungen werden an feststoffisolierten Systemen (Generatoren, Transformatoren) mit der Zielrichtung durchgeführt, deren Spannungsfestigkeit besser zu verstehen. Das Treeingwachstum ist nicht nur von der elektrischen Feldstärke abhängig, sondern es wird auch durch mechanische Zug- oder Druckkräfte verändert. Ein besonders interessantes Versuchsfeld ist die kombinierte elektrische und thermische Alterung, die zumeist mit erhöhtem Prüfpegel in Form von Dauerversuchen angewandt wird.

Während meiner Zeit als Assistent konnte ich am Institut im Bereich der elektrischen Belastung umfangreiche Versuchsreihen an Generatorstäben durchführen, die den Fokus auf das Alterungsverhalten haben. Es wurden mehrere Publikationen in Journalen und Konferenzbeiträgen verfasst und Studien sowie praktische Versuchsdurchführungen im Rahmen diverser Projekte realisiert.

Für die Dimensionierung von Hochspannungskomponenten ist die Auseinandersetzung mit der Feldtheorie und der Lösung von komplexen Feldgleichungen unumgänglich. Durch den Einsatz leistungsstarker Rechnersysteme

und Computerprogramme können immer komplexere Feldprobleme im mehrdimensionalen Raum bei statischer und dynamischer Belastung berechnet werden. Die analytische Lösung und grafische Verfahren rücken dadurch zunehmend in den Hintergrund, wenngleich diese Methoden als einfache Mittel zur groben Abschätzung und Skizzierung der Problemlösung gut geeignet sind.

In diesem Themenbereich konnte ich an mehreren Projekten teilnehmen, die sich mit der Feldberechnung elektrischer Kabelanlagen, gasisolierter Leitungen und Freileitungen auseinandersetzten. So wurden dabei für erdverlegte Kabel die magnetischen und thermischen Felder berechnet, um ein optimales Verlegeprofil zur Lastoptimierung herauszufinden. Bei Freileitungen wurden die elektrischen und magnetischen Felder ermittelt, um die Feldbelastung auf die Umwelt zu minimieren. Bei den gasisolierten Leitungen war die Feldbelastung durch das Magnetfeld von besonderem Interesse, da diese Anlagen zumeist in Tunnel und Kabelschächten verlegt sind und das Betriebspersonal einer erhöhten Strahlenexposition ausgesetzt ist. Dieser Themenbereich wird auch in der von mir abgehaltenen Pflichtvorlesung „Hochspannungstechnik 1“ aus dem Wahlfachkatalog „Energietechnik“ ausführlich behandelt.

#### **1.2.2.2 Elektrische Festigkeit, Isolierstofftechnik**

Eine der wesentlichen Aufgaben in der Hochspannungstechnik ist die auftretende elektrische Belastung zu beherrschen. Die elektrische Festigkeit stellt eine Größe dar, die aufgrund äußerer und innerer Vorgänge einer gewissen statistischen Schwankung unterliegt. Innere Ursachen können Inhomogenitäten des Materials, physikalische oder chemische Veränderungen aufgrund der Belastung sein. Zu den äußeren Ursachen sind hauptsächlich veränderte Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur, Feuchte) zu zählen. Ausgehend von einer zufälligen Verteilung der Durchschlagswerte kann eine Verteilungsfunktion abgeleitet werden. In der Hochspannungstechnik wird aufgrund der einfachen Handhabung die zweiparametrische Weibullverteilung bevorzugt angewendet. Von dieser Verteilungsfunktion können weitere statistische Größen wie Ausfallrate, Dichtefunktion oder Zuverlässigkeit abgeleitet werden. Bei Vorliegen einer entsprechend großen Versuchsreihe können passende Lebensdauer kennlinien und diverse andere statistische Größen abgeleitet werden.

Bei der Beschreibung der elektrischen Festigkeit wird zwischen Durchschlägen in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen unterschieden. Der Gasdurchschlag und seine unterschiedlichen Erscheinungsformen wurden schon früh beschrieben. Mit Hilfe der Gasentladungskennlinie und des Paschen Gesetzes lassen sich sehr exakte Vorhersagen über das Festigkeitsverhalten ableiten. Der Flüssigkeitsdurchschlag wird im Grunde auf einen Gasdurchschlag zurückgeführt, wobei mehrere Theorien bestehen. Beim Festkörperdurchschlag unterscheiden sich unterschiedliche Arten: rein elektrischer Durchschlag (Treeing) sowie Wärmedurchschlag, Alterungs- bzw. Erosionsdurchschlag. Das Phänomen der Teilentladungen stellt einen Teilbereich dar, der in der Hochspannungsmess- und Prüftechnik besondere Bedeutung findet.

In der Isolierstofftechnik geht es um die Beschreibung und Einteilung der in der Hochspannungstechnik eingesetzten Materialien und Werkstoffe. Es existieren verschiedene Möglichkeiten der Einteilung, wobei zumeist jene aufgrund der Aggregatzustände bevorzugt wird. So unterscheidet man feste, flüssige und gasförmige Stoffe, die in Isoliersystemen kombiniert werden können. Chemisch betrachtet kann man zwischen organischen und anorganischen unterscheiden. Neben den natürlichen Stoffen sind die Kunststoffe immer stärker vertreten. Die Kunststoffe lassen sich in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste einteilen. Im Bereich der Materialwissenschaft rückt die Nanotechnologie immer mehr in den Vordergrund. Mit Hilfe dieser relativ neuen Technologie lassen sich Werkstoffe regelrecht designen und spezielle Eigenschaften können ausgeprägt werden. Das Ziel ist eine bessere Materialausnutzung bei geringeren Kosten und längerer Nutzungsdauer. Nicht alle Zukunftstechnologien konnten letztendlich Fuß fassen, so liegt die Entdeckung der Supraleitung bereits mehrere Jahrzehnte zurück. Es wurden einige Projekte im Bereich Kabel, Generatoren und Transformatoren realisiert und deren Einsatz in der Praxis demonstriert, jedoch konnten sich nur Nischenprodukte wie Strombegrenzer oder Magnetspeicher behaupten.

Am Institut konnte ich in diesem Teilgebiet diverse Festigkeitsuntersuchungen an festkörperisolierten Betriebsmitteln und Hochspannungskomponenten durchführen. Zum Themenkreis Isoliersysteme für Tieftemperaturanwendungen habe ich meine Dissertation verfasst. Es wurden mehrere Diplomarbeiten betreut, die sich mit innovativen Isoliersystemen für supraleitende Betriebsmittel und Werkstoffe mit

Nanotechnologie beschäftigten. Es konnten auch mehrere Publikationen in internationalen Fachmagazinen veröffentlicht werden. Die von mir aufgebaute Vorlesung „Neue Technologien in der Isolierstofftechnik“ beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Isolierstofftechnologie und Innovationen in der elektrischen Isolierstofftechnik.

### **1.2.2.3 Hochspannungsprüftechnik**

Für die Fertigung hochspannungstechnischer Komponenten ist der Nachweis der Spannungsfestigkeit ein notwendiges Muss. Mit Hilfe der Hochspannungsprüftechnik wird zumeist der Nachweis über die entsprechende elektrische Festigkeit erbracht. Es ist zwischen Prüfungen zum Beleg der Dauerbelastung als auch der Kurzzeitexposition zu unterscheiden. In den Normen und Vorschriften sind die entsprechenden Belastungsarten zu finden. Für bereits in Betrieb befindliche Geräte finden andere Prüfpegel und Prüfungen Anwendung als für neue, da diese durch die Betriebsbelastung schon gealtert sind und durch die Prüfung nicht zerstört werden sollen. Es nimmt daher die Erzeugung der Prüfspannungen im Prüffeld eine besondere Bedeutung ein. Durch die Anforderungen den Betrieb möglichst unterbrechungsfrei zu gestalten etablieren sich mobile Prüfanlagen zunehmend, die eine Vor-Ort Prüfung ermöglichen.

In der Hochspannungsprüftechnik unterscheidet man unterschiedliche Arten von Prüfungen. Die Stehspannungsprüfung dient zum Nachweis der Übereinstimmung der Isolierung mit der Bemessungsspannung. In der Norm IEC 60071-1 werden die Pegel für:

- Kurzzeit-Wechselspannungsprüfung
- Schaltstoßspannungsprüfung
- Blitzstoßspannungsprüfung und
- Kombinierte Spannungsprüfungen festgelegt.

Weisen die Prüfobjekte ein nichtselbtheilendes Isoliersystem auf, so sind keine Durchschläge zulässig. Im Fall von selbstheilenden Isoliersystemen kann eine statistische Stehspannung mit einer festgelegten Anzahl von Durchschlägen pro Prüfung zugelassen werden, wie dies bei Gasstrecken der Fall ist.

In der Hochspannungsprüftechnik kann zwischen Typprüfungen und Stückprüfungen unterschieden werden. Die Typprüfung dient dazu, die Spannungsfestigkeit eines

bestimmten Isoliersystems (Typ) nachzuweisen, wogegen bei der Stückprüfung alle Objekte geprüft werden. Im Rahmen von Wiederholungsprüfungen wird der Isolierpegel nach jahrelangem Betrieb erneut nachgewiesen. Zu jeder Bezugsspannung existieren meist mehrere verschiedene Prüfspannungspegel, die einen unterschiedlichen Sicherheitsgrad repräsentieren. Je nach der erwarteten Belastung ist ein entsprechend hoher Pegel zu wählen, der im Rahmen der Isolationskoordination oder auch der Sternpunktsbehandlung festgelegt wird.

Ein Teilgebiet der Hochspannungsprüftechnik ist die für die Prüfung erforderliche Erzeugung hoher Spannungen. Es wird zwischen Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen für Prüfzwecke unterschieden.

Gleichspannungen werden zur Prüfung von Energieübertragungskomponenten mittels hoher Gleichspannung (HGÜ) eingesetzt sowie für diagnostische Messungen im Bereich der dielektrischen Diagnostik. Hohe Gleichspannungen werden jedoch auch als Versorgungsspannung unterschiedlichster technischer Geräte im Alltag, Medizintechnik und Industrie (Bildröhren, Röntgenapparate, Elektrofiter, etc.) eingesetzt. Erzeugt wird die hohe Gleichspannung zumeist aus einer mittels Gleichrichter umgeformten Wechselspannung in Verbindung einer Vervielfacherschaltung. Charakterisiert wird die Qualität der Gleichspannung durch deren Welligkeit.

