



Masterarbeit

Implementierung zustandsorientierter Instandhaltungsmaßnahmen in den Bereichen Schmierung & Thermografie am Beispiel der MVA Spittelau & Flötzersteig

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
(Dipl.-Ing., DI)

erstellt für

Fernwärme Wien GmbH

Vorgelegt von:

Michael Kößlbacher, BSc
0535168

Betreuer:

Dipl.-Ing. Alexander Kirchner
em. O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Werner L. Kepplinger

Leoben, 2. März 2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

PROLOG

„Die größten Ereignisse, das sind nicht unsere lautesten,
sondern unsere stillsten Stunden.“

**Friedrich Nietzsche (1844 – 1900) in,
„Also sprach Zarathustra“**

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen Menschen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Manuela und Peter, die mir dieses Studium ermöglicht haben. Durch ihre finanzielle und mentale Unterstützung tragen sie einen wesentlichen Anteil am Erfolg meiner Studienzzeit. Gemeinsam mit meiner Schwester Nina waren sie in allen Lebenslagen da, um mir bei der Erreichung meiner Ziele behilflich zu sein.

Einen besonderen Anteil am Gelingen dieser Arbeit und an der Vollendung meines Studiums hat auch meine Freundin Magdalena. Sie war es die mir in schwierigen Zeiten, wieder den Blick auf das Wesentliche verschaffte.

Ich bedanke mich bei den Verantwortlichen der Fernwärme Wien GmbH, allen voran bei Herrn Dipl.-Ing. Alexander Kirchner, für das Zustandekommen und die Betreuung dieser Masterarbeit. Auch allen anderen Mitarbeitern die mich mit Rat und Tat unterstützt haben möchte ich hiermit meinen Dank aussprechen.

Desweiteren bedanke ich mich bei Herrn em.O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Werner Kepplinger vom Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes für die universitäre Betreuung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Implementierung zustandsorientierter Instandhaltungsmaßnahmen in den Bereichen Schmierung & Thermografie am Beispiel der MVA Spittelau & Flötzersteig

Diese Arbeit liefert einen Beitrag zur Implementierung zustandsorientierter Instandhaltungsmaßnahmen in den Müllverbrennungsanlagen Spittelau und Flötzersteig der Fernwärme Wien GmbH. Dabei werden die Bereiche Schmierung, Betriebsmediendiagnostik und Diagnoseverfahren mit thermischem Messprinzip behandelt.

In einem ersten Schritt werden dazu die theoretischen Grundlagen auf den Gebieten Tribologie, Schmierungstechnik und berührungsloser Temperaturmessung abgehandelt. Im Anschluss daran werden dem Stand der Technik entsprechende Einsatzfelder zur zustandsorientierten Instandhaltung in diesen Bereichen angeführt.

Der praktische Teil im Bereich der Schmierung beschäftigt sich einerseits mit technischen Fragen zur Optimierung von Wartungstätigkeiten, sowie andererseits mit wirtschaftlichen Aspekten wie Personalaufwand oder Kosten für mögliche Inspektionsmaßnahmen.

Im Bereich der berührungslosen Temperaturmessung besteht der praktische Teil in der Implementierung einer thermografischen Überwachungsmethode an elektrischen Anlagen. Dies reicht von der Auswahl der Anlagen, über die Art und Häufigkeit der Überwachungsmaßnahmen, bis hin zur organisatorischen Durchführung. Den Abschluss bilden auch hier wirtschaftliche Gesichtspunkte, sowie eine Analyse der relevanten, rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Einführung einer solchen Methode.

Abstract

Implementation of condition based maintenance tasks in the areas of lubrication & thermography utilized in waste incineration plants

Spittelau & Flötzersteig

This thesis makes a contribution to the implementation of condition based maintenance tasks in the waste incineration plants Spittelau and Flötzersteig of Fernwärme Wien GmbH. It focuses the areas of lubrication, diagnostics of operating fluids and diagnostics based on thermal measurement principles.

Step one is theoretical basics on the fields of tribology, lubrication technology and non-contact temperature measurement. Then, step two is about the best available techniques in condition based maintenance for these application fields.

The practical part in the field of lubrication consists of the optimization of maintenance activities and of economic aspects like human resources or costs for inspection activities.

In the field of non-contact temperature measurement the practical part deals with the implementation of a thermographic monitoring methodology for electrical systems. It starts with the selection of the electrical equipment and goes further to questions about the type, the frequency and the organizational implementation of the monitoring method. The conclusion also consists of economic aspects and an analysis of the legal issues in case of implementation of such a method.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	2
2. Einführung in die Instandhaltung.....	3
2.1 Instandhaltung.....	3
2.1.1 Begriffsdefinition.....	3
2.1.2 Instandhaltungsphilosophien	4
2.1.3 Instandhaltung als Dienstleistung	5
2.2 Anlagenwirtschaft.....	6
2.3 TPM – Total Productive Maintenance.....	8
2.4 IH-Management	10
3. Anlagenbeschreibung.....	13
3.1 MVA Spittelau	13
3.2 MVA Flötzersteig	16
4. Betriebsmediendiagnostik.....	19
4.1 Grundlagen der Tribologie.....	20
4.1.1 Definitionen	20
4.1.2 Tribologische Beanspruchung	21
4.1.3 Reibung.....	23
4.1.3.1 Reibungskenngrößen	23
4.1.3.2 Reibungsarten	23
4.1.3.3 Reibungszustände	27
4.1.4 Verschleiß	29
4.1.4.1 Verschleißmessgrößen [vgl. 6].....	29
4.1.4.2 Verschleißmechanismen.....	30
4.1.4.3 Verschleißarten	34
4.2 Schmierung.....	40
4.2.1 Schmierungszustände [vgl. 6]	41
4.2.1.1 Hydrodynamische Schmierungstheorie.....	41
4.2.1.2 Elastohydrodynamische Schmierungstheorie (EHD).....	42
4.2.1.3 Grenzreibung.....	42

4.2.2	Schmierstoffe	43
4.2.2.1	Eigenschaften von Schmierstoffen.....	45
4.2.3	Schmierung von Gleitlagern	47
4.2.3.1	Hydrodynamische Gleitlager.....	48
4.2.3.2	Hydrostatische Gleitlager.....	48
4.2.4	Schmierung von Wälzlagern.....	49
4.2.4.1	Lebensdauer.....	50
4.2.4.2	Ölschmierung [vgl. 2].....	51
4.2.4.3	Fettschmierung [vgl. 2, 65].....	53
4.2.5	Getriebeschmierung	58
4.2.5.1	Lebensdauer [vgl. 2]	58
4.2.5.2	Getriebeöle [vgl. 2].....	59
4.2.5.3	Getriebefette [vgl. 2]	60
4.2.5.4	Schmierstoffauswahl [vgl. 2]	60
4.2.6	Kettenschmierung	61
4.2.6.1	Schmierungsarten [vgl. 2].....	61
4.2.6.2	Schmierstoffviskosität [vgl. 2].....	62
4.2.6.3	Schmierstoffart	62
4.3	Instandhaltungsmaßnahmen	63
4.3.1	Wartung	63
4.3.2	Inspektion.....	64
4.3.2.1	Inspektion von Schmier- und Hydraulikmedien	64
4.3.2.2	Inspektion von Kühl- und Isolationsmedien	67
4.4	Praktische Umsetzung.....	69
4.4.1	Technische Maßnahmen	69
4.4.1.1	Ausgangssituation	69
4.4.1.2	Aufnahme der Schmierstellen	70
4.4.1.3	Aufnahme der Schmierstoffsorten.....	70
4.4.1.4	Berechnung der Nachschmierintervalle und –mengen.....	74
4.4.1.5	Der Schmierungsprozess.....	79
4.4.2	Wirtschaftliche Auswirkungen.....	81
4.4.2.1	Personalaufwand Nachschmiertätigkeiten	81
4.4.2.2	Optimierung der Schmierstoffbewirtschaftung.....	83
4.4.2.3	Zustandsbeurteilung durch Ölanalyse.....	84

5. Diagnoseverfahren mit thermischem Messprinzip	86
5.1 Physikalische Grundlagen	87
5.1.1 Strahlungsausbreitung [vgl. 109]	88
5.1.2 Energiebilanz der Wärmestrahlung	92
5.1.3 Strahlungsgesetze und das Modell des Schwarzen Körpers	92
5.1.4 Eigenstrahlung realer Körper.....	95
5.1.5 Thermische Auflösung und Strahlungscontrast	96
5.1.6 Die Transmission der Atmosphäre	99
5.1.7 Detektortypen.....	102
5.1.7.1 Detektorempfindlichkeit R_D	102
5.1.7.2 Detektivität.....	103
5.1.7.3 Thermische Detektoren.....	104
5.1.7.4 Quantenempfänger.....	107
5.2 Thermische Messanwendungen in der Instandhaltung	113
5.2.1 Pyrometrie.....	113
5.2.2 Thermografie.....	113
5.2.3 Normen in der Temperaturmessung.....	115
5.2.4 Einführung einer Überwachungsmethode mit thermischem Messprinzip	116
5.3 Praktische Umsetzung.....	117
5.3.1 Technische Maßnahmen	118
5.3.1.1 Eingesetzte Thermografiegeräte.....	118
5.3.1.2 Anlagenauswahl	119
5.3.1.3 Risikoanalyse	121
5.3.1.4 Inspektion	124
5.3.1.5 Dokumentation und Interpretation.....	124
5.3.1.6 Der Thermografieprozess.....	127
5.3.2 Wirtschaftliche Maßnahmen.....	129
5.3.2.1 Personalaufwand Thermografieüberwachung.....	129
5.3.2.2 Eigenvergabe – Fremdvergabe Thermografieüberwachung	133
5.3.3 Rechtliche Aspekte.....	135
5.3.3.1 Elektrotechnikgesetz (ETG) – 1992	135
5.3.3.2 Elektrotechnikverordnung (ETV) – 2002	135
5.3.3.3 Elektroschutzverordnung (ESV) – 2003.....	137
6. Ergebnisse und Diskussion.....	138
6.1 Bereich „Schmierung“.....	138
6.2 Bereich „Thermografie“	140



7. Ausblick	142
8. Verzeichnisse	143
8.1 Literatur.....	143
8.2 Abkürzungen	162
8.3 Tabellen	165
8.4 Abbildungen	167
Anhang.....	172

1. Einleitung

Die Zahl der Publikationen im Bereich der industriellen Instandhaltung hat in den letzten zwei Jahrzehnten stark zugenommen und die Auseinandersetzung mit diesem Thema, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis, ist nach wie vor ungebrochen. Die besondere Schwierigkeit bei der Einführung neuer Ideen und Konzepte, in eine seit Jahren mehr oder weniger stark bewährte Instandhaltungsorganisation eines Unternehmens, stellt die Umsetzung der wissenschaftlich fundierten Methoden und Instrumente in eine praktikable und für alle Beteiligten bewältigbare Form in den täglichen Arbeitsalltag dar. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass solchen Veränderungsprozessen die nötige Zeit eingeräumt wird, um von der Managementebene bis zum sogenannten „shop floor“ akzeptiert und auch angewandt zu werden. Es reicht aber sicher nicht aus, eine neu einzuführende Strategie in Form eines Meetings an Mitarbeiter des mittleren Managements vorzustellen und von diesen dann die Delegation dieser neu anzuwendenden Methode an das Instandhaltungspersonal zu fordern. Auch von der Einführung neuer Management Konzepte in ein bestehendes Unternehmen darf man sich keine Wunder erwarten. Nur wenn die dazugehörigen Anpassungen gemeinsam mit den Mitarbeitern im Sinne „learning by doing“ geschieht, können solche Konzepte ihr wahres Potential entfalten.

1.1 Problemstellung

Der Wechsel von einer ausfallorientierten zu einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie wird von vielen Unternehmen als Chance wahrgenommen, die Ausfallzeiten ihrer Produktions- oder Prozessanlagen zu reduzieren und so die Verfügbarkeit zu steigern. Diesem Vorhaben eilt meist der Wunsch voraus, die eigene Marktposition auszubauen oder zu verbessern und so konkurrenzfähig zu bleiben.

Es gilt daher geeignete Diagnosemethoden zur Zustandsbeurteilung zu definieren und diese, an dafür ausgewählten technischen Systemen, erfolgreich zu implementieren. Dabei kommt zum einen der richtigen und repräsentativen Zustandserfassung, sowie der Häufigkeit an Überwachungszyklen eine entscheidende Rolle zu. Es darf dabei nie, auch wenn die Diagnosemethode noch so geeignet und aussagekräftig erscheint, das vertretbare wirtschaftliche Maß außer Acht gelassen werden. Die andere Herausforderung im Zusammenhang mit der Einführung „neuer“ Diagnosemethoden stellt die Auswertung der gewonnenen Messdaten dar. Nur wenn man in der Lage ist, die Fülle vorhandener Daten auch richtig zu interpretieren, werden sich mittel- bis langfristig Erfolge einstellen. Die Überwachung als Selbstzweck ist also tunlichst zu vermeiden und die Sinnhaftigkeit durchgeführter Überwachungsmaßnahmen sollte regelmäßig überprüft werden. Wenn diese



Überlegungen allerdings beachtet werden, dann steht einer erfolgreichen Implementierung einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie nichts mehr im Wege.

1.2 Zielsetzung

Den Ausgangspunkt dieser Arbeit bildet die bestehende Risikoanalyse, die im Zuge der Bachelorarbeit von KÖSLBACHER/WEILER [1] mit dem Titel „Methoden der Zustandsorientierten Instandhaltung am Beispiel der MVA Spittelau & Flötzersteig“ an den Müllverbrennungsstandorten Spittelau und Flötzersteig der Fernwärme Wien GmbH durchgeführt wurde. Darauf aufbauend soll die Implementierung einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie erarbeitet werden. Dabei befasst sich diese Arbeit vor allem mit Diagnosemethoden von Betriebsmedien (siehe Kapitel 4), sowie Diagnosemethoden mit thermischem Messprinzip (siehe Kapitel 5). In beiden Fällen werden zu Beginn des jeweiligen Kapitels die theoretischen Grundlagen vermittelt, welche zum Verständnis und zur Auswahl geeigneter Diagnoseparameter dienen sollen. Im Anschluss werden allgemeine und zustandsorientierte Instandhaltungsmaßnahmen angeführt. Den Abschluss beider Kapitel bilden Betrachtungen zur jeweiligen Ausgangssituation in den beiden Werken Spittelau und Flötzersteig, sowie Maßnahmen die schließlich zur Implementierung einer zustandsorientierten Instandhaltung beitragen sollen.

Zuvor wird zu Beginn der Arbeit (siehe Kapitel 2) eine allgemeine Einführung in die Themen Instandhaltung, Anlagenwirtschaft sowie Instandhaltungsmanagement gegeben und im Anschluss daran erfolgt eine kurze Anlagen- und Verfahrensbeschreibung der beiden Müllverbrennungsanlagen an den Standorten Spittelau und Flötzersteig (siehe Kapitel 3).

Zum Ende hin werden die Ergebnisse in gebündelter Form analysiert und einer kritischen Betrachtung unterzogen (siehe Kapitel 6). Den Abschluss bildet sodann eine grobe Zusammenfassung sowie ein Ausblick über die Zukunft der zustandsorientierten Instandhaltung in den Werken Spittelau und Flötzersteig (siehe Kapitel 7).



2. Einführung in die Instandhaltung

In diesem Kapitel wird aufbauend, auf der zu Grunde liegenden Industrie-Norm die Definition der Instandhaltung erarbeitet. In weiterer Folge werden Einblicke in aktuelle Themen und Fragestellungen, die einerseits durch die wissenschaftliche Auseinandersetzung in diesem Bereich, sowie andererseits aus der praktischen Umsetzung in der Industrie entstehen, geboten. Zu diesem Zweck wird ein kurzer Abriss der nah verwandten Konzepte der Betriebswirtschaftslehre, wie etwa der Anlagenwirtschaft, dem TPM-Konzept, sowie dem Instandhaltungsmanagement, dargestellt.

2.1 Instandhaltung

2.1.1 Begriffsdefinition

Der Begriff der Instandhaltung (IH) wird allgemein in DIN 31051 [77] definiert und als Überbegriff für die Tätigkeiten „Wartung“, „Inspektion“, „Instandsetzung“ und „Verbesserung“ verwendet. Eine diesbezügliche Unterteilung gibt Abbildung 1 wieder. [vgl. 1]

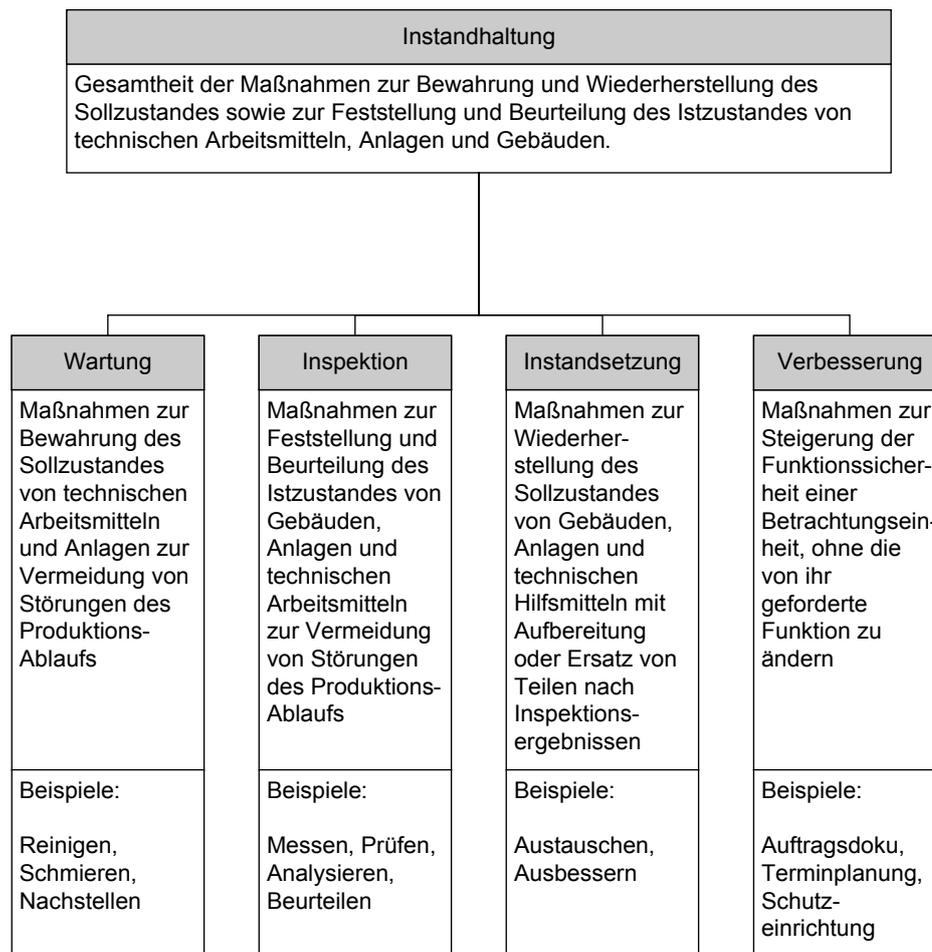


Abbildung 1: Unterteilung des Instandhaltungsbegriffes nach DIN 31051 [77] in Anlehnung an RÖTZEL [136] S.13

2.1.2 Instandhaltungsphilosophien

Mit den Begriffen Instandhaltungsphilosophie oder Instandhaltungsstrategie wird in der industriellen Instandhaltung zum einen der Planungsgrad von Instandhaltungstätigkeiten und zum anderen der Zeitpunkt, an welchem IH-Tätigkeiten durchgeführt werden, unterschieden. Angefangen bei der „ausfallorientierten Instandhaltung“, welche den geringsten Planungsgrad aufweist, ergeben sich so die unterschiedlichsten Stufen der Instandhaltungsphilosophie. Abbildung 2 zeigt eine in der Literatur derzeit übliche Unterteilung in sechs unterschiedliche Instandhaltungsphilosophien.

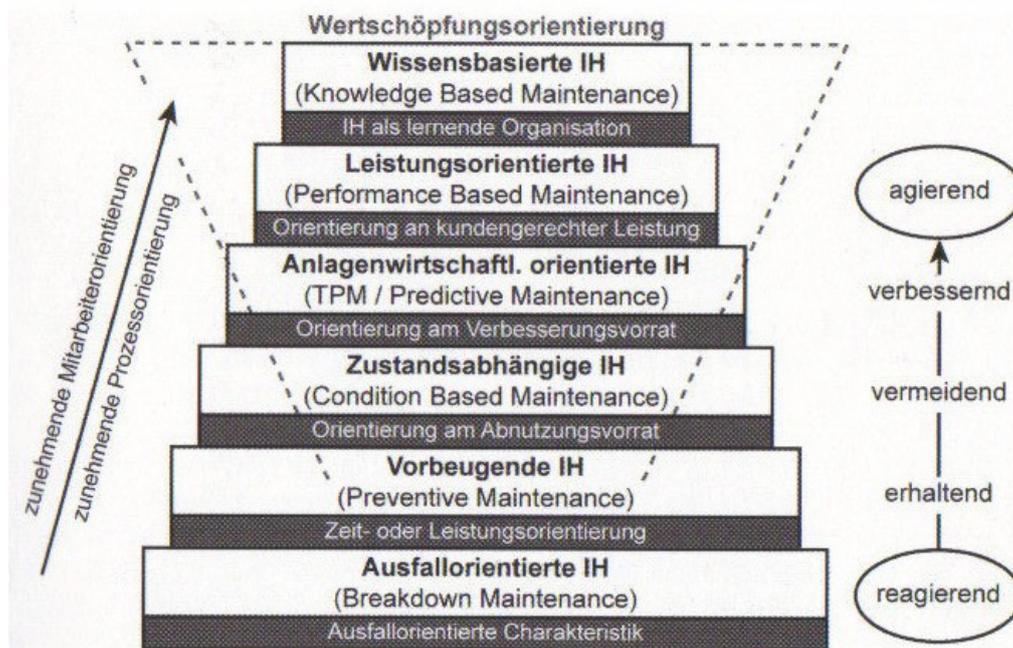


Abbildung 2: Instandhaltungsphilosophien und ihr unterschiedlicher Beitrag zur Wertschöpfung aus [157]

Für einen Industriebetrieb und hier insbesondere für den operativen Geschäftsbereich, sind vor allem die drei untersten Stufen von entscheidender Bedeutung.

Daher werden diese drei Stufen oft auch als Instandhaltungsstrategien bezeichnet, wobei der Abnutzungsvorrat einer Maschine oder Anlage das entscheidende Kriterium für die Instandhaltung darstellt. Während die „ausfallorientierte IH“ zwar den Abnutzungsvorrat einer Maschine oder Anlage voll ausnützt, stellt jedoch der Ausfallzeitpunkt die entscheidende Unbekannte dar. Ein auftretender Schaden lässt sich nicht vorhersagen und tritt daher immer zufällig und unvorbereitet auf. Bei der „vorbeugenden IH“ hingegen werden Instandhaltungsaufgaben periodisch (meist in zeitlichen Abständen) durchgeführt und sind somit planbar, der Abnutzungsvorrat einer Maschine oder Anlage wird dabei aber nicht vollständig ausgenutzt. Das Konzept der „zustandsorientierten IH“ versucht die Vorteile der

ausfallorientierten und der vorbeugenden Instandhaltung zu vereinen. Dabei soll mit geeigneten Diagnosemethoden der Zustand einer Maschine oder Anlage bestimmt werden, um darauf geeignete und auf ein technisches System individuell abgestimmte Maßnahmen ableiten zu können. [vgl. 1]

Die oberen Stufen in Abbildung 1 setzen eine zunehmende Mitarbeiter- und Prozessorientierung voraus und orientieren sich zunehmend an der Wertschöpfungskette einer Produktion.

2.1.3 Instandhaltung als Dienstleistung

Der gesteigerte Kostendruck auf wirtschaftliche Unternehmen hat in den vergangenen Jahren ein geändertes Rollenverständnis in der Instandhaltung eingeläutet. So wird die industrielle Instandhaltung heute zunehmend als interner Dienstleister der Produktion verstanden. Diese geänderten Rahmenbedingungen sind im Unternehmen nur durch verstärkte Kulturarbeit und geeignete Mitarbeiterschulung und –motivation zu erreichen. [vgl. 140]

Dabei stellt die Mitarbeitermotivation eine entscheidende Rolle der Führungskraft dar. Sie muss die Rahmenbedingungen schaffen, damit vor allem die Eigenmotivation der IH-Mitarbeiter möglich ist. Dies gelingt, wenn zum einen Leistung gefordert und auch gefördert wird und zum anderen Freiräume zum Probieren, Mitbestimmen und Lernen geschaffen werden. Vor allem der tägliche Erfolg bei der Arbeit gibt enorme Selbstbestätigung und trägt in einem hohen Ausmaß zur Eigenmotivation bei. [vgl. 141, 142]



2.2 Anlagenwirtschaft

Die Anlagenwirtschaft (Asset Management) als Disziplin der allgemeinen Betriebswirtschaftslehre befasst sich mit dem Bereich des Sachanlagevermögens (Anlagen, Betriebsmittel, usw.). Gemeinsam mit der Personalwirtschaft und der Materialwirtschaft bildet die Anlagenwirtschaft den „Input“ (siehe Abbildung 3), der durch die Beschaffungsmärkte versorgt wird. [vgl. 143]

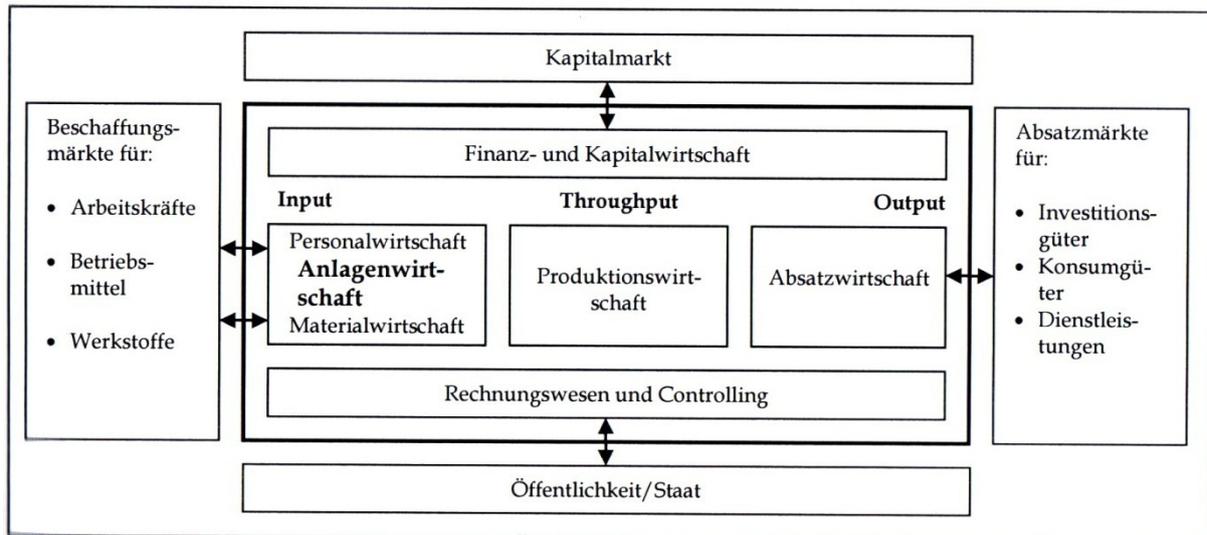


Abbildung 3: Einordnung der Anlagenwirtschaft aus [143]

Versucht man den Produktionsfaktor Anlage umfassend an seinem Anlagenlebenszyklus auszurichten, so wird oft auch der von MÄNNEL [146] geprägte Begriff der „integrierten Anlagenwirtschaft“ verwendet. Diese umfassende Betrachtung erfolgt nach den in Abbildung 4 angeführten Dimensionen „Lebenszyklus“, „Ziele“ und „Handlungsfelder“. [vgl. 144]

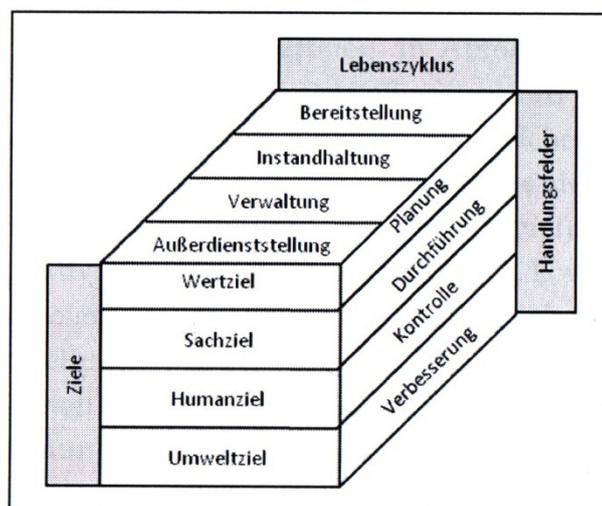


Abbildung 4: 3-dimensionale Darstellung der Integrierten Anlagenwirtschaft nach MÄNNEL aus [146]

Nach dem Konzept der integrierten Anlagenwirtschaft bildet die in dieser Arbeit behandelte industrielle Instandhaltung nur einen Teilbereich der gesamten Anlagenwirtschaft. Da sich das Hauptinteresse der Anlagenwirtschaft allerdings auf die Nutzungsphase einer Anlage bezieht, nimmt auch die Instandhaltung einen hohen Stellenwert in der Anlagenwirtschaft ein. [vgl. 145]

2.3 TPM – Total Productive Maintenance

Das von NAKAJIMA [147] in Japan entwickelte und durch zahlreiche andere Vertreter (siehe dazu umfassend SCHRÖDER [145]) in den westlichen Kulturkreis überführte Konzept des Total Productive Maintenance (TPM), hat die Maximierung der Gesamtanlageneffektivität zum Ziel. Dabei wird alles der Globalphilosophie „Null Verluste“ zu Grunde gelegt. [vgl. 145] Die klassischen fünf Grundelemente des TPM-Konzeptes sind [vgl. 148]:

- Kontinuierliche Anlagenverbesserung
- Autonome Instandhaltung
- Geplante Instandhaltung
- Schulung und Training
- Instandhaltungsprävention

Eine wichtige Kennzahl um die Zielerreichung des TPM Ansatzes quantifizieren zu können, ist die „Overall Equipment Effectiveness“ (OEE). Der OEE-Wert wird durch die Multiplikation von vier weiteren Kennzahlen gebildet. Diese sind in Abbildung 5 dargestellt und werden durch die unterschiedlichsten Verlustquellen die während der Betriebszeit einer Anlage auftreten berechnet. [vgl. 149]

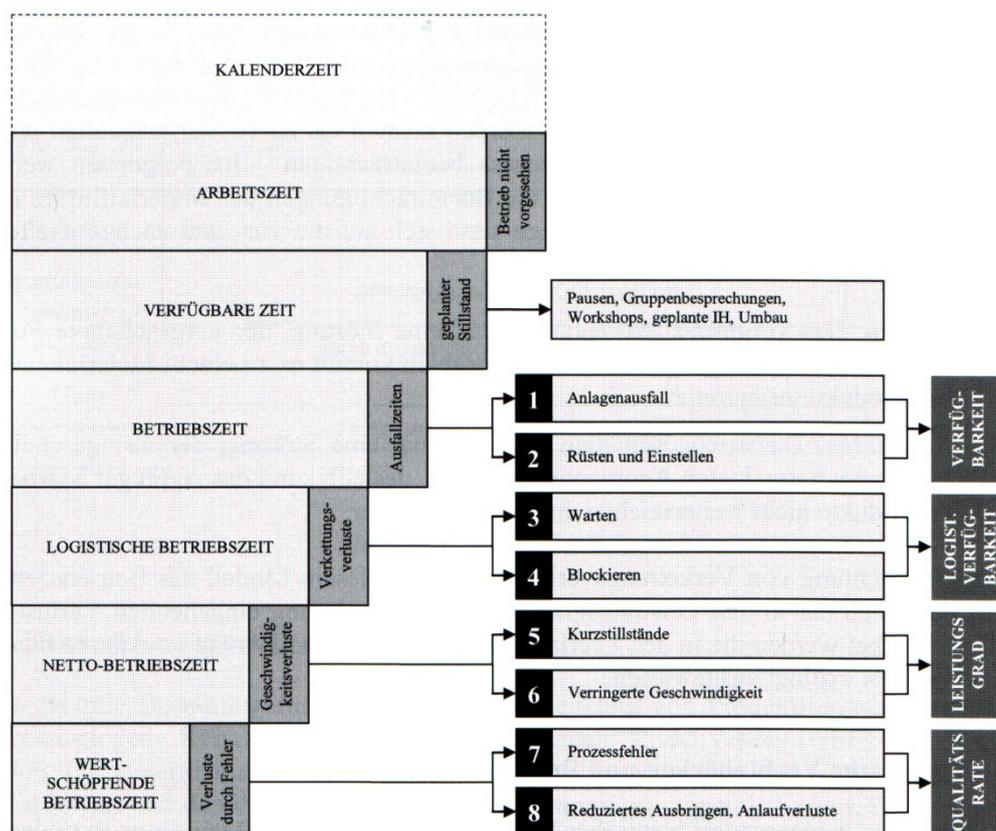


Abbildung 5: Betriebszeitmodell mit den dazugehörigen Verlustquellen aus [149] S.102

In Abbildung 6 ist die Berechnung der OEE mit den dazu benötigten vier Unterkennzahlen schematisch dargestellt. Wird beispielsweise ein OEE-Wert von 75% berechnet, so bedeutet dies, dass sich die Anlage in $\frac{3}{4}$ der Zeit, die nach Abzug der geplanten Stillstände zur Verfügung steht (verfügbare Zeit, siehe Abbildung 5), verlustfrei in Betrieb befindet. [vgl. 149]

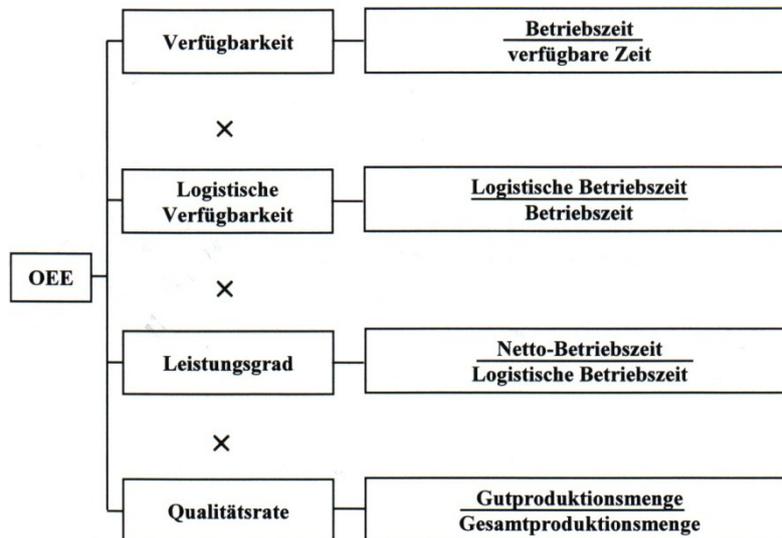


Abbildung 6: Bestimmung der OEE über die vier Unterkennzahlen aus [149] S.103

2.4 IH-Management

In DIN EN 13306:2008 [150] wird das IH-Management durch Erweiterung der Definition der Instandhaltung um technisch-wirtschaftliche Aspekte wie folgt definiert. [vgl. 145]

Instandhaltungsmanagement:

„Alle Tätigkeiten des Managements, die die Ziele, die Strategien und die Verantwortlichkeiten sowie die Durchführung der Instandhaltung bestimmen und sie durch Maßnahmen wie Instandhaltungsplanung, -steuerung und die Verbesserung der Instandhaltungstätigkeiten und deren Wirtschaftlichkeit verwirklichen.“ [150]

Der Aufbau und die Aufgaben des Instandhaltungsmanagements werden in Abbildung 7 dargestellt.

