

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>XI</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Einführung in die Problematik</b>	<b>1</b>
1.1.1 Allgemeines	1
1.1.2 Prinzipieller Temperaturverlauf in Wälzlageringen	1
1.1.3 Auswirkungen der reibungsbedingten Temperaturerhöhung	3
1.1.3.1 ... auf maßliche Veränderungen im Wälzlager	3
1.1.3.2 ... auf die Beanspruchung des Werkstoffes	3
1.1.3.3 ... auf die Beanspruchbarkeit des Werkstoffes	4
<b>1.2 Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
<b>1.3 Zielsetzung</b>	<b>6</b>
<b>2 TEMPERATURBERECHNUNG</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr</b>	<b>7</b>
2.1.1 Wärmezufuhr	7
2.1.1.1 Der Aufteilungsfaktor	8
2.1.1.2 Der Reibwert	9
2.1.1.3 Berechnung der Abwälzverhältnisse	12
2.1.1.3.1 Berechnung der Druckwinkel und Winkelgeschwindigkeiten	12
2.1.1.3.2 Berechnung der Relativgeschwindigkeiten in den Kontaktstellen	17
2.1.1.4 Berechnung der Kontaktflächen und Pressungsverteilung ...	20
2.1.1.5 Resultierende Wärmestromdichte	22
2.1.2 Wärmeabfuhr	23
2.1.2.1 Wärmeabfuhr an Gehäuse und Welle	23
2.1.2.2 Wärmeabfuhr an den Schmierstoff	24

<b>2.2 Das elektrische Analogiemodell eines Lagers</b>	<b>26</b>
2.2.1 Wärmeströme und prinzipieller Temperaturverlauf	26
2.2.2 Berechnung der Wärmewiderstände	31
2.2.2.1 Wärmewiderstand der Lagerringe	31
2.2.2.2 Wärmewiderstand der Wälzkörper	34
2.2.2.3 Wärmewiderstand zum Schmierstoff	35
<b>2.3 Zusammenfassung</b>	<b>35</b>
<b>3 BERECHNUNG DER SCHMIERFILMDICKE IM KONTAKT</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Dimensionslose Kennzahlen</b>	<b>38</b>
<b>3.2 Die isotherme Theorie</b>	<b>39</b>
3.2.1 Für Linienkontakte	39
3.2.2 Für Punktkontakt	40
<b>3.3 Thermische Korrektur - nichtisotherme Theorie</b>	<b>43</b>
<b>3.4 Eintrittstemperatur und Schmierfilmdicke</b>	<b>45</b>
<b>3.5 Zusammenfassung</b>	<b>46</b>
<b>4 GRUNDLAGEN DER SPANNUNGSBERECHNUNG</b>	<b>47</b>
<b>4.1 Berechnung der aus Druckbelastung resultierenden Spannungen</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Berechnung der Temperaturspannungen im punktförmigen Wälzkontakt</b>	<b>51</b>
<b>4.3 Berechnung der Vergleichsspannung im Material</b>	<b>55</b>
<b>4.4 Zusammenfassung</b>	<b>57</b>
<b>5 DAS NUMERISCHE MODELL</b>	<b>59</b>
<b>5.1 Modellbildung und Differentialgleichung</b>	<b>59</b>
5.1.1 Stationäres dreidimensionales Modell	60
5.1.2 Instationäres zweidimensionales Modell	61
5.1.3 Dimensionslose Form der Differentialgleichung	62