Die Erzeugung von Wechselspannungen erfolgt bis in eine Höhe von etwa 400kV mittels einstufiger Prüftransformatoren, für höhere Spannungen werden mehrere Transformatoren kaskadiert. Müssen Prüflinge hoher Kapazität geprüft werden, so ist eine Kompensation der kapazitiven Last erforderlich. Für die Vor-Ort Prüfung von Anlagen werden verstärkt Resonanzanlagen eingesetzt, da diese einen wesentlichen Gewichtsvorteil bieten. In manchen Fällen kommen Wechselspannungsprüfanlagen mit sehr niedriger Frequenz (Very Low Frequency VLF - 0,1Hz) zum Einsatz. Auch diese Anlagen weisen geringes Gewicht auf und werden daher für den mobilen Einsatz zur Prüfung von Kabelanlagen eingesetzt. Bei Wechselspannung wird der Spannungswert immer als Scheitelwert durch Wurzel aus zwei (dies entspricht dem Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung) angegeben, da der Scheitelwert

für den Durchschlag entscheidend ist. Die Kurvenform ist also auch ein zu beachtendes Kriterium bei Wechsellspannung.

Die Prüfung mit Stoßspannung wird zur Simulation von nicht netzfrequenten Störungen verwendet. Es wird zwischen Blitzüberspannungen (äußere Überspannungen) und Schaltstoßspannungen (innere Überspannungen) unterschieden. Die Verläufe der Stoßspannung sind in den Normen festgelegt und weisen eine aperiodische Form auf. Blitz- und Schaltstoßspannung unterscheiden sich durch deren Anstiegszeit (Stirnzeit bzw. Scheitelzeit) und Rückenhalbwertszeit. Die Erzeugung von Stoßspannungen erfolgt grundsätzlich durch Aufladen einer Belastungskapazität aus einem kapazitiven Energiespeicher und durch Entladen nach Zünden einer Funkenstrecke über einen Dämpfungswiderstand. Es liegen daher zwei überlagerte Exponentialfunktionen vor, die durch Wahl der jeweiligen Elemente bestimmt werden können. Werden Stoßspannungen über etwa 100kV benötigt, so wird ein mehrstufiger Stoßkreis aufgebaut. Durch paralleles Aufladen und seriell Entladen können auf diese Weise Spannungen bis zu mehreren MV erzeugt werden.

Die Sicherheitstechnik stellt ein sehr wichtiges Teilgebiet dar. Neben den sicherheitstechnischen Einrichtungen zählen auch die Unterweisung des Personals und die Kenntnis über Erste Hilfe Maßnahmen zu den unerlässlichen Erfordernissen im Hochspannungslabor. Zu den wichtigsten Sicherheitselementen zählen Absperrungen, automatische Schutzeinrichtungen, schaltungstechnische Verriegelungen, mechanischer Berührungsschutz, Erdungs- und Schirmungsmaßnahmen sowie Sicherheitsabstände, Schilder und Warnlampen. Die Kenntnis der fünf Sicherheitsregeln ist unablässig und es ist eine entsprechende Befähigung (Schaltberechtigung) für das selbständige Arbeiten in Hochspannungsanlagen erforderlich.

Auch im Bereich der Hochspannungsprüftechnik konnte ich einige praktische Erfahrungen im Rahmen von Untersuchungen sowie Abnahme- und Inbetriebnahmeprüfungen an der Versuchsanstalt sammeln. Hervorzuheben sind die Stabprüfungen an Generatoren eines Geräteherstellers im Werk und im Labor,

Alterungstests und Kabelversuche zur Bestimmung der Spannungsfestigkeit. Auch in diesem Bereich wurden Konferenzbeiträgen publiziert.

#### **1.2.2.4 Hochspannungsmesstechnik**

Die Hochspannungsmesstechnik stellt ein Spezialgebiet der elektrischen Messtechnik dar, welche sich mit der Messung hoher Spannungen und Ströme beschäftigt. Als Teilgebiete sind die technische Diagnostik und Monitoring an Hochspannungsgeräten aufzuzählen, wobei elektrische und dielektrische von nichtelektrischen Messmethoden (magnetische, mechanische, chemische, optische udgl.) unterschieden werden.

Messfunkenstrecken wurden früher zur Messung der Spannung eingesetzt. Die Messfunkenstrecke stellt eine direkte Messmethode dar, bei der mittels Durchschlagversuchen aus der Schlagweite auf den Scheitelwert der Spannung geschlossen werden kann, indem mit Hilfe von Tabellen der Scheitelwert der 50%-Durchschlagsspannung bestimmt wird, wobei die Geometrie der Elektroden einen bedeutenden Einfluss hat. Damit ein korrekten Wert resultiert, sind die Umgebungsbedingungen (Luftdruck und Temperatur) zu berücksichtigen und das Ergebnis zu korrigieren. Die Feuchte der Luft geht nur mit untergeordneter Rolle ein. Kugelfunkenstrecken können als Kalibriermittel mit einer Messunsicherheit von bis zu 3% eingesetzt werden.

Mittels elektrostatischer Voltmeter ist ebenfalls eine Spannungsmessung möglich. Aufgrund der elektrischen Feldwirkung kommt es zur Auslenkung eines Feldplättchens, dem eine mechanische Federkraft entgegenwirkt. Im Gleichgewichtszustand liegt ein bestimmtes System vor, das zwar eine quadratische Abhängigkeit von der Spannung aufweist, aber durch eine entsprechende Skalierung linearisiert werden kann. Aufgrund der Systemträgheit funktioniert das elektrostatische Messprinzip auch bei Wechselspannung. Es wird der Mittelwert des Spannungsquadrats angezeigt, womit eine echte Effektivwertmessung vorliegt.

Sind sehr hohe Spannungen oder Ströme zu messen, so müssen diese mittels Spannungsteilern oder Wandlern zuerst umgeformt werden, um sie danach einem Messgerät zuzuführen. Bei den Spannungsteilern ist das Übertragungsverhalten von entscheidender Bedeutung, es soll linear, frequenz- und temperaturunabhängig sein.

Es unterscheiden sich rein ohmsche von ohmsch kapazitiven, rein kapazitiven, gedämpft kapazitiven und kapazitiven Teiler mit Vorwiderstand. Zu beachten sind auch die auftretenden Streu- bzw. Erdkapazitäten, die das Übertragungsverhalten entscheidend beeinflussen können. Wandler werden eingesetzt, um betriebsfrequente hohe Spannungen oder Ströme elektrischer Versorgungsnetze zu messen. Induktive Wandler sind mit Prüftransformatoren vergleichbar, die überspannungsseitig angespeist werden und unterspannungsseitig das Messsignal auskoppeln. Für sehr hohe Spannungen kommen auch kapazitive Spannungswandler zum Einsatz, um den Materialaufwand (Eisenkern) zu reduzieren, dabei wird ein kapazitiver Teiler dem induktiven Wandler vorgeschaltet.

Die Strommessung an Niederspannungsleitern kann mittels Messzangen erfolgen, deren magnetischer Kreis eine Spannung an den Windungen um den aufklappbaren Eisenkern induziert. Rogowski-Spulen werden für die Messung schnell veränderlicher Vorgänge eingesetzt. Strommesswiderstände (Shunts) ermöglichen oftmals die Erweiterung des Messbereichs. Neuerdings werden auch optische Sensoren zur Strommessung eingesetzt, die nach dem Faraday-Prinzip funktionieren. Durch die Exposition im Magnetfeld ändern sich die optischen Eigenschaften, und es kommt zu einer Drehung der Polarisationssebene. Diese Sensoren werden als potenzialfreie Sensoren eingesetzt.

Die praktische Erfahrung der Hochspannungsmesstechnik ist eng mit meiner Tätigkeit im Labor und der Vor-Ort Diagnoseuntersuchungen an Kraftwerksgeneratoren verbunden. Auch hier kann wieder auf umfangreiche Publikationen in Konferenzbeiträgen und Fachjournalen verwiesen werden. Die Vorlesung „Vor-Ort Prüfung von Betriebsmitteln“ beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit Diagnoseprüfungen und ist daher eng mit der Hochspannungsmesstechnik verbunden.

#### **1.2.2.5 Diagnose und Monitoring**

Nicht nur der Nachweis der Spannungsfestigkeit ist ein wichtiger Bereich der Hochspannungstechnik, sondern auch der Zustand der Geräte tritt zunehmend in den Vordergrund. Ziel der Diagnose und des Monitoring sind differenzierte Aussagen über das Isoliersystem und die Detektion von Fehlern. Abseits der routinemäßigen Nachweisprüfung der Isoliereigenschaften gehen die Anforderungen an die Diagnose



insofern über jene der Prüftechnik hinaus, als nicht nur eine ja/nein Entscheidung getroffen werden muss, sondern selektiv Fehler erkannt werden sollen. Das Ziel ist fehleranfällige Betriebsmittel vor dem Eintritt eines Ausfalls zu erkennen und rechtzeitig entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Je nach Wiederbeschaffungswert und Auswirkung einer Störung sind die Diagnosemethoden auszuwählen. Je nach Betriebsmittel werden unterschiedliche Methoden ausgewählt und mit dem Instandhaltungsplan abgestimmt.

Zu den klassischen Methoden zählen die Messungen von Kapazität und Verlustfaktor bei Netzfrequenz, des Isolationswiderstands und die Teilentladungsmessung. In den letzten Jahren ist ein starker Zuwachs an dielektrischen Messmethoden zu verzeichnen, da die Auswahl an verfügbaren Geräten stark zunahm. Auch die Messung chemischer und physikalischer Parameter lässt eine Aussage über den Zustand des Isoliersystems zu. Starkes Interesse besteht auch im Bereich der permanenten Messwertaufzeichnung (Online-Monitoring und Diagnose) und an Expertensysteme, die bei Erreichen kritischer Pegel warnen oder bei Grenzwerten automatisch in den Betrieb der Geräte regelnd eingreifen. Die Regelungstechnik auf elektronischer Basis wird zunehmend von softwaregesteuerten Regelungen abgelöst und die Fernwirktechnik (Datenübertragung und Steuerung über Internet) ist längst Stand der Technik.