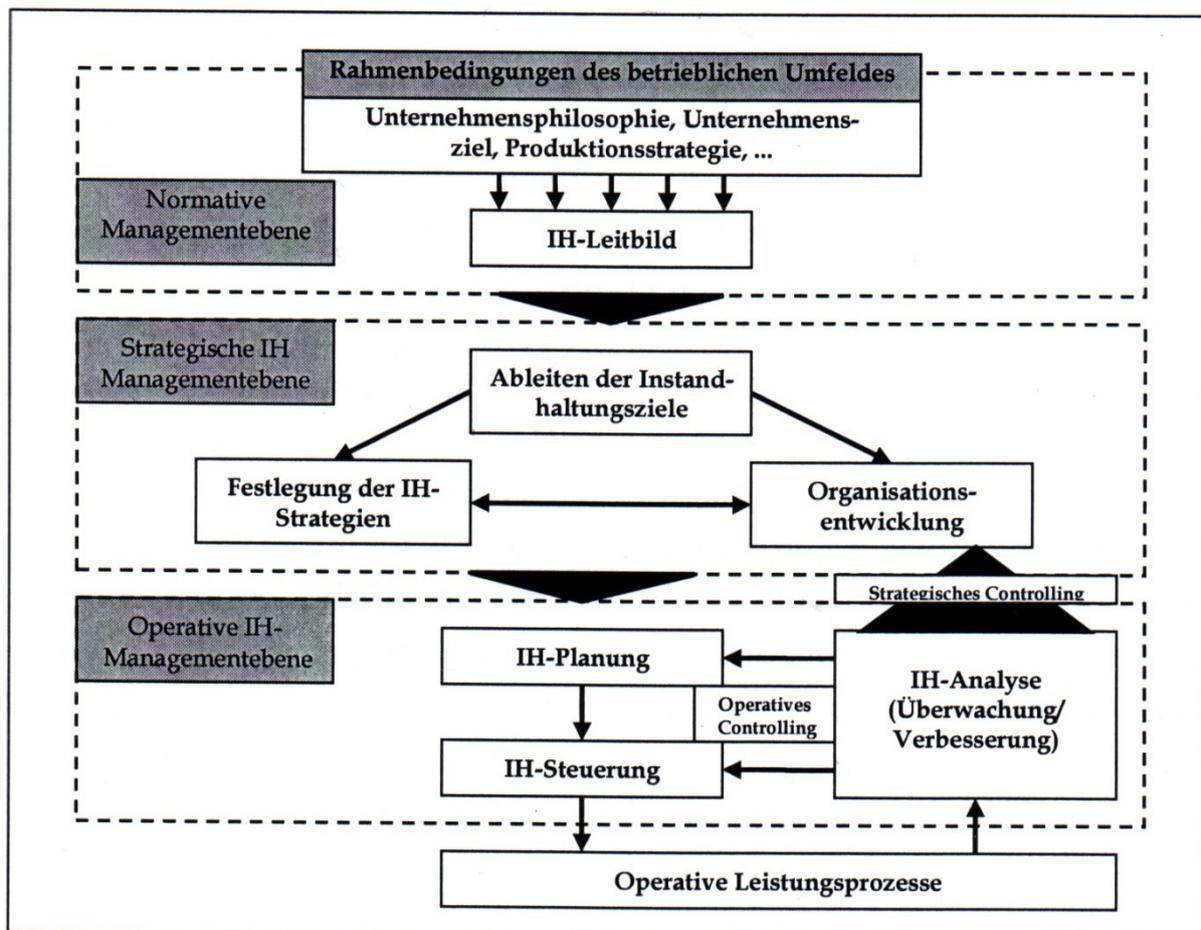


Abbildung 7: Aufbau und Aufgaben des Instandhaltungsmanagements aus SCHRÖDER [145] S.102

Zur Bewertung eines erfolgreich in der Praxis umgesetzten IH-Managements sind in der Vergangenheit eine Vielzahl an unterschiedlichen Bewertungsmethoden entwickelt worden. Eine diesbezügliche Aufzählung aller zurzeit gängigen Bewertungsmethoden zählt SCHRÖDER in „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements“ [145] auf und entwickelt darin selbst ein umfassendes Modell zur Bewertung des IH-Managements.

Als Basis dient dabei ein inhaltlicher Bezugsrahmen, der zum einen ein Struktur- und zum anderen ein Prozessmodell darstellt. Dieser Bezugsrahmen ist in Abbildung 8 dargestellt. [vgl. 151]

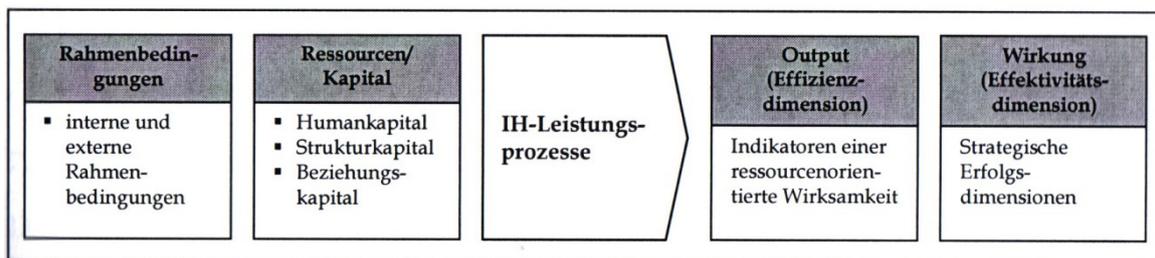


Abbildung 8: Bezugsrahmen des Instandhaltungsmanagements aus [151, 158]

Ausgehend von diesem Bezugsrahmen entwickelt SCHRÖDER [145] ein Gesamtmodell des Instandhaltungsmanagements (siehe Abbildung 9).

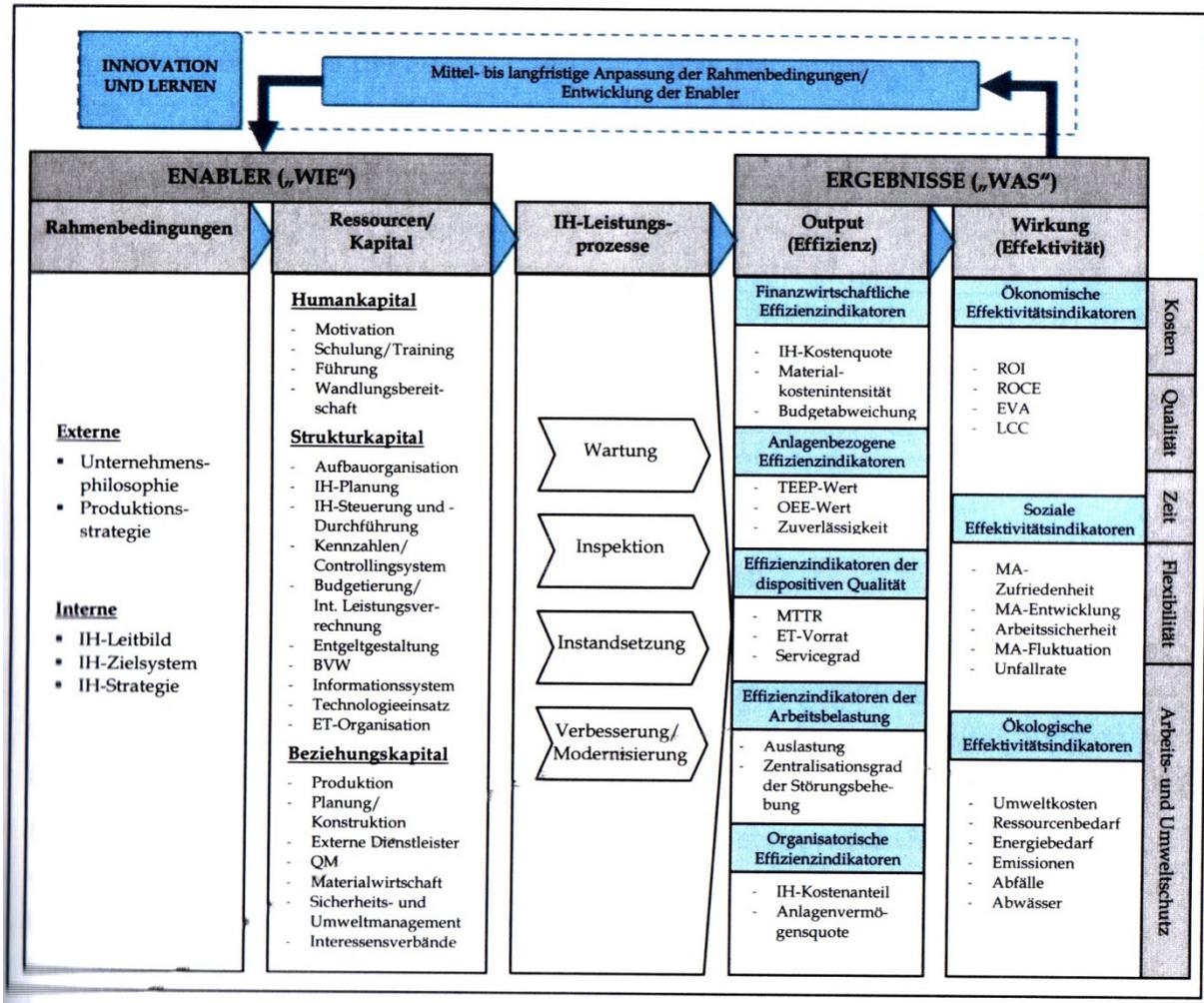


Abbildung 9: Gesamtmodell des Instandhaltungsmanagements aus SCHRÖDER [145] S.190

Die methodische Vorgehensweise bei der Bewertung erfolgt in drei Phasen wovon die erste als „IH-Assessment“ bezeichnet wird und sich mit der Bewertung der Enabler-Aspekten aus Abbildung 9 beschäftigt. In Phase 2 erfolgt die Bestimmung geeigneter Kennzahlen zur Messung und Beurteilung der Ergebnisse. In Phase 3 wird die Durchführung und das Ergebnis kritisch hinterfragt und somit ein kontinuierlicher Lern- und Verbesserungsprozess in Gang gesetzt, der wiederum die Verknüpfung zur Phase 1 darstellt. [vgl. 145]

3. Anlagenbeschreibung

Dieses Kapitel befasst sich mit der technischen Beschreibung der beiden Müllverbrennungsanlagen der Fernwärme Wien GmbH an den Standorten Spittelau und Flötzersteig. Die Abschnitte 3.1 und 3.2 sind dabei wörtlich aus KÖSLBACHERWEILER [1] entnommen.

3.1 MVA Spittelau

Kurzbeschreibung:

„Die MVA (Müllverbrennungsanlage) Spittelau (siehe Abbildung 10) besteht mit geringen Abänderungen in ihrer jetzigen Form seit 1989, wobei die Müllkessel noch aus der Zeit vor dem Brand von 1987 stammen. Die thermische Leistung aus Müll beträgt 60 MW und wird vollständig ins Wiener Fernwärmenetz eingespeist, zusätzlich ist auch eine Gegendruck-Dampfturbine mit 6 MW elektrischer Leistung installiert. Der Durchsatz beträgt 270.000 t [153] Restmüll aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen pro Jahr. [vgl. 152]“ [1]



Abbildung 10: MVA Spittelau [154]

Verfahrensbeschreibung:

„Die Abfallbehandlung erfolgt in zwei getrennten Linien mit jeweils eigener Rauchgasreinigung mit Ausnahme der Entstickungsanlage, für diese werden die Abgasströme der beiden Linien zusammengeführt. Die schematische Darstellung einer Linie ist der Abbildung 11 zu entnehmen. [vgl. 152]

Vom 7000m³ großen Müllvorratsbunker, in welchen die täglich angelieferten Abfälle über 8 Kippstellen entladen werden, werden die beiden Verbrennungslinien mit 2 Brückenkränen beschickt, welche den Abfall zur Vergleichmäßigung des Heizwertes nach dessen Anlieferung durchmischen. In den beiden Schurren wird der Müll getrocknet und vorgewärmt, bevor er dann über ein hydraulisch betriebenes Beschickersystem, welches sich aus zwei Vorschubblöcken zusammensetzt, auf

einen $34,5\text{m}^2$ großen und 26° geneigten Rückschubrost fällt. Die Roste der beiden Linien sind jeweils in zwei Bahnen unterteilt, welche gegengleich laufen, um eine optimale Schürung und folglich einen idealen Ausbrand zu gewährleisten. Die Verbrennungsgasführung im Brennraum erfolgt im Gegenstrom, durch die Eindüsung von Sekundärverbrennungsluft im ersten Zug wird eine vollständige Verbrennung der Rauchgase garantiert. Der heiße Rauchgasstrom geht durch zwei weitere Züge mit Kesselheizflächen, in denen ihr Wärmeinhalt zur Produktion von bis zu 45t/h Sattdampf (33bar) verwendet wird. Das Rauchgas verlässt den Müllkessel durch den Economizer (Speisewasservorwärmung) und erreicht nach einem weiteren Zug, der Verbrennungsluftvorwärmung, den E-Filter. [vgl. 152]

Die beiden E-Filter (einer pro Linie) stellen den trockenen Teil der Rauchgasreinigungsanlage (RRA) dar und verfügen über jeweils 3 Felder, die mit einer Spannung von 60kV betrieben werden. Dieses Reinigungssystem reduziert den Staubgehalt des Abgases auf unter $5\text{mg}/\text{Nm}^3$, die dabei anfallende Flugasche wird mithilfe eines Transportsystems aus mechanischen und pneumatischen Förderaggregaten in einen Lagersilo überführt. Mittels LKW wird die Asche von dort einer Verwertung/Deponierung zugeführt. [vgl. 152]

Nach den E-Filtern durchläuft das Abgas ein dreistufiges Wäschersystem aus saurem, basischem und elektrodynamischem Wäscher. Das Rauchgas wird in der Quench von 180°C auf ungefähr 60°C abgekühlt, der erste (saure) Wäscher scheidet, bei einem pH-Wert von 1 und turbulenten Durchmischungsverhältnissen von Gas- und Flüssigphase, Halogenwasserstoffe (HCL , HF), Reststaub sowie partikelgebundene Schwermetalle ab. Der zweite (basische) Wäscher wird im Gegenstrom gefahren, die eingedüste Kalkmilch reagiert mit dem im Rauchgas enthaltenen Schwefeldioxid (SO_2) zu Gips. Im elektrodynamischen Venturiwäscher wird der Reststaubgehalt auf unter $1\text{mg}/\text{Nm}^3$ vermindert. [vgl. 152]

Die bei der Abgasreinigung belasteten Wasserströme werden in der Abwasserreinigungsanlage (ARA) aufbereitet und mit Hilfe von Umwälzpumpen im Kreis geführt. Die bei der Wiederaufbereitung anfallenden Schlämme werden in zwei Kammerfilterpressen entwässert und anschließend fachgerecht deponiert. [vgl. 152]

Um Verschleppungen der Waschwässer zu verhindern sind zwischen den einzelnen Wäschern und nach der elektrodynamischen Venturi-Wäsche (EDV) Tropfenabscheider eingebaut. Die Abgasströme werden in einem Wärmetauscher erwärmt und über die beiden Saugzüge in die anschließende Entstickungsanlage, die letzte Stufe der Abgasreinigung, geführt. [vgl. 152]

Vor der Entstickungsanlage werden die beiden Linien zusammengeführt, innerhalb der Anlage am Wärmerohr vorgewärmt, mit Ammoniakwasserdampf vermischt und durch Flächenbrenner auf Reaktionstemperatur gebracht. Die Stickoxide werden nun in drei Katalysatorlagen zu Wasser, Sauerstoff und Stickstoff abgebaut. Die gespeicherte Wärme des Stroms wird auf der kalten Seite des Wärmerohrs abgegeben und das Gas verlässt die Anlage nach einem weiteren Wärmetauscher mit 130°C durch den Kamin. Dort angebrachte amtliche Messgeräte überwachen die Abgasqualität rund um die Uhr. [vgl. 152]“ [1]

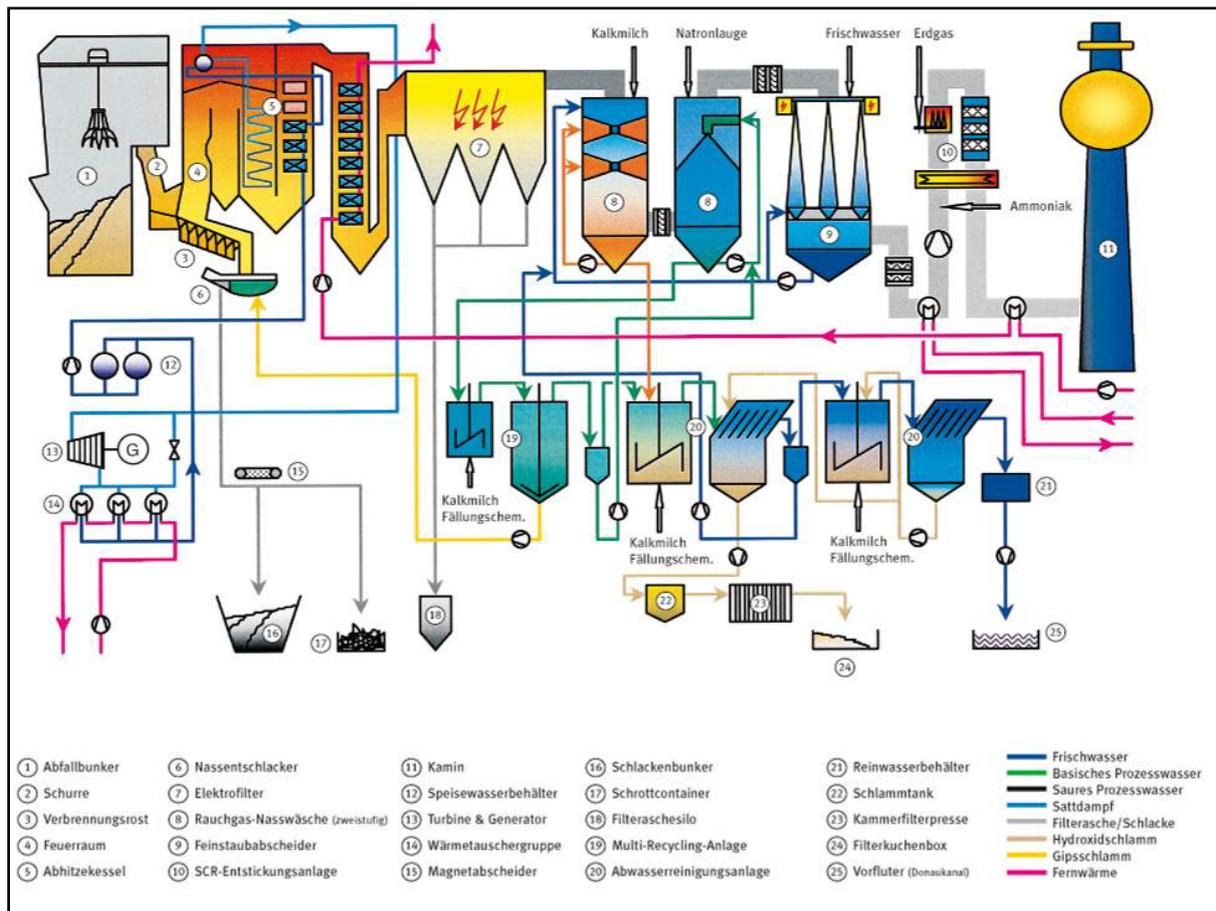


Abbildung 11: Verfahrensschema MVA Spittelau [154]

3.2 MVA Flötzersteig

Kurzbeschreibung:

„Die MVA Flötzersteig (siehe Abbildung 12) ist 1963 von der Gemeinde Wien fertig gestellt worden. Sie verfügte bei ihrer Inbetriebnahme über 3 Linien mit je einer Rostbrennkammer, E-Filter und Zyklonabscheider. Durch große Investitionen in den 80er und 90er Jahren ist die Anlage auch heute noch auf dem neuesten Stand der Technik und emittiert nur 10 bis 25% der gesetzlich zulässigen Grenzwerte. Die installierte thermische Leistung aus Müll beträgt 51MW bei einem Jahresdurchsatz von durchschnittlich 200.000 t. [vgl. 155, 156]“ [1]



Abbildung 12: MVA Flötzersteig [154]

Verfahrensbeschreibung:

„Der Restmüll aus Haushalten und haushaltsähnlichen Einrichtungen wird an jedem Wochentag von bis zu 190 Sammelfahrzeugen angeliefert und in den in Tages- und Vorratsbunker unterteilten Bunker gekippt. In Abbildung 13 ist das Verfahrensschema der Anlage dargestellt. Im Bunker wird der Müll von zwei Brückenkränen zur Angleichung des Heizwertes durchmischt und in drei Schurren überführt. Am Ende der Schurre wird der Müll von einem hydraulischen Zuteiler auf den horizontalen einbahnigen Gegenlauf-Überschub-Rost geschoben. Der Rost wird mit demselben Ölhydrauliksystem angetrieben, welches auch die Zuteiler antreibt. Die Rostbewegung lockert und schürt das Müllbett, um eine gute Verbrennung zu ermöglichen und fördert den Ausbrand zugleich kontinuierlich in den Schlackeabwurf. Die vorgewärmte Verbrennungsluft kann nach den Anforderungen der Feuerung zonenspezifisch geregelt werden. Die Brennkammern sind jeweils mit 2 Gasbrennern ausgestattet, um einen geregelten An- und Abfahrbetrieb zu ermöglichen und können mit ihrer thermischen Leistung von je 11,5MW den Kessel auch ausschließlich mit Erdgas heizen, um die Wärmelieferung an die umliegenden Großabnehmer zu garantieren. Das heiße Rauchgas wird nun durch einen Eckrohr-Naturumlauf-Dampfkessel mit Verdampfer, Überhitzer und Economizer geführt. Der Kessel verfügt durch das historisch bedingte Wachstum über zwei Trommeln, welche allerdings speiswasserseitig getrennt sind. In den ersten 3 Zügen entsteht

Sattdampf mit 200°C (16bar), wird in den Trommeln gesammelt, im Überhitzer auf ca. 280°C erhitzt und mittels Abspritzkühlung auf die voreinstellbare Temperatur von 270°C gekühlt. Der im letzten Zug installierte Economizer erwärmt das Speisewasser von 105°C auf 140°C. Insgesamt sind im Kessel 8^{1/2} Züge vorhanden, dadurch wird Grobstaub bereits gut abgeschieden und mittels Schneckenförderer zum Aschezwischensilo ausgetragen. [vgl. 155, 156]

Beim Verlassen des Kessels verlangsamt sich das Rauchgas durch die Querschnittserweiterung und strömt in den Schlauchfilter, wo es mit Aktivkohlepartikeln vermischt wird, an denen Schwermetalle adsorbiert werden. Das Gas passiert das Filtergewebe der Schläuche und die Staubpartikel werden vom Gewebe zurückgehalten. Auf diese Weise wird der Staubgehalt von 4000mg/m³ auf 1mg/m³ reduziert. Das kontinuierliche Zusetzen der Gewebeschicht erhöht die Filterleistung bis der Druckverlust ein vorgegebenes Niveau erreicht, bei welchem automatisch mit Gegendruck abgereinigt wird. Der abgeschiedene Staub wird über Schneckenförderer zum Aschezwischensilo transportiert und von dort pneumatisch in die beiden Aschesilos überführt. [vgl. 155, 156]

In der Quench wird das ca. 200°C heiße Rauchgas mit Wasser, welches durch zwei Kreuzstrom-Ringdüsen eingespritzt wird, auf 60°C abgekühlt und durch den Überschuss an Wasser mit Wasserdampf gesättigt. Der erste Wäscher ist ohne bauliche Abgrenzung an die Quench angeschlossen und verfügt auch über zwei Düsen desselben Typs. Durch die horizontale Eindüsung des Wassers ergeben sich in dieser Anordnung vier „Wasserebenen“ welche den gesamten Querschnitt der Wäscherrohre ausfüllen und eine intensive Vermischung von Gas und Flüssigkeit verursachen, sodass keine weiteren Einbauten zur Verwirbelung mehr nötig sind. Um der pH-Wert-Erniedrigung durch die abgeschiedenen sauren Rauchinhaltsstoffe entgegenzuwirken, wird Kalkmilch zugegeben und der pH-Wert so bei 1,1 konstant gehalten. Zwei Umwälzpumpen führen das Wasser aus dem Sumpf über getrennte Leitungen wieder den Düsen zu. Um einer übermäßigen Aufkonzentration von Halogenwasserstoffen (HCl, HF), Partikeln und Reststaub im Waschwasser und der damit einhergehenden Leistungsverminderung des Wäschers entgegenzuwirken wird ein konstanter Volumsstrom von 3,5m³/h abgezogen und in die Abwasserreinigungsanlage (ARA) überführt. Schwefeldioxid (SO₂) kann aus chemischen Gründen nicht gemeinsam mit Halogenwasserstoffen abgeschieden werden, weswegen der Abgasstrom nach einem Tropfenabscheider in einen zweiten Rauchgaswäscher eintritt. Dort wird das Gas im Gegenstrom durch einen Natronlauge-Sprühregen geführt, wobei sich Natriumsulfat (NaSO₄) bildet, welches in den Nassentschlacker geleitet wird und dort mit dem im Schlackewasser

enthaltenen Kalzium (Ca) zu Gips (CaSO_4) reagiert. Auch bei diesem Wäscher sorgen zwei unabhängig Kreispumpen mit einer Förderleistung von je $400\text{m}^3/\text{h}$ für eine Umwälzung des Waschwassers. Im Normalbetrieb wird nur eine der Pumpen benötigt, um eine Abscheidung von $250\text{mg SO}_2/\text{m}^3$ auf $7\text{mg SO}_2/\text{m}^3$ zu erreichen. [vgl. 155, 156]

Über einen Tropfenabscheider und das Saugzuggebläse wird der Abgasstrom in die von allen Linien gemeinsam genutzte Entstickungsanlage (DeNOx) geleitet. Das 60°C heiße Abgas wird mit Hilfe eines neuen Wärmeverschubsystems auf die benötigte Reaktionstemperatur von 180°C gebracht und mit Ammoniakdampf vermischt. Die im (durch Einbauten homogenisierten) Gasstrom enthaltenen Stickoxide werden in Katalysatorlagen abgebaut. Auch Dioxine und Furane zerfallen in den wabenförmigen Einsätzen. Nach einer Abkühlung im Wärmeverschubsystem und mittels zweier Gebläse die den Druckverlust der DeNOx kompensieren, gelangt das Abgas über einen Schalldämpfer in den Kamin und anschließend ins Freie. [vgl. 155, 156] [1]

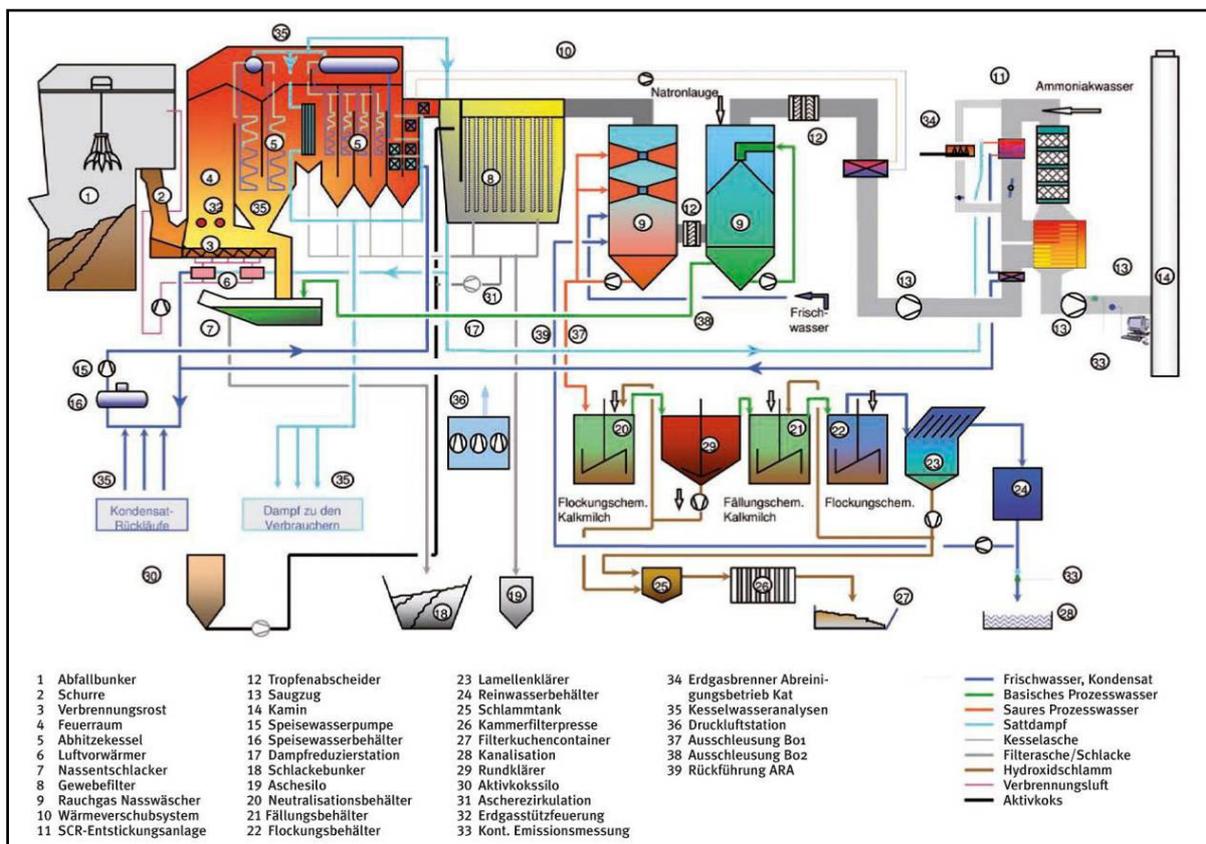


Abbildung 13: Verfahrensschema MVA Flötzersteig [154]

4. Betriebsmediendiagnostik

Unter Betriebsmedien versteht man Stoffe und Substanzen die in Maschinen und Anlagen zur Kraft- und Energieübertragung eingesetzt werden.

Als mögliches Einsatzfeld kann hier, unter anderen, der Bereich der Schmierung von Tribosystemen, in welchen das Betriebsmedium Schmierstoff die Aufgaben einerseits der Kraftübertragung, sowie andererseits der Verminderung von Reibung und Verschleiß und der Abfuhr von Wärme besitzt, genannt werden. [vgl. 2]

Ein anderes Medium zur Kraftübertragung stellen Öle in Hydrauliksystemen dar.

Auch Isolieröle, welche beispielsweise in Öltransformatoren zur elektrischen Isolierung und zum Wärmeabtransport zum Einsatz kommen, zählen zur großen Gruppe der Betriebsmedien. [vgl. 3]

Durch hydrodynamische, mechanische, thermische und elektrische Vorgänge kann die chemische Zusammensetzung von Betriebsmedien verändert werden, man spricht in diesem Zusammenhang von der Alterung des Betriebsmediums. Über eine Bilanzbeziehung wie sie in Formel 1 dargestellt ist, lässt sich diese zeitliche Veränderung für geschlossene Systeme mit homogener chemischer Zusammensetzung bestimmen. [vgl. 3, 5]

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{1}{V} * [\alpha_a * c_{ai} * Q_i - (\alpha * c_i + V_i)] \quad (1)$$

c_i ... Konzentration der Komponente i im geschlossenen System in g/l

c_{ai} ... Konzentration der Komponente i in einem angrenzenden Medium in g/l

Q_i ... spezifische Quellrate der Komponente i in g/l

V_i ... spezifische Verlustrate der Komponente i in g/l

V ... Systemvolumen des Mediums in l

α ... Leckrate des Systemmediums in l/s

α_a ... Leckrate des angrenzenden Mediums in l/s

In diesem Kapitel sollen zu Beginn die Grundlagen der Tribologie und Schmierung behandelt werden. In diesem Zusammenhang werden anschließend die möglichen Maßnahmen, welche im Zuge der Instandhaltung ergriffen werden können, angeführt. Schließlich wird im Speziellen auf die Situation in den Müllverbrennungsanlagen Spittelau und Flötzersteig eingegangen.



4.1 Grundlagen der Tribologie

Der Begriff der Tribologie wird in der Wissenschaft vergleichsweise erst kurz geführt. Er umfasst die Bereiche Reibung, Verschleiß und Schmierung und kann auch mit dem Begriff Reibungslehre (*tribos*, griech. = Reibung; *logos*, griech. = Wort, Lehre) beschrieben werden. Die meisten, der in der Literatur angeführten Definitionen zum Begriff Tribologie verweisen auf die zurückgezogene Norm DIN 50323. [vgl. 2]

4.1.1 Definitionen

Tribologie:

Der Begriff der Tribologie wurde von JOST [9] 1966 in Großbritannien erstmals eingeführt:

„Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices.“ [9]

In der mittlerweile zurückgezogenen Norm DIN 50323 wird Tribologie wie folgt definiert:

„Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.“ [6, 7]

CZICHOS/HABIG [6] verallgemeinern diese Definition zu:

„Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.“ [6]

Tribologisches System, Tribosystem:

Das Tribosystem ist eine abstrahierte Modellvorstellung einer beliebigen Reibpaarung zur Untersuchung der beteiligten Elemente. Auch hier geht die in der Literatur verwendete Definition auf die zurückgezogene Norm DIN 50323 zurück:

„Die am Verschleiß unmittelbar beteiligten Bauteile und Stoffe werden als Elemente des Tribosystems bezeichnet. Sie charakterisieren zusammen mit ihren tribologisch wichtigen Eigenschaften und Wechselwirkungen die Struktur des Tribosystems [...]“ [7]



Reibung:

„Reibung ist der Verlust an mechanischer Energie beim Ablaufen, Beginnen oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Stoffbereiche.“ [10]

Verschleiß:

Für den Begriff Verschleiß gibt es wiederum verschiedene Ansätze in der Literatur. Nach der zurückgezogenen DIN 50323 ist der Verschleiß als *„fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers [...]“* [7] definiert.

