



# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>XI</b>
<b>1 Definitionen und Normen</b>	<b>1</b>
1.1 Kühlungsarten	1
1.1.1 Statische Wandler, Transformatoren, Drosseln	1
1.1.2 Elektromechanische Wandler, Motoren, Generatoren	3
1.2 Betriebsarten (Bemessungsklassen)	7
1.3 Isolierstoffklassen	9
<b>2 Einleitung</b>	<b>13</b>
2.1 Analogiebetrachtungen, Wachstumsgesetze	14
2.2 FEM-Simulationen	14
2.3 Wärmeschaltbilder, thermische Ersatzschaltungen	15
<b>3 Physikalische Grundlagen, Materialeigenschaften</b>	<b>17</b>
3.1 Physikalische Grundlagen	17
3.2 Materialeigenschaften gebräuchlicher Werkstoffe	18
<b>4 Wachstumsgesetze</b>	<b>29</b>
<b>5 Maschinen- und Geräteverluste</b>	<b>33</b>
5.1 Verlustarten	33
5.1.1 Last- bzw. stromunabhängige Verluste	33
5.1.2 Last- bzw. stromabhängige Verluste	34
5.1.3 Mechanische Verluste	34
5.1.4 Erregerverluste	35

5.1.5	Zusatzverluste .....	35
5.1.5.1	Klassische Zusatzverluste .....	35
5.1.5.2	Zusatzverluste bei permanent erregten Synchronmaschinen	36
5.1.5.3	Zusatzverluste durch Umrichterspeisung .....	36
5.2	Verlustminimum, maximaler Wirkungsgrad .....	37
5.3	Temperaturabhängigkeit der Verluste .....	39
5.3.1	Allgemeine Situation und Vorgehensweise .....	39
5.3.2	Temperaturabhängigkeit der Eisenverluste .....	40
5.3.3	Temperaturabhängigkeit der Wicklungsverluste .....	41
5.3.3.1	Klassisch ohmsche Verluste, DC-Verluste .....	41
5.3.3.2	Wicklungszusatzverluste durch den Skineneffekt .....	41
5.3.3.3	Wicklungszusatzverluste durch den Proximityeffekt .....	42
5.3.4	Übergangsverluste .....	42
5.3.5	Temperaturabhängigkeit der mechanischen Verluste .....	43
5.3.6	Temperaturabhängigkeit der Erregerverluste .....	43
5.3.7	Vereinfachte Temperaturskalierung der gesamten Zusatzverluste	43
6	<b>Grundlagen der thermischen Analyse</b> .....	<b>45</b>
6.1	Grundlagen der thermischen Ersatzschaltbilder .....	45
6.1.1	Basiselemente thermischer Ersatzschaltungen .....	45
6.1.1.1	Wärmequellen, Symbol und Eigenschaften .....	45
6.1.1.2	Wärmewiderstände, Symbol und Eigenschaften .....	46
6.1.1.3	Wärmekapazitäten, Symbol und Eigenschaften .....	46
6.1.2	Grundgleichungen thermischer Ersatzschaltungen .....	47
6.1.2.1	Wärmeströme, 1. Kirchhoff'scher Satz .....	47
6.1.2.2	Temperaturgefälle, 2. Kirchhoff'scher Satz .....	48
6.1.2.3	Verfahren der Netzwerkanalyse .....	49
6.2	Praktische Berechnung der Wärmeleitungswiderstände .....	50
6.2.1	Wärmeleitung in einfachen Körpern .....	50
6.2.1.1	Wärmeleitung in zylindrischen bzw. quaderförmigen Körpern	50
6.2.1.2	Wärmeleitung in einer Rohrwand .....	51
6.2.1.3	Wärmeleitung durch eine Kugelschale .....	53
6.2.2	Effektive Wärmeleitung in Wicklungen .....	54
6.2.2.1	Wicklungen aus Rundlackdraht .....	54
6.2.2.2	Wicklungen aus Flachlackdraht .....	56
6.2.2.3	Folienwicklungen .....	57

6.2.3	Effektive Wärmeleitung in Elektroblechpaketen .....	59
6.2.3.1	Effektive Wärmeleitung in der Blechebene .....	60
6.2.3.2	Effektive Wärmeleitung senkrecht zur Blechebene .....	60
6.3	Wärmeübergang durch natürliche bzw. freie Konvektion .....	61
6.3.1	Natürliche Konvektion an vertikalen Flächen .....	64
6.3.1.1	Luftkühlung .....	64
6.3.1.2	Ölkühlung .....	66
6.3.1.3	Wasserkühlung an freien Flächen .....	67
6.3.2	Natürliche Konvektion an horizontalen Flächen .....	69
6.3.2.1	Luftkühlung .....	70
6.3.2.2	Ölkühlung .....	71
6.3.2.3	Wasserkühlung .....	71
6.4	Wärmeübergang durch forcierte Konvektion .....	73
6.4.1	Offene Kühlkreise .....	73
6.4.1.1	Luftkühlung .....	73
6.4.1.2	Ölkühlung .....	74
6.4.1.3	Wasserkühlung .....	75
6.4.2	Geschlossene Kühlkreise, z. B. Rohrkühlung .....	75
6.4.2.1	Ölkühlung .....	76
6.4.2.2	Wasserkühlung .....	76
6.5	Siedekühlung in Kältemittel .....	77
6.6	Besondere Wärmeübergänge .....	79
6.6.1	Wärmeübergang über den Luftspalt von elektrischen Maschinen ..	79
6.6.2	Wärmewiderstand von Kühlrippen .....	81
6.6.3	Wärmeübergang für zusammengesetzte Oberflächen .....	83
6.6.4	Überlagerung von Kühleffekten .....	85
6.7	Wärmeübergang durch Strahlung .....	86
6.8	Reale Wärmequellen .....	88
6.8.1	Temperaturverlauf in Gebieten mit inneren Wärmequellen .....	88
6.8.1.1	Ebene Wand mit symmetrischer Kühlung .....	89
6.8.1.2	Ebene Wand mit asymmetrischer Kühlung .....	92
6.8.1.3	Wicklungen auf Wickelrohr .....	94
6.8.2	Ersatzschaltung der realen Wärmequelle .....	97
6.8.2.1	Elemente der realen Wärmequelle .....	97
6.8.2.2	Verhalten bei zeitlich veränderlicher Temperatur .....	98