Für die Zustandsbewertung wird zumeist eine Messung und Evaluierung des Verlustfaktors durchgeführt. Mittels klassischer Scheringbrücke oder computerbasierter vektorieller Impedanzmessung werden der Verlustfaktor und die Kapazität gemessen, um eine globale Aussage über den Zustand zu bekommen. Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen ist die Temperaturabhängigkeit zu beachten. Der Isolationswiderstand wird gemessen, um eine Aussage über die Feuchte einerseits und um die Veränderung im Isolationssystem andererseits zu gewinnen. Der Isolationswiderstand ist sehr stark temperaturabhängig, daher sind immer die Umwelteinflüsse zu beobachten. Die Teilentladungsmessung dient der selektiven Erfassung von Fehlern des Isoliersystems. Zunehmend werden vollelektronische Messsysteme eingesetzt, die eine synchrone Mehrstellenaufzeichnung ermöglichen. Besonderes Augenmerk ist bei der Teilentladungsmessung auf die Kalibrierung und

Interpretation der Resultate zu legen. Je nach Wahl der Bandbreite, Filter und Messkoppler können Störsignale unterdrückt und die Empfindlichkeit erhöht werden.

Die Anwendung chemischer Analysen hat eine große Bedeutung in der Diagnostik. Bei Isolieröl hat neben der Feuchtebestimmung mittels Karl-Fischer-Titration auch die Gas-in-Öl Analyse sehr hohen Stellenwert für die Zustandsbewertung. Schlüsselgase, die auf die Fehlerursache schließen lassen, können detektiert und entsprechende Maßnahmen frühzeitig eingeleitet werden.

Zu den Isolierstoffprüfungen zählen die dielektrischen Messungen der Dielektrizitätszahl, des Verlustfaktors, des Durchgangswiderstands und des Oberflächenwiderstands. Zumeist erfolgt die Messung mittels Schutzringanordnung, um den Einfluss von Leckströmen zu vermeiden.

Durchschlagsmessungen werden zum Vergleich der elektrischen Festigkeit zwischen verschiedenen Isolierstoffen angewendet. Es sind dabei die Versuchsbedingungen der geltenden Norm genau zu beachten, da unterschiedliche Elektrodenformen, Materialdicken oder Umwelteinflüsse zu gänzlich anderen Ergebnissen führen und daher nicht vergleichbar und somit wertlos sind. Die Auswertung dieser Durchschlagsversuche hat mittels statistischer Methoden zu erfolgen, um die statistische Streuung so gering wie möglich zu halten.

Die Kriechstromfestigkeit beschreibt die Eigenschaften elektrisch belasteter Oberflächen von Isolierstoffen. Durch Verschmutzung der Oberfläche entsteht eine so genannte Fremdschicht, die die Stromverteilung verändert und die Strombahnen zusammendrängt. Dadurch kann es zu einer lokalen thermischen und elektrochemischen Belastung kommen, die zur Austrocknung und Teillichtbögen sowie Kriechspuren führen kann. Die genaue Prüfanordnung ist in den entsprechenden Normen festgelegt.

In den Bereich der dielektrischen Diagnostik fallen all jene Messungen an Dielektrika, die eine vollständige Systemantwort beinhalten und aus denen sich ein Ersatzschaltbild höherer Ordnung ableiten lässt. Es werden dabei die verschiedenen Polarisationsmechanismen im Frequenz- oder Zeitbereich beschrieben. Das

Polarisationsverhalten wird sehr stark von der Trockenheit des Isoliermediums beeinflusst. Das Feuchtaufnahmevermögen hängt bei einigen Isolierstoffsystemen vom Alterungszustand ab, daher werden diese Methoden gerne zur Beschreibung des Alterungszustands eingesetzt. Bei den Methoden im Zeitbereich unterscheidet man die Polarisations-/Depolarisationsstrommethode (PDC), die Rückkehrspannungsmethode (RVM) und die Isotherme Relaxationsstromanalyse (IRC). Bei den Frequenzbereichsanalysen sind die Frequency Domain Spectroscopy (FDS) und Frequency Response Analysis (FRA) von Bedeutung.

Die Entscheidung welche Diagnosemethoden eingesetzt werden hängt letztendlich beim Betreiber der Geräte und Netze ab. Dabei spielt sehr oft die Zuverlässigkeit der Detektion definierter Parameter eine große Rolle, aber auch das Intervall und der Aufwand der jeweiligen Messung sind von Bedeutung. Die Tendenz zu Expertensystemen ist zwar deutlich erkennbar, wird jedoch in absehbarer Zeit Experten nicht ersetzen können, da diese Systeme nur so gut sind, wie sie programmiert wurden und komplexe Vorgänge, wie dies im Falle von Alterungsvorgängen der Fall ist, von Computerprogrammen nicht so einfach erkannt werden können.

Der Schwerpunkt meiner praktischen Diagnostik liegt in der Evaluierung der Generatorprüfungen. Im Rahmen dieser werden an Generatoren im Kraftwerk der Isolationswiderstand, der Verlustfaktor sowie das Teilentladungsverhalten gemessen und die Ergebnisse entsprechend ausgewertet und interpretiert. Als Mitglied im Fachausschuss „Rotierende Elektrische Maschinen - REM“ des OVE und in verschiedenen CIGRE Arbeitsgruppen (Working Group D1) kann ich hierbei auf diverse Diskussionsbeiträge und Publikationen verweisen.

#### **1.2.2.6 Instandhaltung und Zustandsbewertung**

In den einschlägigen Normen und Vorschriften (siehe Kapitel 3.1) sind die Tätigkeiten und Maßnahmen der Instandhaltung weitgehend definiert. Aufgrund des Stufenbaus der Rechtsordnung gelten nicht nur österreichische Gesetze sondern auch EU Richtlinien zwingend. Jeder Betreiber einer elektrischen Anlage ist daher per Gesetz zur Instandhaltung verpflichtet. Die Wahl der besten Instandhaltungsstrategie bleibt dem Betreiber überlassen. Zumeist wird für wichtige

und teure Anlagen eine zustands- oder risikoorientierte Strategie gewählt, die zeit- oder ausfallsorientierte kommt nur bei untergeordneten Objekten zum Einsatz.

Die Zustandsbewertung spielt daher in der Instandhaltung und damit für den ordnungsgemäßen Betrieb eine wichtige Rolle. Es gibt verschiedene Ansätze für die Zustandsbewertung, wobei zumeist eine Interpretation von Messgrößen aussagekräftige Ergebnisse liefern. Wenn keine absoluten Grenzwerte definiert sind, sind Vergleichsmessungen eine hilfreiche Alternative. Neben der technischen Diagnostik kann auch eine Zustandsbewertung aufgrund vorliegender statistischer Vergleiche angestellt werden, dazu müssen entsprechende Betriebsmitteldatenbanken sowie Lebensdauer-/Fehlerstatistiken bekannt sein. Unter umfassender Zustandsbewertung sind die Bewertung der Betriebsart, der Resultate der technischen Diagnostik sowie die Einbeziehung der eingesetzten Technologie des Betriebsmittels und der Erfahrung mit diesem zu verstehen. Es sollte ein Gesamtbild aller verfügbaren Beobachtungsparameter erstellt und daraus der Zustand abgeleitet werden.

Am Institut habe ich mehrere Projekte im Bereich der Instandhaltung und Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln durchgeführt. Dabei wurden elektrische Netze, Generatoren und Transformatoren detailliert untersucht und eine umfassende Zustandsbewertung durchgeführt. Es konnten mehrere Publikationen in Journalen und Konferenzbeiträgen veröffentlicht werden. Zu diesem Thema konnte ich auch einige Diplomarbeiten betreuen und in der Betreuung von Dissertationen mitwirken. Eine Vorlesung mit dem Titel „Instandhaltung und Zustandsbewertung“ wurde aufgebaut.

Im Rahmen des Lehrendenmobilitätsprogramms ERASMUS-SOCRATES hatte ich die Gelegenheit während mehrerer Aufenthalte an der Universität Göteborg (Chalmers) in Schweden am Department of Material and Manufacturing Technology von Prof. Gubanski als Gastvortragender an Vorlesungen teilzunehmen. Für diese Vorträge wurde ich vollständig in den Vorlesungszyklus „High Voltage Technology“ eingebunden und mit mehreren Lektionen über „Dielectric Loss and PD Measurements, Exercise Examples“, „Insulation Systems and Diagnostics of HV Rotating Machines“ und „Assessment of Failure Risk in HV Rotating Machines“

betrachtet. Dieser Vorlesungszyklus ist Teil des internationalen Masterlehrgangs „Electric Power Engineering“, in dem viele Studenten aus anderen Ländern und Kontinenten vertreten waren.

#### **1.2.2.7 Managementmethoden**

Zu den in der Hochspannungstechnik angewandten Managementmethoden zählen neben dem Anlagenmanagement vor allem das Risiko- und Qualitätsmanagement. Im Anlagenmanagement werden die Aufgaben auf hierarchisch und regional bestimmte Aufgabenbereiche verteilt, wobei es das Ziel ist, möglichst große Budgetmittel und Personalressourcen zu erhalten, um den technischen Standard der Anlagen möglichst hoch zu halten. Das Anlagenmanagement wird in folgende Teilbereiche gegliedert: Forschung und Entwicklung (Basistechnologie), Investitionsentscheidungen, Konstruktion, Projektierung (Entwurf, Berechnung, Auslegung), Beschaffung (Ausschreibung, Angebote, Auswahl, Verträge), Errichtung und Montage (Umsetzen der Projektierung), Betrieb und Instandhaltung, Ausmusterung (Demontieren, Abriss, Verschrotten, Entsorgen).

Unter Asset Management ist eine formale und systematische Methode zur Verwaltung des materiellen Eigentums eines Energieunternehmens zu verstehen. Der Begriff Asset Management kommt aus der Finanz- und Versicherungswirtschaft und hat das Ziel, einen effektiven und optimierten Einsatz des materiellen Unternehmensvermögens umzusetzen. Es sind daher Strategien und Geschäftsprozesse zu entwickeln, Investitionsentscheidungen zu fällen, Organisationsstrukturen aufzubauen und das Betriebsergebnis zu maximieren.