Je nachdem ob man den Verschleißbegriff ausschließlich auf geometrisch-stoffliche Änderungen von festen Reibkörpern bezieht, oder ob man in die Begriffsbeschreibung auch den Zwischenstoff miteinbezieht, werden in KUHN [7] zwei weitere Definitionen angeführt:

„(Verschleiß) Verschleiß ist eine infolge Reibung eintretende bleibende Form-, Größen und/oder Stoffänderung der die Oberfläche von Festkörpern bildenden Stoffbereiche.“ [10]

„(Rheologischer Verschleiß) Infolge tribologischer Beanspruchung eintretende irreversible Eigenschaftsänderung beanspruchter Stoffbereiche eines strukturviskosen Schmierstoffes.“ [11]

4.1.2 Tribologische Beanspruchung

Alle makroskopischen technischen Prozesse, wie beispielsweise Gleit- oder Rollbewegungen in technischen Anlagen, sind nach den Gesetzen der Thermodynamik irreversibel und benötigen zu ihrer Durchführung Energie. Bei der Annäherung zweier Festkörper treten Wechselwirkungen zwischen ihren Kontaktflächen auf. Kommt es nun zusätzlich zu einer Relativbewegung zwischen beiden Körpern, treten Kräfte auf, welche die Energiedissipation von Bewegungsenergie bewirken. Diese Kräfte sind maßgebend, in welcher Form die Energiedissipation ausfällt. Hier sind die Reibungswärme, hervorgerufen durch Gitterschwingungen und deren Ausbreitung im Festkörper, sowie die plastische Verformung, als bedeutendste Erscheinungsformen in der Praxis zu nennen. [vgl. 6]

Technische Oberflächen unterscheiden sich hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Gefüge, Festigkeit meist wesentlich vom Werkstoffinneren. Aufgrund der Unterbrechung der Kristallstruktur an der Oberfläche eines technischen Bauteils und dem Kontakt mit Umgebungsmedien (Wasser, Luftsauerstoff, Schmierstoffe, ...) kann es in Abhängigkeit der Reaktivität des Grundwerkstoffes zu einer Physisorption oder Chemisorption von Oxidschichten kommen. Bei tribologischen Beanspruchungen sind diese Umstände stets zu berücksichtigen. [vgl. 6]



Einen weiteren Einflussfaktor auf die Beschaffenheit technischer Oberflächen, genauer gesagt auf die Oberflächenrauheit, stellt das Fertigungsverfahren dar. In Abbildung 14 ist die Oberflächenrauheit als stochastische Verteilung von „Rauheitshügeln“ und „Rauheitstälern“ dargestellt. [vgl. 6]

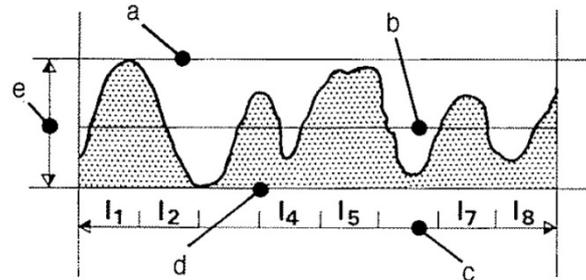


Abbildung 14: Oberflächenrauheit aus MÖLLER/NASSAR [2] S.4

- a) Hülllinie der Profilerhebungen
- b) Arithmetischer Mittenrauwert R_a
- c) Prüflänge l_1 bis l_8 (Bezugsstrecke)
- d) Hülllinie der Profilvertiefungen
- e) Maximale Rautiefe R_t

Dadurch wird auch ersichtlich, dass sich zwei berührende Körper nie mit der gesamten Auflagefläche (scheinbare Berührungsfläche) berühren, sondern lediglich an bestimmten Rauigkeitsspitzen (tatsächliche Berührungsfläche, Traganteil). [vgl 2]

4.1.3 Reibung

Reibung bezeichnet immer einen Widerstand gegen Deformation. Sowohl in mikroskopischer (Gitterdeformation), als auch in makroskopischer (Materialdeformation) Betrachtungsweise. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „äußerer Reibung“ und „innerer Reibung“. Die innere Reibung wird als „Viskosität“ bezeichnet und im Forschungsfeld der Rheologie behandelt. [vgl. 6]

4.1.3.1 Reibungskenngrößen

In diesem Zusammenhang wichtige Beschreibungsgrößen der Reibung sind [6, 10]:

- **Reibungskraft F_R :**
Mechanischer Widerstand gegen eine Relativbewegung infolge Reibung.
- **Reibungsmoment M_R :**
Mechanischer Widerstand gegen eine rotatorische Relativbewegung infolge Reibung.
- **Reibungszahl, Reibungskoeffizient μ :**
Reibungskraft bezogen auf die Normalkraft.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (2)$$

- **Reibungswinkel ρ :**
Winkel zwischen der Normalen auf die Reibungsfläche und der Richtung des resultierenden Kraftvektors aus Normal- und Reibungskraft.

$$\rho = \arctan(\mu) \quad (3)$$

$$\mu = \tan(\rho) \quad (4)$$

4.1.3.2 Reibungsarten

In der Tribologie wird die Reibung nach der Kinematik unterteilt. So unterscheidet man je nach Art der Relativbewegung der Kontaktpartner: [vgl. 6]



- Gleitreibung
- Rollreibung
- Bohrreibung (Spin)

Diese drei Haupt-Reibungsarten werden in CZICHOS/HABIG [6] in einem „Reibungsdreieck“ (siehe Abbildung 15) abgebildet. Hierbei liegen zwischen den Ecken des Dreiecks, in welchen die drei Haupt-Reibungsarten abgebildet sind, die jeweiligen Mischformen. Eine dieser Mischformen stellt unter anderen die technisch sehr bedeutende Form der Wälzreibung dar.

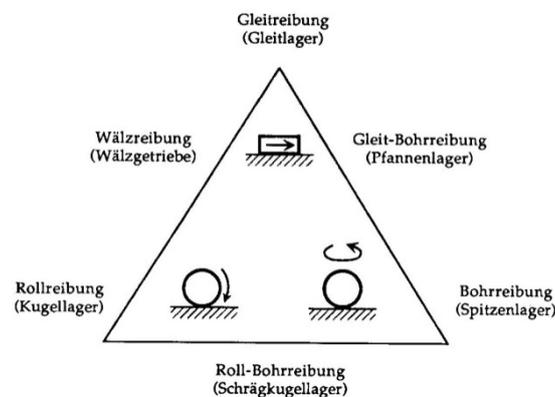


Abbildung 15: Schematische Einteilung der Reibungsarten nach der Kinematik in einem „Reibungsdreieck“ aus [12]

Gleitreibung: [vgl. 2, 10]

Unter Gleitreibung versteht man die translatorische Relativbewegung zweier Körper. Für die trockene Gleitreibung gilt dabei das Gesetz nach AMONTONS/COULOMB, wonach ein Körper erst dann in Bewegung gesetzt werden kann, wenn eine waagrecht einwirkende Kraft einen Mindestwert erreicht hat, der gleich dem Reibwiderstand, der Reibungskraft F_R , ist.

$$F_R = \mu_G * F_N \quad (5)$$

Der Reibungskoeffizient μ_G , siehe Formel 5, so wurde von G. AMONTONS (1663 bis 1705) und C. A. COULOMB (1736 bis 1806) postuliert, sei

- proportional der Normalkraft
- unabhängig der Größe der Berührungsflächen und
- unabhängig von der Relativgeschwindigkeit.

Heute weiß man, dass diese als COULOMB'sche Gesetze bekannten Regeln nicht zu treffen, da die Reibungszahl von den auf das System einwirkenden Beanspruchungen abhängt (siehe Formel 6). [vgl. 13]

$$\mu_G = f(F_N, A, v_G, T_B, O, \vartheta) \quad (6)$$

- F_N ... Normalkraft in N
- A ... (Berührungs-) Fläche in m^2
- v_G ... Gleitgeschwindigkeit in m/s
- T_B ... Beanspruchungsdauer in s
- O ... Faktor für die Oberflächenbeschaffenheit
- ϑ ... Temperatur in $^{\circ}C$

Rollreibung: [vgl. 2, 6, 10]

Bei der Rollreibung vollführen die Kontaktstellen der Reibpartner eine zyklodische Bahn, wie in Abbildung 16 dargestellt. Die Drehachse des Rollkörpers erfährt dabei eine Parallelverschiebung (bzw. bleibt räumlich stationär bei einer Rollbewegung zweier Zylinder).

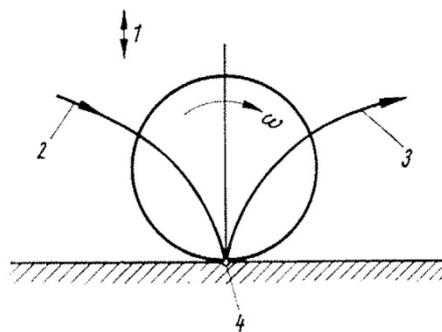


Abbildung 16: Zyklodische Bahn der Kontaktstellen eines Rollkörpers aus FLEISCHER (Hrsg.) S.23 [10]

Die Reibungszahl der Rollreibung (siehe Formel 7) besitzt im Unterschied zur dimensionslosen Ruhe- und Gleitreibungszahl μ_H und μ_G die Dimension einer Länge.

In technischer Hinsicht sind Rollbewegungen von entscheidender Bedeutung, da sie bei gleicher Belastung, einen deutlich niedrigeren Reibungswiderstand aufweisen (siehe Abbildung 17).

$$\frac{M_R}{F_N} = \frac{F_R}{F_N} * r = \mu_R \quad (7)$$

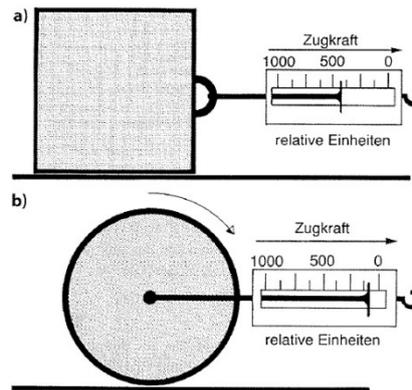


Abbildung 17: Reibungswiderstand bei Gleit- und Rollreibung aus MÖLLER/NASSAR [2] S.8

- a) Reibungskraft bei trockener Gleitreibung
- b) Reibungskraft bei trockener Rollreibung

Bohrreibung: [vgl. 10]

Unter Bohrreibung versteht man, wie in Abbildung 18 ersichtlich, eine Rotationsbewegung des Bohrkörpers um die senkrecht zur Bezugsfläche stehende Drehachse.

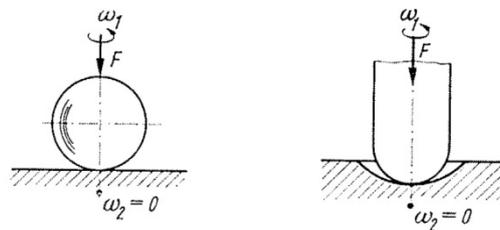


Abbildung 18: Typische Varianten der Bohrreibung aus FLEISCHER (Hrsg.) [10] S.24

Wälzreibung: [vgl. 2]

Bei einer Rollbewegung kann es zu einer überlagerten Gleitbewegung (Schlupf) kommen. Diese in der Praxis sehr häufig vorkommende Reibungsart wird Wälzreibung genannt. Ein Beispiel dafür ist etwa die Abwälzbewegung auf einer Zahnflanke wie in Abbildung 19 dargestellt.

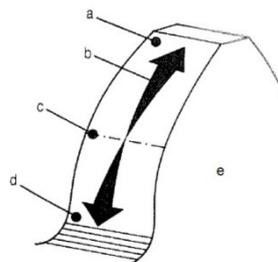


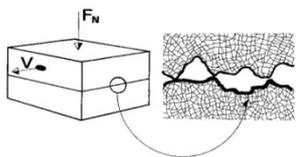
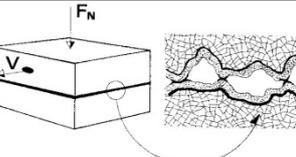
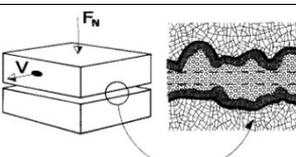
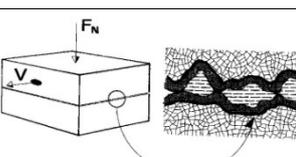
Abbildung 19: Wälzreibung auf einer Zahnflanke aus MÖLLER/NASSAR [2] S.9

- a Zahnkopf, b Gleitgeschwindigkeit, c Wälzkreis, d Zahnfuß, e Zahn

4.1.3.3 Reibungszustände

Man unterscheidet im Allgemeinen die in Tabelle 1 angeführten Reibungszustände.

Tabelle 1: Reibungszustände [6]

Reibungszustand	Kennzeichnung	Bild
Festkörperreibung	Reibung beim unmittelbaren Kontakt fester Körper;	
Grenzreibung/ Grenzschichtreibung	Festkörperreibung, bei der die Oberflächen der Reibpartner mit einem molekularen, z.B. von einem Schmierstoff stammenden Film, bedeckt sind;	
Flüssigkeitsreibung/ Gasreibung	Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden flüssigen (gasförmigen) Film, der hydrostatisch (aerostatisch) oder hydrodynamisch (aerodynamisch) erzeugt werden kann;	
Mischreibung	Reibung, bei der Festkörperreibung und Flüssigkeits- bzw. Gasreibung nebeneinander vorliegen;	

Bereits in der Definition der Reibung (siehe Abschnitt 4.1.1) wird deutlich, dass es unterschiedliche Wirkungen der Reibung gibt, was den Verlauf der Bewegung betrifft. So unterscheidet man den Bewegungsbeginn bzw. das Bewegungsende, wo die Reibung eine haltende Wirkung aufweist, vom Bereich der fortschreitenden Bewegung, in welchem die Reibung die Bewegung hemmt. In diesem Zusammenhang wird noch einmal deutlich, dass die Angabe einer globalen Reibungszahl lediglich eine Näherung darstellen kann. [vgl. 10]

Dem An- und Auslaufen von geschmierten Maschinenelementen ist in der Praxis eine große Bedeutung zu zumessen, da es dabei zu einer Mischreibung kommt. Dies liegt daran, dass sich erst nach Überschreiten einer Mindestrelativbewegung ein hydrodynamischer Druck in der Flüssigkeit bildet, der ausreicht, die Oberflächen zu trennen. In diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung ist die sogenannte STRIBECK-Kurve [vgl. 28]. Die klassische Form der STRIBECK-Kurve ist in Abbildung 20 dargestellt und zeigt die verschiedenen Reibungsarten in Abhängigkeit der Lagerkennzahl (SOMMERFELD-Zahl)(siehe Formel 8). Den Kurvenverlauf bezeichnet man dabei als REYNOLDS-SOMMERFELD-Kurve. [vgl. 2, 14]

$$So = \frac{p_L * \psi_B^2}{\eta_{eff} * \omega_{eff}} \tag{8) [15]}$$

- p_L ... spezifische Lagerbelastung in N/mm²
- ψ_B ... mittleres relatives Lagerspiel
- η_{eff} ... effektive dynamische Viskosität in (N*s)/mm²
- ω_{eff} ... effektive Winkelgeschwindigkeit in 1/s

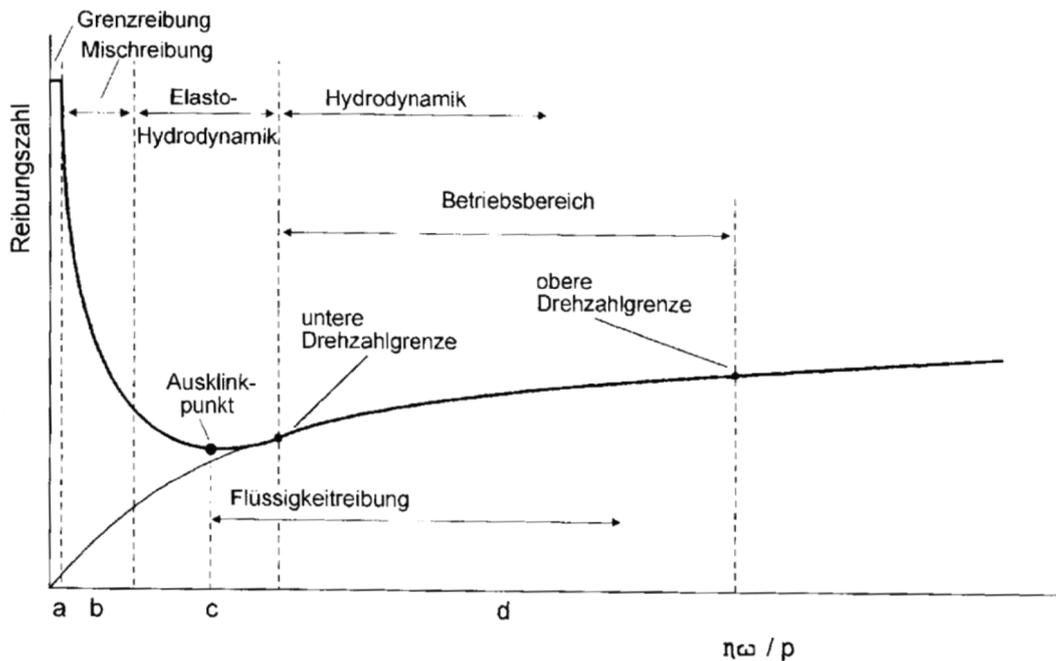


Abbildung 20: STRIBECK-Kurve (klassische Darstellung) aus MÖLLER/NASSAR [2] S.14

a...Trockenreibung; b...Mischreibung; c...Elastohydrodynamik; d...Hydrodynamik

Streng genommen gilt diese klassische Form der STRIBECK-Kurve allerdings nur für den Einlaufvorgang. DROSTE [16] hat in diesem Zusammenhang bereits 1957 auf die Unterscheidung von Anlauf- und Auslaufreibungszahl hingewiesen (siehe Abbildung 21).

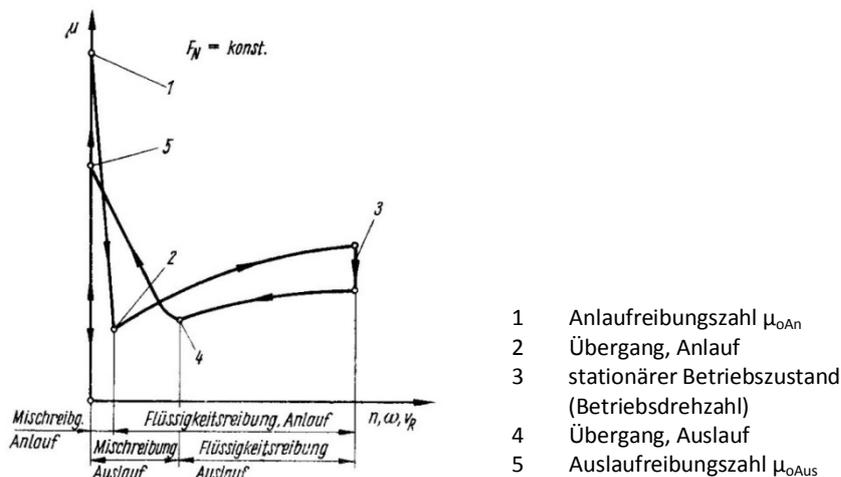


Abbildung 21: STRIBECK-Kurve (bei Gleitreibung für An- und Auslauf) aus DROSTE [16]

4.1.4 Verschleiß

Im deutschen Sprachgebrauch wird der Begriff „Verschleiß“ sowohl für den Verschleißvorgang, als auch für das Verschleißergebnis gebraucht. Die Unterteilung in verschiedene Verschleißarten ist sowohl nach der Art der tribologischen Beanspruchung, als auch nach den beteiligten Stoffen möglich. [vgl. 2, 6]

4.1.4.1 Verschleißmessgrößen [vgl. 6]

In Abbildung 22 sind die verschiedenen Möglichkeiten dargestellt, wie man den Verschleiß als Messgröße erfassen kann. Der Reziprokwert der hier angeführten Messgrößen wird dabei als „Verschleißwiderstand“ bezeichnet.

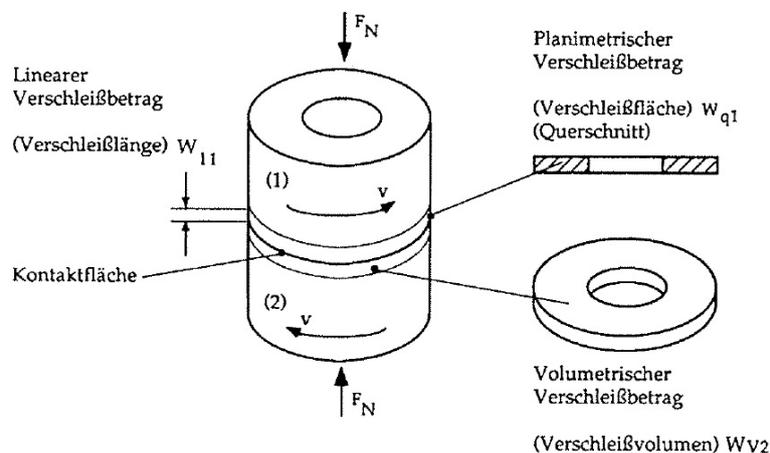


Abbildung 22: Verschleißmessgrößen am Beispiel eines tribologischen Systems aus zwei rotierenden Zylindern (1), (2) aus CZICHOS/HABIG [2] S.115

F_N ...Kraft normal zur Kontaktfläche
 v ...Gleitgeschwindigkeit

Eine andere Möglichkeit einer Verschleißmessgröße stellt die indirekte „Verschleißrate“ dar. Dabei wird der Verschleiß in Relation zu einer Bezugsgröße gesetzt. Beispiele hierfür sind:

- Verschleißgeschwindigkeit, mit der Zeit als Bezugsgröße
- Verschleiß-Weg-Verhältnis bzw. Verschleißintensität, mit dem Weg als Bezugsgröße
- Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis, mit dem Durchsatz als Bezugsgröße

Eine normierte Größe (nach ASTM) stellt diesbezüglich der „Verschleißkoeffizient“, auch specific wear rate (wear rate, wear factor) genannt. Diese Art der Messgröße erlaubt eine auf die Belastung normierte Angabe der Verschleißrate (siehe Formel 9).

$$k = \frac{W_V}{F_N * s} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} * \text{m}} \right] \text{ oder } \left[\frac{\text{m}^2}{\text{N}} \right] \quad (9)$$

W_V ... Verschleißvolumen in mm^3

F_N ... Normalkraft in N

s ... Gleitweg in m

Zu beachten ist, dass eine Verschleißmessgröße nicht die Eigenschaft eines Körpers bezeichnet, sondern stets auf die Materialpaarung bezogen werden muss.

4.1.4.2 Verschleißmechanismen

Nach den Regeln der Kontaktmechanik (siehe Kapitel 4.1.2) nimmt bei der Berührung technischer Oberflächen die Anzahl der Berührungsstellen (Mikrokontakte) linear mit der Normalkraft zu (siehe Formel 10). Desweiteren nehmen die beanspruchten Stellen (Mikrokontakte) auch mit dem Gleitweg s zu (siehe Formel 11). Diese Zusammenhänge führen zu einer vereinfachten Form des ARCHARD'schen Gesetz [16] des Gleitverschleißes, wie in Formel 12 dargestellt. [vgl. 6]

$$W_V \sim F_N \quad (10)$$

$$W_V \sim s \quad (11)$$

$$W_V = k * F_N * s \quad (12)$$

In Abbildung 23 sind die vier Haupt-Verschleißmechanismen dargestellt.

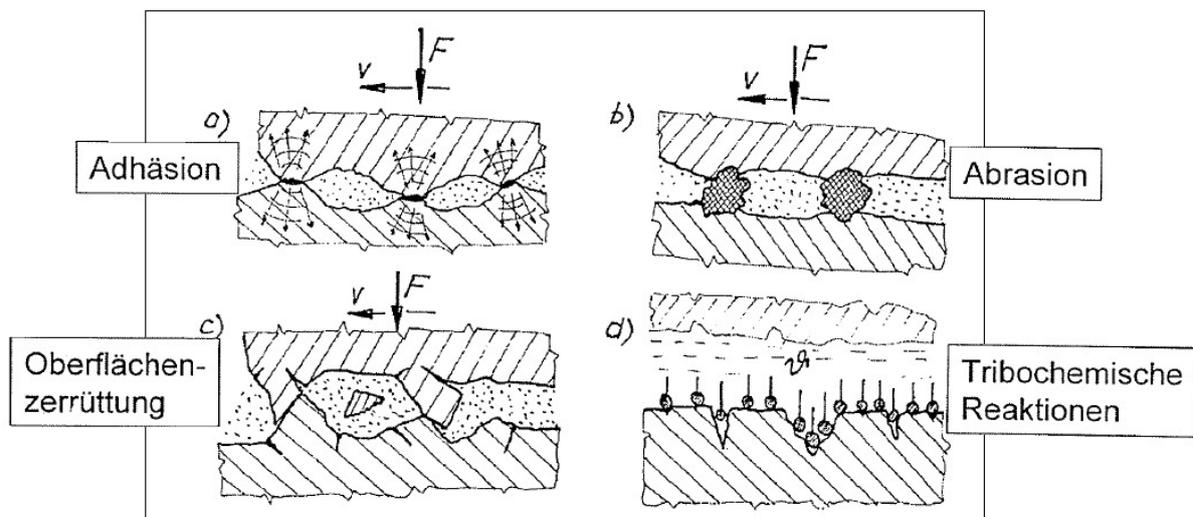


Abbildung 23: Unterteilung der vier Haupt-Verschleißmechanismen aus GÓDOR [8]

Oberflächenzerrüttung (Werkstoffermüdung) [vgl. 6]

Während bei einer reinen Flüssigkeitsreibung die Kraftübertragung über den trennenden Schmierfilm erfolgt, werden die wirkenden Normal- und Tangentialkräfte bei Misch-, Grenz- und Festkörperreibung teilweise bis ganz von Mikrokontakten aufgenommen. Häufig erfolgen diese Beanspruchungen periodisch, sodass es im Laufe der Zeit zu einer Werkstoffermüdung an diesen beanspruchten Stellen kommen kann. Besonders häufig treten Oberflächenzerrüttungen in HERTZ'schen Kontakten (Wälzlager, Zahnradpaarungen,...) auf.

Im Allgemeinen wird eine Werkstoffermüdung durch die Belastungsamplitude und die Zyklenzahl bestimmt. Man unterscheidet diesbezüglich zwischen Kurzzeitermüdung, welche einem quasistatischen Bruch entspricht und bereits ein Belastungszyklus zur Zerstörung führen kann und Langzeitermüdung, welche durch geringe Belastungsamplituden und eine lange Lebensdauer gekennzeichnet ist. Der Ermüdungsprozess kann in folgende Perioden unterteilt werden:

- Inkubationsperiode (Akkumulation von Gitterverzerrungen und –fehlern)
- Entstehung und Entwicklung von Submikrorissen bis zu Mikrorissen
- Rissausbreitung sowie Vereinigung von Rissen
- Endgültiger Bruch

Abrasion [vgl. 6, 8]

Von Abrasion spricht man immer dann, wenn der Gegenkörper (Abrasivstoff) deutlich härter und rauer ist als der verschleißende Grundkörper (abrasiv beanspruchter Körper) und wenn harte Partikel in einen tribologisch beanspruchten Grundkörper eingedrückt werden. [vgl. 17, 18]

Der abrasive Verschleiß wurde von Zum GAHR [19], wie in Abbildung 24 dargestellt, in die vier folgenden Detailprozesse eingeteilt:

- **Mikropflügen:** Durch die Wirkung der abrasiven Teilchen wird der Werkstoff plastisch stark verformt und zu den Furchungsrändern hin aufgeworfen. Ideales Mikropflügen zeichnet sich dadurch aus, dass noch kein Werkstoffabtrag erfolgt.
- **Mikrospanen:** Vor dem abrasiv wirkenden Teilchen bildet sich ein Mikrospan, dessen Volumen im Idealfall dem der entstandenen Verschleißfurche ist.
- **Mikroermüden:** Kann als Folge wiederholten Mikropflügens entstehen. (Wird der Oberflächenzerrüttung zugeordnet.)
- **Mikrobrechen:** Bei spröden Werkstoffen kommt es oberhalb einer kritischen Belastung zum Ausbrechen größerer Teilchen längs der Verschleißfurche.



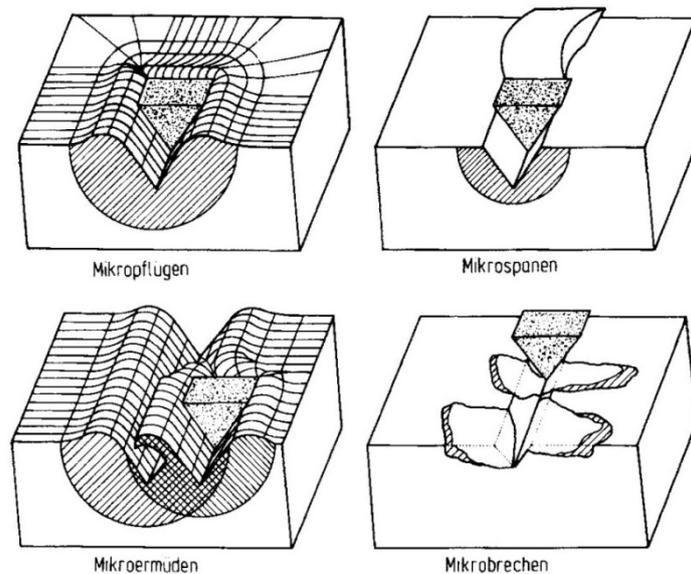


Abbildung 24: Detailprozesse des abrasiven Verschleißes aus Zum GAHR [19]

In der Praxis treten allerdings Überlagerungen dieser Teilprozesse auf, ihr relativer Anteil kann durch unterschiedliche theoretische Modelle berechnet werden (siehe dazu CZICHOS/HABIG [6]).

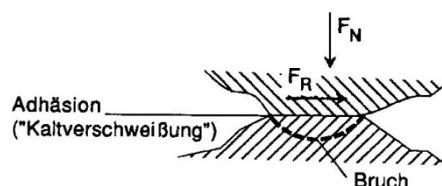
Adhäsion [vgl. 6]

Beim Verschleißmechanismus der Adhäsion spielen vor allem stoffliche Wechselwirkungen eine bedeutende Rolle, während die Mechanismen Oberflächenzerrüttung und Abrasion vor allem durch die Kontaktmechanik hervorgerufen werden. [vgl. 21]

Hierbei kommt es infolge hoher lokaler Pressungen zu Grenzflächenbindungen, im Falle metallischer Kontaktpartner spricht man auch von „Kaltverschweißen“, dabei ist im Allgemeinen mit einem Materialübertrag vom kohäsiv schwächer gebundenen Partner zum kohäsiv stärker gebundenen Partner zu rechnen.

Das ARCHARD'sche Gesetz (siehe Formel 13) liefert hier einen Zusammenhang Normalkraft F_N , Gleitweg s und der Härte H des weicheren Kontaktpartners. Die Modelldarstellung dazu findet sich in Abbildung 25.

$$W_V = K * \frac{F_N * s}{H} \quad (13)$$



K	ARCHARD'scher Verschleißkoeffizient
F_N	Normalkraft in N
s	Gleitweg in m
H	Härte in N/m ²

Abbildung 25: Einfaches Modell des adhäsiven Verschleißes aus CZICHOS/HABIG [6] S.127

Im Vergleich zum vereinfachten ARCHARD'schen Gesetz aus Formel 12 mit dem „Verschleißkoeffizienten“ k als Proportionalitätsfaktor mit der Einheit m^2/N , ist der „ARCHARD'sche Verschleißkoeffizient“ K dimensionslos, da hier das Verschleißvolumen zusätzlich auf die Härte bezogen wird. Es ist somit klar, dass auch im Falle der Adhäsion die Verschleißmessgrößen immer auf das jeweilige tribologische System bezogen werden müssen.

Neben dem ARCHARD'schen Gesetz finden sich in der Literatur [8] auch noch andere Adhäsionstheorien.

Tribochemische Reaktionen [vgl. 6]

Bei dieser Art von chemischen Reaktionen reagiert der Grund- oder Gegenkörper eines tribologischen Systems mit Bestandteilen des Zwischenstoffes oder Umgebungsmediums. Vor allem an den Mikrokontaktstellen kommt es durch einen erhöhten korrosiven Angriff und den damit verminderten Verschleißwiderstand zur Entstehung von Verschleißprodukten.

Vor allem bewirken tribochemische Reaktionen Veränderungen in den äußeren Grenzschichten kontaktierender Partner. Dadurch wird in den meisten Fällen der Verschleißbetrag erhöht, in manchen Fällen jedoch auch vermindert. Dies geschieht dann, wenn die entstandene Reaktionsschicht einen adhäsiven Angriff verhindert oder zumindest verringert. In diesem Zusammenhang ist die Luftfeuchte des Umgebungsmediums von besonderer Bedeutung. [vgl. 22]

Nach einem von QUINN [23] entwickelten Modell (siehe Abbildung 26) setzt der Verschleiß von tribochemisch erzeugten Reaktionsschichten erst ab einer gewissen Schichtdicke ρ ein. Hier gibt es zwei unterschiedliche Modellvorstellungen. Während die eine von einem parabolischen Wachstum der Reaktionsschicht ausgeht (siehe Formel 14), geht die neuere Sichtweise von einem linearen Wachstum des Geschwindigkeitsfaktors der Oxidation aus (siehe Formel 15). [vgl. 24]

$$W_V = \frac{k''}{\xi^2 * \rho^2} * \frac{d}{H} * \frac{F_N}{v} * s \quad (14)$$

$$W_V = \frac{l''}{\xi * \rho} * \frac{d}{H} * \frac{F_N}{v} * s \quad (15)$$

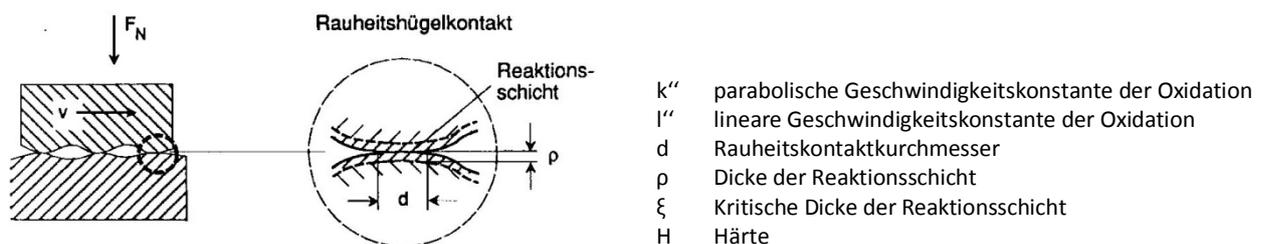


Abbildung 26: Modell des tribochemischen Verschleißes aus CZICHOS/HABIG [6] S.129

Delaminationstheorie [vgl. 8]

Die Delaminationstheorie wurde von SUH [25] entwickelt und stellt eine Erweiterung der vier Haupt-Verschleißmechanismen aus Abbildung 23 dar. Sie versucht, in Einzelschritten die Entstehung von Verschleißpartikeln als Folge des Abgleitens von Reibpaarungen zu beschreiben. Diese Einzelschritte sind (siehe Abbildung 27):

- Bei der Relativbewegung einer Reibpaarung werden an der weicheren Oberfläche Verformungen hervorgerufen und bei wiederholter Belastung geglättet. (a bis c)
- Diese Verformungen führen zu Rissen unterhalb der Oberfläche. (d)
- Die Rissausbreitung erfolgt parallel zur Oberfläche, wobei die Risstiefe durch den Reibungskoeffizienten und die Materialeigenschaften bestimmt wird.
- Wenn die Risse schließlich an einer Stelle zur Oberfläche durchbrechen, lösen sich lange, dünne Verschleißplättchen ab. (e)

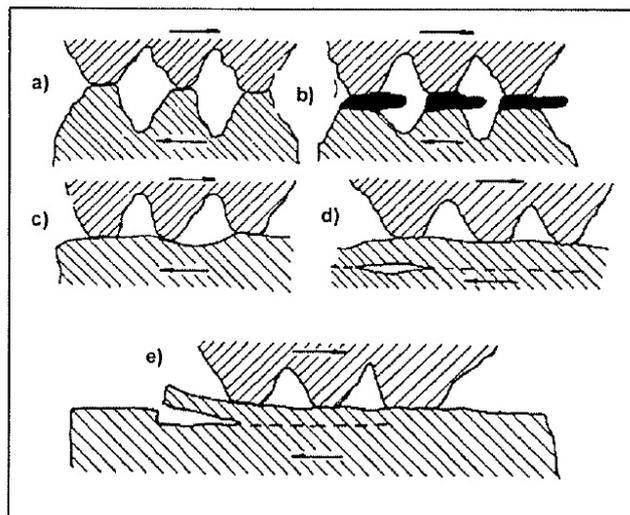


Abbildung 27: Delaminationstheorie aus Gódor [8]

Zugerechnet wird die Delaminationstheorie im Weiteren Sinne der Oberflächenzerrüttung.