---

<b>5.2 Mathematische Umsetzung mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente</b>	<b>63</b>
5.2.1 Örtliche Diskretisierung	63
5.2.2 Zeitliche Diskretisierung	65
5.2.3 Ansatzfunktionen	66
5.2.4 Kompilation und Speicherbedarf	67
<b>5.3 Diskretisierung der Geometrie</b>	<b>69</b>
5.3.1 Der Gittergenerator	69
5.3.2 Der Gitteroptimierer	70
<b>5.4 Zeitliche Diskretisierung</b>	<b>72</b>
<b>5.5 Stabilität</b>	<b>73</b>
5.5.1 Forderung für das Verhältnis zwischen Zeit- und Ortsschritt	73
5.5.2 Forderung für die Diskretisierung des Ortes bei zeitlich periodischer Randbedingung	75
5.5.3 Zusammenfassung Stabilität	76
<b>5.6 Test der Numerik mit Hilfe Analytischer Vergleichsrechnungen</b>	<b>78</b>
5.6.1 Eindimensionale Wärmeleitung im Zylinder	79
5.6.1.1 Rechnung für kurze Zeiten	79
5.6.1.2 Rechnung für lange Zeiten	81
5.6.2 Zweidimensionale Wärmeleitung im Zylinder	84
5.6.3 Zusammenfassung Test der Numerik	85
<b>5.7 Zusammenfassung</b>	<b>85</b>
 <b>6 MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG</b>	 <b>87</b>
<b>6.1 Aufbau des Versuchstandes</b>	<b>87</b>
<b>6.2 Anordnung der Meßstellen</b>	<b>88</b>
<b>6.3 Versuchsparameter</b>	<b>89</b>
<b>6.4 Ergebnisse</b>	<b>90</b>
6.4.1 Temperaturen in radialer Richtung	90
6.4.2 Temperaturunterschied quer zur Laufrichtung	91
6.4.3 Lastabhängiger Temperaturanstieg	92
6.4.4 Drehzahlabhängiger Temperaturanstieg	93
<b>6.5 Zusammenfassung</b>	<b>94</b>

---

<b>7 PARAMETERSTUDIE</b>	<b>95</b>
7.1 Variation der Geometrie	95
7.2 Variation der Materialpaarung	96
7.3 Variation der Belastung	97
7.4 Variation der Kühlbedingung	97
<b>8 ERGEBNISSE</b>	<b>99</b>
<b>8.1 Auswertung der Parameterstudie</b>	<b>99</b>
8.1.1 Temperaturen	99
8.1.1.1 Mittlere Kontaktbahntemperatur	101
8.1.1.2 Hubtemperatur	105
8.1.1.3 Maximaltemperatur	108
8.1.1.4 Erläuterung zu den Einflußgrößen der Hubtemperatur	110
8.1.1.5 Temperaturverlauf im Radialschnitt	112
8.1.1.6 Temperaturen der Laufbahn über der Zeit	113
8.1.1.7 Orte der Maximaltemperatur	114
8.1.1.8 Zusammenfassung	115
8.1.2 Spannungen	116
<b>8.2 Näherungsgleichungen</b>	<b>119</b>
8.2.1 Eindringtiefe ET	119
8.2.1.1 Berechnung der Eindringtiefe mit FD-Verfahren	119
8.2.1.2 Näherungsgleichung - Fitfunktion	121
8.2.2 Mittlere Kontaktbahntemperatur	123
8.2.2.1 Näherungsgleichung für hohe Drehzahlen	123
8.2.2.2 Näherungsgleichung für Fett- oder Minimalölschmierung	125
8.2.2.3 Vergleich mit den FE-Rechnungen	125
8.2.3 Hubtemperatur	126
8.2.3.1 Herleitung der Näherungsgleichung	126
8.2.3.2 Die Überrollzeit $\Delta t$	128
8.2.3.3 Die maximale Wärmestromdichte	129
8.2.3.4 Näherung und Vergleich mit den Ergebnissen der Parameterstudie	130
<b>8.3 Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>132</b>

---

<b>9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>135</b>
9.1 Grundlagen, Zielsetzung und Ergebnisse	135
9.2 Durchgeführte Arbeiten	136
9.3 Ergebnisse	137
9.4 Ausblick	139
<b>Anhang</b>	<b>141</b>
<b>Literatur</b>	<b>157</b>