<b>7</b>	<b>Wärmeschaltbilder für elektrische Maschinen</b>	<b>101</b>
7.1	Wärmeschaltbilder des Transformators	102
7.1.1	Wärmeschaltbild des Kleintransformators	102
7.1.2	Wärmeschaltbild des ölgekühlten Verteilertransformators	103
7.2	Wärmeschaltbild der Asynchronmaschine	105
7.3	Wärmeschaltbilder für andere elektrische Maschinen	106
7.3.1	Wärmeschaltbild der Synchronmaschine	107
7.3.1.1	Wärmeschaltbild der elektrisch erregten Synchronmaschine	107
7.3.1.2	Wärmeschaltbild der permanent erregten Synchronmaschine	107
7.3.1.3	Wärmeschaltbild der Reluktanzmaschine	108
7.3.2	Wärmeschaltbild für Gleichstrom- bzw. Stromwendermaschinen	108
7.3.2.1	Wärmeschaltbild der klassischen Gleichstrommaschine	108
7.3.2.2	Wärmeschaltbild der permanent erregten Gleichstrommaschine	110
7.3.2.3	Wärmeschaltbild des Universalmotors	110
7.3.3	Wärmeschaltbild für Elektronik- bzw. Schrittmotoren	110
7.3.4	Wärmeschaltbild für Transversal- und Axialflussmaschinen	111
7.4	Vereinfachte Wärmeschaltbilder	111
7.4.1	Situationsabhängige Vereinfachung der Wärmeschaltbilder	112
7.4.1.1	Leicht vereinfachtes Wärmeschaltbild der Asynchronmaschine	112
7.4.1.2	Vereinfachtes Wärmeschaltbild der Gleichstrommaschine	113
7.4.2	Wärmeschaltbilder für den stationären Betrieb	114
7.4.3	Vereinfachte Wärmeschaltbilder für transiente Vorgänge	115
7.4.3.1	Wärmeschaltbild für transiente Vorgänge	116
7.4.3.2	Einfacher Erwärmungsvorgang im Ein-Körper-Modell	117
7.4.3.3	Abkühlvorgang im Ein-Körper-Modell	119
7.4.3.4	Spezielle Abschätzung für die Betriebsarten S3 bis S6	120
7.4.4	Wärmeschaltbild für subtransiente Vorgänge	123
<b>8</b>	<b>Beispiele für Erwärmungsvorgänge in elektrischen Maschinen</b>	<b>127</b>
8.1	Erwärmung des Kleintransformators EI 84b	127
8.2	Erwärmung der Asynchronmaschine	133

8.2.1	Temperaturverlauf bei Bemessungsbelastung .....	135
8.2.1.1	Temperaturverlauf im vollständigen Wärmeschaltbild ...	135
8.2.1.2	Temperaturverlauf im Ein-Körper-Modell .....	139
8.2.2	Temperaturverlauf in der Abkühlphase .....	140
8.2.3	Der Temperatursprung .....	142
8.2.3.1	Der Temperatursprung im Normalbetrieb .....	142
8.2.3.2	Der Temperatursprung im Überlast- bzw. Störfall .....	143
8.2.3.3	Kurzschlussversuch zur Messung des Temperatursprunges	143
8.3	Die Asynchronmaschine in unterschiedlichen Betriebsarten .....	144
8.3.1	Dauerbetrieb „S1“ der Asynchronmaschine .....	145
8.3.1.1	Erwärmung der Asynchronmaschine im Dauerbetrieb ...	145
8.3.2	Kurzzeitbetrieb „S2“ der Asynchronmaschine .....	145
8.3.2.1	Erwärmungsphase im Kurzzeitbetrieb .....	146
8.3.2.2	Abkühlphase im Kurzzeitbetrieb .....	148
8.3.2.3	S2-Betrieb der Asynchronmaschine mit Sonderwicklung ..	149
8.3.3	Die Asynchronmaschine in den höheren Betriebsarten .....	151
8.3.3.1	S3-Aussetzbetrieb .....	152
8.3.3.2	S4-Aussetzbetrieb mit thermisch relevantem Anlauf .....	152
8.3.3.3	S5-Aussetzbetrieb mit thermisch relevantem Anlauf und Abbremsung .....	153
8.3.3.4	S6-Durchlaufbetrieb mit periodisch aussetzender Belastung	154
8.3.3.5	Höhere Betriebsarten, äquivalente Ersatzleistung .....	155
8.4	Erwärmung bei Störfällen, Explosionsschutz .....	157
8.4.1	Asynchronmotor mit blockiertem Rotor an voller Betriebsspannung	158
8.4.2	Schweranlauf beim Asynchronmotor .....	160
8.4.3	Kurzschluss bei Transformatoren .....	162
9	<b>Lösungen</b> .....	<b>165</b>
10	<b>Quellen</b> .....	<b>169</b>
	<b>Index</b> .....	<b>171</b>