Risikomanagement ist ein aufstrebendes Instrument zur Erlangung der Ziele des Asset- und Anlagenmanagements sowie für die Instandhaltung. Das Risikomanagement ist ein mehrstufiges Verfahren zur Erkennung und Bewältigung von Risiken. Mit Hilfe unterschiedlicher Maßnahmen können Risiken verringert oder im Idealfall verhindert werden. Für die Darstellung der Ist-Situation werden zumeist grafische Methoden eingesetzt, beispielsweise die Risikomatrix. Das Risikocontrolling ist ein Instrument, um die Wirksamkeit der eingeleiteten Maßnahmen zu überprüfen und gegebenenfalls korrigierend eingreifen zu können.

Das Qualitätsmanagement ist ein Teilbereich des funktionalen Managements. Beim Qualitätsmanagement soll sichergestellt werden, dass Qualitätsbelange in der Unternehmensführung den ihnen gebührenden Platz einnehmen. Qualität bezieht sich dabei sowohl auf die vermarkteten Produkte und Dienstleistungen als auch auf die internen Prozesse des Unternehmens und ist definiert als das Maß, in dem das betrachtete Produkt oder der betrachtete Prozess den Anforderungen genügt. Diese Anforderungen können explizit definiert sein, sie können aber auch implizit als Erwartungen vorausgesetzt werden. Wesentliche Werkzeuge des Qualitätsmanagements sind die sieben elementaren Qualitätstechniken (Q7) und die sieben Management Werkzeuge (M7). Zu den Q7 zählen: Brainstorming, Fehlersammelkarte, Histogramm, Korrelationsdiagramm, Paretodigramm, Qualitätsregelkarte und Ursache-Wirkungs-Diagramm. Zu den M7 gehören: Affinitätsdiagramm, Relationendiagramm, Entscheidungsbaum, Matrixdiagramm, Portfolio, Netzplan und Problem-Entscheidungs-Plan.

Die genannten Managementmethoden stellen das tägliche Handwerkzeug für eine analytische Vorgangsweise dar, erleichtern das strukturierte Vorgehen und ermöglichen eine Fokussierung von Aufgabenstellungen. Diese Methoden und Werkzeuge wurden in unterschiedlichen Projekten am Institut universell eingesetzt. In einer Lektion des Lehrgangs „Netze“ eines deutschen Verlags konnte ich die strukturierte Vorgangsweise im Risikomanagement und Methoden des Qualitätsmanagements darstellen und Anwendungsbeispiele aufzeigen und veröffentlichen.

### **1.2.3 Entwicklung des Lehrfachs Hochspannungstechnik an der Technischen Universität Graz**

Das Lehrfach der Hochspannungstechnik ist ein Teilgebiet der elektrischen Energietechnik. Einzig an der Technischen Universität Graz existiert in Österreich ein Institut, das sich so ausführlich und umfangreich mit den Problemstellungen der Hochspannungstechnik beschäftigt. Nicht nur die Hochspannungstechnik, sondern die gesamte elektrische Energietechnik stellt einen Forschungsschwerpunkt an der TU Graz dar, so sind auch das Institut für Elektrische Anlagen, das Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen und das Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation zu erwähnen.

Historisch gesehen wurde an der Technischen Hochschule Graz bereits im Jahre 1928 ein Lehrstuhl für Elektrotechnik eingerichtet. 1940 wurden drei selbständige Abteilungen für Elektrotechnik aufgebaut, die ihre Schwerpunktorientierung in Richtung Theoretische Elektrotechnik, Elektromaschinen sowie Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik legten. Im Jahre 1945 wurden diese Lehrstühle vorerst im Rahmen der Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik übernommen. Die Fakultät für Elektrotechnik wurde 1976 eingerichtet.

Als Vorgänger des heutigen Instituts ist das Institut für Bau und Betrieb elektrischer Anlagen zu sehen. Das Institut für Hochspannungstechnik wurde 1971 neu gegründet und befand sich damals noch in der „Neuen Technik“. Der Planungsbeginn für den Neubau war bereits im Jahre 1963 und der Baubeginn erfolgte 1968 am heutigen Standort in den Inffeldgründen. Die Inbetriebnahme der neuen Infrastruktur konnte 1972 erfolgen. Nach einer Zusammenlegung der Institute Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik im Jahre 2000 wurden drei wissenschaftliche Abteilungen eingerichtet: Elektrische Anlagen, Hochspannungstechnik sowie Energiewirtschaft und Energieinnovation. Durch die Umstrukturierung der TU Graz im Rahmen des UOG 2002 wurde 2004 die Abteilung für Hochspannungstechnik wieder zu einem selbständigen Institut, wobei im Zuge dieser Neuorientierung entsprechend dem erweiterten Aufgabenbereich der Institutsname mit Hochspannungstechnik und Systemmanagement festgelegt wurde.



**Abbildung 1-3: Hochspannungsprüfhalle der TU Graz**

In unmittelbarem Zusammenhang mit dem Institut ist die Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH zu erwähnen. Im Jahre 1956 wurde die Versuchs- und Forschungsanstalt für Hochspannungstechnik (VAH) gegründet. Aufgrund der erforderlichen Umstrukturierung der TU Graz im Rahmen des UOG 2002 wurde die Versuchsanstalt in eine Gesellschaft mit beschränkter Haftung umgewandelt, die in vollem Eigentum der TU Graz steht. Das Schmuckstück des Instituts und der Versuchsanstalt war und ist auch heute noch das große Versuchslabor, die „Große Halle“. Aufgrund des 150 jährigen Geburtstags von Nikola Tesla am 10. Juli 2006, seiner einstigen Studienzeit in Graz, seines Ehrendoktorats von der TU Graz und des Jubiläums von Institut und Versuchsanstalt wurde dies als Anlass genommen, die Große Halle in „Nikola Tesla Labor“ zu benennen.



### 1.3 **Definition von Isolierung und Isolation**

Da in der Fachliteratur und auch in dieser Habilitationsschrift die Begriffe Isolierung und Isolation eine wichtige Rolle spielen, sie jedoch oftmals fehlerhaft verwendet werden, soll an dieser Stelle über deren Bedeutung und Definition sowie deren weitere Verwendung diskutiert werden.

Im deutschsprachigen Normenwerk finden sich die Begriffe Isolierung und Isolation in der VDE 0111-1 (12.1966): **Unter ISOLATION ist der Grad der galvanischen Trennung von leitenden Teilen, die gegeneinander und gegen Erde betriebsmäßig unter Spannung stehen zu verstehen, hingegen bedeutet ISOLIERUNG die Gesamtheit der in ihre endgültige Form gebrachten Isoliermittel einer elektrischen Anlage oder eines elektrischen Betriebsmittels.** Seit der Revision dieser Norm im Jahre 1979 als Verlautbarung in der IEC 60071-1 (Isolationskoordination: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen) erschienen diese Begriffsdefinitionen nicht mehr in der Norm und sind nunmehr in der IEC 60050-151 (International Electrotechnical Vocabulary - Part 151: Electrical and magnetic devices) in englischer und französischer Sprache definiert. Die englische Bezeichnung INSULATION wird für beide deutschen Begriffe ISOLIERUNG und ISOLATION verwendet und findet erst in ihrem wörtlichen Zusammenhang die Unterscheidung ihrer Bedeutung.

- **INSULATION (en) – ISOLIERUNG (de)**, IEC-Index 151-15-41: *all the materials and parts used to insulate conductive elements of a device.*

wörtliche Übersetzung: Alle Materialien und Teile, die zum Isolieren leitender Komponenten eines Gerätes verwendet werden.

- **INSULATION (en) – ISOLIERUNG (de)**, IEC-Index 815-06-45: *all the material used to insulate a device.*

wörtliche Übersetzung: Alle Materialien, die zum Isolieren eines Gerätes verwendet werden.

- **INSULATION (en) – ISOLATION (de)**, IEC-Index 151-15-42: *set of properties which characterize the ability of an insulation (151-15-41) to provide its function, NOTE – Examples of relevant properties are: resistance, breakdown voltage.*

wörtliche Übersetzung: Eine Vielzahl an Eigenschaften, die die Fähigkeit der Isolierung kennzeichnen, um die Funktionstüchtigkeit zu halten. ANMERKUNG - als relevante Eigenschaften sind beispielhaft Widerstand oder Durchschlagsspannung genannt.

Anmerkung des Autors: Eine Definition sollte nicht den Wortstamm des zu beschreibenden Begriffs enthalten.

Als Resümee sollen für die beiden Begriffe folgende Beschreibungen gelten:

**Unter dem Begriff ISOLIERUNG ist die Wirkung aller Materialien und Teile zu verstehen, die die Funktion der Potenzialtrennung hochspannungsführender Komponenten gegeneinander oder des gesamten Geräts gegen Erde übernehmen.** Zu der Isolierung sind die konstruktive Ausführung bzw. die eingesetzten Werkstoffe zu zählen, oftmals wird auch der Begriff Isolationssystem verwendet.

**Unter dem Begriff ISOLATION sind alle Eigenschaften zu verstehen, die für die Funktionsfähigkeit der Isolierung verantwortlich sind.** Solche Eigenschaften können beispielsweise der Isolationswiderstand, die Durchschlagsspannung oder der Feuchtigkeitsgehalt eines Materials oder einer Isolieranordnung sein.

Im alltäglichen aber auch technischen Sprachgebrauch wird die Bezeichnung Isolation sehr oft fälschlicher Weise eingesetzt. Spricht beispielsweise jemand von Kabelisolation so sind zumeist nicht die isolierenden Eigenschaften der Potenzialtrennung gemeint, sondern die isolierende Wirkung des eingesetzten Werkstoffs bzw. der Isolierstoff selbst, daher wäre der Begriff Kabelisolierung oder Isolationssystem richtiger verwendet. Sind jedoch die isolierenden Eigenschaften (Isolationswiderstand) gemeint, so kann der Begriff Kabelisolation korrekter Weise verwendet werden.

## 9 Resümee und Ausblick

In dieser Habilitation wurden eingangs die historische Entwicklung sowie der aktuelle Stand der Technik und die Zukunftstendenzen von Isoliersystemen elektrischer Maschinen aufgezeigt. Neben Generatoren und Transformatoren wurde auch die Technologieentwicklung bei Freileitungen, Kabeln und alternativen Übertragungssystemen recherchiert.

