

# 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

<b>5.1.5 Zusatzverluste .....</b>	<b>35</b>
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
<b>5.2 Verlustminimum, maximaler Wirkungsgrad .....</b>	<b>37</b>
<b>5.3 Temperaturabhängigkeit der Verluste .....</b>	<b>39</b>
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 Skineffekt .....	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
<b>6 Grundlagen der thermischen Analyse .....</b>	<b>45</b>
<b>6.1 Grundlagen der thermischen Ersatzschaltbilder .....</b>	<b>45</b>
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
<b>6.2 Praktische Berechnung der Wärmeleitungswiderstände .....</b>	<b>50</b>
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>	