4.1.4.3 Verschleißarten

Wie bei der Klassifizierung der Reibungsarten (siehe Kapitel 4.1.3.2) wird auch für die Einteilung des Verschleißes die Kinematik herangezogen, wobei alle Verschleißarten aus unterschiedlichen Anteilen der in 4.1.4.2 beschriebenen Verschleißmechanismen bestehen können.

Gleitverschleiß

Unter Gleitverschleiß versteht man den Ablauf oder das Ergebnis eines Verschleißprozesses bei einer Gleitbewegung. Je nach Art des Tribosystems, ob mit oder ohne Zwischenstoff, kann noch eine weitere Unterteilung in Gleitverschleiß bei Misch- oder Grenzreibung, Festkörper-Gleitverschleiß oder Trocken-Gleitverschleiß unternommen werden. Bei Gleitverschleiß können alle grundlegenden Verschleißmechanismen auftreten, durch die Analyse der Verschleißflächen sowie der Verschleißpartikel kann auf den zu Grunde liegenden Mechanismus geschlossen werden. [vgl. 6]

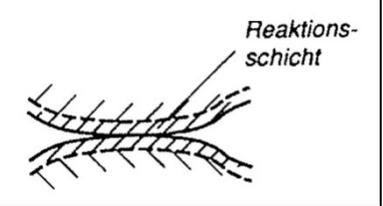
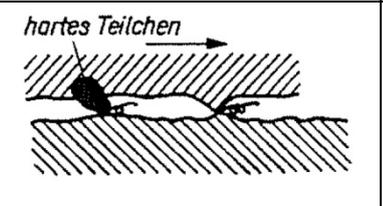
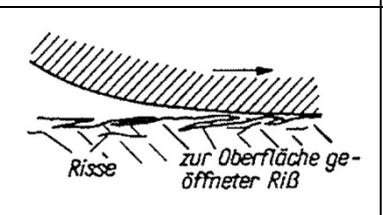
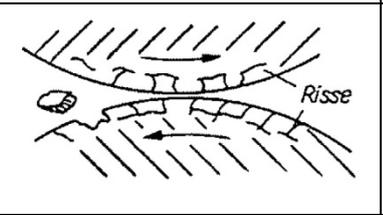
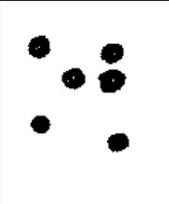
In CZICHOS/HABIG [6] wird diesbezüglich auf die frühere DIN 50320 verwiesen:

- Risse, Grübchen bei Oberflächenzerrüttung
- Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen bei Abrasion
- Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertrag bei Adhäsion
- Reaktionsprodukte in Form von Partikeln, oder Schichten bei
Tribochemischen Reaktionen

Eine Möglichkeit der Analyse von Verschleißpartikeln in geschmierten Tribosystemen stellt die Ferrographie dar. Bei dieser Art der Analyse wird die zu untersuchende Schmierstoffprobe in welcher Verschleißpartikel vermutet werden, über eine transparente Scheibe geführt und mit Hilfe eines Magnetfeldes nach Korngrößen aufgefächert. Diese Partikel werden anschließend mikroskopisch auf ihre Zusammensetzung analysiert. [vgl. 1, 4, 6]

In Tabelle 2 sind die verschiedenen Grundformen der Verschleißpartikel und der dazugehörige Verschleißprozess der zur Entstehung führt aufgelistet.

Tabelle 2: Schematische Darstellung der Grundformen von Verschleißpartikeln und ihrer Entstehungsmechanismen aus WUTTKE [60]

Verschleißmechanismus	Entstehungsprozess	Partikelform	Partikelkennzeichnung
Tribochemische Reaktionen (+Abtrennprozesse)			pulverförmig bzw. amorph
Abrasion (Mikrospanen)			spiral- bzw. spanförmig
Oberflächenzerrüttung (Delamination)			schuppen- bzw. lamellenförmig
Oberflächenzerrüttung (Ermüdung)			splitterförmig
Kontaktdeformation, Triboschmelzen			kugelförmig

Wälzverschleiß [vgl. 6]

Bei Wälzverschleiß ist der dominierende Verschleißmechanismus die Oberflächenzerrüttung. Aufgrund der Geometrie der Kontaktpartner bei Wälzvorgängen kommt es meist zu HERTZ'schen Pressungen und damit zu einer Überlagerung aus Normalspannungen (durch die wirkende Belastung) und Tangentialspannungen (durch die wirkende Reibung). Beim Überrollen eines Wälzkörpers kommt es somit immer zu einer wechselnden mechanischen Beanspruchung und daraus resultierenden Gefügeänderungen, Rissbildungsprozesse und schließlich das Ablösen von Verschleißpartikeln welche Grübchen, man spricht in diesem Zusammenhang von „Pitting“, an der Oberfläche zurücklassen. Auch ein Schmierstoff kann dieses Problem nur mindern, da zyklische Beanspruchungen auch durch hydrodynamische oder elastohydrodynamische Schmierfilme übertragen werden können. In diesem Fall entsteht der Riss nicht wie bei der Trockenreibung an der Oberfläche, sondern unterhalb der Oberfläche in demjenigen Bereich, in dem nach den verschiedenen

Anstrengungshypothesen die maximale Vergleichsspannung liegt. Abbildung 28 stellt diese beiden Arten der Rissbildung schematisch dar.

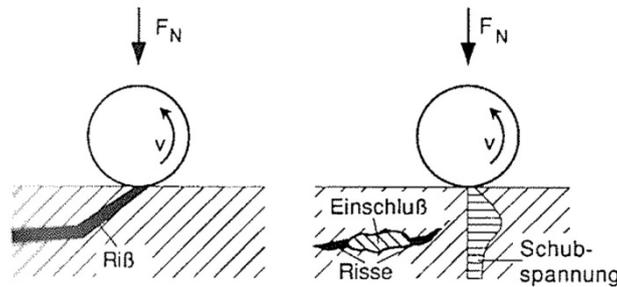


Abbildung 28: Mögliche Arten der Rissbildung bei Wälzverschleiß aus CZICHOS/HABIG [6] S.135

Stoßverschleiß [vgl. 6]

Der Stoß- oder Prallverschleiß wird durch eine vereinfachte Modellvorstellung aus der klassischen Physik, dem „zentralen Stoß“, beschrieben. Dieser Vorgang wird in Abbildung 29 dargestellt.

Dabei kommt es zu einer Impulsänderung $\Delta p = p_2 - p_1$ nach dem NEWTON'schen Kraftgesetz (siehe Formel 16).

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt \tag{16}$$

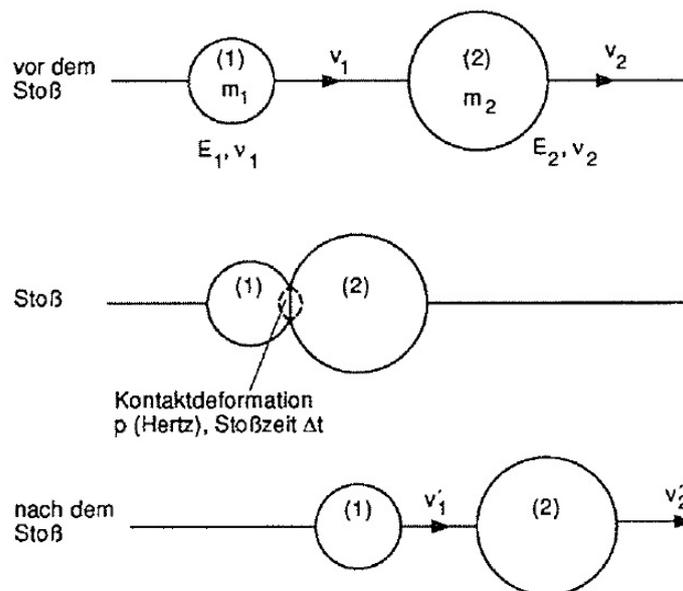


Abbildung 29: Modelldarstellung des zentralen Stoßes zwischen zwei Bauteilen (1) und (2) aus CZICHOS/HABIG [6] S.136

m_1, m_2 ...Masse; E_1, E_2 ...Elastizitätsmodul; ν_1, ν_2 ...POISSON'sche Zahl

Will man nun die Energiebilanz aufstellen, so muss man den dissipierten Anteil der kinetischen Energie berücksichtigen. In Formel 17 geschieht dies durch die Größe e^2 ($0 < e < 1$).

$$\left(\frac{m_1 * v_1'^2}{2} + \frac{m_2 * v_2'^2}{2} \right) = e^2 \left(\frac{m_1 * v_1^2}{2} + \frac{m_2 * v_2^2}{2} \right) \quad (17)$$

Wobei e die sogenannte Stoßzahl darstellt (siehe Formel 18).

$$e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2} \quad (18)$$

$e=1$... idealer elastischer Stoß

$e=0$... gesamte kinetische Energie dissipiert

Schwingungsverschleiß

Schwingungsverschleiß entsteht bei oszillierenden Relativbewegungen der Kontaktpartner eines tribologischen Systems, wobei alle Verschleißmechanismen beteiligt sein können. Bei Kontaktpartnern aus Stahl spricht man auch von „Passungsrost“ oder „Reibrost“ da es hier vermehrt zur Bildung von schwarzem Eisenoxid Fe_3O_4 kommt. Eine entscheidende Rolle spielt dabei auch die Luftfeuchtigkeit, da sich das Fe_3O_4 dann zum rötlichen $\alpha-Fe_2O_3$ umwandelt. [vgl. 6]

Oft wird aufgrund dieser triboinduzierten Oxidationsvorgänge auch von Reibkorrosion (fretting corrosion) gesprochen. [vgl. 26]

Furchungsverschleiß [vgl. 6]

Beim Furchungsverschleiß, der durch Abrasionsprozesse entsteht, unterscheidet man zwischen der Zwei-Körper-Abrasion und der Drei-Körper-Abrasion (siehe Abbildung 30).

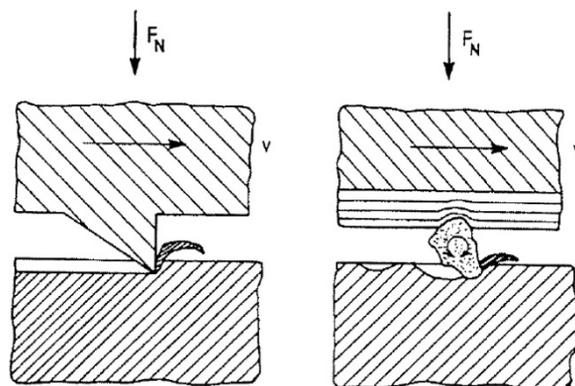


Abbildung 30: Furchungsverschleiß in den zwei Erscheinungsformen „Zwei-Körper-Abrasion“ und „Drei-Körper-Abrasion“ aus CZICHOS/HABIG [6] S.140

In den meisten Fällen besteht eine Korrelation zwischen der Härte des beanspruchenden Abrasivstoffes H_A und der Härte des abrasiv beanspruchten Materials H_M . Dies wird in der Tief-Hochlagen-Charakteristik [vgl. 61], aus Abbildung 31, ausgedrückt und in drei Bereiche unterteilt:

- I. Verschleiß-Tieflage, bei $H_A < H_M$
- II. Übergangsgebiet, bei $H_A \approx H_M$
- III. Verschleiß-Hochlage, bei $H_A > H_M$

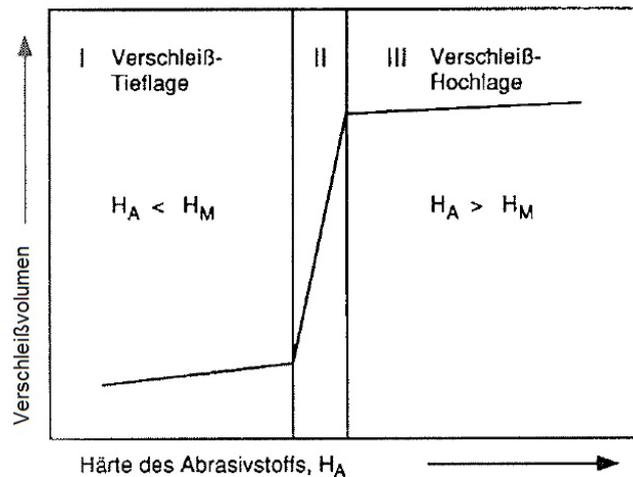


Abbildung 31: Tief-Hochlagen-Charakteristik des Furchungverschleißes aus WAHL [61]

Daraus ergibt sich die in der Literatur immer wieder angeführte allgemeine Forderung für einen verschleißarmen Betrieb (siehe Formel 19).

$$H_M > 1,3 * H_A \quad (19)$$

Strömungverschleiß

Der Begriff Strömungverschleiß stellt eine weitere Sonderform der Verschleißarten dar und befasst sich mit dem Verschleiß in strömenden Medien. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen der Erosion und der Kavitation.

Im Begriff Erosion werden alle Verschleißarten, die in Gas- oder Flüssigkeitsströmungen, durch evtl. vorhandene Partikel, Schäden an Materialoberflächen hervorrufen zusammengefasst. [vgl. 8]

Unter Kavitation versteht man die stoßartige Materialschädigung durch schlagartige Implusion von Flüssigkeitshohlräumen. Die Umkehr der Kavitation, der sogenannte Tropfenschlag, ist eine weitere stoßartige Verschleißerscheinung durch aufprallende Flüssigkeitstropfen. Kavitation entsteht, wenn an einer Stelle des Flüssigkeitsstromes der statische Strömungsdruck auf den Wert des Dampfdruckes p_d absinkt. [vgl. 6]

4.2 Schmierung

Um die Reibung und den Verschleiß in tribologischen Systemen so gering wie möglich zu halten, bedient man sich eines Zwischenstoffes zwischen den Reibpartnern, der allgemein als Schmierstoff bezeichnet wird. Die Wirkung dieses Schmierstoffes hängt unter anderem von der Art der Kontaktpartner (Geometrie, Anordnung, Oberflächenrauheit), der Schmierstoffviskosität, der Geschwindigkeit und der Belastung ab und durchläuft dabei verschiedene Schmierzustände, die mit Hilfe der STRIBECK-Kurve [vgl. 28], wie in Abbildung 20 dargestellt, unterteilt werden in [vgl. 6]:

- Grenzreibung
- Mischreibung
- Elastohydrodynamische Schmierung
- Hydrodynamische Schmierung

Eine andere Art der Unterteilung zeigt Abbildung 32. Hier wird der Schmierzustand als Funktion der Schmierfilmdicke und des Lagerdruckes aufgetragen. [vgl. 29]

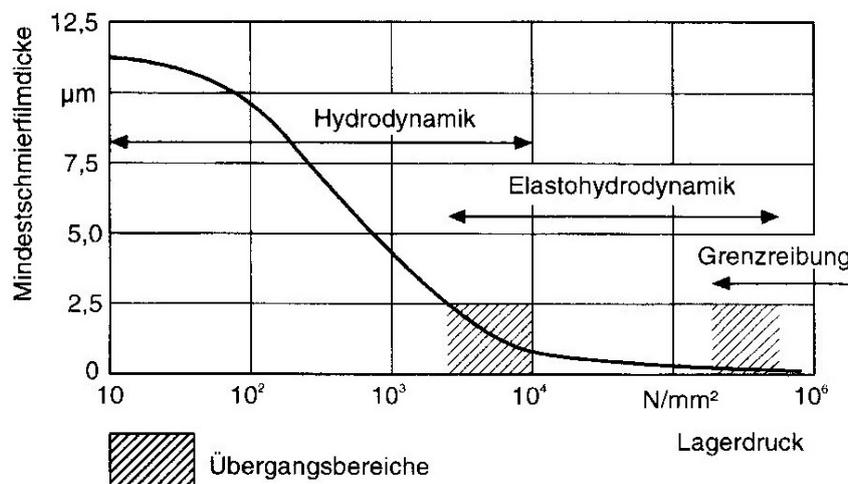


Abbildung 32: Schema der Schmierzustände in Abhängigkeit von Mindestschmierfilmdicke und Lagerdruck aus GLAESER (Hrsg.) [29]

4.2.1 Schmierzustände [vgl. 6]

4.2.1.1 Hydrodynamische Schmiertheorie

Damit im Schmierespalt ein tragender Flüssigkeitsfilm entsteht, werden von BARTZ [30] drei Hauptbedingungen angegeben:

- es muss ein sich verengender Spalt vorliegen
- die Gleitflächen müssen sich in tangentialer Richtung relativ zueinander bewegen
- es muss genügend Flüssigkeit (oder Gas) vorhanden sein

Die hydrodynamische Schmiertheorie lässt sich mit der von REYNOLDS entwickelten Druckdifferentialgleichung, welche ihren Ursprung in den NAVIER-STOKES-Gleichungen hat, beschreiben. In Formel 20 ist die allgemeine Form der REYNOLD'schen Druckdifferentialgleichung angeführt, die Beschreibung dazu findet sich in Abbildung 33.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + w \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (20)$$

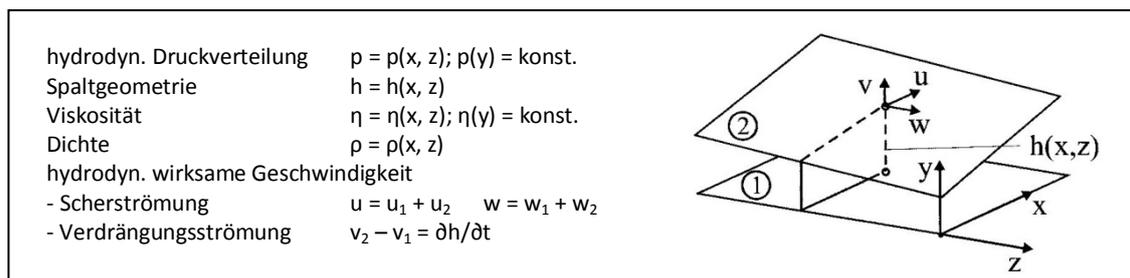


Abbildung 33: Druckdifferentialgleichung der hydrodynamischen Schmiertheorie nach REYNOLDS aus CZICHOS/HABIG [6] S.227

Für den technischen Gebrauch wurde eine, auf Ähnlichkeitskriterien basierende dimensionslose Form der REYNOLD'schen Differentialgleichung (siehe Formel 21) erstellt. Diese führt auch zur, aus Abschnitt 4.1.3.3, bereits bekannten dimensionslosen Tragkraftkennzahl (Sommerfeldzahl) So. Die Erläuterungen dazu finden sich in Abbildung 34. Für eine weiterführende theoretische Betrachtungsweise der hydrodynamischen Schmiertheorie sein an dieser Stelle auf die Spezialliteratur [2, 6, 8] verwiesen.

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(H^3 \frac{\partial p^*}{\partial \varphi} \right) + b^{-2} \frac{\partial}{\partial z} \left(H^3 \frac{\partial p^*}{\partial z} \right) = 6 \left(\frac{\partial H}{\partial \varphi} + \frac{2}{\bar{\omega}} \frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad (21)$$

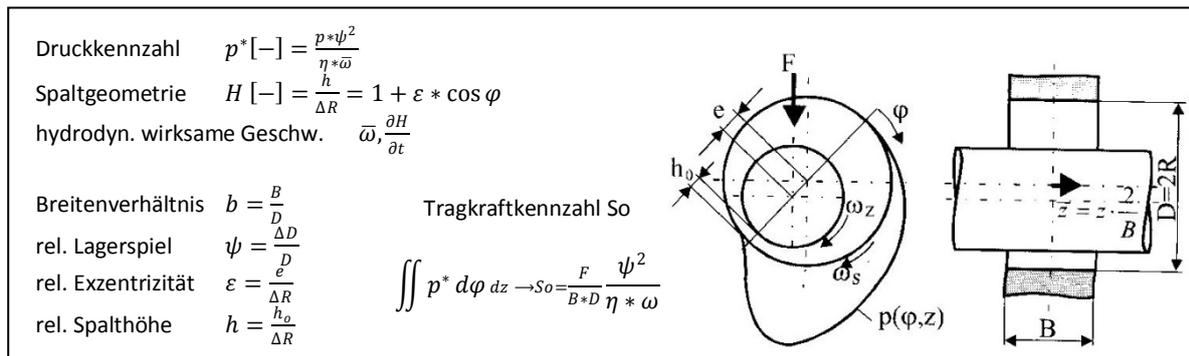


Abbildung 34: Dimensionslose REYNOLD'sche Differentialgleichung für Radiallager aus CZICHOS/HABIG [6] S.228

4.2.1.2 Elastohydrodynamische Schmierungstheorie (EHD)

Aus der REYNOLD'schen Differentialgleichung ist ersichtlich, dass die Druckentwicklung im Schmierpalt auch von den Schmierstoffparameter, wie der Dichte und der Viskosität, sowie mit der dritten Potenz vom Spaltverlauf, abhängt. Dies führt bei hochbelasteten tribologischen Systemen schließlich zur elastohydrodynamischen Schmierungstheorie.

Hier unterscheidet man die EHD-Theorie für HERTZ'sche Kontakte und jene für Gleitlagerpaarungen.

In der erweiterten Lebensdauerberechnung für Wälzlager wird diesbezüglich, neben der statistischen Ausfallwahrscheinlichkeit und den Materialeigenschaften, auch die minimale Spaltweite nach den Berechnungen von DOWSON und HIGGISON [31] durch den a_3 -Beiwert berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.2.4.1, Formel 29).

4.2.1.3 Grenzreibung

Reißt der hydrodynamische oder elastohydrodynamische Schmierfilm ab, dann tritt Grenzreibung ein. Dabei werden Reibung und Verschleiß maßgebend von der sich bildenden Grenzschicht beeinflusst. Diese Grenzreibung entsteht durch Interaktionen der Kontaktpartner untereinander und mit dem Schmierstoff, wobei die Bildung durch die drei folgenden Prozesse geschieht:

- Physisorption
- Chemisorption
- Tribochemische Reaktion

4.2.2 Schmierstoffe

Als Schmierstoffe können sowohl feste, flüssige als auch gasförmige Stoffe zum Einsatz kommen. Neben den beiden Haupteinsatzgründen – der Verminderung von Reibung und Verschleiß, sowie dem Wärmeabtransport, werden in MÖLLER/NASSAR [2] noch weitere Vorteile von Schmierstoffen angeführt:

Flüssige Schmierstoffe

- Entfernung von Ablagerungen und Abriebpartikel aus dem Schmierpalt
- Schutz der Metalloberfläche vor Korrosion
- Abdichtung von aufeinander gleitenden Teilen

Konsistente Schmierstoffe

- Das Abfließen des Schmierstoffes wird verhindert
- Abdichtung der Schmierstelle gegenüber Verunreinigungen von außen
- Lange Schmierfristen möglich, da die Ölabscheidung nur langsam erfolgt
- Mischreibungsgebiet wird verkleinert

Allgemein eingeteilt können Schmierstoffe nach ihrer Herkunft, sowie nach ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften werden. So unterscheidet man in der Praxis in:

- Natürliche Basisöle (Mineralöle, Pflanzenöle)
- Synthetische Öle
- Konsistente Schmierstoffe (Schmierfette, Haftschnierstoffe)

Die Klasse der konsistenten Schmierstoffe hebt sich von den flüssigen Schmierstoffen durch eine definiert Fließgrenze ab. Konsistente Schmierstoffe bestehen allgemein aus einem flüssigen Grundöl, einem festen Eindicker und flüssigen oder festen Wirkstoffen (Additiven). Als Grundöl kommen sowohl natürliche Basisöle, als auch Syntheseöle zum Einsatz. Den Additiven wird dabei, ähnlich wie den Legierungselementen bei der Stahlerzeugung, eine bedeutende Rolle zu teil. Aus diesem Grund spricht man bei Mineralölen mit Wirkstoffen auch von legierten Ölen, im Gegensatz zu den reinen oder unlegierten Mineralölen. Tabelle

3 zeigt jene Eigenschaften die durch Additive verbessert werden im Vergleich mit jenen, auf die sie praktisch keinen Einfluss ausüben. [vgl. 2]

Tabelle 3: Eigenschaften legierter und unlegierter Schmieröle aus MÖLLER/NASSAR
S. 100

	Schmieröle unlegiert	Schmieröle legiert
nicht durch Additive beeinflussbar	Wärmeabfuhr VP-Verhalten	Wärmeabfuhr VP-Verhalten
durch Additive zu verbessern	Kältebeständigkeit Alterungsstabilität VT-Verhalten Korrosionsschutz	verbesserte Kältebeständigkeit verbesserte Alterungsbeständigkeit verbessertes VT-Verhalten erhöhter Korrosionsschutz
nur durch Additive zu erreichen	- - - -	Reinigungsvermögen Dispersionsvermögen EP-Eigenschaften Schaumverhütung

VP...Viskosität-Druck, VT...Viskosität-Temperatur, EP...extreme pressure
(Hochdruck- und Verschleißschutz)

4.2.2.1 Eigenschaften von Schmierstoffen

Zur Charakterisierung und zum Vergleich der Schmierstoffe gibt es sehr viele unterschiedliche Parameter die diesbezüglich herangezogen werden können und deren Bestimmung und Klassifizierung auch in Normenwerken geregelt ist. In Tabelle 4 und Tabelle 5 ist eine Auswahl der wichtigsten Parameter zur Beschreibung von Schmierstoffen zusammengestellt.

Tabelle 4: Parameter zur Beschreibung von Schmierstoffen (1) [vgl. 2]

Parameter	Beschreibung	Bestimmung/Norm
Dichte	In DIN 1306 [32] wird die Dichte γ als Quotient aus Masse m und Volumen V definiert. $\gamma = \frac{m}{V} \text{ in kg/m}^3 \text{ (22)}$ Bei Mineralölprodukten wird die Dichte meist bei 15°C als γ_{15} angegeben.	In DIN 51757 [33] ist die Bestimmung von Mineralölprodukten nach vier Verfahren genormt: - Bestimmung mit Aräometer nach DIN EN ISO 3675 [34] - Bestimmung mit hydrostatischer Waage (MOHR-WESTPHAL'sche Waage) nach DIN 51757 [33] - Bestimmung mit Pyknometer nach DIN EN ISO 12185 [35] - Bestimmung mit Schwingungsmessgeräten nach DIN EN ISO 12185 [35]
Farbe	Bei gebrauchten Industrieölen ist es möglich durch die Farbe Rückschlüsse auf die Öloxidation zu machen.	Bestimmt wird die Farbe durch den Vergleich mit definierten Vergleichsfarbgläsern nach DIN ISO 2049 [36].
Flammpunkt	Der Flammpunkt ist jene niedrigste Temperatur, bei der unter festgelegten Bedingungen ein solches Öldampf-Luft Gemisch entsteht, dass dieses bei Annäherung einer Zündflamme erstmals aufflammt, jedoch von selbst nicht weiter brennt.	Haben Öle einen Flammpunkt über 79°C, so kann dieser nach DIN EN ISO 2592 [37] im offenen Tiegel nach CLEVELAND bestimmt werden. Bei Ölen mit geringeren Flammpunkten gibt es die Methoden nach ABEL-PENSKY (DIN 51755 [38]) oder PENSKY-MARTENS (DIN 51758) im geschlossenen Tiegel.
Anilinpunkt (AP)	Der Anilinpunkt ist jene Temperatur in °C, bei der sich eine Lösung zu gleichen Raumanteilen Anilin und Mineralöl entmischt. Man kann sagen, je höher der AP, desto mehr kettenförmige Kohlenwasserstoffe beinhaltet das Öl. Auch kann gesagt werden, dass die Wechselwirkungen des Öls mit einem Dichtungswerkstoff mit steigendem AP abnehmen.	Zur Bestimmung des AP werden in DIN ISO 2977 [39] insgesamt fünf unterschiedliche Methoden genannt.
Aufnahme von Wasser	Wasser fördert die Schmierstoffalterung, setzt die Schmierfähigkeit herab und fördert die Korrosion, daher sollten Schmierstoffe wasserfrei sein. Der Gleichgewichtszustand eines mit feuchter Luft in Kontakt stehenden Öles ist dann erreicht, wenn die relative Feuchtigkeit des Öles gleich der relativen Luftfeuchte ist.	Ist der Massengehalt an freiem Wasser >0,1%, so erfolgt die Bestimmung des Wassergehaltes nach DIN ISO 3733 [40] mit Hilfe eines Rückflusskühlers. Bei Massengehalten <0,1% erfolgt die Bestimmung titrimetrisch nach Karl Fischer (DIN 51777 [41, 42]).
Feste Fremdstoffe	Alle unlöslichen festen Verunreinigungen, die nicht als Festschmierstoffe dem Öl beigemischt wurden, zählen zu den festen Fremdstoffen.	- Zentrifugenverfahren nach ISO 3734 [43] bzw. ASTM D 839 - Membranfilterverfahren nach DIN 51592 - Abpressen von Schmierfetten nach DIN 51592

Tabelle 5: Parameter zur Beschreibung von Schmierstoffen (2) [vgl. 2]

Parameter	Beschreibung	Bestimmung/Norm
Fließverhalten (Viskosität)	<p>Man unterscheidet zwei Arten der Viskosität.</p> <p>Dynamische Viskosität η Durch den Parallelplattenversuch (siehe Abbildung 35) für NEWTON'sche Flüssigkeiten erhält man das Schergefälle D_1 (Geschwindigkeitsunterschied zu Abstand zwischen den Platten).</p> $D_1 = \frac{v_2 - v_1}{\Delta y} = \frac{dv}{dy} \text{ in } s^{-1} \quad (23)$ <p>Zwischen diesem Schergefälle und der zur Verformung aufzubringenden Schubspannung τ besteht ein direkter proportionaler Zusammenhang.</p> $D_1 = f(\tau) = \frac{1}{\eta} * \tau \quad (24)$ <p>Der Proportionalitätsfaktor η wird dabei als dynamische Viskosität mit der Einheit $N*s/m^2 = Pa*s$ bezeichnet.</p> <p>Kinematische Viskosität ν In den meisten Viskosimetern wird nicht die dynamische Viskosität selbst, sondern lediglich ihr Verhältnis zur Dichte gemessen. Dieses Verhältnis wird als kinematische Viskosität bezeichnet.</p> $\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ in } m^2/s \quad (25)$ <p>Wichtig im Zusammenhang mit der Viskosität von Schmierstoffen ist ihre Abhängigkeit von Temperatur (VT-Verhalten) und vom Druck (VP-Verhalten). Im Allgemeinen nimmt die Viskosität mit steigender Temperatur ab und mit steigendem Druck zu.</p>	<p>Die Viskosität wird im Allgemeinen durch Viskosimeter oder Penetrometer, wobei erstere für flüssige Schmierstoffe und zweitere für konsistente Schmierstoffe zum Einsatz kommen, bestimmt.</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Kapillarviskosimeter</i> (laminarer Durchfluss durch ein Rohr) - <i>Kugelfallviskosimeter</i> (Fall einer festen Substanz durch die Substanz) - <i>Rotationsviskosimeter</i> (Scherung der Substanz zwischen zwei bewegten Oberflächen) - <i>Schwingungviskosimeter</i> (meist piezoelektrische Schwingungen von Quarzkörpern) - <i>Penetrometer</i> (Eindringen eines festen Körpers in die Prüfsubstanz) <ul style="list-style-type: none"> + <i>Konuspenetration</i> nach ISO 2137 [44] + <i>Nadelpenetration</i> nach DIN 51579 [45] <div style="text-align: center;"> </div> <p>Abbildung 35: Schema der Bewegungsvorgänge in laminar strömenden NEWTON'schen Flüssigkeiten aus MÖLLER/NASSAR [2] S.160</p>
Viskositätsklassen	<p>Durch die Einführung von Viskositätsklassen wurde versucht, jeden wesentlichen Anwendungsfall durch eine Viskositätsklasse abzudecken. Man unterscheidet:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Viskositätsklassen für Industrieöle</i> Man unterscheidet 18 „ISO-Viscosity Grades (ISO-VG)“ bei einer Temperatur von 40°C. - <i>Viskositätsklassen für Industriegetriebeöle</i> Die „American Gear Manufacturers Association (AGMA)“ unterscheidet 9 Viskositätsklassen. - <i>Viskositätsklassen für Kfz-Getriebeöle</i> Herausgegeben durch die amerikanische „Society of Automotive Engineers (SAE)“. - <i>Viskositätsklassen für Motoröle</i> Ebenfalls durch SAE festgelegt. - <i>Konsistenzklassen für Schmierfette</i> Einteilung nach dem „National Lubricating Grease Institute (NLGI)“ 	<ul style="list-style-type: none"> - ISO-VG: DIN ISO 3448 [46] - SAE-Klassen (Getriebe): SAE J 306 [47] - SAE-Klassen (Motor): SAE J 300 [48] - NLGI-Klassen: DIN 51818 [49]

4.2.3 Schmierung von Gleitlagern

In Gleitlagern sind Lagerwelle und Lagerschale konstruktiv nur durch den flüssigen oder gasförmigen Zwischenstoff (Schmierstoff) getrennt. Gleitlager können nach mehreren Kriterien eingeteilt werden. Eines dieser Kriterien ist die Schmierungsart [vgl. 2]:

- Hydrodynamische (gasdynamische) Gleitlager
- Hydrostatische (gasstatische) Gleitlager
- Gleitlager mit Festschmierstoff
- Ungeschmierte Gleitlager

Gleitlager zeichnen sich, im Vergleich zu Wälzlagern, dadurch aus, dass sie für wesentlich höhere Belastungen und Drehzahlen geeignet sind. [vgl. 6]

Dies geht auch aus Abbildung 36 und Abbildung 37 hervor, welche typische Einsatzgrenzen für unterschiedliche Lagerarten darstellen.