Die Instandhaltung von elektrischen Erzeugungsanlagen und Übertragungs- sowie Verteilsystemen stellt einen wichtigen Teil für den sicheren und zuverlässigen Betrieb dar und trägt zur Werterhaltung des Unternehmens bei. Es wurde darauf hingewiesen, dass der Betreiber zur Instandhaltung gesetzlich verpflichtet ist. Die Ziele der Instandhaltung sowie die organisatorischen Grundlagen wurden dargestellt. Die unterschiedlichen Strategien zur Instandhaltung konnten gegenübergestellt sowie Maßnahmen und Tätigkeiten an unterschiedlichen Anlagen erarbeitet werden.

In einem kurzen Kapitel wurde auf die üblichen Spannungsformen zur Erzeugung von Prüfspannungen eingegangen. Die am häufigsten verwendeten Spannungsgeneratoren wurden vorgestellt, insbesondere wurde auf die Vor-Ort Prüfung bei Generatoren eingegangen.

Die technische Diagnostik stellt ein wichtiges Instrument zur Zustandsbewertung elektrischer Geräte dar, es wurden elektrische, dielektrisch sowie auch nichtelektrische Methoden beschrieben. Insbesondere wurde auf die neuen dielektrischen spektroskopischen Methoden zur Zustandsbewertung von Transformatoren eingegangen sowie die PDC- und FDS-Analyse beschrieben. Unter der Vielzahl an nichtelektrischen Methoden wurden jene herausgegriffen, die für die Generator- und Transformatorbewertung von Bedeutung sind. Tabellarisch wurden bekannte Methoden für die Diagnose an diesen Geräten dargestellt.

Zur Bewertung des Zustands sind die Kenntnis der Belastungsarten und die daraus erwachsenen Alterungsmechanismen ein wichtiger Teil. Der Begriff Alterung und die verschiedenen Lebensdauergesetze wurden beschrieben sowie Fehlerarten und Ausfallshäufigkeiten erarbeitet. Die Lebensdauer eines Betriebsmittels wurde definiert und Möglichkeiten zur Bestimmung der Restlebensdauer aufgezeigt.

Unterschiedliche Möglichkeiten zur Bewertung des Zustands wurden dargestellt, wobei der Begriff „Umfassende Zustandsbewertung“ geprägt wurde. Darunter soll die Bewertung unter Kenntnis von Betriebsmitteldaten, Analyseergebnissen aus der technischen Diagnostik und der visuellen Inspektion unter Berücksichtigung statistischer Lebensdauermodelle verstanden werden.

Die Managementmethoden für Hochspannungsbetriebsmittel wurden untergliedert in das Qualitäts- und das Risikomanagement. Die Qualitätshandhabung und deren Techniken sowie dazugehörige Managementwerkzeuge wurden anhand von Praxisbeispielen dargestellt. Beim Risikomanagement wurden eingangs die Arten der Risiken und deren Kategorien dargestellt und die zugehörigen Managementprozesse Identifikation, Analyse, Bewältigung und Überwachung praxisnah aufgezeigt.

Für die beiden Praxisbeispiele wurden ein fiktiver Maschinenpark eines Kraftwerksbetreibers und eines Industrienetzes angenommen. Anhand von ausgewählten Diagnosemethoden wurde der technische Zustand bestimmt und bewertet, die Betriebsmitteldaten erhoben und evaluiert. Der Gesamtzustand wurde jeweils mittels der Methode der umfassenden Zustandsbewertung vorgeführt. Die Ergebnisse wurden in Form von Balkendiagrammen (Benchmarks) dargestellt und Empfehlungen für Instandhaltungsmaßnahmen sowie -intervalle ausgearbeitet. Auf Basis dieser Daten wurde eine Risikoanalyse durchgeführt und das Betriebsrisiko bestimmt sowie mögliche Maßnahmen zur Bewältigung oder Minimierung des Risikos vorgeschlagen.

Mit Hilfe dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass das Gebiet der Hochspannungstechnik ein Thema ist, das gerade in diesem Zeitpunkt des steigenden Energiebedarfs und der immensen Verteuerung der Rohstoffe von ungemeiner Bedeutung ist. Durch den Einsatz neuer Materialien und Technologien ist ein zu beachtendes Potenzial an Effektivitätssteigerung möglich, wobei gleichzeitig die Zuverlässigkeit verbessert werden kann.

Mit Hilfe neuer Messmethoden und Messtechnik wird eine Zustandsbewertung immer zuverlässiger und permanente Messungen (Online-Monitoring) werden durch den Einsatz konventioneller PC-Systeme möglich. Durch Verknüpfung der Messdaten mit

historischen Betriebsmitteldaten und Ausfallsstatistiken werden bessere Lebensdauerprognosen möglich.

Von der Vielzahl an möglichen Diagnosemethoden resultieren nur wenige in einer absoluten Aussagekraft, zumeist liegt ein relativer Vergleichswert vor, oder es existieren keine aussagekräftigen Grenzwerte in Normen oder Herstellerempfehlungen. Die Evaluierung der Messresultate bedarf daher einer Expertenmeinung und ebenso ist für die Durchführung der Messungen selbst ein fundiertes Wissen unerlässlich. In die Zustandsbewertung sollte daher neben den Ergebnissen der technischen Diagnostik auch die Erfahrung des Betriebspersonals und der visuellen Inspektion eingehen.

In den Praxisbeispielen konnte gezeigt werden, dass eine Zustandsbewertung aufgrund von Betriebsmittel- und Messdaten möglich ist und daraus eine Risikoevaluierung abgeleitet werden kann. Allerdings kann eine sichere Aussage über die Restlebensdauer davon jedoch nicht abgeleitet werden. Sehrwohl ist es aber möglich, Schwachstellen im Netz aufzufinden und entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Mit Hilfe der aufgezeigten technischen Möglichkeiten, Methoden und Managementwerkzeuge sollte es daher heute möglich sein, Ausfälle aufgrund von technischen Schwachstellen bestmöglich zu verhindern und einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb unter wirtschaftlich vertretbaren Kosten zu gewährleisten.



## 10 Literatur

---

- [1] WIKIPEDIA, de.wikipedia.org, download am 17.4.2007
- [2] Wang J., Wang S., Wu J., Wu J., Yang Y., Xiong Z., Niu Y., Fuchs A. and Hughes D.: "Critical Path", PEI Magazine June 2005, www.peimagazine.com
- [3] „Kabelhandbuch“, VDEW-Verlag, Frankfurt am Main 1997, ISBN-3-8022-0455-7
- [4] Marek P.: „Neues Trägersystem für Hochspannungsisolierungen“, Dissertation TU Graz, 2005
- [5] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: "Electrical insulation for rotating machines", IEEE Press, W. John Wiley & Sons, Inc., USA, ISBN 0-471-44506-1, 2004
- [6] Gockenbach E.: "Review of material advances for high voltage electrical machines", INSUCON 2002, p. 203 – 208, Berlin 2002
- [7] Stone G.C., Boulter E.A.: "Historical development of rotor and stator winding insulation materials and systems", IEEE Electrical insulation magazine Vol. 20, No 3, p. 25, May/June 2004
- [8] Glew C.N.: "The next generation"- a review of the factors influencing the output of electrical machines in the new millennium, INSUCON/ISOTEC '98, p. 231 - 242, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [9] Scherer K., Müller F.: "Highly stressed generator insulations", INSUCON/ISOTEC '98, p. 96 - 104, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [10] Didzun N., Stobbe F.: "New manufacturing process of indirect cooled stator winding bars for VPI post impregnation technology", INSUCON/ISOTEC '98, p. 87- 95, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [11] Tari M., Iwata N., Hatano H., Matsumoto H., Inoue Y., Yoshimitsu T.: "Advanced technology of stator coil insulation system for turbo-generator", INSUCON/ISOTEC '98, p. 78 - 86, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [12] Hafner B.: "Mica tapes for high voltage generators", State of the art and future trends, INSUCON/ISOTEC '98, p 114 - 118, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [13] Brütsch R., Lutz A., Liptak C., Schuler R.: "New high voltage insulation with increased thermal conductivity", Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1993, Proceedings, Chicago '93 EEIC/ICWA Exposition, p. 323-327
- [14] Brütsch R., Allison J., Lutz A., Sekito S., Tari M., Yoshida K.: "A high voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo-generators", CWIEME 2001, p. 49 – 53, Berlin 2001
- [15] Barrutia E., Mortier N.: "Advances in mica tapes for high voltage generators using global impregnation", INSUCON/ISOTEC '98, p. 105 - 114, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [16] Emery F.T., Barrutia E., Smith J. B.D.: "Latest advances in mica paper tapes for application to VPI'ed high voltage generators", IEEE International Symposium on Electrical Insulation - ISEI, p. 266 – 269, Arlington, Virginia, USA, June, 1998
- [17] Didzun N., Stobbe F.: "New manufacturing process of indirect cooled stator winding bars for VPI post impregnation technology", INSUCON/ISOTEC '98, p. 87- 95, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [18] Brandes H.: "VPI technology and trends", INSUCON/ISOTEC '98, p. 56 - 60, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [19] Schuler R.H.: "Survey of insulation technology for stator winding bars of rotating electrical machines (generators)", INSUCON/ISOTEC '98, p. 61- 69, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [20] Langer J.: "Survey of insulation technology for winding of rotating electrical machines (electric motors) based on form wound coils", INSUCON/ISOTEC '98, p. 1 - 9, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [21] Zwignagl W.H.: „Zur Frage der Bestimmung und Beurteilung des Feuchtigkeitsgehaltes der Isolierung von Generator – Hochspannungswicklungen“, Dissertation TU Graz, 1965
- [22] "VPI System for high voltage motors", Product catalogue, Von Roll, www.vonroll.com Download am 25.03.2008
- [23] Wheeler J.C.G.: "Effects of Converter Pulses on the Electrical Insulation in Low and Medium Voltage Motors", IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 2005 – Vol.21 No.2, p.24
- [24] „High voltage main stator insulation“, Produktinformation, von Roll, 2005