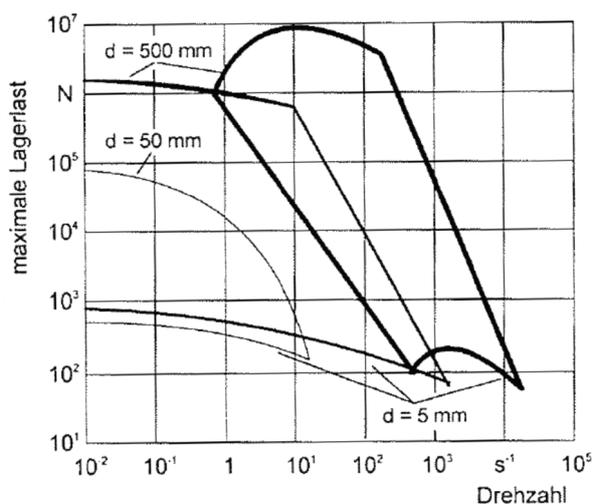


Abbildung 36: Einsatzgrenzen von Radiallagern aus BARTZ [62]

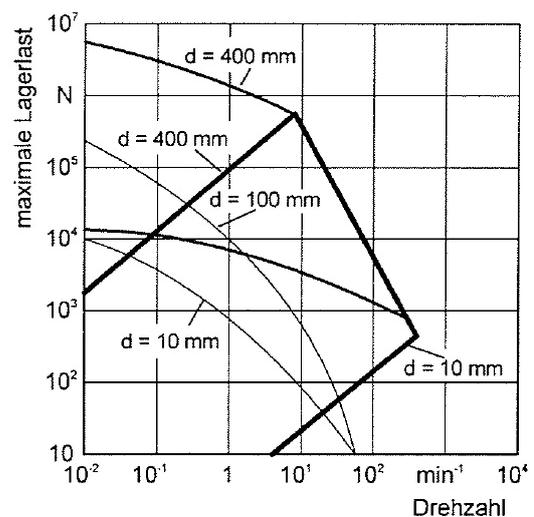


Abbildung 37: Einsatzgrenzen von Axiallagern aus BARTZ [62]

- Wälzlager
- Sinterlager
- hydrodynamische Gleitlager

Andererseits benötigen Gleitlager, im Vergleich zu Wälzlagern, eine geregelte Schmierstoffzufuhr, einen höheren Wartungsaufwand und eine längere Bauform, sowie eine Einlaufphase in welcher mit erhöhtem Verschleiß zu rechnen ist. [vgl.6]

4.2.3.1 Hydrodynamische Gleitlager

Im Bereich der hydrodynamischen Schmierung bildet sich ein tragender Schmierfilm zwischen Lagerzapfen und Lagerschale aus und der Verschleiß wird auf ein Minimum reduziert. Dies wird jedoch erst nach Überschreitung einer bestimmten Drehzahl, wenn genügend Schmierfilm in den Lagerspalt (Keilspalt) gezogen wurde, erreicht. Unter dieser Drehzahl ist mit Grenzreibung und erhöhtem Verschleiß zu rechnen. Deshalb kommt der An- und Auslaufphase eine bedeutende Rolle zu, wie in Abbildung 38 dargestellt. [vgl. 2]

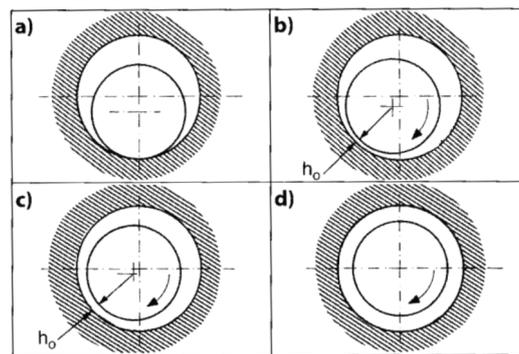


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Anlaufvorganges eines hydrodynamischen Gleitlagers aus MÖLLER/NASSAR [2] S.272

a) Stillstand; b) Rotationsbeginn; c) langsame Drehzahl; d) schnelle Drehzahl

4.2.3.2 Hydrostatische Gleitlager

Bei hydrostatischen Gleitlagern wird der Schmiermitteldruck durch eine externe Pumpe erzeugt. Damit kann der Schmiermitteldruck so eingestellt werden, dass es zu keiner metallischen Berührung auch während der An- und Auslaufphase kommt. Diese Art der Schmierung wird bei Anlagen angewandt, wo es zu keinen Verschleißerscheinungen kommen darf. [vgl. 2]

Für die Berechnung des Schmierölbedarfs von Gleitlagern finden sich in der Literatur viele ähnliche Ansätze, weshalb an dieser Stelle auf MÖLLER/NASSAR [2] verwiesen wird.

Schmierfette werden zur Gleitlagerschmierung nur in seltenen Fällen eingesetzt, wenn das Lager gegen Staub oder Feuchtigkeit von außen abgedichtet werden soll. [vgl. 2]

4.2.4 Schmierung von Wälzlagern

Wälzlager bestehen aus einem Innenring, einem Außenring, dem Käfig und den Wälzkörpern. Abbildung 39 zeigt den Aufbau eines Wälzlers am Beispiel eines Kegelrollenlagers.

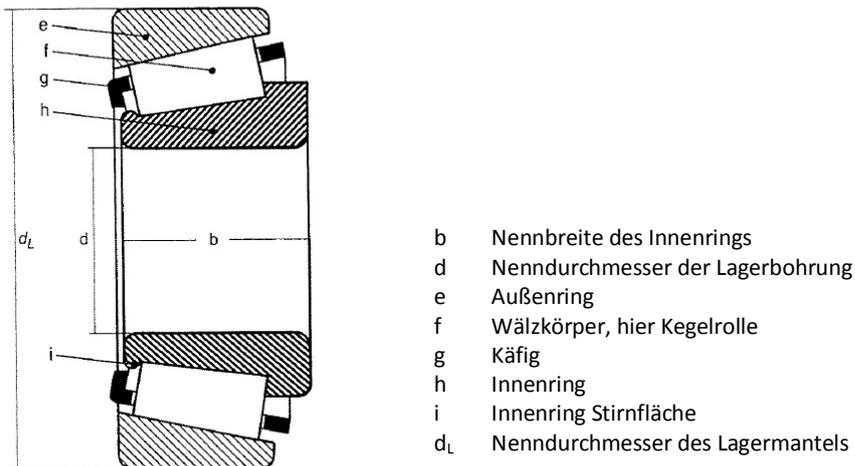


Abbildung 39: Aufbau eines Wälzlers (Kegelrollenlager) aus MÖLLER/NASSAR [2] S.285

Wälzlager können nach der Art der Lastrichtung (siehe Abbildung 40) in Radiallager und Axiallager eingeteilt werden.

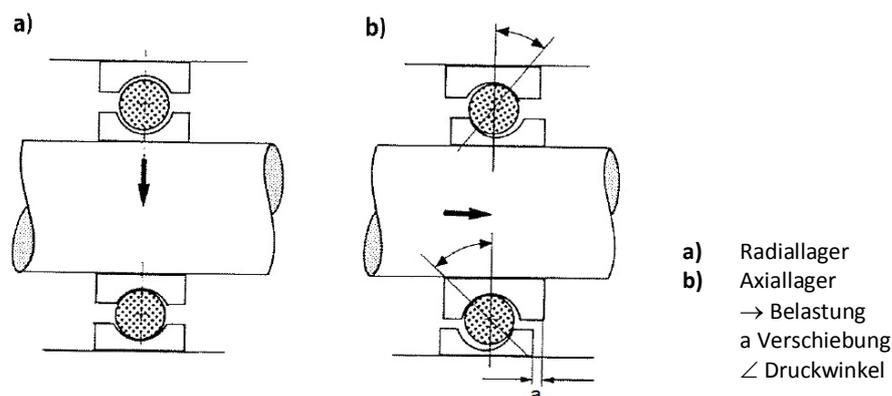


Abbildung 40: Belastungsrichtungen bei Wälzlagern aus MÖLLER/NASSAR [2] S.286

Nach der Schmierungsart unterscheidet man:

- fettgeschmierten Lager
- ölgeschmierte Lager
- Lager mit Festschmierstoffen

Nach der Form der Wälzlager (siehe Abbildung 41):

- Kugellager
- Rollenlager
- Nadellager

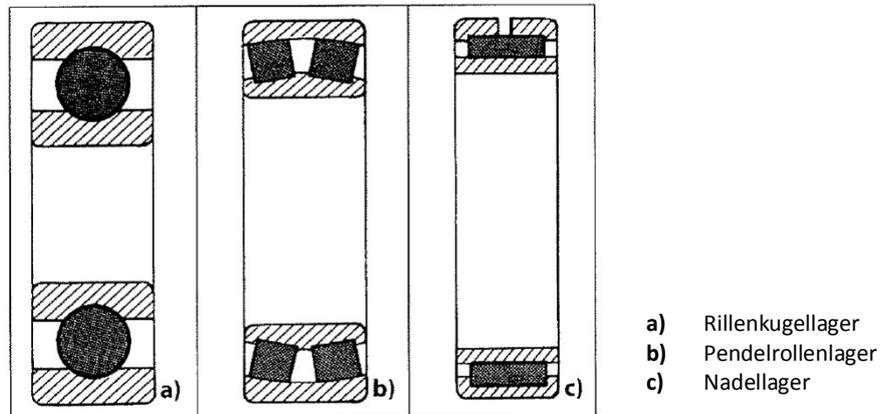


Abbildung 41: Arten von Wälzkörpern aus MÖLLER/NASSAR [2] S.287

4.2.4.1 Lebensdauer

Jeder Wälzkörper passiert beim Abwälzvorgang mehrmals den untersten Punkt an welchem die höchsten HERTZ'schen Belastungen auftreten. Am obersten Punkt kommt es dann wiederum zur geringsten Belastung (siehe Abbildung 42). Dieser, mit dem Begriff „Lastwechsel“, bezeichnete Vorgang ist maßgebend für die Lebensdauer eines Wälzkörpers. Die Berechnung derjenigen Lebensdauer von Wälzlager, die von 90% der Lager erreicht wird ist in DIN ISO 281 [50] festgelegt (siehe Formel 26 und 27). [vgl. 2]

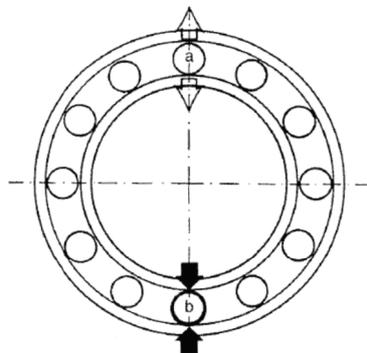


Abbildung 42: Druckbeanspruchung und -entlastung von Wälzkörpern aus MÖLLER/NASSAR [2] S.288

a...Druckentlastung; b...Druckbeanspruchung

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (26) [15]$$

$$L_{h10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \frac{10^6}{n \cdot 60} \quad (27) [15]$$

L_{10} ... Lebensdauer in 10^6 Umdrehungen

L_{h10} ... nominelle Lebensdauer in Stunden

C ... Dynamische Tragzahl in N

P ... dynamische äquivalente Lagerbelastung in N

p ... Lebensdauerexponent, für Kugellager: $p=3$, Rollenlager: $p=10/3$

n ... Drehzahl in min^{-1}

Die dynamisch äquivalente Lagerbelastung P aus den Formeln 26 und 27 wird aus den Lagerkräften bestimmt (siehe Formel 28).

$$P = X * F_r + Y * F_a \quad (28) [15]$$

F_r ... radiale Lagerkraft in N

F_a ... axiale Lagerkraft in N

X ... Radialfaktor; berücksichtigt Verhältnis aus F_r zu F_a

Y ... Axialfaktor; berücksichtigt die Umrechnung der Axialkraft bei Radiallagern in eine äquivalente Radialkraft

Da diese Art der Lebensdauerberechnung von einer definierten Erlebenswahrscheinlichkeit ausgeht und weder Werkstoff- noch Schmierungseinflüsse berücksichtigt, gibt es noch die Möglichkeit einer modifizierten Lebensdauerberechnung wie sie Formel 29 zeigt.

$$L_{na} = a_1 * a_2 * a_3 * L_{10} \quad (29) [2]$$

L_{na} ... modifizierte Lebensdauer in 10^6 Umdrehungen

a_1 ... Faktor für die geänderte Erlebenswahrscheinlichkeit

a_2 ... Faktor für den Werkstoffeinfluss

a_3 ... Faktor für die Schmierungseinflüsse

4.2.4.2 Ölschmierung [vgl. 2]

Da sich in der Praxis die Fettschmierung von Wälzlagern bewährt hat, laufen nur ca. 10% aller Wälzlager mit einer Ölschmierung. Zur Entscheidung ob Fett- oder Ölschmierung kann der „Drehzahlkennwert“ $n_D * d_m$ (in mm/min) herangezogen werden. Als n_D wird dabei die Betriebsdrehzahl bezeichnet und d_m stellt den mittleren Lagerdurchmesser dar. Als Grenze für die Fettschmierung wird häufig der Wert $0,5 * 10^6$ mm/min angegeben.



Wichtig bei der Auswahl des richtigen Öles ist vor allem die Viskosität. Ist diese nämlich zu gering, dann reißt der tragende Schmierfilm ab und ist sie zu hoch, dann kommt es zu erhöhter Schmierstoffreibung was den Zu- und Ablauf des Öles beeinträchtigen kann. Eine vereinfachte Möglichkeit der Auswahl der richtigen Viskositätsklasse nach DIN ISO 3448 [46] stellt Abbildung 43 dar. Dabei wird der oben beschriebene Drehzahlkennwert über der Einsatztemperatur aufgetragen.

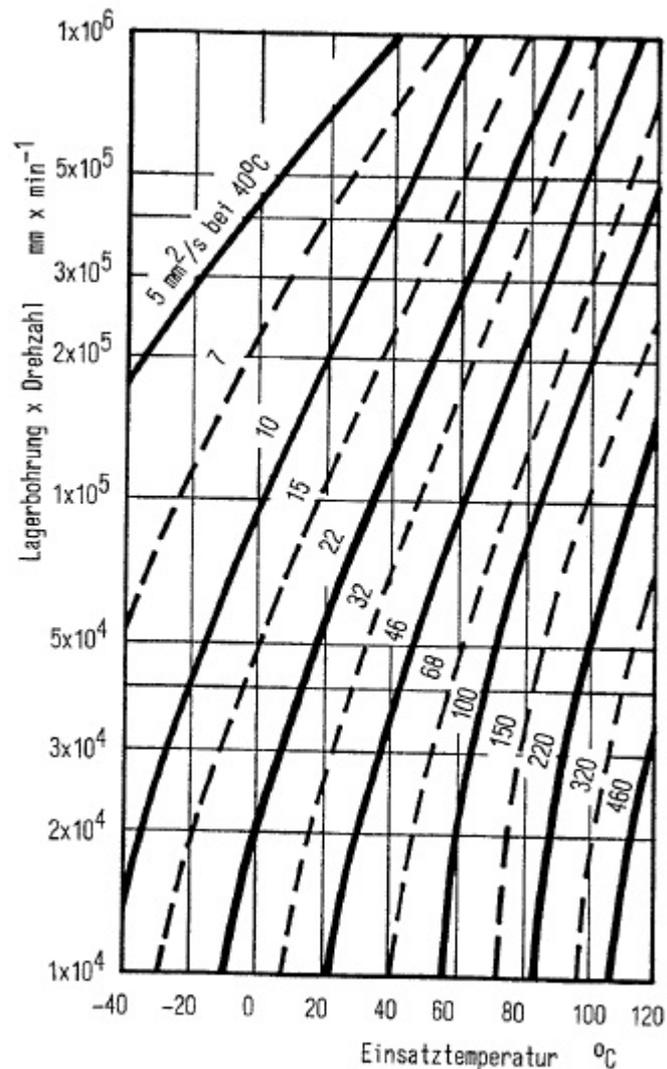


Abbildung 43: Vereinfachte Viskositätsauswahl für Wälzlagerschmieröle durch das Verhältnis aus Lagerbohrung, Drehzahl und Einsatztemperatur aus MÖLLER/NASSAR [2] S.296

Je nach Art der eingesetzten Ölschmierung (Tauchschmierung, Umlaufschmierung, Einpritzschmierung) werden in MÖLLER/NASSAR [2] unterschiedlichste Diagramme zur Ölmengenbestimmung angeführt. Bei normalem Betrieb, d.h. die Lagertemperatur bleibt unter 80°C und es kommt zu keiner Verschmutzung des Lagers von außen, kann die

Ölwechselfrist nach Abbildung 44, in Abhängigkeit von Lagerbohrung und Ölmenge, bestimmt werden.

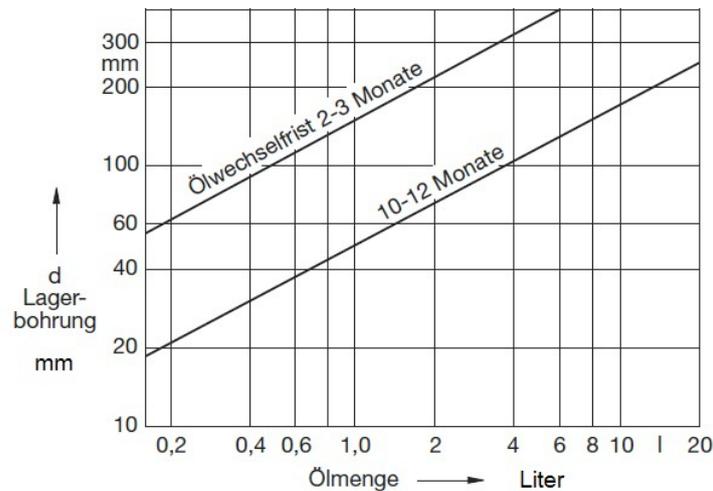


Abbildung 44: Ölwechselfrist bei Wälzlagerölschmierung in Abhängigkeit von Ölmenge und Lagerbohrung aus [53] S.43

Einen allgemeinen Überblick zur Klassifikation von Schmierstoffen findet man in DIN 51502 [54]. Die Mindestanforderung an ein Mineralöl zur Schmierung von Wälzlagern gibt DIN 51501 [55] wieder. Für die Praxis von weitaus größerer Bedeutung sind allerdings Schmieröle nach DIN 51517 [56, 57, 58], da diese auch für, über die Mindestanforderungen hinausgehende, Anwendungen geeignet sind.

4.2.4.3 Fettschmierung [vgl. 2, 65]

Die überwiegende Mehrheit der heutzutage eingesetzten Schmierfette besitzen die NLGI Konsistenzklasse 2 nach DIN 51818 [49]. Daneben auch noch in Verwendung sind die Klassen 1 und 3. Wälzlagerschmierfette sind allgemein in DIN 51825 [51], oder auch in ISO 6743-9 [59] genormt. Eine Möglichkeit der Fettauswahl besteht, ähnlich wie für die Ölschmierung, in der Berechnung des „Drehzahlkennwertes“ $k_a \cdot n_D \cdot d_m$ (in mm/min). Der Faktor k_a berücksichtigt hier zusätzlich die Wälzlagerbauform. Der so ermittelte „Drehzahlkennwert“ wird in Abhängigkeit des Belastungsverhältnisses P/C in einem Diagramm (siehe Abbildung 45) aufgetragen. Dieses Diagramm unterteilt sich in die drei Belastungsbereiche, normaler Betriebsbereich, Bereich hoher Belastung und Bereich hoher Drehzahlen.

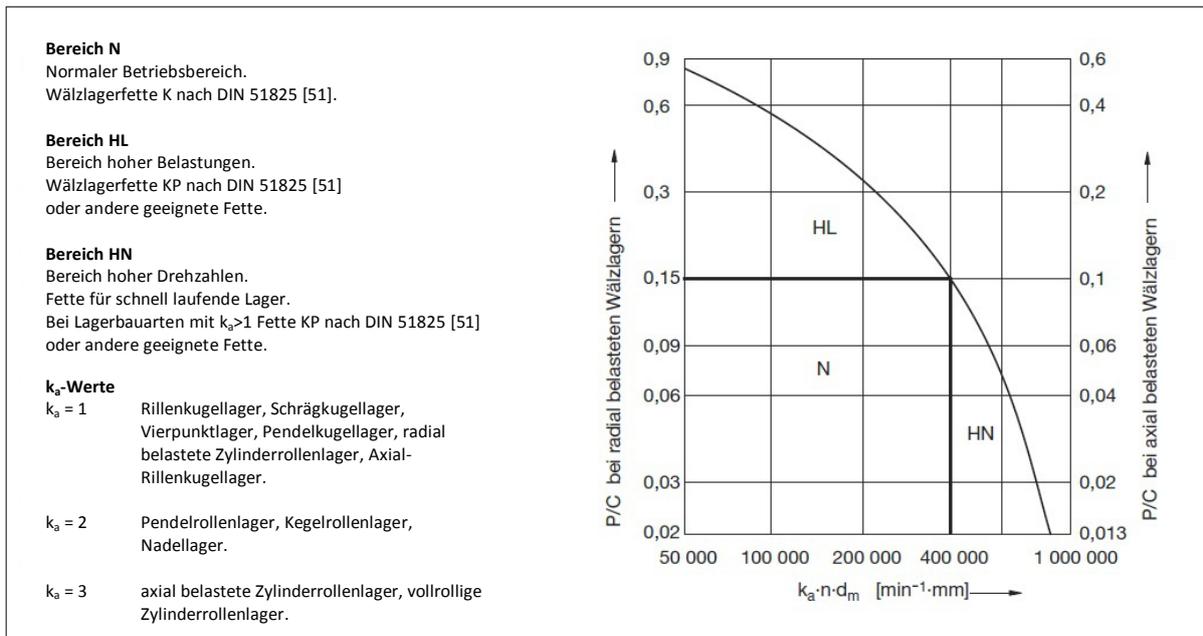


Abbildung 45: Schmierfettauswahl für Wälzlagerfettsschmierung in Abhängigkeit von lagerabhängigem Drehzahlkennwert $k_a \cdot n \cdot d_m$ und Belastungsverhältnis P/C aus [53] S.27

Bei einer Wälzlagerschmierung durch Schmierfett wird das Fett in die Zwischenräume der Wälzkörper gedrückt. Je mehr Fett in den Zwischenräumen vorhanden ist und je höher die Drehzahl des Lagers ist, desto mehr macht sich ein Temperaturanstieg aufgrund der Walkreibung nach dem Schmiervorgang bemerkbar. In Abbildung 46 ist dieser Temperaturanstieg grafisch dargestellt.

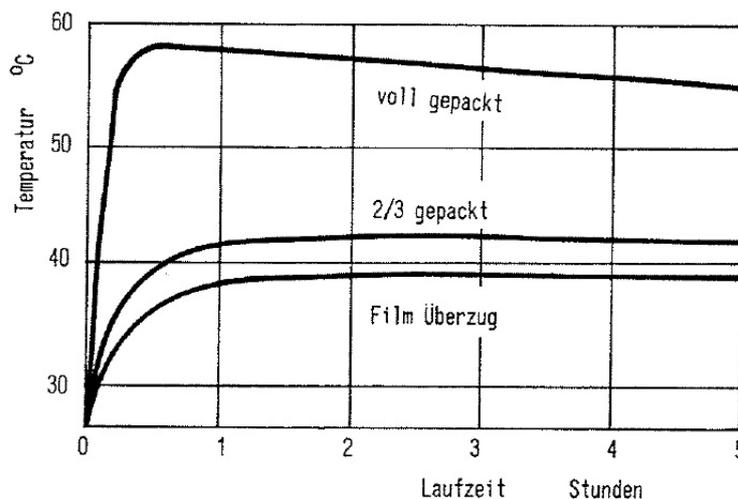


Abbildung 46: Temperaturanstieg in einem fettgeschmierten Wälzlager aus WILLS [63]

Jene Fettmenge G_f die für eine vollständige Füllung mit Schmierfett erforderlich ist, kann nach Formel 30 berechnet werden.

$$G_f = \frac{f_1 (R+r)(R-r)b}{5,2 \cdot 10^{-3}} \quad (30) [52]$$

- G_f ... Fettmenge zur vollständigen Füllung in g
- f_1 ... Faktor siehe Tabelle 6
- R ... Radius Lagerschale in m
- r ... Radius Lagerwelle in m
- b ... Lagerbreite in m

Tabelle 6: f_1 -Werte zur Fettfüllung aus MÖLLER/NASSAR [2] S. 306

Lagerart	f_1
Rillenkugellager, Stahlkäfig	1,0
Rillenkugellager, Messingkäfig	0,6
Rollenlager, Messingkäfig	0,6
Schräggugellager, Messingkäfig	0,65
Doppelkugellager, Messingkäfig	0,35

Schmierfette müssen aufgrund von Strukturveränderung und Oxidation, sowie aufgrund von Verunreinigungen in regelmäßigen Abständen ergänzt bzw. erneuert werden. Abbildung 47 zeigt die Nachschmierfristen verschiedener Wälzlagerarten in Abhängigkeit der Lagerbohrung und der Drehzahl.

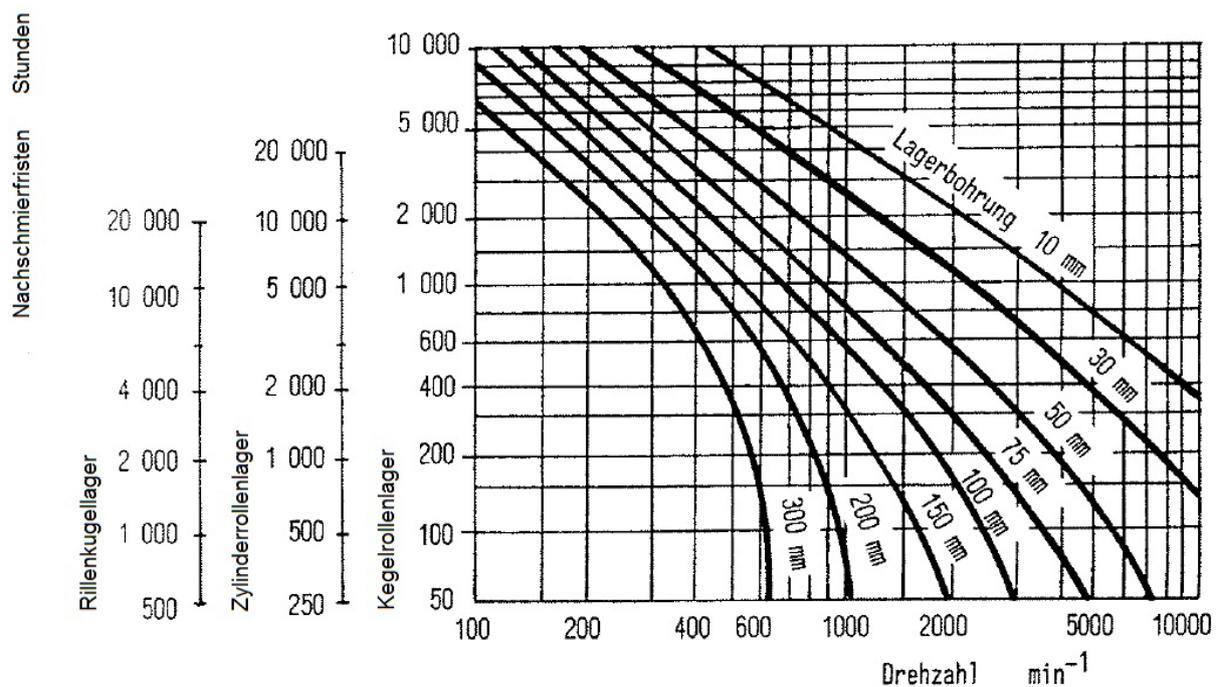


Abbildung 47: Nachschmierfristen bei fettgeschmierten Wälzlagern aus CONGRAM [64]

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Nachschmierfristen von Wälzlagerfetten ohne EP-Wirkstoffe stellen die von MIDDLEBROOK [106] in den USA veröffentlichten Tabellenwerke dar (siehe Tabelle 7 und Tabelle 8).

Tabelle 7: Nachschmierfrist für Lagertyp I (Kugellager, Zylinderrollenlager, Nadellager, und Schrägkugellager mittels Fettpresse) aus MIDDLEBROOK [106]

Nachschmierfrist							
	2 Jahre	1 Jahr	6 Monate	3 Monate	2 Monate	1 Monat	2 Wochen
Lagerbohrung	Drehzahl						
[mm]	[min ⁻¹]						
20	<1600	1600 – 3200	3200 – 5500	5500 – 8000	8000 – 10000	10000 – 12000	>12000
30	<1000	1000 – 2000	2000 – 3800	3800 – 5500	5500 – 7000	7000 – 9000	>9000
40	<800	800 – 1600	1600 – 2900	2900 – 4400	4400 – 5400	5400 – 7200	>7200
50	<640	640 – 1300	1300 – 2300	2300 – 3500	3500 – 4300	4300 – 5800	>5800
60	<530	530 – 1100	1100 – 1900	1900 – 2900	2900 – 3600	3600 – 4800	>4800
70	<450	450 – 900	900 – 1650	1650 – 2500	2500 – 3100	3100 – 4100	>4100
80	<400	400 – 800	800 – 1450	1450 – 2200	2200 – 2700	2700 – 3600	>3600
90	<350	350 – 700	700 – 1280	1280 – 1950	1950 – 2400	2400 – 3200	>3200
100	<320	320 – 650	650 – 1150	1150 – 1750	1750 – 2200	2200 – 2900	>2900
120	<270	270 – 550	550 – 960	960 – 1450	1450 – 1800	1800 – 2400	>2400
140	<230	230 – 450	450 – 820	820 – 1250	1250 – 1550	1550 – 2000	>2000
160	<200	200 – 400	400 – 720	720 – 1100	1100 – 1350	1350 – 1800	>1800
180	<180	180 – 360	360 – 640	640 – 980	980 – 1200	1200 – 1600	>1600
200	<160	160 – 320	320 – 580	580 – 880	880 – 1100	1100 – 1400	>1400

Tabelle 8: Nachschmierfristen für Lagertyp II (Tonnenlager, Kegelrollenlager und Axialkugellager mittels Fettpresse) aus MIDDLEBROOK [106]

Nachschmierfrist								
	2 Jahre	1 Jahr	6 Monate	3 Monate	2 Monate	1 Monat	2 Wochen	1 Woche
Lagerbohrung	Drehzahl							
[mm]	[min ⁻¹]							
20	<540	540 – 1160	1160 – 2100	2100 – 3200	3200 – 4000	4000 – 6000	6000 – 6500	>6500
30	<360	360 – 800	800 – 1400	1400 – 2200	2200 – 2800	2800 – 4000	4000 – 4500	>4500
40	<270	270 – 580	580 – 1050	1050 – 1600	1600 – 2100	2100 – 3000	3000 – 3600	>3600
50	<220	220 – 460	460 – 850	850 – 1300	1300 – 1700	1700 – 2400	2400 – 2900	>2900
60	<180	180 – 390	390 – 700	700 – 1080	1080 – 1400	1400 – 2000	2000 – 2400	>2400
70	<150	150 – 330	330 – 600	600 – 920	920 – 1200	1200 – 1700	1700 – 2050	>2050
80	<135	135 – 290	290 – 520	520 – 800	800 – 1050	1050 – 1500	1500 – 1800	>1800
90	<120	120 – 260	260 – 470	470 – 720	720 – 950	950 – 1300	1300 – 1600	>1600
100	<110	110 – 230	230 – 420	420 – 650	650 – 850	850 – 1180	1180 – 1450	>1450
120	<90	90 – 190	190 – 350	350 – 540	540 – 700	700 – 980	980 – 1200	>1200
140	<80	80 – 165	165 – 300	300 – 460	460 – 600	600 – 850	850 – 1050	>1050
160	<70	70 – 145	145 – 260	260 – 400	400 – 530	530 – 750	750 – 900	>900
180	<60	60 – 130	130 – 230	230 – 360	360 – 470	470 – 650	650 – 800	>800
200	<50	50 – 120	120 – 210	210 – 320	320 – 420	420 – 590	590 – 720	>720
240	<45	45 – 100	100 – 175	175 – 270	270 – 350	350 – 490	490 – 600	>600
300	<35	35 – 80	80 – 140	140 – 220	220 – 280	280 – 390	390 – 480	>480

Die so ermittelte Nachschmierfrist muss gegebenenfalls noch mit einzelnen Faktoren der Tabelle 9 multipliziert werden.

Tabelle 9: Minderungsfaktor der Nachschmierfrist [vgl. 2, 53]

Faktor	Beschreibung
2	wenn vor Nachschmierung Ausbau und Säuberung erfolgt
3 bis 4	bei diskontinuierlichem Betrieb (40 Wochenstunden)
0,25 bis 0,8	bei Staub, Feuchtigkeit oder Vibration
0,5	je 15°C höhere Belastungstemperatur als 70°C

Zur näherungsweisen Berechnung der Nachschmiermengen, entsprechend der jeweiligen Nachschmierfristen, werden in [53] die Formeln 31 bis 33 angeführt. Man unterscheidet dabei lediglich zwischen wöchentlicher, monatlicher sowie jährlicher Nachschmierfrist.

$$m_w = 0,002 * D * b \quad (31)$$

$$m_m = 0,003 * D * b \quad (32)$$

$$m_j = 0,004 * D * b \quad (33)$$

m_w ...Nachschmiermenge bei wöchentlicher Nachschmierfrist in g

m_m ... Nachschmiermenge bei monatlicher Nachschmierfrist in g

m_j ...Nachschmiermenge bei jährlicher Nachschmierfrist in g

D ... Lageraußendurchmesser in mm

b... Lagerbreite in mm

Bei der Nachschmierung fettgeschmierter Wälzlager ist im Idealfall darauf zu achten, dass nur Schmierfettarten mit identischer Bezeichnung verwendet werden. Eine Mischung verschiedener Schmierstoffarten ist weitestgehend zu vermeiden, da es hier unter Umständen zu Unverträglichkeiten kommen könnte. Die Mischbarkeit hängt vor allem von der Art des Grundöles, sowie des Verdickers ab. [vgl. 2]

Die zulässigen und unzulässigen Verdickerkombinationen werden in der Literatur auf sehr unterschiedliche Art und Weise dargestellt. Eine mögliche Darstellung gibt Tabelle 10 wieder. Im Allgemeinen muss die Verträglichkeit zweier Schmierfettarten experimentell festgestellt werden. Des Weiteren ist es äußerst ratsam den Rat des jeweiligen Schmierstoffherstellers bzw. -lieferanten einzuholen. Um mögliche negative Folgen eines Schmierstoffartenwechsels zu minimieren werden unter anderen die Maßnahmen: Einsatz von Lösungsmittel zur vollständigen Entfernung des Altfettes; verstärkte Zufuhr von Neufett um das Altfett vollständig zu entfernen; Verringerung der Nachschmierfristen; empfohlen. [vgl. 2]

Tabelle 10: Verträglichkeit unterschiedlicher Schmierfette nach der Art ihres Verdickers [20]

	Al-Komplex	Barium	Ba-Komplex	Calcium	Ca-12-Hydroxystearate	Ca-Komplex	Kieselgel	Lithium	Li-12-Hydroxystearate	Li-Komplex	Natrium	Polyharnstoff	Tonerde
Al-Komplex	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-
Barium	-	-	?	-	+	-	?	-	-	-	?	-	-
Ba-Komplex	+	?	-	+	+	+	+	+	+	+	+	?	?
Calcium	-	-	+	+	+	o	+	+	o	+	-	?	+
Ca-12-Hydroxystearate	+	+	+	+	+	o	+	+	+	+	-	-	+
Ca-Komplex	-	-	+	o	o	+	+	o	+	+	-	+	-
Kieselgel	-	?	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	?
Lithium	-	-	+	+	+	o	+	+	+	+	-	-	-
Li-12-Hydroxystearate	-	-	+	o	+	-	+	+	+	+	-	-	-
Li-Komplex	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Natrium	-	?	+	-	-	-	+	-	-	-	-	?	?
Polyharnstoff	-	-	?	?	-	+	+	-	-	-	?	?	-
Tonerde	-	-	?	+	+	-	?	-	-	-	?	-	+

+ verträglich, o mit Einschränkungen verträglich, - unverträglich

4.2.5 Getriebeschmierung

Vor allem Zahnradgetriebe haben sich als Vertreter der formschlüssigen Maschinenelemente zur Übertragung von Drehzahlen und Drehmomenten in der Industrie ein breites Anwendungsgebiet geschaffen. [vgl. 2]

4.2.5.1 Lebensdauer [vgl. 2]

Je nachdem, wie sich das Verhältnis aus Belastung und Geschwindigkeit zusammensetzt, kann, wie in Abbildung 48 ersichtlich, einer von vier Faktoren maßgebend für die Lebensdauer einer Verzahnung sein. So wird bei langsam laufenden Getrieben die Verschleißgrenze überschritten, wenn sich kein ausreichender elastohydrodynamischer Schmierfilm ausbilden kann. Steigert man die Drehzahl, so gelangt man in das Gebiet der Grübchensicherheit (Pittinggrenze). Dabei handelt es sich um eine Form der Werkstoffermüdung die sich nur bedingt durch den Schmierstoff beeinflussen lässt. Wird die Drehzahl noch weiter erhöht, so spielt vor allem die Bruchsisicherheit, also die Materialfestigkeit des Zahnradwerkstoffes, die entscheidende Rolle. Diese kann durch Schmierstoffe nicht beeinflusst werden. Bei hohen Geschwindigkeiten erreicht man schließlich das Gebiet der Fresssicherheit. Hierbei wird der Schmierfilm durch zu hohe Belastung oder zu hohe Temperaturen zerstört und es kommt zur metallischen Berührung der Zahnflanken.

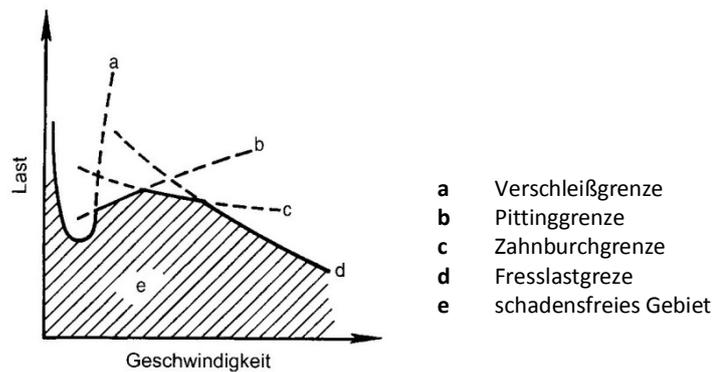


Abbildung 48: Einsatzgrenzen für Zahnradgetriebe aus MÖLLER/NASSAR [2] S.324

Für die Getriebeschmierung ist vor allem der elastohydrodynamische Schmierfilm mit Flüssigkeitsreibung, wie er in Abbildung 49 schematisch dargestellt ist, entscheidend.

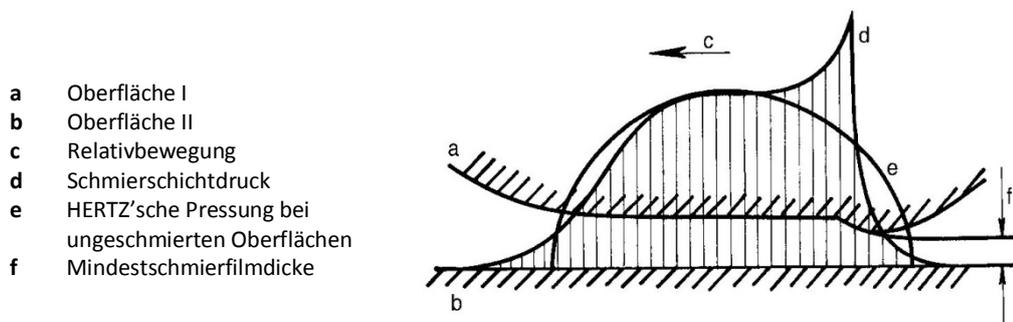


Abbildung 49: Elastohydrodynamischer Schmierfilm aus MÖLLER/NASSAR [2] S.325

4.2.5.2 Getriebeöle [vgl. 2]

Als Getriebeöle werden hauptsächlich unlegierte Mineralöle eingesetzt. Diese können zur Verbesserung der Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit entsprechende Inhibitoren enthalten. Für höher belastete Getriebe kommen auch legierte Öle, mit polaren Zusätzen (antiwear agent, AW-additives), zum Einsatz.

Eine weitere Möglichkeit stellen Syntheseöle mit AW/EP-Zusätzen dar. Sie bieten bei sehr hohen oder tiefen Einsatztemperaturen Vorteile gegenüber Mineralölen. Hier ist allerdings besonders darauf zu achten, dass Syntheseöle und Mineralöle nicht ohne Probleme mischbar sind. Desweiteren weisen AW/EP-Additive ein geändertes Verhalten auf, als beim Einsatz in Mineralölen.

4.2.5.3 Getriebefette [vgl. 2]

Zum Einsatz kommen hauptsächlich Schmierfette auf Mineralölbasis (vorzugsweise langfaserige Natronseifenfette) in den NLGI-Konsistenzklassen 0, 00 und 000 nach DIN 51818 [49]. Um ein höheres Lastaufnahmevermögen zu erreichen, werden auch EP-Substanzen zugesetzt.

4.2.5.4 Schmierstoffauswahl [vgl. 2]

Meist wird vom Getriebehersteller ein definierter Schmierstoff vorgegeben. Ist dies nicht der Fall, so kann man nach einem fünf Stufen Schema laut DIN 51509 [69, 70] vorgehen.

Schmieröle ohne EP-Zusätze

- Schmieröle L-AN nach DIN 51501 [55], sind für Schmieraufgaben ohne besondere Anforderungen auf Alterungsbeständigkeit, Korrosionsschutz usw. geeignet.
- Schmieröle C nach DIN 51517-1 [56], sind alterungsbeständige Mineralöle für den Einsatz in Umlaufschmierungen.
- Schmieröle CL nach DIN 51517-2 [57], werden bei erhöhter Anforderung an den Korrosionsschutz eingesetzt.
- Schmier- und Regleröle TD nach DIN 51515-1 [66], werden für Turbinenöle mit Wirkstoffen zur Alterungs- und Korrosionsbeständigkeit eingesetzt.

Schmieröle mit EP-Zusätzen

- Schmieröle CLP nach DIN 51517-3 [58], gelten als typische Schmierflüssigkeiten für Industriegetriebe.
- Schmieröle TG nach DIN 51515-2 [67], werden bei erhöhter thermischer Beanspruchung eingesetzt.
- Schmierfette G nach DIN 51826 [68], werden bei Schmierstellen für Getriebefließfette mit EP Zusätzen verwendet.

4.2.6 Kettenschmierung

Kettentriebe fallen ebenfalls in die Kategorie der formschlüssig kraftübertragenden Maschinenelemente.

Eine Kette gilt dann als gut geschmiert, wenn der Kettenbolzen über die gesamte Oberfläche einen Schmierfilm aufweist und somit weder Riefen noch Rost auftreten. [vgl. 71]

Die Lebensdauer, das Geräusch- und Verschleißverhalten von Ketten wird maßgebend durch die Schmierung beeinflusst. [vgl. 2]

Das Kettengelenk selbst, kann als Tribosystem „Gleitlager“ im „Mischreibungsgebiet“ angesehen werden, welches auch bei einer ausreichenden Schmierung eine Dreiteilung im Verschleißdiagramm (siehe Abbildung 50) aufweist. [vgl. 72]

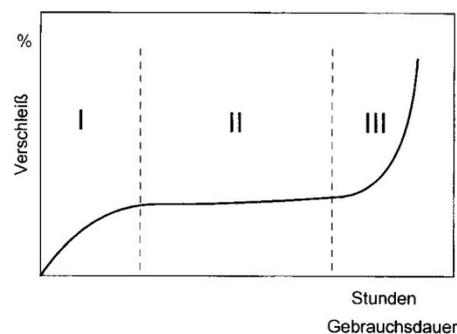


Abbildung 50: Verschleißdiagramm Kettengelenk aus MÖLLER/NASSAR [2] S.367

- | | | |
|-----|------------------------|---|
| I | degressiver Verschleiß | - Setzen der Pressverbindungen
- Abtrag der Rauigkeitsspitzen
- Abtrag der aufgebauchten Tönnchenform |
| II | linearer Verschleiß | - geringe Verschleißrate |
| III | progressiver Verlauf | - Abtrag der Härteschichten |

Für den Betrieb eines Kettentriebes ist es äußerst wichtig, dass in regelmäßigen Abständen Schmierstoff nachgeführt wird, da man durch statistische Auswertungen davon ausgeht, dass mehr als 60% aller Kettendefekte auf eine unzureichende Schmierung zurückzuführen sind. [vgl. 73]

Durch den auftretenden Verschleiß kommt es zu einer Vergrößerung der wirksamen Teilung und somit zu einer Zunahme der Kettenlänge, welche max. 2 bis 3% der Ursprungslänge betragen sollte. [vgl. 74]

4.2.6.1 Schmierungsarten [vgl. 2]

Die Schmierung von Kettentrieben kann auf vier unterschiedliche Arten erfolgen, welche in Abhängigkeit von Kettengeschwindigkeit und Kettenteilung (siehe Abbildung 51) zum Einsatz kommen und nach DIN ISO 10823 [75, 76] genormt sind.

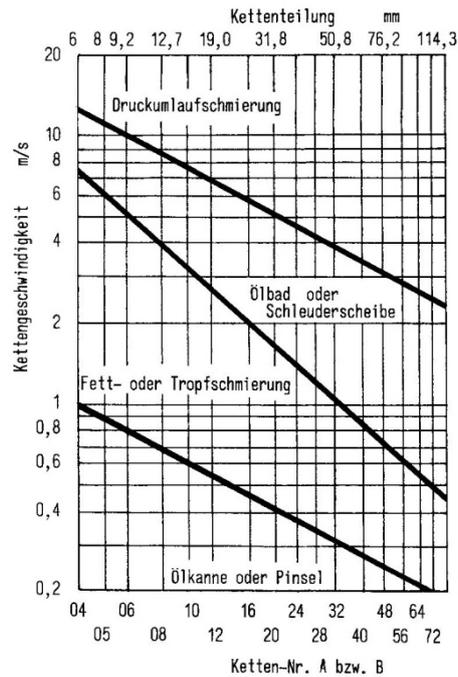


Abbildung 51: Schmierungsarten für Rollenketten in Abhängigkeit von Kettengeschwindigkeit und Kettenteilung aus MÖLLER/NASSAR [2] S.369

4.2.6.2 Schmierstoffviskosität [vgl. 2]

Bei der Auswahl der richtigen Schmierstoffviskosität muss meist ein Kompromiss gemacht werden. Höher viskose Öle ermöglichen erst die Ausbildung eines hydrodynamisch tragenden Schmierfilmes, verhindern aber evtl. das Vordringen des Schmierstoffes bis zur Reibstelle zwischen Bolzen und Buchse und verursachen damit Trockenreibung im Gelenk. Hier gibt ebenfalls DIN ISO 10823 [75, 76] Empfehlungen für die richtige Viskositätsauswahl.

4.2.6.3 Schmierstoffart

Da es keine allgemein gültigen Spezifikationen für Kettenschmierstoffe gibt, geben MÖLLER/NASSAR [2] drei Arten von Schmierstoffen an, welche sich in der Praxis als geeignet erwiesen haben:

- Getriebeöle des Qualitätsniveaus API GL-4
- Motorenöle des Qualitätsniveaus API SE/CC und höher in den Viskositäten 10W-40 und 15W-50
- Kalkfette mit einem Tropfpunkt von etwa 70°C und der NLGI-Klasse 1 und dünner

4.3 Instandhaltungsmaßnahmen

Auf dem Weg in Richtung einer zustandsorientierten Instandhaltung ist es in einem ersten Schritt von besonderer Bedeutung den Begriff der „Instandhaltung“ mit den vier Teilbereichen „Wartung“, „Inspektion“, „Instandsetzung“ und „Verbesserung“ wie er nach DIN 31051 [77] definiert ist (siehe Abschnitt 2.1.1), umfassend abzuhandeln. Vor allem im Bereich der Betriebsmedien kann mit einer umfangreichen und vollständigen Wartung schon sehr viel zur Bewahrung des Sollzustandes und zur Verlängerung der Nutzungsdauer von technischen Systemen bewirkt werden.

4.3.1 Wartung

Um Wartungsmaßnahmen abschätzbar und, vor allem im Bereich der Schmierung von Maschinenelementen, planbar zu gestalten, ist ein detaillierter Schmierplan von großer Bedeutung. Aus diesem soll sowohl die letzte, als auch die darauf folgende Nachschmierung hervorgehen.

Die Basis für die Erstellung eines solchen Schmierplans stellt eine Inventarisierung sämtlicher Schmierstellen eines Industriestandortes dar. Dies kann von einer Auflistung nach Aggregaten und Betriebsbereichen, bis hin zu einer detaillierten Beschreibung der Schmierstellen eines Aggregates reichen. Dabei sollten vor allem auch die für die Schmierung notwendigen Details der jeweiligen Schmierstelle und des darin eingesetzten Schmierstoffes erfasst werden. Diese bestehen zum Einen aus den Eigenschaften des eingesetzten Schmierstoffes und andererseits aus den für die Nachschmierung wichtigen Kennwerten,

- Nachschmierintervall und
- Nachschmiermenge.

Bei der Festlegung des Schmierintervalls sollten grundsätzlich drei Faktoren berücksichtigt werden.

Zu allererst sind hier die Herstellerangabe heranzuziehen, sowohl was Nachschmierintervall und –menge betrifft, als auch im Bezug auf die Schmierstoffsortenauswahl. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn die Erstinbetriebnahme der entsprechenden Anlage noch nicht all zu weit zurück liegt und sich diese somit noch in der Garantiephase des Herstellers befindet. Jedes Abweichen von den vom Hersteller vorgegebenen Schmierungsparametern während dieses Zeitraumes, würde im Schadensfall einen Ausschluss aus den Garantieansprüchen zur Folge haben.



Wenn sich das Aggregat bereits außerhalb der Garantiephase befindet und bereits Instandsetzungs- und Verbesserungsmaßnahmen vorgenommen wurden (z.B. Umstieg auf andere Schmierstoffsorte, Einsatz eines anderen Lagertyps, usw.), kann mit Hilfe der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methoden das Nachschmierintervall theoretisch berechnet werden. Dies setzt jedoch in den meisten Fällen eine genaue Kenntnis des vorliegenden Tribosystems voraus. Im Bereich der Lagerung müssen etwa die Lagerdaten, sowie die Drehzahl und allgemeine Umgebungsbedingungen bekannt sein. Bei Getrieben und Ketten sind in erster Linie die Drehzahlen, d.h. die Umfangsgeschwindigkeiten von Bedeutung.

In vielen Fällen fehlen diese Informationen jedoch teilweise oder überhaupt zur Gänze. Hier kann man sich dann meist nur auf die Erfahrungswerte von Mitarbeitern mit langjähriger Betriebspraxis im Bereich der Schmierung stützen.

Zur Bestimmung der Nachschmiermenge wird ähnlich verfahren. Auch hier sind ausgehend vom Zeitpunkt der Erstinbetriebnahme eines Aggregates zuerst die Herstellerangaben und in einer späteren Folge theoretische Ansätze bzw. Erfahrungswerte als Vorgabe heranzuziehen.

Diese Erfahrungswerte sind für einen Betrieb von großer Bedeutung und sollten auch nicht unterschätzt werden. Ein erfahrender Mitarbeiter ist oftmals in einem weitaus höheren Ausmaß in der Lage das Schmierintervall bzw. die erforderliche Nachschmiermenge „abzuschätzen“, als dies durch eine rein theoretische Herangehensweise möglich ist. Vor allem die Umgebungsbedingungen eines Aggregates haben oft einen erheblichen Einfluss, wie der Nachschmiervorgang ausgeführt werden muss. In der Theorie werden hierfür lediglich empirische Faktoren mit meist großzügigen Anwendungsbereichen (siehe Tabelle 9) genannt, welche von Aggregat zu Aggregat individuell festgelegt werden müssen.

4.3.2 Inspektion

Die Inspektion als Teilbereich der Instandhaltung ist meist der entscheidende Schritt, weg von einer schadens- oder zeitorientierten Instandhaltung, hin zu einer zustandsorientierten Instandhaltung. Angewandt auf die sich im Einsatz befindlichen Betriebsmedien soll so mit Hilfe geeigneter Inspektions- und Diagnosemethoden deren Zustand, vor allem in Bezug auf die Fortsetzung der Einsatzfähigkeit im jeweiligen technischen System festgestellt werden. Somit kann anstelle der Reaktion bei einem Totalausfall des Systems, bereits bei einer Veränderung der Leistungsfähigkeit, zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt agiert werden.

4.3.2.1 Inspektion von Schmier- und Hydraulikmedien

Schmierstoffe und Hydrauliköle erfahren während ihrer Nutzungsdauer Veränderungen, die in ihrer Gesamterscheinung als Ölalterung bezeichnet werden. Diese Veränderungen



umfassen zum einen die chemische Zusammensetzung des Mediums und zum anderen den Eintrag von Verunreinigungen. [vgl. 2]

Ölfiltration als präventive IH-Maßnahme

Für Hydrauliksysteme weiß man heutzutage, dass Partikel im Größenordnungsbereich von 1 bis 5µm als Hauptverursacher für Verschleißerscheinungen anzusehen sind. [vgl. 78]

Deshalb kann man durch eine geeignete Separation fester Partikel und einer evtl. nachgeschalteten Analyse die Lebensdauer technischer Systeme deutlich verlängern.

Eine Möglichkeit der Separation bietet die Filtration, welche durch die unterschiedlichsten Ausführungsformen in der Praxis realisiert werden kann.

Für die Filtration von Hydraulikölen gibt es mit der Norm ISO 4406 [79] auch eine Grundlage für die Reinheitsangabe von Kraftübertragungsflüssigkeiten. [vgl. 2]

Ölanalyse als zustandsorientierte IH-Maßnahme

Als Methoden zur Zustandsbeurteilung von Gebrauchttölen stellen Ölanalysen eine in der Praxis bewährte Inspektionsmethode dar. Dabei muss jedoch eine strenge Unterscheidung zwischen einer Analyse der Ölelemente und einer Analyse der tribotechnischen Verschleißpartikel angestellt werden. Während mit einer traditionellen Ölanalyse vor allem Aussagen über den Zustand und die Alterung des Öls gemacht werden können, muss zur qualitativen Aussage bezüglich der Art der Schädigung sowie der Herkunft der Verschleißpartikel eine analytische Ferrographie angewandt werden. Der Grund dafür liegt darin, dass die traditionelle Ölanalyse mit Hilfe der Spektrometrie (heute meist ICP – Inductively Coupled Plasma) durchgeführt wird. Diese Verfahren sind zwar zur Bestimmung kleiner Partikelgrößen äußerst empfindlich, ab Partikelgrößen größer 6 bis 7µm nimmt die Empfindlichkeit jedoch drastisch ab (siehe Abbildung 52). [vgl. 134]

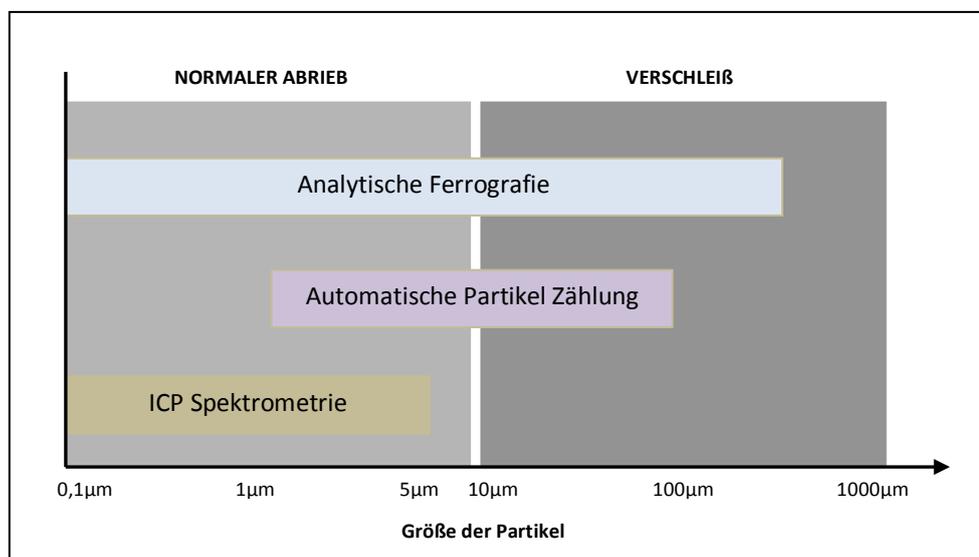


Abbildung 52: Messbereich der Verschleißpartikelbestimmungsmethoden aus [134]

Dieser Erscheinung kann zwar durch das Ansäuern der Probe und der damit verbundenen Lösung größerer Partikel entgegengewirkt werden, wird aufgrund des großen Zeitaufwandes in der Praxis aber meist nicht angewandt. Einen weiteren Grund warum die Ferrographie der Spektrometrie bei der Verschleißpartikelanalyse vorzuziehen ist, zeigt Abbildung 53. Während sich bei normalem Verschleiß bevorzugt kleine Partikel im Bereich unter $5\mu\text{m}$ ins Öl absetzen und sich deren Konzentration somit kontinuierlich vergrößert, entstehen bei anormalem Verschleiß ein plötzlicher sprunghafter Anstieg großer Partikel im Öl (siehe Abbildung 53b). Spektrometrische Verfahren zeigen solche Änderungen im Verschleiß aus oben genannten Gründen jedoch nicht an. [vgl. 134]

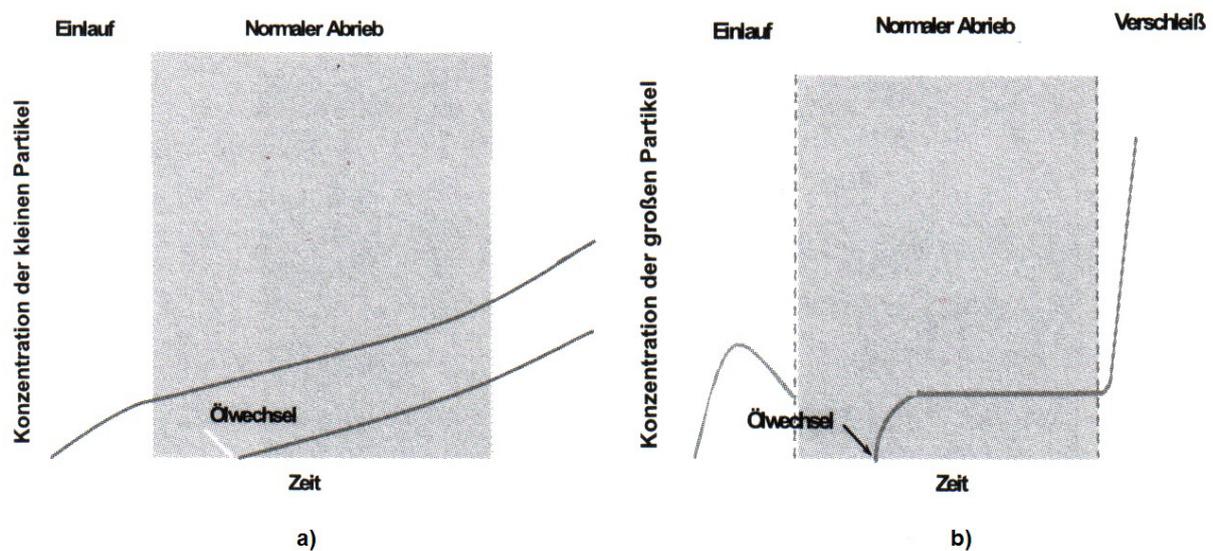


Abbildung 53: Gegenüberstellung der Partikelkonzentrationen im Öl in Abhängigkeit der Betriebsdauer aus [134]

Bei der Ferrographie (siehe dazu umfassend STURM/FÖRSTER [4]) werden die Abriebpartikel über einem Glaträger mit Hilfe einer Flüssigkeit und einem Magnetfeld nach ihrer Größe zwischen 1 und $100\mu\text{m}$ aufgetrennt. In einem speziellen Mikroskop wird anschließend ein sogenanntes Ferrogramm angefertigt. [vgl. 80, 81]

Auch Magnetstopfen können eine günstige Alternative zur Separation von ferromagnetischen Verunreinigungen darstellen.

Die traditionelle Ölanalyse, sowohl von Einzelparametern als auch von Summenparametern, ist in einer Vielzahl unterschiedlicher Normen festgehalten und durch die einschlägige Fachliteratur (z. B. MÖLLER/NASSAR [2]) bereits entsprechend abgehandelt.

Wie bei jeder analytischen Untersuchung kommt vor allem der Probenahme eine tragende Rolle zu. Für eine qualitative Aussage ist es von äußerster Notwendigkeit, dass die Probenahme repräsentativ erfolgt. Dies ist jedoch nur für Spezialfälle genormt, wie z.B. in DIN 51574 „Probenahme von Schmierölen aus Verbrennungskraftmaschinen“ [82]. [vgl. 2]

4.3.2.2 Inspektion von Kühl- und Isolationsmedien

Einen weiteren wichtigen Bereich in der industriellen Instandhaltung in welchem Inspektionsmethoden zur Zustandsbeurteilung angewandt werden können, stellen Isolieröle in Leistungstransformatoren dar. Ähnlich wie bei Schmierölen kommt es auch bei Isolierölen mit andauernder Betriebszeit zur Eigenschaftsänderung des Öls und damit zur Ölalterung. In der Richtlinie DIN EN 60422 (VDE 0370-2) [27] sind die entscheidenden Parameter zur Identifikation der Ölalterung angeführt. Die Kenntnis dieser Parameter gestattet die Ableitung von Prognosen über die restliche Einsatzdauer eines Isolieröles, sowie über mögliche Instandsetzungs- und Verbesserungsmaßnahmen. Im Folgenden werden einige dieser Parameter kurz beschrieben. [vgl. 3]

Durchschlagsspannung

Ein Maß für den Widerstand einer Isolierflüssigkeit gegenüber elektrischer Beanspruchung stellt die Durchschlagsspannung dar. Verunreinigungen, vor allem Wasser, verschlechtern den Wert der Durchschlagsspannung. [vgl. 27]

Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Entnahmetemperatur des Isolieröles, da die Durchschlagsspannung meist bei ca. 20°C bestimmt wird. Auch die Betriebstemperatur des Transformators und das Temperaturgefälle des Isolieröls über die Transformatorhöhe stellen wichtige Randbedingungen bei der Bestimmung der Durchschlagsspannung dar. [vgl. 3]

Dielektrischer Verlustfaktor

Als dielektrischen Verlustfaktor bezeichnet man den Quotienten aus Wirkstrom zu Blindstrom wenn das Isolieröl mit einem sinusförmigen Wechselstrom von 50Hz beansprucht wird. Je niedriger dieser Parameter desto besser. Beeinflusst wird er von allgemeinen Verunreinigungen im Öl und bei regelmäßiger Bestimmung, kann er als Maß für die Geschwindigkeit der Ölalterung herangezogen werden. [vgl. 3]

Wassergehalt

Den wohl wichtigsten Parameter zur Bestimmung der Ölalterung stellt der Wassergehalt dar. Allgemein lässt sich sagen, dass der Wassergehalt im Öl bis zur Ölsättigung direkt proportional zur relativen Wasserkonzentration ist, wobei die Wasserlöslichkeit eine Funktion der Temperatur ist (siehe Formel 34). [vgl. 3]

$$W_S = W_{\text{Öl}} * e^{\frac{B}{T}} \text{ in} \quad (34)$$

W_S ... Wasserlöslichkeit in Öl

$W_{\text{Öl}}$... Konstante in Abhängigkeit des Transformatoröls

B ... Konstante in Abhängigkeit des Transformatoröls

T ... absolute Temperatur zum Zeitpunkt der Probenahme in K



Weitere Einflussfaktoren für die Wasserlöslichkeit stellen das Öl selbst, sowie Alterungsnebenprodukte im Öl dar. Mögliche Verfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes im Öl sind einerseits das Verfahren nach KARL-FISCHER [41], sowie andererseits die Bestimmung mit Hilfe eines kapazitiven Sensors (Vaisala Sonde). Bei der Methode nach KARL-FISCHER [41] wird der Gesamtwassergehalt des Öls, d.h. Wasser in gelöster Form, sowie an Alterungsnebenprodukte gebundenes Hydrat-Wasser, bestimmt. Mit kapazitiven Sensoren wird nur die relative Feuchte des Öls gemessen, d.h. es wird nur jenes Wasser erfasst, welches für Wechselwirkungen zur Verfügung steht. Da dieses jedoch auch das größte Schädigungspotential besitzt, ist es vollkommen ausreichend nur die relative Feuchte zu bestimmen. Bei der Bestimmung nach der KARL-FISCHER [41] Methode werden chemische Reagenzien verwendet, welche unter Umständen mit Ölalterungsprodukten interagieren und somit das Messergebnis verfälschen können. Dies stellt einen weiteren Grund zur Verwendung kapazitiver Sonden zur Bestimmung des Wassergehaltes im Öl dar. [vgl. 3]

Gas-in-Öl-Analyse

Durch elektrische Entladungen sowie lokalen Überhitzungen kann es zur Zerstörung des Isolieröls und der Zellulose in einem Transformator kommen. Dabei entstehen Spaltgase welche in ihrer Art und Menge eine charakteristische Größe für bestimmte Fehlerarten innerhalb eines Transformators darstellen. Einen Leitfaden zur Interpretation solcher Gas-in-Öl-Analysen bildet die Norm DIN EN 60599:2008 (VDE 0370-7) [139]. [vgl. 3]

4.4 Praktische Umsetzung

Dieses Kapitel befasst sich mit der praktischen Handhabung der Betriebsmedien in den beiden Müllverbrennungsanlagen Spittelau und Flötzersteig. Dabei wird in einem ersten Schritt der Status quo beleuchtet und darauf aufbauend eine Strategie zur Verbesserung der Betriebsmittelbewirtschaftung im Hinblick auf die Implementierung einer zustandsorientierten Instandhaltung erarbeitet. Dabei werden zum einen die technischen Maßnahmen, die der Erreichung dieses Ziels dienen, als auch wirtschaftliche Gegenüberstellungen angeführt.

4.4.1 Technische Maßnahmen

4.4.1.1 Ausgangssituation

Die Betriebsmedien im Bereich der Tribologie werden in den Werken Spittelau und Flötzersteig vom Personal der mechanischen Werkstätten betreut. Dabei gibt es in beiden Werken Experten auf diesem Gebiet, die sich in langjähriger Betriebspraxis ein fundiertes Wissen über den Maschinenpark des jeweiligen Werkes und der dazugehörigen Eigenheiten von Einzelaggregaten im Bereich der Wartung von Schmierstoffen und Hydraulikflüssigkeiten erworben haben.

Im Werk Flötzersteig werden die Tätigkeiten Ersetzen und Erneuern von Schmierstoffen und Hydraulikölen bereits seit Jahren mit Hilfe eines Schmierplanes durchgeführt. Dieser Schmierplan beinhaltet neben den einzelnen Schmierstellen, auch den eingesetzten Schmierstoff, das Schmierintervall, sowie die Menge an Schmierstoff, welche ersetzt werden muss. Auch die eingesetzte Sortenvielfalt wurde in der Vergangenheit stark eingeschränkt, was zu einer deutlichen Arbeitserleichterung in Hinblick auf Beschaffung, Lagerung und Handhabung der unterschiedlichen Schmierstoffe geführt hat.

Anders stellt sich die Lage im Werk Spittelau dar. Auch hier wurden bereits in der Vergangenheit die Grundzüge eines Schmierplanes erstellt, jedoch nicht mehr regelmäßig aktualisiert. Vor allem im Bereich der Nachschmierintervalle und –mengen besteht hier ein Verbesserungspotential.

Diese Erkenntnisse führen zu dem Umstand, dass vor allem im Werk Spittelau Maßnahmen notwendig sind, um in Richtung einer planbaren Instandhaltung im Bereich der Schmierungstechnik zu gelangen.

Im Bereich der Isolieröle für Transformatoren wird in beiden Werken in Anlehnung an die ESV 2003 (Elektroschutzverordnung) [83] ein Überwachungszyklus von fünf Jahren angewandt. Die Ölanalyse erfolgt dabei durch eine externe Firma, welche ein Prüfprotokoll mit den Ergebnissen und den zu ergreifenden Maßnahmen erstellt.



4.4.1.2 Aufnahme der Schmierstellen

Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangssituation wie in Abschnitt 4.4.1.1 dargestellt, wurde der Fokus bei der Schmierstelleninventarisierung vor allem auf das Werk Spittelau gelegt. Da im Werk Flötzersteig bereits ein detaillierter Schmierplan zum Einsatz kommt, kann davon ausgegangen werden, dass mit diesem auch ein Großteil der Schmierstellen in diesem Werk ihre Berücksichtigung finden. Nichts desto trotz sollten auch diese Angaben in einem weiterführenden Schritt einer Überprüfung auf Vollständigkeit und Plausibilität unterzogen werden.

Die Schwierigkeit bei der Aufnahme der einzelnen Schmierstellen im Werk Spittelau stellt mit Sicherheit die große Vielfalt an unterschiedlichen Anlagenbereichen und Aggregaten dar, da sich neben den klassischen Aggregaten der Müllverbrennung, auch noch der Bereich der Fernwärmeauskoppelung am Standort befindet. Hier diente die firmeninterne Risikobewertung wie sie in KÖSLBACHER/WEILER [1] beschrieben wird, als Referenz zur Festlegung der Priorität der unterschiedlichen Anlagenbereiche. Vor allem die Risikoklassen I und II, welche in der Risikobewertung für sehr großes bzw. großes Risiko stehen, wurden besonders in den Fokus der Schmierstellenaufnahme gerückt. Aber auch bei alle übrigen Aggregaten wurde im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung des Begriffes „Instandhaltung“ versucht, sämtliche Schmierstellen zu identifizieren und aufzuzeichnen. Die Schmierstellen der einzelnen Aggregate wurden in sogenannten „Schmierblättern“ zusammengefasst. Der Anhang A dieser Arbeit beinhaltet die Schmierblätter jener Aggregate, welche der Risikoklassen I und II zugeordnet wurden.

4.4.1.3 Aufnahme der Schmierstoffsorten

Im Zuge der Schmierstelleninventarisierung wurden auch die Schmierstoffsorten, welche in den einzelnen Schmierstellen zum Einsatz kommen erfasst und ebenfalls in den „Schmierblättern“ (siehe Anhang A) vermerkt. Dabei wurde mit Hilfe einer Produktrecherche versucht die wesentlichen Eigenschaften einer Schmierstoffsorte zu eruieren, um diese unabhängig von gängigen Markennamen untereinander vergleichbar zu machen. Bei jenen Schmierstoffen die zusätzlich eine Kennzeichnung nach den in Abschnitt 4.2 angeführten einschlägigen Normen für Industrieschmierstoffe besitzen wurde diese angeführt, alle übrigen erhielten hier die Abkürzung n.v., für nicht vorhanden. Die so gewonnenen Schmierstoffspezifikationen sind ein wertvolles Hilfsmittel bei zukünftigen Optimierungsaufgaben im Bereich der Schmierung. Durch sie ist es möglich eingesetzte, sowie am Markt erhältliche Schmierstoffe aufgrund ihrer Eigenschaften objektiv zu vergleichen. In Tabelle 11 ist eine Gegenüberstellung der im Werk Flötzersteig eingesetzten konsistenten Schmierstoffe vorgenommen worden. Da hier bereits in der Vergangenheit eine



Schmierstoffsortenreduktion stattgefunden hat, befinden sich nur noch zwei unterschiedliche Schmierstoffsorten im Einsatz.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der im Werk Flötzersteig eingesetzten konsistenten Schmierstoffe (Schmierfette) [87, 88]

Schmierstoffsorte	Renolit Duraplex EP 2	Shell Alvania RL 3
Grundöl	Mineralöl	Mineralöl
Verdicker	Lithium-Komplex	Lithium-Komplex
Walkpenetration (DIN ISO 2137 [84])	265 – 295	220 – 250
NLGI-Klasse (DIN 51818 [49])	2	3
Grundölviskosität bei 40°C (DIN 51562-1 [85])	112mm ² /s	100mm ² /s
Ölabscheidung 18h bei 40°C (DIN 51817 [86])	<1,0%	1,0%
Kennzeichnung (DIN 51502 [54])	KP 2 P-30	K 3 K-20

Ein ähnliches Bild bietet sich hier auch im Bereich der Schmieröle wie Tabelle 12 zeigt. Die drei verbliebenen Ölarten differenzieren sich vor allem in ihrer Viskosität voneinander.