- [25] Neal J.E.: "Resin rich technologies and trends", INSUCON/ISOTEC '98, p. 44 - 55, The 8<sup>th</sup> BEAMA International Electrical Insulation Conference, Harrogate, 1998
- [26] Gerstl A., et al., "Power Transformers technology review and assessments", CIGRE SC A2.4, ELECTRA 23 - No. 236, February 2008
- [27] Dzhumaliyski P.: „Transformator-Stufenschalter im bulgaischen Verteilnetz, Diplomarbeit TU Graz, 2008
- [28] Moser H.P.: „Transformerboard“, Sonderdruck der Zeitschrift Scientia Electrica, Weidmann AG Rapperswil, 1979
- [29] Kuen C.: „Bestimmung der Feuchtesorptionskurven von Zellulose für Transformatoren in Abhängigkeit vom Depolymerisationsgrad“, Diplomarbeit TU Graz, 2008
- [30] Muhr H.M., Sumereder C.: „Aufbau und Verhalten moderner Isolationssysteme bei Transformatoren“, MICAFIL Symposium 2002, Stuttgart
- [31] Moser H.P., Dahinden V.: „Transformerboard II“, Weidmann AG Rapperswil, 1987
- [32] Jany S.S.: „Alterungsverhalten von biologischen und synthetischen Transformatorölen“, Diplomarbeit TU Graz, 2008
- [33] Diverse Vorträge „Isolierester, Nachhaltige Energieübertragung mit sicheren Transformatoren“, <http://www.isoest.com/>, Hamburg, 11.05.2007
- [34] Oommen T.V.: "Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 1, Jan/Feb. 2002
- [35] BECK: „Sonderdruck Midel/Silikon“, 8. Fachtagung Elektroisierstoffe, 89/10
- [36] Leijon M. et al, "Breaking Conventions in Electrical Power Plants", Paper 11/37-03, CIGRE 1998
- [37] Leijon M. et al, "High Voltage Cables in a New Class of Generators - Powerformer™", Paper NORD-IS 99
- [38] "Dryformer", ABB Transformers AB, Schweden 1999, <http://www.abb.se/setfo/>
- [39] Muhr H.M., Sumereder C., Woschitz R., Neges E.: „Entwicklungen in der Isolierstofftechnik und deren Anwendungen für Komponenten der Energietechnik“, e&i, Jg. 119 (2002), Heft 5, S. 153-157
- [40] Wintersberger C.: „Mastkonstruktionen für Hochspannungsleitungen“, Diplomarbeit TU Graz, 2003
- [41] SACAC Schleuderbetonwerk AG, Produktinformation, <http://www.sacac.ch>, 20070802
- [42] Zöser S.: „Isolationssysteme für Hochspannungsanwendungen – Entwicklung und Zukunftsperspektiven“, Diplomarbeit TU Graz, 2000
- [43] Produktinformation Porzellanfabrik Frauenthal, PPCInsulators
- [44] NGK Produktinformation Durasstor®, [www.ngk.co.jp](http://www.ngk.co.jp), Download am 02.08.2007
- [45] Sumereder C.: „Dielektrische Untersuchungen an Tieftemperaturisolationssystemen“, Dissertation TU Graz, 2003
- [46] Muhr H.M., Sumereder C., Woschitz R.: „Entwicklungen in der Isolierstofftechnik für HS-Anwendungen“, Haefely Symposium Stuttgart, 2000
- [47] Arkell C.A., "Polypropylene/paper laminates for power cables", Produktfolder von BICC Cables Limited, 1989
- [48] Moore G.F.: "Electric Cable Handbook", 3<sup>rd</sup> Edition 1997, ISBN 978-0-632-04075-9
- [49] Peschke E.F., v. Olshausen R.: „Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung“, Publicis MCD Verlag, Erlangen und München, ISBN 3-89578-057-X
- [50] Sumereder C.: „Neue Technologien in der Isolierstofftechnik“, Skriptum TU Graz, SS 2007
- [51] Muhr H.M., Woschitz R., Sumereder C.: „Teilverkabelung der 380kV-Leitung Zwaring-Rotenturm“, TU Graz - Abteilung für Hochspannungstechnik, Studie Oktober 2001
- [52] „110-kV-Kabel / -Freileitung Eine technische Gegenüberstellung“, 2. Auflage März 2005, Verlag der Technischen Universität Graz, ISBN 3-902465-11-5
- [53] Kröpfel M.: „Die gasisolierte Übertragungsleitung (GIL)“, Diplomarbeit TU Graz, 2004
- [54] „Siemens verwirklicht in Genf weltweit erste Hochspannungsverbindung mit gasisolierter Übertragungsleitung der zweiten Generation“, Siemens Pressemitteilung November 2000
- [55] Knollseisen G., Woschitz R. et al: CIGRE Session 2006, Paper B1-304
- [56] Benato B., Brunello P., Carlini M., Di Mario C., Fellin L., Knollseisen G., Laußegger M., Muhr H.M., Paolucci A., Stroppa W., Wörle H., Woschitz R.: "Italy-Austria GIL in the new planned railway galleries Fortezza-Innsbruck under Brenner Pass", e&i, Jg. 123 (2006), Heft 12, S. 551-558
- [57] Muhr H.M.: „Moderne Leitungssysteme für Übertragungsnetze“, 10. Symposium Energieinnovation, TU Graz 2008



- [58] Gubanski S.: "Engineering Developments and Research on Large Power Systems", Invited Lecture ISH 2007, Ljubljana
- [59] Asplund G.: „HVDC Light and Renewable Energy“, Vortrag im Rahmen des Firmenbesuchs bei ABB Ludvika, Schweden am 17. April 2008
- [60] Knollseisen G.: „Flüssigstickstoff als Isoliermedium“, Diplomarbeit TU Graz, 2003
- [61] Sumereder C., Gerhold J., Muhr H.M., Woschitz R.: "Dielectric measurements on cryogenic insulation systems", ICDL 2002, S. 225 - 227
- [62] Okubo H., McCarthy M., Nagaya S., Noe M., Schmidt F., Sumereder C, Tønnesen O., Wacker B.: "Development and Application Trend of Superconducting Materials and Electrical Insulation Techniques for HTS Power Equipment", CIGRE Session 2006, Paper D1-306
- [63] Takahashi T.: "Tests for HTS Power Cable", Workshop on Cryogenic Dielectrics, Nashville, USA, 2005
- [64] Mifka M.: „Anwendung eines offenzelligen Schaumstoffes als Isolierung für Supraleiter“, Diplomarbeit TU Graz, 2005
- [65] Okubo H., Noe M., Cho J., Malozemoff A., Martini L., Nagaya S., Schmidt F., Sumereder C., Tixador P., Wacker B., Wolsky A.: „ Status of Development and Field Test Experience with High-Temperature Superconducting Power Equipment ”, CIGRE Report of SCD1 WG15, 2008
- [66] Okubo H., McCarthy M., Nagaya S., Noe M., Schmidt F., Sumereder C, Tønnesen O., Wacker B.: "Technical Trend of Superconducting and Electrical Insulating Materials for HTS Power Applications", CIGRE Session 2004, Paper D1-4-443
- [67] Noe M., Steurer M.: "High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status", Superconductor Science and Technology 20 (2007), R15-R29
- [68] Neumann C., Bock J.: "Three phase resistive fault current limiter – impact on system design", IEEE ASC, Jacksonville, USA, 2004
- [69] Noe M., Hyun O.-B., Yoon Y., Jagels H.: "Investigation of the feasibility of superconducting fault current limiters in Seoul and Berlin", No. 181, Proc. EUCAS Sorrento, pp. 682-689, 2003
- [70] Knorr, Schlosser: „Supraleitende Transformatoren und ihre Einsatzgebiete“, Siemens AG Nürnberg, Beitrag VDEW Fachtagung „Supraleitung“ 13. und 14. 2. 2001, Darmstadt
- [71] Sumereder C., Muhr H.M.: "The Prospects of Nanotechnology in Electrical Power Engineering", CIRED 2007, Paper 0594
- [72] Sumereder C., Muhr H.M.: "Aplicações da nanotecnologia na engenharia elétrica de potencia", Eletricidade Moderna, No. 411, Junho 2008, p. 66-75
- [73] Andritsch T.: „Nanotechnologie in der Energietechnik“, Diplomarbeit TU Graz, 2006
- [74] Gzásó A., Greßler S., Schiemer F.: „nano – Chancen und Risiken aktueller Technologien“, Springer Wien New York, ISBN 978-3-211-48644-3, 2007
- [75] Ingenieur Wissenschaft Jahresmagazin, <http://www.institut-wv.de/2244.html>, Download 30.07.2007
- [76] Hjortstam O., Isberg P., Söderholm S., and Dai H.: "Can we achieve ultra-low resistivity in carbon nanotube-based metal composites?", Applied Physics A, Vol. 78, No. 8, 2004
- [77] Liljenberg T., Hjortstam O., Volponi S.: „Nanotechnologie – Kleines kommt groß heraus“, ABB Technik 2/2003 Seite 49-53
- [78] Rätzke S., Kindesberger J.: „Werkstoffe mit Nanofüllstoffen für Freiluftisolierungen“, ETG Fachtagung 99, 2005 Hanau
- [79] „Der Stoff, aus dem die Zukunft ist: Winzige Röhrchen verändern die Welt der Werkstoffe“, TUHH Spektrum ISSN 1611-6003, Oktober 2005, Seite 11
- [80] <http://www.ipt.arc.nasa.gov/cntpolymer.html>, Download 31.07.2007
- [81] Sumereder C., Muhr H.M.: "The Prospects of Nanotechnology in Electrical Power Engineering", CIRED 2007, Paper 0597
- [82] ÖNORM EN 13306 (20010801): „Begriffe der Instandhaltung“
- [83] Traxler E.: „Instandhaltung und Risikomanagement in der elektrischen Energietechnik“, Diplomarbeit TU Graz, 2003
- [84] Beckmann G., Marx D.: „Instandhaltung von Anlagen“, 4. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1994, ISBN 3-342-00427-4
- [85] Sumereder C., Muhr H.M.: „Instandhaltung und Zustandsbewertung“, Skriptum TU Graz, SS 2008
- [86] ÖNORM M8100 (zurückgezogen): „Instandhaltung - Benennungen, Definitionen und Maßnahmen“
- [87] DIN 31051 (2003-06): „Grundlagen der Instandhaltung“
- [88] Hackstein, R.: „100 Milliarden für Instandhaltung“, VDI-Nachrichten, 40 (1986)