Tabelle 12: Gegenüberstellung der im Werk Flötzersteig eingesetzten Schmier- und Hydrauliköle [95, 96, 97]

Schmierstoffsorte	Mobil DTE Heavy Medium	Mobilgear 629	Mobil DTE 25
Grundöl	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl
ISO Viskositätsklasse	68	150	46
Viskosität (40°C) (ASTM D 445 [89])	65,1mm ² /s	150mm ² /s	44,2mm ² /s
Viskositätsindex (ASTM D 2270 [90])	95	98	98
Flammpunkt (ASTM D 92 [91])	223°C	245°C	232°C
Pourpoint (ASTM D 97 [92])	-15°C	-27°C	-27°C
Kennzeichnung [57, 58, 93, 94]	Schmieröl DIN 51517 – CL 68	Schmieröl DIN 51517 – CLP 150	Hydrauliköl DIN 51524 – HLP 46

Etwas anders stellt sich die Situation im Werk Spittelau dar. Hier kommen fünf unterschiedliche Schmierfettarten zum Einsatz. Die Gegenüberstellung in Tabelle 13 zeigt, dass die als Hauptschmierfett eingesetzte Sorte „Mobil Greasrex 47“ und die Sorte „Mobilux EP 2“ fast identische Spezifikationen aufweisen. Eine Reduktion der, ohnehin nur in geringer Verwendung befindlichen Sorte „Mobilux EP 2“, scheint hier daher sinnvoll. Wie bereits in Abschnitt 4.2.4.3 erläutert, ist bei der Mischbarkeit von Schmierfetten die Art des Verdickers von entscheidender Bedeutung.

Um Klarheit in dieser Frage zu erlangen wurde der Kontakt zum Schmierstoffhersteller hergestellt. Von Seiten des Herstellers wurde hier auf die Mischbarkeitsregeln aus Tabelle 10 verwiesen. Daraus geht hervor, dass Schmierfette mit Ca-Komplex Verdickern (Mobil Greasrex 47) und Fette mit Verdickern auf Li-Seifen Basis (Mobilux EP 2) nur mit

Einschränkungen mischbar sind. Auf Empfehlung des Herstellers ist eine solche Vermischung zu vermeiden.

Eine Einsparung der Sorte „Mobilux EP 2“ ist damit nur schrittweise möglich. Dazu muss die Substitution im Zuge von Wartungs- oder Reparaturarbeiten erfolgen. Hierfür ist es notwendig das Lagergehäuse vollständig vom „Altfett“ zu befreien und zu säubern. Anschließend kann die Neufüllung mit dem Hauptschmierfett erfolgen. Diese Vorgehensweise erfordert eine genaue Buchführung an welchen Aggregaten bereits eine Substitution durchgeführt wurde und damit in Zukunft mit der Sorte „Mobil Greasrex 47“ die Nachschmiertätigkeiten durchzuführen sind, sowie an welchen noch die Sorte „Mobilux EP 2“ zum Einsatz kommt.

Das Einsparungspotential einer solchen Sortenreduktion ist zwar monetär, aufgrund der geringen Fettmengen in den hier betrachteten Bereichen, kaum zu bewerten, aber auch nicht zu vernachlässigen. Die Erleichterung liegt hier in der Vereinfachung der routinemäßigen Nachschmiertätigkeiten des dafür beauftragten Mitarbeiters, aber auch in Vereinfachungen in den Bereichen Betriebsmedienbeschaffung und Lagerhaltung. Desweiteren wird durch solche Optimierungsmaßnahmen die Wahrscheinlichkeit einer Fehlschmierung reduziert.

Im Bereich der Schmier- und Hydrauliköle kommen überhaupt 10 unterschiedliche Sorten zum Einsatz die in Tabelle 14 gegenübergestellt werden. Hier lässt der bloße Vergleich der Eigenschaften einzelner Ölsorten keine vernünftige Aussage über das Einsparungspotential einzelner Sorten zu Gunsten anderer zu. Ein solches Vorhaben wird hier nur durch die Analyse der Einsatzbereiche der jeweiligen Ölsorten evtl. möglich sein. Wobei anzumerken ist, dass 10 unterschiedliche Sorten an Schmier- und Hydraulikölen für einen Industriestandort dieser Größe, eine durchaus adäquate und bewältigbare Anzahl darstellen.

Das Ziel bei allen Einsparungen im Bereich der Betriebsmedien muss immer eine Optimierung im Sinne von, soviel wie nötig und so wenig als möglich, sein.



Tabelle 13: Gegenüberstellung der im Werk Spittelau eingesetzten konsistenten Schmierstoffe (Schmierfette) [100, 101, 102]

Schmierstoffsorte	Mobil Greasrex 47	Mobilux EP 2	Mobilux EP 3	Mobilux EP 004	Mobiltemp SHC 100
Grundöl	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl	Synthetisches PAO
Verdicker	Ca-Komplex	Li-Seifen Basis	Li-Seifen Basis	Li-Seifen Basis	organo-clay, non soap
Walkpenetration	280 – 310 (25°C) (ASTM D 217 [98])	280 (25°C) (ASTM D 217 [98])	235 (25°C) (ASTM D 217 [98])	415 (25°C) (ASTM D 217 [98])	280 (25°C) (ASTM D 217 [98])
NLGI-Klasse (DIN 51818 [49])	1,5	2	3	00	2
Grundölviskosität bei 40°C	150mm ² /s (ASTM D 445 [89])	160mm ² /s (ASTM D 445 [89])	160mm ² /s (ASTM D 445 [89])	160mm ² /s (ASTM D 445 [89])	100mm ² /s (ASTM D 445 [89])
Tropfpunkt	>300°C (ASTM D 2265 [99])	190°C (ASTM D 2265 [99])	190°C (ASTM D 2265 [99])		>260°C
Kennzeichnung (DIN 51502 [54])	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

n.v. nicht vorhanden

Tabelle 14: Gegenüberstellung der im Werk Spittelau eingesetzten Schmier- und Hydrauliköle [95, 96, 97, 103, 104, 105, 106]

Schmierstoffsorte	Mobilfluid 125	Mobilgear 632	Mobilgear 636	Mobil Glygoyl 30	Mobil Delvac 1330	Mobil DTE Medium	Mobil DTE Heavy Medium	Mobil DTE 13m	Mobil DTE 24
Grundöl	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl	Polyglykol	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl
ISO Viskositätsklasse	32	320	680	220	30 (SAE-Klasse)	46	68	32	32
Viskosität (40°C) (ASTM D 445 [89])	30mm ² /s	320mm ² /s	680mm ² /s	224mm ² /s	106mm ² /s	44,5mm ² /s	68mm ² /s	31,5mm ² /s	31,5mm ² /s
Viskositätsindex (ASTM D 2270 [90])	104	97	90		99	98	95	141	98
Flammpunkt (ASTM D 92 [91])	+225°C	+265°C	+285°C	+221°C	+256°C	+221°C	+223°C	+210°C	+220°C
Pourpoint (ASTM D 97 [92])	-30°C	-18°C	-9°C	-41°C	-21°C	-15°C	-15°C	-45°C	-27°C
Kennzeichnung [57, 58, 93, 94]	n.v.	Schmieröl DIN 51517 – CLP 320	Schmieröl DIN 51517 – CLP 680	n.v.	n.v.	Schmieröl DIN 51517 – CL 46	Schmieröl DIN 51517 – CL 68	n.v.	Hydrauliköl DIN 51524 – HLP 32

n.v. nicht vorhanden



4.4.1.4 Berechnung der Nachschmierintervalle und –mengen

Um der, wie in Abschnitt 4.4.1.1 erwähnten, eher willkürlichen als systematischen Vorgehensweise bei der Festlegung des Schmierintervalls sowie der dazugehörigen Nachschmiermenge entgegenzuwirken, wurde der Versuch unternommen, anhand der in Abschnitt 4.2 angeführten Methoden, diese für ausgewählte Aggregate theoretisch zu berechnen. Die Auswahl der Aggregate, an welchen solch eine Berechnung durchgeführt wurde, erfolgte zum einen aufgrund ihrer Risikoklasse und zum anderen aufgrund der Schmierungsart und der dazu verfügbaren Spezifikationen. Unter Spezifikationen ist in diesem Zusammenhang vor allem das Vorhandensein von Informationen im Bezug auf die Lagerung von Aggregaten zu verstehen. Nur durch die Kenntnis der Art des eingesetzten Lagers, sowie der Betriebsdrehzahl des Aggregates ist eine Berechnung nach den in der Theorie vorgeschlagenen Methoden überhaupt möglich. Vor allem für die Aggregate der Risikoklassen I und II wurden so entsprechende Nachschmierintervalle und –mengen berechnet. Diese sind der Tabelle 15 und der Tabelle 16 zu entnehmen. Im Folgenden wird für ein ausgewähltes Aggregat beispielhaft der durchgeführte Berechnungsvorgang erläutert. Vor allem der Umstand, dass das Nachschmierintervall über die graphische Abschätzung eines Diagrammes erfolgt, erschwert eine automatisierte Form der Berechnung mit Hilfe einer Tabellenkalkulationssoftware, da für jedes Lager der entsprechende Wert per Hand bestimmt werden muss.

Beispielberechnung:

Aggregat: Prozesswasserpumpe 3

Risikoklasse: III

Nennndrehzahl: 985min⁻¹

- Spezifikationen Motor:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Lager Lüfterseitig: 6319 C3 → „Rillenkugellager“ d=95mm, D=200mm, b=45mm

Lager Kupplungsseitig: 6319 C3 → „Rillenkugellager“ d=95mm, D=200mm, b=45mm

- Spezifikationen Laufrad:

Schmierstoff: Mobiltemp SHC 100

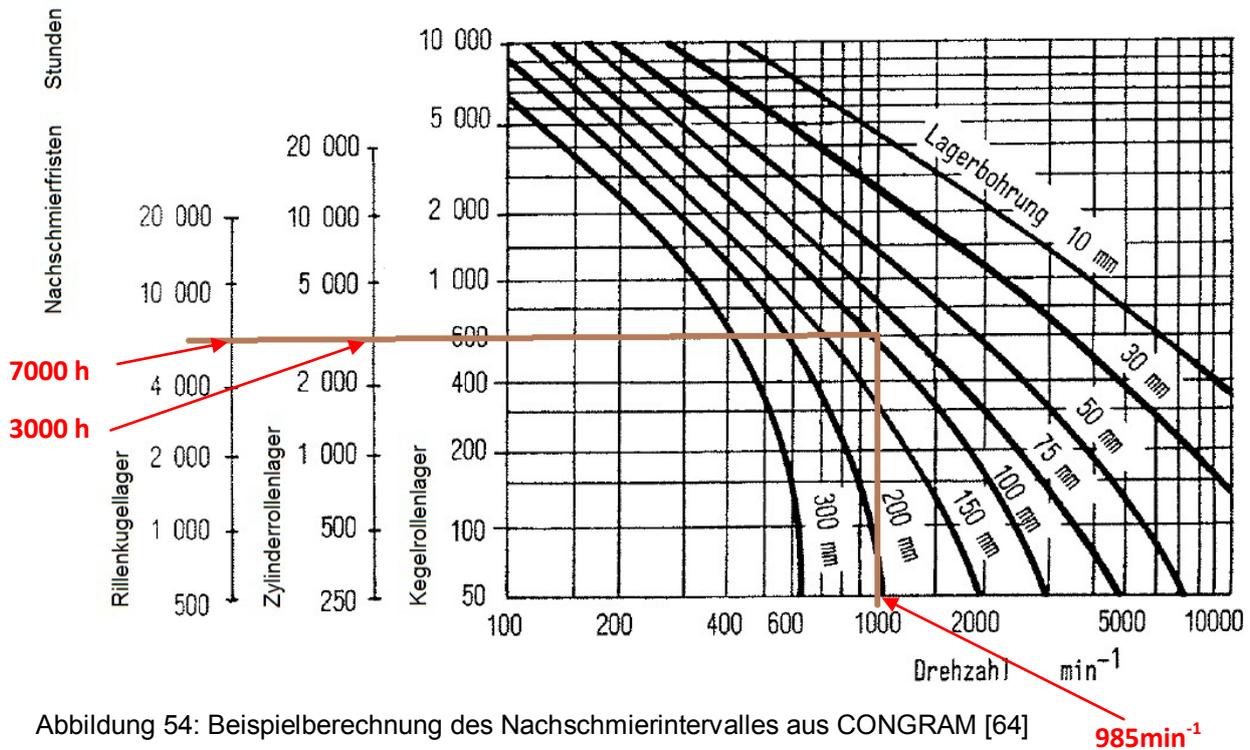
Lager Kupplungsseitig: 3319 C3 → „Schrägkugellager“ d=95mm, D=200mm, b=78mm

Lager Pumpenseitig: 21319 → „Pendelrollenlager“ d=95mm, D=200mm, b=45mm



- Nachschmierintervall I_i :

Dazu wird das Diagramm aus Abbildung 47 verwendet und mit Hilfe der Nenndrehzahl sowie des Lagerbohrungsdurchmessers d , das Schmierintervall bestimmt (siehe dazu Abbildung 54).



Motorlager lüfterseitig: $I_1=7000\text{h} \rightarrow 1\text{x im Jahr}$
 kupplungsseitig: $I_2=7000\text{h} \rightarrow 1\text{x im Jahr}$

Laufrollenlager kupplungsseitig: $I_3=7000\text{h} \rightarrow 1\text{x im Jahr}$
 pumpenseitig: $I_4=3000\text{h} \rightarrow 3\text{x im Jahr}$

- vermindertes Nachschmierintervall I_i :

Bei bestimmten Aggregaten ist das berechnete Schmierintervall noch mit einem Minderungsfaktor f nach Tabelle 9 zu korrigieren. Im Falle der Prozesswasserpumpen ist dies jedoch nicht notwendig. Gewählte Minderungsfaktoren für andere Aggregate betragen entweder $f=0,8$, für Aggregate die in besonders staubiger Lage im Einsatz sind, sowie $f=4,0$ für Aggregate die sich nur diskontinuierlich im Einsatz befinden.

- Nachschmiermenge m :

Da zur Berechnung der Nachschmiermengen in der Literatur (siehe Abschnitt 4.2.4.3) nur die Varianten wöchentliche, monatliche oder jährliche Nachschmiermenge (siehe Formel 31 bis 33) unterschieden werden, ist auch hier aufgrund des berechneten Nachschmierintervalles

die Menge für jedes Aggregat individuell festzulegen. Nachfolgend werden die Mengen für monatliche und jährliche Nachschmierung berechnet.

Motorlager	lüfterseitig:	$m_m = 0,003 * D * b = 0,003 * 200 * 45 = 27g$	(monatlich)
		$m_j = 0,004 * D * b = 0,004 * 200 * 45 = 36g$	(jährlich)
	kupplungsseitig:	$m_m = 0,003 * D * b = 0,003 * 200 * 45 = 27g$	(monatlich)
		$m_j = 0,004 * D * b = 0,004 * 200 * 45 = 36g$	(jährlich)
Laufradlager	kupplungsseitig:	$m_m = 0,003 * D * b = 0,003 * 200 * 78 = 47g$	(monatlich)
		$m_j = 0,004 * D * b = 0,004 * 200 * 78 = 62g$	(jährlich)
	pumpenseitig:	$m_m = 0,003 * D * b = 0,003 * 200 * 45 = 27g$	(monatlich)
		$m_j = 0,004 * D * b = 0,004 * 200 * 45 = 36g$	(jährlich)

Im Anschluss wurden die berechneten Nachschmierintervalle und die dazugehörigen Nachschmiermengen in die Schmierblätter eingefügt, sodass diese nun sämtliche zur Schmierung notwendigen Details einer Schmierstelle enthalten (siehe Anhang A). In weiterer Folge wurde mit den so ermittelten Daten ein Schmierplan für ein Kalenderjahr erstellt, aus welchem die wöchentlichen Nachschmiertätigkeiten abgelesen werden können. Dieser Schmierplan für das Werk Spittelau ist dem Anhang B beigefügt.

Eine Besonderheit stellt die Lagergröße der Laufradlager der Müllkessel Saugzuggebläse dar. Aufgrund der großen Lagerbohrung eignet sich das Diagramm aus Abbildung 47 hier nicht mehr und das Schmierintervall musste stattdessen mit den Werten aus Tabelle 7 abgeschätzt werden. Diese sind zwar streng genommen nur für Schmierfette ohne EP-Zusätze gültig, das eingesetzte Schmierfett „Renolit Duraplex EP 2“ enthält jedoch sehr wohl EP-Wirkstoffe. Zur Orientierung stellen die so ermittelten Werte jedoch eine gute Näherung dar. Aufgrund des eingesetzten Schmierstoffes kann hier in der Praxis das Schmierintervall sicherlich etwas verlängert werden.

Für das Werk Flötzersteig wurde der bestehende Schmierplan ebenfalls in eine kalendarische Form eingearbeitet, damit die wöchentlich durchzuführenden Schmierungsarbeiten in übersichtlicher Form dargestellt sind (siehe Anhang C).



Tabelle 15: Berechnung der Nachschmierintervalle und –mengen Motorlager für das Werk Spittelau

Aggregat	Drehzahl	Motor																		
		Schmierstoff	Lager								Intervall						Menge [g]			
			LS				KS				LS			KS			monatl.		jährl.	
			Bez.	d	D	b	Bez.	d	D	b	in Std	±f	im Jahr	in Std	±f	im Jahr	LS	KS	LS	KS
Erz. Pumpe HWK	1650	Mobil Greasrex 47	6322A	110	240	50	NU322	110	240	50	2500	10000 ¹	1x	1300	5200 ¹	2x	36	36	48	48
Verbrennungsluftgeb HWK	1489	Mobil Greasrex 47	6326M1	130	280	58	NU326M	130	280	58	2000	8000 ¹	1x	1000	4000 ¹	2x	49	49	65	65
Rez. Gebläse HWK	1500	Mobil Greasrex 47															0	0	0	0
AKH Pumpe	1489	Mobil Greasrex 47	6319	95	200	45	6319	95	200	45	3000	3000	3x	3000	3000	3x	27	27	36	36
Netzpumpe 1,2,3	1489	Mobil Greasrex 47	6326M1	130	280	58	NU326M	130	280	58	2000	2000	6x	1000	1000	12x	49	49	65	65
Strang 2 Druckerhöhungsp.	3000	Mobil Greasrex 47	6315 2Z	75	115	20	6315 C3	75	160	37	1500	1500	6x	1500	1500	6x	7	18	9	24
Rohwasserpumpe 1	1489	Mobil Greasrex 47	6316 C3	80	170	39	NU314 C3	70	150	35	4000	4000	2x	3000	3000	3x	20	16	27	21
Rohwasserpumpe 4	1489	Mobil Greasrex 47	6315 C3	75	160	37	6313 C3	65	140	33	5000	5000	2x	6000	6000	2x	18	14	24	18
Erz. Pumpe MK	1489	Mobil Greasrex 47	6317 C3	85	180	41	6317M C3	85	180	41	4000	4000	2x	4000	4000	2x	22	22	30	30
Kesselspeisewasserp. 1,2,3,4	2980	Mobil Greasrex 47															0	0	0	0
Primärluftgebläse MK 1,2	1489	Mobil Greasrex 47	6317	85	180	41	6317	85	180	41	4000	3200 ²	3x	4000	3200 ²	3x	22	22	30	30
Sekundärluftgebläse MK 1,2	1489	Mobil Greasrex 47	6317	85	180	41	6317	85	180	41	4000	3200 ²	3x	4000	3200 ²	3x	22	22	30	30
RGWT Pumpen MK 1,2	1489	Mobil Greasrex 47	6215 C3	75	130	25	6215 C3	75	130	25	5000	5000	2x	5000	5000	2x	10	10	13	13
Denox Verbrennungsl. MK 1,2	3000	Mobil Greasrex 47	6314 2Z	70	150	35	6314 2Z	70	150	35	1400	1400	6x	1400	1400	6x	16	16	21	21
Denox Sprühverdampf. MK 1,2	3000	Dauer															0	0	0	0
Saugzuggebläse MK 1,2	1489	Mobil Greasrex 47	6326M1	130	280	58	NU326M C3	130	280	58	2000	2000	6x	1000	1000	12x	49	49	65	65
Prozesswasserpumpe 1 L1	1460	Mobil Greasrex 47	6313 C3	65	140	33	6313 C3	65	140	33	7000	7000	1x	7000	7000	1x	14	14	18	18
Prozesswasserpumpe 2 L1	1420	Mobil Greasrex 47	6314 2Z	70	150	35	6314 2Z	70	150	35	7000	7000	1x	7000	7000	1x	16	16	21	21
Prozesswasserpumpe 3 L1	985	Mobil Greasrex 47	6319 C3	95	200	45	6319 C3	95	200	45	7000	7000	1x	7000	7000	1x	27	27	36	36
Prozesswasserpumpe 4 L1	985	Mobil Greasrex 47	6319 C3	95	200	45	NU319	95	200	45	7000	7000	1x	3000	3000	3x	27	27	36	36
Prozesswasserpumpe 5 L1	1480	Mobil Greasrex 47	6314 2Z	70	150	35	6314 2Z	70	150	35	7000	7000	1x	7000	7000	1x	16	16	21	21
Prozesswasserpumpe 1 L2	1480	Mobil Greasrex 47	6314	70	150	35	6314	70	150	35	7000	7000	1x	7000	7000	1x	16	16	21	21
Prozesswasserpumpe 2 L2	1480	Mobil Greasrex 47	6314	70	150	35	6314	70	150	35	7000	7000	1x	7000	7000	1x	16	16	21	21
Prozesswasserpumpe 3 L2	985	Mobil Greasrex 47	6319 C3	95	200	45	6319 C3	95	200	45	7000	7000	1x	7000	7000	1x	27	27	36	36
Prozesswasserpumpe 4 L2	985	Mobil Greasrex 47	6319 C3	95	200	45	6319 C3	95	200	45	7000	7000	1x	7000	7000	1x	27	27	36	36
Prozesswasserpumpe 5 L2	1480	Mobil Greasrex 47	6314 2Z	70	150	35	6314 2Z	70	150	35	7000	7000	1x	7000	7000	1x	16	16	21	21

±f...Nachschmierintervall multipliziert mit Fehlerfaktor f [h]:

¹ multipliziert mit Faktor 4,0, aufgrund diskontinuierlicher Betriebsweise

² multipliziert mit Faktor 0,8 aufgrund staubiger Umgebungsbedingungen

d...Lagerbohrungsdurchmesser [mm]

D...Lageraußendurchmesser [mm]

b...Lagerbreite [mm]

KS...Kupplungs-Seite

LS...Lüfter-Seite

PS...Pumpen-Seite



Tabelle 16: Berechnung der Nachschmierintervalle und –mengen Lager Pumpe/Laufrad für das Werk Spittelau

Aggregat	Drehzahl	Pumpe/Laufrad																		
		Schmierstoff	Lager									Intervall						Menge [g]		
			PS				KS					PS			KS			monatl.		jährl.
			Bez.	d	D	b	Bez.	d	D	b	in Std	±f	im Jahr	in Std	±f	im Jahr	PS	KS	PS	KS
Erz. Pumpe HWK	1650	Mobilfluid 125	NU320	100	215	47	2x 7320	100	215	94										
Verbrennungsluftgeb HWK	1489	Mobil Greasrex 47	23224	120	215	76	1224M	120	215	42	2000	8000 ¹	1x	2000	80000 ¹	1x	49	27	65	36
Rez. Gebläse HWK	1500	Mobil DTE Heavy Med	2316M	80	170	58	2316M	80	170	58										
AKH Pumpe	1489	Mobilfluid 125	NU413	65	160	37	2x 7315 BECBM	75	160	37										
Netzpumpe 1,2,3	1489	Mobil Greasrex 47	NU315	75	160	37	6320	100	215	47	2700	2700	4x	3300	3300	3x	18	30	24	40
Strang 2 Druckerhöhungsp.	3000	Mobilflux EP2	NU311	55	120	29	2x 7311 BG	55	120	29	1500	1500	6x	3000	3000	3x	10	10	14	14
Rohwasserpumpe 1	1489	Mobil Greasrex 47	6313 C3	65	140	33	NU312TVP2	60	130	31	7000	7000	1x	4000	4000	2x	14	12	18	16
							6412N	60	150	35				8000	8000	1x		16		21
Rohwasserpumpe 4	1489	Mobil Greasrex 47															0	0	0	0
Erz. Pumpe MK	1489	Mobil Delvac 1330	NU311 EC	55	120	29	2x 7311 BECB	55	120	29										
Kesselspeisewasserp. 1,2,3,4	2980	Mobil Greasrex 47	N308	40	90	23	N308	40	90	23	3000		3x	3000		3x	6	6	8	8
Primärluftgebläse MK 1,2	1489	Mobil DTE Heavy Med	NU319	95	200	45	6319MA C4	95	200	45										
							7319	95	200	45										
Sekundärluftgebläse MK 1,2	1489	Mobil Greasrex 47	22220EK + H380	90	180	46	22220EK + H380	90	180	46	1600	1280 ²	6x	1600	1280 ²	6x	25	25	33	33
RGWT Pumpen MK 1,2	1489	Mobil DTE Heavy Med	NU307 EW	35	80	21	2x 7307 BWG	35	80	21										
Denox Verbrennungsl. MK 1,2	3000	Mobilflux EP3	2318KM + H2318	80	190	64	2318KM + H2318	80	190	64	1200	1200	12x	1200	1200	12x	36	36	49	49
Denox Sprühverdampf. MK 1,2	3000	Mobiltemp SHC 100	22216EK + H316	70	140	33	22216EK + H316	70	140	33	1400	1400	6x	1400	1400	6x	14	14	18	18
Saugzuggebläse MK 1,2	1489	Renoit Duraplex 2	2224	200	360	98	1224M C3	120	215	42			12x ^A			12x ^A	106	27	141	36
Prozesswasserpumpe 1 L1	1460	Mobiltemp SHC 100	3312 C3	60	130	54	3312 C3	60	130	54	8000	8000	1x	8000	8000	1x	21	21	28	28
Prozesswasserpumpe 2 L1	1420	Mobiltemp SHC 100	3312 C3	60	130	54	3312 C3	60	130	54	8000	8000	1x	8000	8000	1x	21	21	28	28
Prozesswasserpumpe 3 L1	985	Mobiltemp SHC 100	21319	95	200	45	3319 C3	95	200	78	3000	3000	3x	7000	7000	1x	27	47	36	62
Prozesswasserpumpe 4 L1	985	Mobiltemp SHC 100	21319	95	200	45	3319 C3	95	200	78	3000	3000	3x	7000	7000	1x	27	47	36	62
Prozesswasserpumpe 5 L1	1480	Mobiltemp SHC 100	3312 C3	60	130	54	3312 C3	60	130	54	8000	8000	1x	8000	8000	1x	21	21	28	28
Prozesswasserpumpe 1 L2	1480	Mobiltemp SHC 100	3312 C3	60	130	54	3312 C3	60	130	54	8000	8000	1x	8000	8000	1x	21	21	28	28
Prozesswasserpumpe 2 L2	1480	Mobiltemp SHC 100	3312 C3	60	130	54	3312 C3	60	130	54	8000	8000	1x	8000	8000	1x	21	21	28	28
Prozesswasserpumpe 3 L2	985	Mobiltemp SHC 100	21319	95	200	45	3319 C3	95	200	78	3000	3000	3x	7000	7000	1x	27	47	36	62
Prozesswasserpumpe 4 L2	985	Mobiltemp SHC 100	21319	95	200	45	3319 C3	95	200	78	3000	3000	3x	7000	7000	1x	27	47	36	62
Prozesswasserpumpe 5 L2	1480	Mobiltemp SHC 100	3312 C3	60	130	54	3312 C3	60	130	54	8000	8000	1x	8000	8000	1x	21	21	28	28

±f...Nachschmierintervall multipliziert mit Fehlerfaktor f [h]:

¹ multipliziert mit Faktor 4,0, aufgrund diskontinuierlicher Betriebsweise

² multipliziert mit Faktor 0,8 aufgrund staubiger Umgebungsbedingungen

d...Lagerbohrungsdurchmesser [mm]

D...Lageraußendurchmesser [mm]

b...Lagerbreite [mm]

KS...Kupplungs-Seite

LS...Lüfter-Seite

PS...Pumpen-Seite

^A Aufgrund der großen Lagerbohrung ist hier das Diagramm aus Abbildung 47 ungeeignet um das Nachschmierintervall festzustellen. Hier bietet sich die Auswahl aufgrund der Tabellen 7 und 8 an. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass diese streng genommen nur für Schmierfette ohne EP-Zusätze gelten.



4.4.1.5 Der Schmierungsprozess

Wie bereits unter Abschnitt 4.4.1.1 erläutert, ist unter der Tätigkeit des Nachschmierens im Idealfall weit mehr zu verstehen, als das bloße Auffüllen des Fettreservoirs von rotierenden Maschinen in regelmäßigen Abständen. Sowohl im Werk Spittelau als auch im Werk Flötzersteig sind Mitarbeiter mit langjähriger Betriebspraxis im Bereich der Schmierung tätig. Diese Schmierungsexperten können einen wesentlichen Beitrag zur Schadensfrüherkennung liefern. Aus diesem Grund wurde ein Prozessschema für die Nachschmiertätigkeit entwickelt. Dieses zeigt Abbildung 55.

Der Routineprozess des Nachschmierens fettgeschmierter Maschinenelemente, im Prozessschema durch den „schwarzen Pfad“ dargestellt, umfasst lediglich einen Schritt. Sollten im Zuge der Nachschmiertätigkeiten keine bedeutsamen Auffälligkeiten festgestellt werden, so kann die Schmierung planmäßig nach Schmierplan fortgesetzt werden.

Werden allerdings Auffälligkeiten oder Unregelmäßigkeiten während oder nach dem Nachschmieren an einem Aggregate festgestellt („roter Pfad“ im Prozessschema), so sind die Experten der Schwingungsüberwachung zur Fehlerdiagnose hinzuzuziehen. In einem ersten Schritt ist nachfolgend abzuklären, ob diese Auffälligkeiten bereits bei früheren Messungen identifiziert wurden und im Zuge der Schwingungsüberwachung bereits unter Beobachtung stehen. Stellen die entdeckten Phänomene allerdings auch für die Experten der Schwingungsüberwachung eine noch nicht bekannte Auffälligkeit dar, so sollte eine umgehende Überprüfung mit Hilfe der Schwingungsanalyse eingeleitet werden. Aus den so gewonnen Ergebnissen lässt sich dann abschätzen, ob der Zustand eines Aggregates als kritisch erachtet werden muss, oder ob man sich noch im zulässigen Rahmen bewegt und der Fortschritt der Schädigung mit Hilfe der Schwingungsanalyse weiter beobachten werden kann. Sollte der Befund jedoch bereits einen kritischen Aggregatzustand aufweisen, so ist der zuständige technische Referent davon in Kenntnis zu setzen. Er muss schließlich die notwendigen Maßnahmen einleiten und gegebenenfalls die Instandsetzung des betroffenen Aggregates veranlassen.



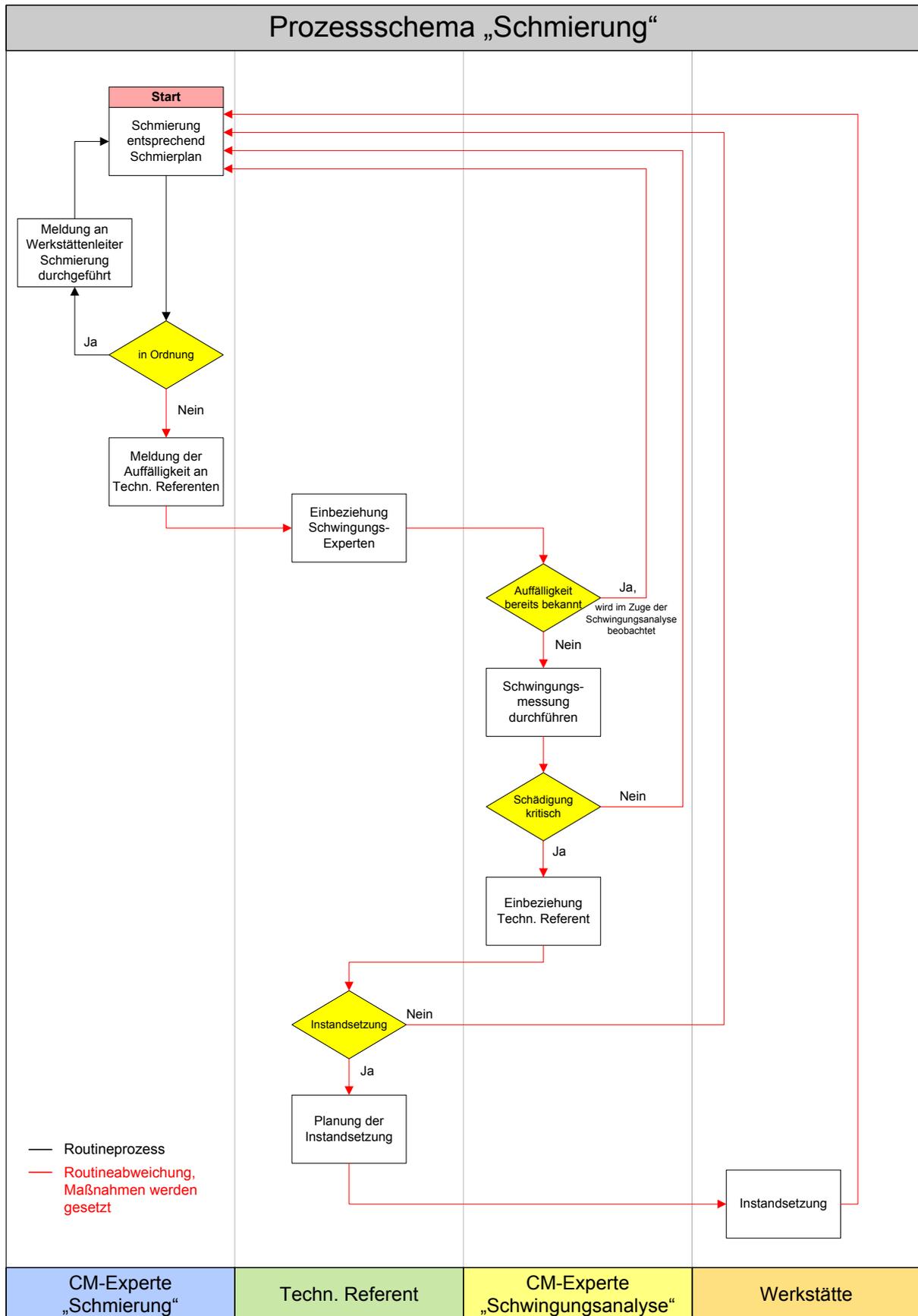


Abbildung 55: Prozessschema der Schmierung

4.4.2 Wirtschaftliche Auswirkungen

Die wirtschaftlichen Auswirkungen im Bereich der Schmierung von Maschinenelementen in den Werken Spittelau und Flötzersteig sollen in diesem Abschnitt einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

Die Nachschmiertätigkeiten im Bereich der fettgeschmierten Maschinen und Aggregate, wie sie im vorigen Abschnitt erläutert wurden, stellen sicherlich eine Kernaufgabe des Instandhaltungspersonals an beiden Müllverbrennungsstandorten dar. Daher und vor allem auch aufgrund der Tatsache, dass der Dienstleistungsmarkt kaum Anbieter hervorbringt, welche die Nachschmierung des gesamten Maschinenparks eines Industriebetriebes als Geschäftsleistung anbieten, ist diese Tätigkeit auch weiterhin durch das geschulte Eigenpersonal abzudecken. Die Kenntnis der aufzubringenden Jahresmannstunden stellt deshalb den ersten wichtigen wirtschaftlichen Indikator im Schmierungsbereich dar.