- [89] Warnecke, H.-J.: „Handbuch Instandhaltung, Band 1 Instandhaltungsmanagement“, 2. Auflage. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1992
- [90] Marketz M.: „Instandhaltungsstrategien für Verteilnetze im liberalisierten Elektrizitätsmarkt“, Dissertation TU Graz, 2003
- [91] IEC 60060-1 (1994-06): „Hochspannungs-Prüftechnik, Allgemeine Festlegungen zu Prüfbedingungen“
- [92] Gsodam H.: „Hochspannungstechnik“, Skriptum TU Graz, 1988
- [93] Hilgarth G.: „Hochspannungstechnik“, B.G. Teubner Stuttgart, 1981, ISBN 3-519-06422-7
- [94] Beyer M., Boeck W., Möller K., Zaengl W.: „Hochspannungstechnik“, Springer Berlin Heidelberg New York, 1986, ISBN 3-540-16014-0
- [95] IEC 60034-1 (2005-04): „Drehende elektrische Maschinen, Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten“
- [96] Michitsch H., Spiegelberg J.: „Hochspannungsprüfung großer elektrischer Maschinen“, ew Jg. 104 (2005), Heft 17-18, Seiten 62-70
- [97] Sumereder C., Muhr H.M., Marketz M., Rupp C., Krüger M., "Unconventional Diagnostic Methods for Testing Generator Stator Windings," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 5 (2009), pp. 18-24
- [98] Hauschild W., Coors P., Weidner J.R., Gradinarov P.: „Diagnostische Prüfungen an Ständerwicklungen großer rotierender Maschinen mit AC Resonanzprüfsystemen variabler Frequenz“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln 2004
- [99] Jaufer S., Schwarz R., Sumereder C., Woschitz R.: „Hochspannungstechnik Labor“, Skriptum TU Graz
- [100] Seidl G.: „Diagnose an rotierenden elektrischen Maschinen“, Diplomarbeit TU Graz, 2006
- [101] „Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen“, ÖVE-Merkblatt 2, 2. Auflage 1990
- [102] IEEE 433-1974: “ Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very Low Frequency”
- [103] IEEE 95-2002: “Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage“
- [104] Binder E., Stocker A., Kogler A.: „Bestimmungen und Beurteilung des Zustands der Wicklungen von Hochspannungsmaschinen“, Verbund Informationsschritt zu den Diagnosemessungen
- [105] Muhr H.M., Schwarz R., Sumereder C.: “Evaluation of the dissipation factor under different environmental conditions”, ISH 2007, Paper 329
- [106] Sumereder C., Muhr H.M.: “Humidity Absorption of Generator Bars”, ICPADM 2006, Paper 020
- [107] IEEE 43-2000: “Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery“
- [108] IEC 60085 (2004 06): “ Elektrische Isolierung, Thermische Bewertung und Bezeichnung“
- [109] Muhr H.M.: „Hochspannungsmesstechnik“, Habilitation TU Graz 1983
- [110] Schwab A.: „Hochspannungsmesstechnik“, Springer Berlin Heidelberg New York 1981, ISBN 3-540-10545-X
- [111] Ramm G., Moser H.: “Calibration of Electronic Capacitance and Dissipation Factor Bridges” IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol. 52, No. 2, April 2003
- [112] IEC 60270: (2001-10-01): „Hochspannungs- Prüftechnik – Teilentladungsmessungen“
- [113] Groß D.: „Teilentladungsdiagnose an Motoren und Generatoren“, Power Diagnostix Systems GmbH, Aachen
- [114] IEC 60034-27 (2005-07): “ Drehende elektrische Maschinen, Teil 27: Off-line Teilentladungsmessungen an der Statorwicklungsisolierung drehender Maschinen“
- [115] CIGRE Brochure 226: “Knowledge Rules for Partial Discharge Diagnosis in Service”, Task Force 15.11/33.03.02, April 2003
- [116] Hudon C., Bélec M.: “Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2, April 2005
- [117] Küchler A.: „Hochspannungstechnik“, VDI Verlag, 2005, ISBN 3-540-21411-9
- [118] IRIS Power LP. “PD Seminar“, Version 4.4, 11. August 2006
- [119] Kreuger F.H.: “Industrial High Voltage“, Delft University Press, 1992, ISBN 90-6275-562-3
- [120] Gulski E., et al: “Condition Assessment of Service Aged Power Cables“, CIGRE 2008, Paper D1-206
- [121] „Ingenieurkeramik III, Funktionskeramik“, Professur für nichtmetallische Werkstoffe, Skriptum ETH Zürich, 2001

- [122] Der Houhanessian Vahe: "Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems", Dissertation ETH Zürich, 1998
- [123] Koch M.: „Feuchtigkeitsmessung mit dielektrischen Verfahren“, Regensburger Transformatorensymposium 2004
- [124] Kranz H.G., Hoff G.: "On-site Dielectric Diagnostics of Power Cables Using the Isothermal Relaxation Current Measurements", IEEE PES Winter Meeting 2000, vol.3, pp 1593 - 1598
- [125] Hofmann R.: „Zerstörungsfreie dielektrische Diagnose von epoxidharzisolierten Durchführungen mit der computergestützten IRC-Analyse“, Dissertation UNI Wuppertal, 2005
- [126] Patsch R., Kouzime O.: "The Influence of Climatic Conditions on the Diagnostic Results of Return Voltage Measurements", ISEI, USA, April 2002
- [127] Zaengl W.: "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment (Transformers, Cables, etc.), ISH, Key Note Speech, Bangalore India, August 2001
- [128] Shayegani A.A., Gockenbach E., Borsi H., Mohseni H.: "Investigation on the transformation of time domain spectroscopy data to frequency domain data for impregnated pressboard to reduce measurement time", Electrical Engineering (2006) 89, pp 11-20
- [129] Sumereder C., Muhr H.M.: „Diagnose von Durchführungen mit Hilfe von frequenzabhängigen Verlustfaktormessungen“, OMICRON Tagung, Bregenz 2007
- [130] Weingärtner M.: „Zustandsbewertung der Isolierung von Hochspannungsdurchführungen durch dielektrische Antwortmessung im Zeit- und Frequenzbereich“, Diplomarbeit TU Graz, 2008
- [131] Werle P.: „Zustandsbewertung und Verbesserung von Leitungstransformatoren“, OMICRON Seminar 2005, Klaus
- [132] Gockenbach E., Borsi H.: „Aktueller Stand der Monitoring- und Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren“, e&I, Jg. 124 (2007), Heft 12, S. 435-442
- [133] Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D.: "Transformer Winding Movement Monitoring in Service—Key Factors Affecting FRA Measurements", IEEE Electrical Insulation Magazine, September/October 2004 — Vol. 20, No. 5
- [134] Florkowski M., Furgał J.: "Detection of winding faults in electrical machines using the frequency response analysis method", Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 2067–2074
- [135] Homagk C., Leibfried T.: „Praktische Aspekte bei der Messung der Übertragungsfunktion an Leistungstransformatoren“, ETG Tagung 2006
- [136] Maughan C.V.: "Maintenance of Turbine Driven Generators", Wiley 2004, ISBN 978-0471614470
- [137] Schwarz R.: „Vor-Ort-Prüfung von Betriebsmitteln“, Skriptum TU Graz, WS 2007/08
- [138] OVE - Fachausschuss für rotierende elektrische Maschinen: „Online Messverfahren für rotierende elektrische Maschinen“, Version Oktober 2003, derzeit noch nicht veröffentlicht
- [139] Albert G., Neumayer F., Hautendorf W.: „Nutzung der "Cepstrum Methode" in modernen Online-Überwachungssystemen für Generatoren“, e&i erscheint vorr. 2010
- [140] Muhr H.M., Pack S., Körbler B., Jauffer S.: „Verfahren der Zustandserkennung und -beurteilung des Kontaktzustands mittels berührungsloser Messmitteln“, GIS Anwenderforum, Darmstadt 2004
- [141] Tarrant D.C.H.: "Problems (and solutions) experienced with ELCID testing a large hydro-generator stator", Download <http://www.irispower.com> im Februar 2008
- [142] Duval M. et al, CIGRE Symposium Berlin 1993, Paper 110-14
- [143] Couderc D., Bourassa P.: "Gas-in-oil-Criteria for the Monitoring of Self-contained Oil-filled Power Cables, IEEE CEIDP 1996, San Francisco
- [144] Duval M., De Pablo A.: "Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases", IEEE Electrical Insulation Magazine Vol.17, No. 2, March/April 2001
- [145] Unsworth, J., Mitchell, F.: "Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography", IEEE TEI Volume 25, Issue 4, Aug. 1990, pp. 737 - 746
- [146] De Pablo A., Möllmann A.: "New Guidelines for Furans Analysis as well as Dissolved Gas Analysis In Oil-Filled Transformers", CIGRE 1996, 15/21/33-19
- [147] Lütke H., Höhle I., Kachler A.J.: "Transformer Ageing Research on Furanic Compounds Dissolved in Insulating Oil", CIGRE Session 2002, Paper 15-302
- [148] Kleboth-Lugova O., Buerschaper B., Leibfried T., Hahn M.: „Feuchtebestimmung in Isoliermedien - ein Erfahrungsbericht“, ETG Fachbericht 97, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, ETG Fachtagung 2004, ISBN 978-3-8007-2817-6
- [149] „Vorlesungsskript Uni Jena“, Institut für Physikalische Chemie, Download am 29.2.2008

- [150] Porzel R., Neudert E., Sturm M.: „Diagnostik der elektrischen Energietechnik“, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1996, ISBN 3-8169-1364-4
- [151] Uhde D.: „Einsatz der akustischen TE-Messung bei der Transformatorenprüfung im Werk“, Haefely Symposium, Stuttgart, 2000
- [152] Schwarz R.: „Optische Teilentladungsdiagnostik für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik“, Dissertation TU Graz, 2002
- [153] Van Bolhuis P., Gulski E., Smidt J.J.: “Monitoring and Diagnostic of Transformer Solid Insulation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, Issue 2, April 2002, pp. 528 - 536
- [154] Lapworth J., McGrail T., The National Grid Company: “Transformer failure modes and planned replacement“, IEEE Colloquium on Transformer Life Management 1998
- [155] Cliteur G.J., Wetzer J.M., KEMA T&D Power: “Condition assessment of power transmission and distribution components“, CIRED 16<sup>th</sup> Int. Conference, 2001
- [156] Pukel G., Muhr H.M., Lick W.: “Transformer Diagnostics: Common Used and New Methods“, CMD 2006, Korea
- [157] Körbler B.: „Zustandsbewertung von Betriebsmitteln in der elektrischen Energietechnik“, Dissertation TU Graz, 2004
- [158] IEC 60505: (2005-08): „Bewertung und Kennzeichnung elektrischer Isoliersysteme“
- [159] „Nutzungsdauer von Betriebsmittel“, ETG Fachbericht 55, Berlin 1995, ISBN 3-8007-2087-6
- [160] Sumereder C., Muhr H.M., Woschitz R., Egger H., Marketz M.: “Extension of Generator Lifetime by Winding Renewal”, ISEI 2006, pp. 106-109
- [161] Timperley J.E., Michalec J.R.: “Stator Winding Replacement Based on Overpotential Testing“, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 9, Issue 4, Dec. 1994, pp. 686 – 694
- [162] Pack A.: “Service Aged Medium Voltage Cables – A Critical Review Of Polyethylene Insulated Cables“, ISEI 2004, Indianapolis, pp. 532-535
- [163] IEC 60216 (Teile 1 bis 6): „Elektroisolierstoffe - Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens“
- [164] Sumereder C., Muhr H.M.: “Estimation of Residual Lifetime – Theory and Practical Problems“, 8<sup>th</sup> Höflers Days, Portoroz, 2005
- [165] Praxl G.: „Statistische Methoden zur Beurteilung der elektrischen Festigkeit von Hochspannungsisolierungen“, Habilitationsschrift TU Graz, 1985
- [166] “Hydrogenerator Failures – Results of the Survey“, Study Committee SC11, WG11.02, 2003
- [167] Bomba R., Groß U., Kaiser J.: „VGB-Datenbank Generatorschäden“, VGB Power Tech 11/2005
- [168] Seinsch H.O.: „Monitoring und Diagnose elektrischer Maschinen und Antriebe“, Allianz Schadensstatistik an HS Motoren 1996–1999 in VDE Workshop, Jun. 2001
- [169] Allianz-Handbuch der Schadensverhütung, 3. Auflage, VDI Verlag Berlin, 1984
- [170] Koch H.: „Brandschutz von Generatoren“, Diplomarbeit TU Graz, 1998
- [171] Sumereder C., Weiers T.: “Significance of Defects Inside In-Service Aged Winding Insulations“, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 9-14, March 2008
- [172] Sumereder C.: “Statistical Lifetime of Hydro Generators and Failure Analysis“, IEEE Trans. DEI, Vol. 15, No. 3, pp. 678-685, June 2008
- [173] Egger H.: „Strategien zur Überwachung der Hochspannungsisolierung von Betriebsmitteln elektrischer Energiesysteme“, Habilitation TU Graz, März 2001
- [174] Hrala T.: „Ergebnisse der vorbeugenden Instandhaltung ölgefüllter Kraftwerkstransformatoren“, E.u.M., 92 (1975), S. 170 bis 172
- [175] “Failure of Large oil Cooled Transformers“, 29<sup>th</sup> Conference of the International Machinery Insurers Association, IMIA 16-66 (96) E, September 1996
- [176] William H. Bartley P.E.: “Analysis of Transformer Failures“, International Association of Engineering Insurers, 36<sup>th</sup> Conference, Stockholm 2003
- [177] Vosen H.: „Kühlung und Belastbarkeit von Transformatoren: Erläuterung zu DIN VDE 0532“, VDE-Schriftenreihe 72, ISBN 3-8007-2225-9, VDE-Verlag GmbH Berlin und Offenbach, 1997
- [178] Borsi H.: „Möglichkeiten der Diagnose von Leistungstransformatoren vor Ort“, Siemens Kolloquium "Transformer Life Management" Nürnberg, Juni 2002
- [179] Körbler B., Muhr H.M., Sumereder C., Egger H.: “Condition Evaluation of Network Components“, ISH 2003
- [180] Körbler B., Muhr H.M., Sumereder C., Sander H., Marketz M., Poster J.: “Basics of Condition Evaluation in Distribution Networks“, CIRED 2003
- [181] IEC 60599 (1999-12): „In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte Leitfadens zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase“

- [182] Rupp C.: „Zustandsbewertung rotierender elektrischer Maschinen“, Diplomarbeit TU Graz, 2005
- [183] Sumereder C., Muhr H.M.: „Umfassende Zustandsbewertung von Generatoren“, e&i, Jg. 126 (2009), Heft 3, S. 126-131
- [184] IEEE Std 1366-2003: „Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices“
- [185] Kamiske G.F., Brauer J.-P.: „Qualitätsmanagement von A – Z“, 5. Auflage, ISBN-10: 3-446-40284-5, Hanser Verlag
- [186] Singhal V. (Georgia Institute of Technology), Hendricks K. (University of Western Ontario): „Cash from Excellence“, Studie 2000, <http://www.tqu.com/businessexcellence/excellencecashfrom.pdf>
- [187] „Qualitätsmanagement Übungen“, Skriptum IFW Universität Hannover
- [188] Theden P., Colman H.: „Qualitätstechniken“, 4. Auflage, ISBN 3-446-40044-3, Hanser Verlag
- [189] Kamiske G. F., Brauer J.-P.: „ABC des Qualitätsmanagements“, 2. Auflage, ISBN-10: 3-446-21866-1, Hanser Verlag
- [190] Sumereder C.: „Quality Engineering Übungen“, Skriptum TU Graz, WS 2005/06
- [191] Sumereder C.: „Neue Technologien in der Isolierstofftechnik“, Skriptum TU Graz, SS 2007
- [192] CIGRE Brochure 227: „Life Management Techniques for Power Transformer“, Juni 2003
- [193] Sumereder C.: „Instandhaltung und Zustandsbewertung“, Skriptum TU Graz, SS 2007
- [194] Umshaus R.: „Quality Function Deployment Implementierung & Fallstudien“, Diplomarbeit TU Graz, 1996
- [195] <http://www.ingenieur-verlag.de/betriebsleitung/qualitaetsmanagement/quality-function-deployment-in-10-schritten-durch-das-house-of-quality-zum-qualitaetsplan-produkt/>, Download am 23.07.2007
- [196] Muhr H.M., Sumereder C.: „Risiken, Risikobewertung, Risikomanagement“, Schriftlicher Management Lehrgang Netze: Erfolgreich trotz Regulierung, Herausgeber: Euroforum Verlag GmbH Düsseldorf, 3. Auflage 2008
- [197] Polster J.: „Risikomanagement und Anlagenmanagement in Elektrizitätsunternehmen“, Dissertation TU Graz, 2003
- [198] IEC 60300-3-9 (Entwurf Mai 2007): „Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-9: Anwendungsleitfaden – Risikobeurteilung technischer Systeme“
- [199] Romeike F.: „Lexikon Risiko-Management“, Wiley-VCH, 1. Auflage Mai 2004, ISBN 3-527-50112-6
- [200] ONR 49000 (1. Jänner 2004): „Risikomanagement für Organisation und Systeme, Begriffe und Grundlagen“
- [201] Rosenkranz F., Missler-Berh M.: „Unternehmensrisiken erkennen und managen“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, ISBN 3-540-24507-3
- [202] Dörner D., Horvat P., Kagermann H.: „Praxis des Risikomanagements“, Schäffer-Poeschl Vlg., Stuttgart November 2000, ISBN 3-7910-1452-8
- [203] „Revisionsempfehlung für vertikale Synchronmaschinen mit Trag- und Führungslager“, ELIN Weiz, November 1983
- [204] „Revisionsempfehlung für horizontale Synchronmaschinen mit Lagerböcken“, ELIN Weiz, November 1983
- [205] „Empfehlungen für die Revisionsintervalle von Generatoren“, VDEW 1980
- [206] „Recommendations for Intervals between Turbogenerator Inspections“, VDEW Publikation, 2<sup>nd</sup> Edition 1991
- [207] Muhr H.M., Schwarz R., Sumereder C.: „Evaluation of the dissipation factor under different environmental conditions“, ISH 2007, Laibach, Paper 329
- [208] ELIN Protokoll „Generatorüberprüfung Zirknitz 1“, Prüfbericht TBKf-EH-Wie/Wie 1986-11-05
- [209] EN 50209 (1998): „Prüfung der Isolierung von Stäben und Spulen von Hochspannungsmaschinen“
- [210] IEEE 286-2000: „Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation“
- [211] IEEE 1434-2000: „Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery“
- [212] Klempner G., Kerszenbaum I.: „Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators“, IEEE New York, Wiley Interscience, ISBN 0-471-61447-5, 2004
- [213] Dämisch G.: „Der Transformator – Asset Beurteilung und Reinvestitionsoptimierung“, Regensburger Transformatorsymposium 2004
- [214] Schmid R.: „Optimierung des Reinvestitionszeitpunktes von Öltransformatoren durch systematische Anlagenwertführung und Zustandsbeurteilung“, Disseratation TU Graz, 2008

- [215] „Überwachung und Instandhaltung der flüssigen und festen Isolierung von Wicklungen in Öl“, ÖVE Merkblatt 5, Ausgearbeitet vom Arbeitskreis 4 „Wicklungen in Öl“, Gruppe C, 1987-09-15
- [216] IEC 60422 (2007-02): „Richtlinie zur Überwachung und Wartung von Isolierölen auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln“
- [217] IEC 60567 (2005): „Ölgefüllte elektrische Betriebsmittel - Probennahme von Gasen und von Öl für die Analyse freier und gelöster Gase – Anleitung“
- [218] Höhle I., Kachler A.J., Lütke H., Theiß U.: „Transformer Life Management- ein Kundenservice zur Alterungsanalytik und Labordiagnostik.“, SIEMENS Broschüre, Materialprüflabor Transformatorenwerk Nürnberg
- [219] Müller R., Schliesing H., Soldner K.: „Die Beurteilung des Betriebszustands von Transformatoren durch Gasanalyse“, Elektrizitätswirtschaft 11/1977, S. 345-349
- [220] Duval M., De Pablo A.: “Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases”, IEEE DEIS, March/April 2001 - Vol. 17, No. 2, pp 31-41