Desweiteren stellt sich die Frage, mit welchem finanziellen Aufwand Ölanalysen an ausgewählten Aggregaten, als Teil einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie, in das bestehende Repertoire an Diagnosemethoden aufgenommen werden können.

4.4.2.1 Personalaufwand Nachschmiertätigkeiten

In Tabelle 17 sind die Jahresmannstunden, die für die gesamte Nachschmierung im Werk Spittelau aufzubringen sind, angeführt und nach den einzelnen Risikoklassen unterteilt. Das Kürzel „k.A.“ steht dabei für jene Aggregate die in der bestehenden Risikobewertung nicht enthalten sind. Die Tabelle 18 gibt analog dazu den Aufwand für das Werk Flötzersteig wieder. Die prozentuelle Aufteilung der einzelnen Risikoklassen zeigt Abbildung 56 und Abbildung 57. Auffällig ist, wenn man die Ergebnisse beider Werke vergleicht, dass der Nachschmieraufwand im Werk Flötzersteig ca. doppelt so hoch ist, als im Werk Spittelau. Dies ist auf mehrere, konstruktionsbedingte Ursachen zurückzuführen. Zum Einen besteht die Müllverbrennung im Werk Spittelau aus zwei Verbrennungslinien, während im Werk Flötzersteig drei Verbrennungslinien installiert sind (siehe dazu Kapitel 3). Des Weiteren wird die Schmierung der Vorschubrostbahnen im Werk Spittelau durch eine Zentralschmieranlage bewerkstelligt, während im Werk Flötzersteig sämtliche Schmierstellen im Bereich des Rostes von Hand geschmiert werden müssen. Bereinigt man die Ergebnisse allerdings um diese Unterschiede, d.h. zieht man den Schmieraufwand für den Verbrennungsrost im Werk Flötzersteig vom Gesamtaufwand ab und normiert man anschließend die Ergebnisse beider Werke auf jeweils eine Verbrennungslinie, so betragen die Jahresmannstunden im Werk Spittelau rund 223 Stunden und im Werk Flötzersteig rund 196 Stunden. Dieser Mehraufwand pro Linie im Werk Spittelau ist auf den umfangreicheren Bestand an Aggregaten (wie bereits in Abschnitt 4.4.1.2 beschrieben) zurückzuführen.



Tabelle 17: Personalaufwand Nachschmierung, Spittelau

Zeit pro Schmierungsvorgang: 5 min				
	Schmierungen pro Jahr	Jahresmannstunden		
		[min]	[h]	[%]
RK I	36	180	3,0	0,7
RK II	2646	13230	220,5	49,5
RK III	128	640	10,7	2,4
RK IV	152	760	12,7	2,8
RK k.A.	2387	11935	198,9	44,6
gesamt	5349	26745	445,8	100
spezifisch**	2674,5	13372,5	222,9	

** spezifisch bedeutet in diesem Zusammenhang, bezogen auf eine Verbrennungslinie

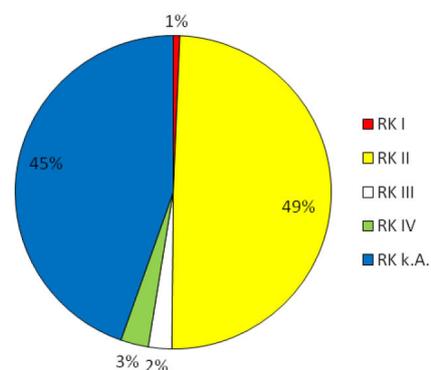


Abbildung 56: Anteil der einzelnen RK am gesamten Nachschmieraufwand, Spittelau

Tabelle 18: Personalaufwand Nachschmierung, Flötzersteig

Zeit pro Schmierungsvorgang: 5 min				
	Schmierungen pro Jahr	Jahresmannstunden		
		[min]	[h]	[%]
RK I	0	0	0,0	0,0
RK II	4029	20145	335,8	75,3
RK III	186	930	15,5	3,5
RK IV	2243	11215	186,9	41,9
RK k.A.	3898	19490	324,8	72,9
gesamt	10356	51780	863,0	100
ohne Rost*	7038	35190	586,5	
spezifisch**	2346	11730	195,5	

* im Werk Flötzersteig ist der Vorschubrost händisch zu schmieren, während im Werk Spittelau dieser von einer Zentralschmieranlage geschmiert wird

** spezifisch bedeutet in diesem Zusammenhang, bezogen auf eine Verbrennungslinie

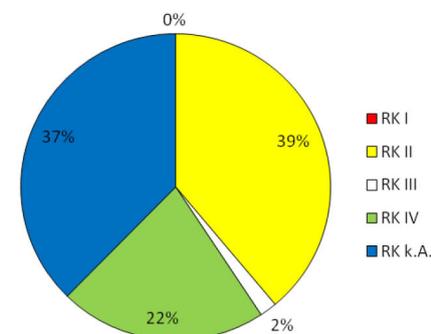


Abbildung 57: Anteil der einzelnen RK am gesamten Nachschmieraufwand, Flötzersteig

4.4.2.2 Optimierung der Schmierstoffbewirtschaftung

Die in Abschnitt 4.4.1 durchgeführten Maßnahmen, zur Optimierung der tribotechnischen Maßnahmen im Bereich der eingesetzten Schmierstoffe, wie

- Analyse der Ausgangssituation im Bereich der Tribologie
- Aufnahme der einzelnen Schmierstellen
- Aufnahme der eingesetzten Schmierstoffsorten
- Reduktion der Schmierstoffsorte auf ihre spezifischen Eigenschaften
- Schmierstoffsortenreduktion
- Definition der Nachschmierintervalle und –mengen

werden am Dienstleistungssektor durch einschlägige Firmen, meist Consulting Unternehmen, ebenfalls angeboten. Um die wirtschaftlichen Aufwendungen in diesem Bereich durch Zahlen zu unterlegen, wurde eine Angebotseinholung am Dienstleistungsmarkt durchgeführt. Die nachfolgende Aufstellung in Tabelle 19 gibt den Inhalt und die dafür aufzubringenden Kosten wider.

Tabelle 19: Kosten zur Optimierung tribotechnischer Maßnahmen am Dienstleistungsmarkt

Pos.	Leistungen	Kosten ¹			
		Spittelau		Flötzersteig	
		[Tage]	[EUR]	[Tage]	[EUR]
1	Schmierstelleninventarisierung	ca. 6 ²	6450	ca. 5 ²	5450
2	Plausibilitätsüberprüfung der richtigen Schmierstoffwahl				
3	Schmierstoffsortenreduzierung auf Basis der Pos. 1 und 2				
4	Nachschmierintervall und -mengen auf Basis der Pos. 1, 2 und 3				
5	Schmierstellenspezifikationen, unabhängig vom Markennamen		2590		740
Gesamtkosten			9040		6190

¹ Angebotseinholung eines entsprechenden Dienstleisters im Bereich Schmierungstechnik; alle Preise exkl. MwSt. und exkl. Reise- und Hotelkosten

² Arbeitstag zu 9 Stunden

Obwohl nicht alle Leistungen des in Tabelle 19 abgebildeten Angebotes in den Ausführungen dieser Arbeit enthalten sind, konnte doch ein Großteil dieser Maßnahmen bereits eingeführt werden und es ist damit gelungen, einen entscheidenden Beitrag zur kosteneffizienten Weiterentwicklung im Bereich der Schmierungstechnik beizutragen. Durch die konsequente Arbeit im betrieblichen Alltag und der Bereitschaft sich kontinuierlich weiterzuentwickeln, ist eine nachhaltige Optimierung der Schmierungstechnik auch in Zukunft möglich.

4.4.2.3 Zustandsbeurteilung durch Ölanalyse

Bei der wirtschaftlichen Betrachtungsweise ob eine Ölanalyse an einem bestimmten Aggregat angewandt werden soll, wird meist als einziges Kriterium das Ölvolumen des jeweiligen Aggregates herangezogen. Wenn dieses bei einigen Litern liegt, so entscheidet man sich meist dazu (als eine Art Präventivstrategie) den gesamten Ölinhalt nach einem festgelegten Intervall zu erneuern. Erst bei Aggregaten mit bedeutend größeren Öfüllungen, wird im Allgemeinen eine Ölanalyse auch aus wirtschaftlicher Betrachtung als sinnvoll erachtet. Dabei kann auch bei Aggregaten mit geringen Öfüllungen der Einsatz einer Ölanalyse zu neuen und wichtigen Erkenntnissen führen. So ist es unter Umständen möglich, dass ein starres Ölwechselintervall an einem bestimmten Aggregat, die vermutete präventive Wirkung gar nicht besitzt, da das angewandte Intervall zu lange gewählt wurde. Auch wenn es dadurch noch nicht unmittelbar zu feststellbaren Schäden am Aggregat kommt, so wäre es doch möglich, dass eine Verkürzung des Ölwechselintervalls, die Bildung von Alterungsprodukten innerhalb des eingesetzten Öls deutlich reduziert und damit die Lebenserwartung eines Aggregates verlängert. Somit kann eine Ölanalyse einen entscheidenden Beitrag zur Optimierung des derzeit angewandten Ölwechselintervalls liefern und wichtige Erkenntnisse über Ist-Zustand und Soll-Zustand der Schmierung eines Aggregates aufdecken.

Um eine Auswahl an Aggregaten zu treffen, an welchen eine Zustandsbeurteilung des Öls mit Hilfe einer Ölanalyse möglich ist, wurde die vorhandene firmeninterne Risikobewertung herangezogen. In Tabelle 20 und Tabelle 21 findet sich eine Auswahl an Aggregaten, welche sich für eine Ölanalyse eignen würden. Dabei handelt es sich vorwiegend um Aggregate aus den Risikoklassen I und II. Aus Risikoklasse III wurde lediglich die Rosthydraulik beider Werke mit aufgenommen, da hier aufgrund der großen Ölvolumina eine Ölanalyse ebenfalls wirtschaftliche Vorteile ergeben kann, wenn dadurch beispielsweise die Ölgebrauchsdauer des Hydrauliköls verlängert werden könnte.

Tabelle 20: Auswahl geeigneter Aggregate für die Zustandsbeurteilung mit Hilfe der Ölanalyse, Spittelau

Aggregat	RK	Schmierstellen	Schmiermittel
Müllkran 1 + 2	II	Greiferhydraulik	Mobil DTE 24
		Hubwerkgetriebe	Mobilgear 632
		Katzfahrwerkgetriebe	Mobilgear 632
		Kranfahrwerkgetriebe	Mobilgear 632
Primärluftgebläse MK1 + MK2	II	Ölbad Lauftrad	Mobil DTE Heavy Medium
Rosthydraulikpumpe 1 + 2 + 3	III	Hydrauliköl	Mobil DTE Heavy Medium
Rohrkettenförderer	II	Kettengetriebe	Mobilgear 632
		Zellenrad	Mobilgear 632

Tabelle 21: Auswahl geeigneter Aggregate für die Zustandsbeurteilung mit Hilfe der Ölanalyse, Flötzersteig

Aggregat	RK	Schmierstellen	Schmiermittel
Müllkran 1+2	II	Greiferhydraulik	Mobil DTE Heavy Medium
		Hubwerkgetriebe	Mobil 629
		Katzfahrwerkgetriebe	Mobil 629
		Kranfahrwerkgetriebe	Mobil 629
Rosthydraulik MK1 + MK2 + MK3	III	Hydrauliköl	Mobil DTE Heavy Medium
Entschlacker MK1 + MK2 + MK3	II	Getriebemotor	Mobil DTE Heavy Medium

Um den Kostenaufwand einer Ölanalyse an diesen 49 Öl Einsatzstellen abzuschätzen, wurde am Dienstleistungsmarkt ein Angebot eines Anbieters für Öl Zustandsbeurteilungen eingeholt. Die Eckdaten dieses Angebotes sind der Aufstellung der Tabelle 22 zu entnehmen und sollen einen groben Überblick über die zu erwartenden Kosten einer solchen Zustandsbeurteilung geben. Beim Vergleich unterschiedlicher Angebote zur Ölanalyse am Markt, muss immer sehr stark auf den angebotenen Leistungsumfang solch einer Analyse geachtet werden. Hier gilt es, jene Parameter zu analysieren, die für den jeweiligen Einsatzort des Öls, klare Aussagen über den Zustand eines Aggregates liefern können. Im vorliegenden Angebot sind dies die Parameter: Wassergehalt, Ölalterung, Viskosität, Eisen- und Nichteisenmetalle, Partikelanzahl sowie eine Ölfilterprobe.

Tabelle 22: Kosten einer Ölanalyse an ausgewählten Aggregaten

Pos.	Ablauf	Einzelkosten ¹	Gesamtkosten ^{1,2}
		[EUR]	[EUR]
1	Ölanalyse ^{3,4}	75	3185
2	Probefläschchen 120 ml ⁵	1,2	49,2
3	Handpumpe	78	78
gesamt		154,2	3312,2

¹ Angebotseinholung eines entsprechenden Dienstleisters für Öl Zustandsbeurteilung; alle Kosten exkl. MwSt.

² unter Gesamtkosten versteht sich die einmalige Analyse aller angeführten Aggregate aus Tabelle 20 und Tabelle 21, d.h. insgesamt 49 Einzelanalysen

³ unter Ölanalyse versteht man hier die Überprüfung auf: Wassergehalt, Ölalterung, Viskosität, Eisen- und Nichteisenmetalle, Partikelanzahl sowie eine Ölfilterprobe

⁴ ab einer Analysemenge > 20 Stück sinken die Kosten der Ölanalyse auf 65 EUR je Stück

⁵ eine Packung von 48 Stück Probefläschchen kostet 48 EUR

5. Diagnoseverfahren mit thermischem Messprinzip

Die Temperatur als Absolutgröße, aber vor allem ihre Änderung stellt in vielen Anwendungsfällen einen geeigneten Diagnoseparameter für die zustandsorientierte Instandhaltung dar. In der Temperaturmessung unterscheidet man grob zwischen der berührenden und der berührungslosen Temperaturmessung. Unter berührender Temperaturmessung versteht man in den meisten Fällen die Temperaturmessung mittels Thermometer. Dabei kommt man jedoch ständig in den Konflikt, dass mit Hilfe eines mobilen Thermometers hauptsächlich Anlagen erfasst werden können die sich außer Betrieb befinden. Eine Messung während des Betriebes ist sicherheitstechnisch in den meisten Fällen nicht zu verantworten. Fix installierte berührende Thermometer hingegen haben den Nachteil, dass sie nur an einer definierten Stelle in einer Anlage zum Einsatz kommen können. Wurde eine solche Messstelle nicht bereits bei der Konstruktion des entsprechenden Anlagenteiles vorgesehen, so ist eine nachträgliche Installation einer berührenden Temperaturmessung in den meisten Fällen nur mit erhöhtem Aufwand zu realisieren. Einen weiteren Nachteil einer stationär eingebauten berührenden Temperaturmessung stellen die Betriebs- und Umgebungsbedingungen dar. Diese können mit der Zeit das Messergebnis stark verfälschen bzw. zum Ausfall der Temperaturmessung führen, wenn diese nicht kontinuierlich gewartet wird.

All diese Überlegungen haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass sich berührungslose Temperaturmesssysteme in der Industrie immer mehr verbreitet haben. Wobei hier vor allem zwei Arten der Temperaturmessung von entscheidender Bedeutung sind. Zum einen die Pyrometrie, deren Aufgabe vor allem in der qualitativen Temperaturmessung, d.h. in der Bestimmung von Absoluttemperaturen, zu sehen ist und zum anderen die (Infrarot-) Thermografie, die sowohl zur qualitativen als auch zur quantitativen (Temperaturverteilung wird in einem Thermogramm dargestellt) Temperaturmessung eingesetzt wird. Sie haben beide den Vorteil, dass meist mit einigen wenigen mobilen Geräten eine Vielzahl von unterschiedlichen Aggregaten und Anlagenteilen überwacht werden können. Auch die Bestimmung der Temperatur während des Betriebes einer Anlage ist mit berührungslosen Messsystemen in den meisten Fällen problemlos und vor allem ohne sicherheitstechnische Bedenken möglich. Auch die Exposition des Messgerätes an Orten mit, wenig geeigneten Umgebungsbedingungen für die fehlerfreie Temperaturmessung, kann so auf ein Minimum reduziert werden. Vor allem die Thermografie weist im Bereich der industriellen Instandhaltung ein großes Potential auf, da die Möglichkeit der Darstellung von Temperaturverteilungen an Maschinen und Aggregaten einen wesentlichen Beitrag zur Auffindung von „Störstellen“ liefern kann. Dieser Umstand führt dazu, dass in diesem Kapitel vermehrt die Thermografie als Mittel zur zustandsorientierten Instandhaltung behandelt wird.



Zu Beginn des Kapitels werden somit vor allem die physikalisch-technischen Grundlagen der Infrarotmesstechnik beschrieben. Darauf aufbauend folgen dann die Abhandlungen zur Thermografie in der Instandhaltung, sowie deren konkrete Umsetzung in den Müllverbrennungsanlagen der Fernwärme Wien GmbH.

5.1 Physikalische Grundlagen

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ($-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{K}$) emittiert diese Wärme in Form von elektromagnetischen Wellen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Wärmestrahlung. Allgemein werden elektromagnetische Wellen nach ihrer Wellenlänge und Frequenz in verschiedene Bereiche eingeteilt. Diese Einteilung wird elektromagnetisches Spektrum genannt und ist in Abbildung 58 dargestellt. Für das menschliche Auge ist in diesem weiten Bereich nur ein sehr schmales Spektralband sichtbar. Dieses liegt zwischen 380 und 780nm und wird durch unterschiedliche Farben wahrgenommen. Das Empfindlichkeitsmaximum des menschlichen Auges liegt bei einer Wellenlänge von etwa 550nm und wird als Grün empfunden. Das untere Ende des Spektralbereiches des sichtbaren Lichtes (auch oft mit VIS, für visuell, bezeichnet), endet bei Wellenlängen um 380nm welche als Violett empfunden werden. [vgl. 108, 110]

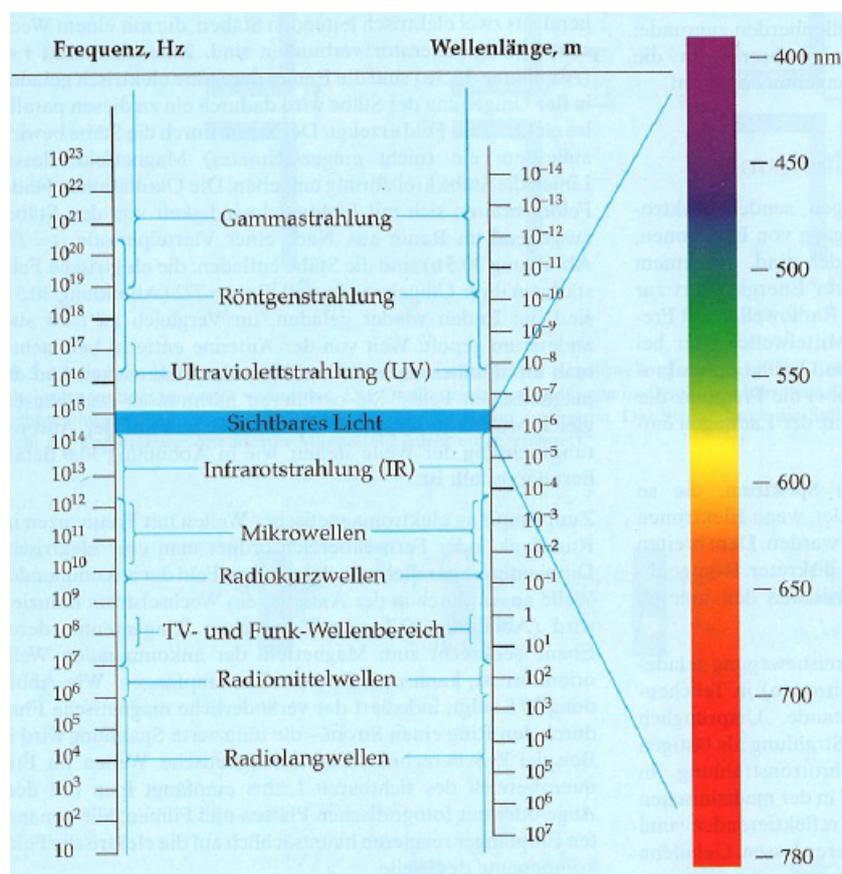


Abbildung 58: Das elektromagnetische Spektrum aus TIPLER/MOSCA [110] S.971

Darunter beginnt der energiereiche Bereich der ultravioletten Strahlung (UV), der für das Auge unsichtbar ist. Bei Wellenlängen von 780nm liegt das obere Empfindlichkeitsminimum des menschlichen Auges, diese werden mit der Farbe Rot assoziiert. Darüber beginnt der infrarote Strahlungsbereich (IR), welcher oft noch in die Bereiche nahes (NIR), mittleres (MIR), langwelliges (LIR) und fernes IR (FIR) unterteilt wird. [vgl. 109]

Um die Wärmestrahlung eines Körpers mit dem menschlichen Auge wahrzunehmen muss dieser eine Temperatur von über 900K besitzen. Die (Infrarot-)Thermografie versucht daher mit Hilfe von Wärmebildkameras die Eigenstrahlung von Körpern bei Umgebungstemperatur sichtbar zu machen. Die Schwierigkeit stellte hier lange Zeit der Umstand dar, dass es für die Thermografie im Vergleich zur Fotografie kein geeignetes Empfängermaterial zur Speicherung der IR-Szene gibt. Der fotografische Film ist für die Thermografie vollkommen ungeeignet, da er sofort durch die Strahlung der Umgebung belichtet werden würde. Es bleibt also nur der Umweg, die thermische Szene über eine zeitliche Abfolge elektrischer Signale sichtbar zu machen. Somit war der entscheidende Schritt zur Massentauglichkeit der Thermografie die Entwicklung von hochauflösenden und zugleich mobilen Bildschirmtechnologien, wie sie in den letzten Jahren stattfand. [vgl. 109]

5.1.1 Strahlungsausbreitung [vgl. 109]

Zur Beschreibung der Strahlungsausbreitung für praktische Zwecke geht man von einer Reihe von Voraussetzungen aus, die zu einfachen Formelbeziehungen führen. Ausgangspunkt dafür ist die Strahlungsleistung bzw. der Strahlungsfluss Φ (in W). Als spektralen Strahlungsfluss bezeichnet man die Verteilung des Strahlungsflusses über die Wellenlänge (siehe Formel 35).

$$\Phi_{\lambda} = \frac{d\Phi}{d\lambda} \text{ in W}/\mu\text{m} \quad (35)$$

Ist der spektrale Strahlungsfluss bekannt, so kann die sich ausbreitende Strahlungsleistung innerhalb eines Spektralbandes λ_1 bis λ_2 berechnet werden (siehe Formel 36).

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} d\lambda \text{ in W} \quad (36)$$

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, ist das menschliche Auge nur in einem schmalen Spektralbereich empfindlich. Diese Empfindlichkeit wird durch die sogenannte V_{λ} -Kurve, welche in Abbildung 59 dargestellt ist, beschrieben. [vgl. 111]



Ihr Maximum liegt mit 550nm beim Empfindlichkeitsmaximum des menschlichen Auges und besitzt an dieser Stelle den Wert 1. Ein durch die V_λ -Kurve bewerteter Strahlungsfluss Φ wird als visueller Strahlungsfluss bzw. Lichtstrom Φ_v bezeichnet. Zur Umrechnung der energetischen Größe in die visuelle Größe wird das photometrische Strahlungsäquivalent k_m , welches sich aus der Definition der SI-Basiseinheit Candela (cd) und der verbindlichen internationalen V_λ -Kurve ergibt, mit $k_m=683\text{lm/W}$ verwendet (siehe Formel 37). (lm steht für die Maßeinheit Lumen, welche die sichtbare Strahlungsleistung charakterisiert; SI-Basiseinheit: $1\text{lm}=1\text{cd}\cdot\text{sr}$; [110])

$$\Phi_v = k_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_\lambda * \Phi_\lambda * d\lambda \text{ in lm} \quad (37)$$

In Abbildung 59 ist die V_λ -Kurve sowie der spektrale Strahlungsverlauf einer 100W Halogenlampe in Abhängigkeit der Wellenlänge dargestellt. Die horizontal schraffierte Fläche 3 unter der Kurve symbolisiert den Strahlungsfluss im Spektralband λ_1 bis λ_2 . Für das menschliche Auge sichtbar ist allerdings nur der vertikal schraffierte Teil 4.

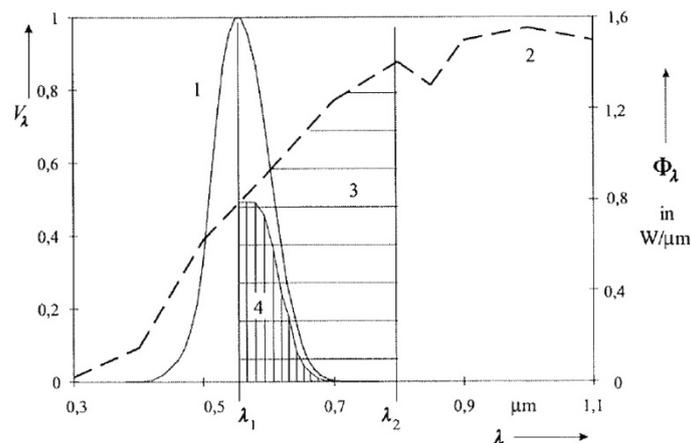


Abbildung 59: V_λ -Kurve aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.51

Die Strahlungsausbreitung von einer Quelle dA in den dreidimensionalen Raum ist in Abbildung 60 dargestellt und wird mit Hilfe des Raumwinkels $d\Omega$ beschrieben.

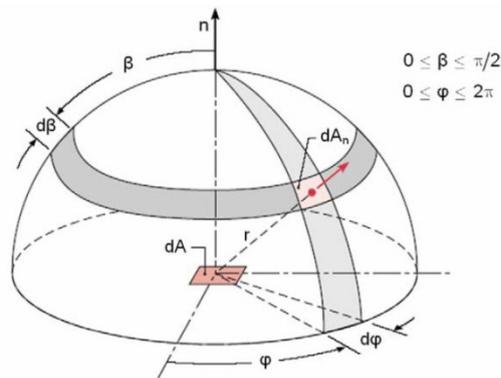


Abbildung 60: Strahlungsausbreitung ausgehend von einem Flächenelement dA aus WERNER [108] S.172

Der Raumwinkel besitzt die Einheit Steradian $1\text{sr}=1\text{m}^2/1\text{m}^2$ und wird nach dem Vorbild des ebenen Winkels $1\text{rad}=1\text{m}/1\text{m}$ definiert (siehe Abbildung 61). Die Definitionsgleichung des Raumwinkels lautet also wie folgt [110]:

$$d\Omega = \frac{dA_n}{r^2} \text{ in sr} \tag{38}$$

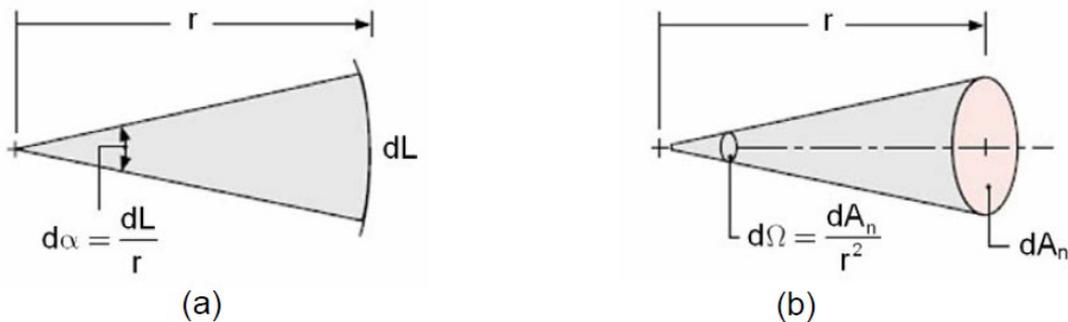


Abbildung 61: Gegenüberstellung des (a) ebenen Winkels α und des (b) Raumwinkels Ω aus WERNER [108] S.172

Der Maximalwert des Raumwinkels wird durch die Vollkugel begrenzt und beträgt 4π sr wie aus Formel 39 leicht nachvollzogen werden kann. [vgl. 110]

$$\oint_{Kugel} d\Omega = \oint_{Kugel} \frac{dA}{r^2} = \frac{1}{r^2} \oint_{Kugel} dA = \frac{1}{r^2} (4\pi r^2) = 4\pi \text{ sr} \tag{39} [110]$$

Werden die Größen Strahlungsfluss Φ bzw. Lichtstrom Φ_v nun in der Praxis auf die verschiedenen geometrischen Größen Raumwinkel Ω oder Fläche A bezogen, so entstehen unterschiedliche, in der Technik gebräuchliche Größen. Eine Auswahl solcher Größen wird in SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] angeführt und ist der Tabelle 23 zu entnehmen. Die

geometrischen Größen der Quelle werden dabei mit Index 1 und die des Empfängers mit dem Index 2 gekennzeichnet.

Tabelle 23: Visuelle und energetische Größen zur Beschreibung des Strahlungstransportes aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.53

Definition	visuelle Größen		energetische Größen	
	Name	Einheit	Name	Einheit
$I = \frac{d\Phi}{d\Omega_1}$	Lichtstärke I_v	cd=lm/sr	Strahlstärke I	W/sr
$M = \frac{d\Phi}{dA}$	spezifische Lichtausstrahlung M_v	lm/m ²	spezifische Ausstrahlung M	W/m ²
$L = \frac{d^2\Phi}{dA_1 * \cos\varepsilon_1 * d\Omega_1}$	Leuchtdichte L_v	cd/m ²	Strahldichte L	W/(m ² sr)
$E = \frac{d\Phi}{dA_2}$	Beleuchtungsstärke E_v	Lux lx=lm/m ²	Bestrahlungsstärke E	W/m ²
$H = \int_{t_e} E(t)dt$	Belichtung H_v	lx*s	Bestrahlung H	W*s/m ²

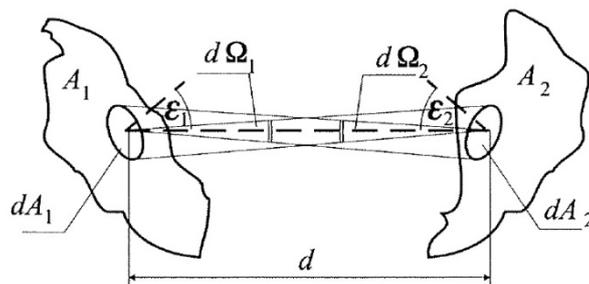


Abbildung 62: Strahlungstransport von Quelle zu Empfänger aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.53

A₁...Quellenfläche; A₂...Empfängerfläche; d...kürzeste Entfernung zwischen Quellen- und Empfängerfläche; ε₁, ε₂...Winkel zwischen der kürzesten Entfernung von Quelle und Empfänger und deren Flächennormalen dA₁ und dA₂

Will man nun den Strahlungstransport zwischen zwei Flächen dA₁ und dA₂ mit beliebiger Lage zueinander bestimmen (siehe Abbildung 62), so ist die dafür entscheidende Größe die Strahldichte L. Aus ihrer Definition aus Tabelle 23 kann durch Umformung, wie Formel 40 zeigt, der differentielle Strahlungsfluss d²Φ berechnet werden.

$$d^2\Phi = L * dA_1 * \cos\varepsilon_1 * d\Omega_1 \quad (40)$$

Dieser kann in analoger Weise auch für die Empfängerfläche angeschrieben werden (siehe Formel 41).

$$d^2\Phi = L * dA_2 * \cos\varepsilon_2 * d\Omega_2 \quad (41)$$

Mit Hilfe von Formel 41 und der allgemeinen Definition der Bestrahlungsstärke E aus Tabelle 23, kann somit die Bestrahlungsstärke auf eine Empfängerfläche wie folgt berechnet werden:

$$E = \int_{\Omega_2} L * \cos\varepsilon_2 * d\Omega_2 \quad (42)$$

Geht man von der Näherung aus, dass L über der Quelle als konstant angesehen werden kann, so spricht man von einem diffusen Strahler oder auch Lambert-Strahler. Aus diesem Grund wird Formel 42 oft auch als „LAMBERT'sches Gesetz“ bzw. „LAMBERT'sches Kosinusetz“ bezeichnet. Zu den fast idealen Lambert-Strahlern können Flächen ohne Glanz, raues Papier, Beton oder auch verrostetes Eisen gezählt werden.

5.1.2 Energiebilanz der Wärmestrahlung

In Formel 43 sind die drei dimensionslosen Größen Absorptionsgrad α , Reflexionsgrad ρ und Transmissionsgrad τ dargestellt. Dabei ist leicht zu erkennen, dass diese Größen immer auf den eingestrahltten spektralen Strahlungsfluss $\Phi_{\lambda 0}$ bezogen werden und somit den Anteil an absorbierter, reflektierter sowie transmittierter Strahlung eines Körpers beschreiben und ihre Summe immer den Wert 1 ergeben müssen (siehe Formel 44).

$$\alpha(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda\alpha}}{\Phi_{\lambda 0}}, \quad \rho(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda\rho}}{\Phi_{\lambda 0}}, \quad \tau(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda\tau}}{\Phi_{\lambda 0}} \quad (43)$$

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (44)$$

5.1.3 Strahlungsgesetze und das Modell des Schwarzen Körpers

Die Thermografie beruht auf der Sichtbarmachung von Temperaturfeldern eines Körpers mit Hilfe, des von ihm ausgehenden Strahlungsflusses. [vgl. 109]

Eines der wichtigsten Gesetze im Zusammenhang mit der Wärmestrahlung von Körpern ist das in Formel 45 dargestellte STEFAN-BOLTZMANN Gesetz. Es besagt, dass die von einem Körper emittierte Strahlungsleistung Φ_e proportional zu dessen Oberfläche und zur vierten Potenz der absoluten Temperatur ist und stellt somit einen Zusammenhang zwischen der energetischen Größe des Strahlungsflusses Φ und der Temperatur T her. [vgl. 110]



$$\Phi_e = \varepsilon * \sigma * A * T^4 \text{ in W} \quad (45)$$

Φ_e ... emittierte Strahlungsleistung in W

ε ... Emissionsgrad des strahlenden Körpers $0 < \varepsilon < 1$

σ ... STEFAN-BOLTZMANN-Konstante, $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [110]

A ... Oberfläche des strahlenden Körpers in m^2

T ... Absoluttemperatur in K

Die Größe ε in Formel 45 steht für den Emissionsgrad eines Körpers, vergleichbar mit den Größen α , ρ und τ (siehe Formel 43). Für praktische Untersuchungen der Wärmestrahlung hat sich ein Modell als besonders geeignet herausgestellt – das Modell des Schwarzen Körpers. Dabei geht man, wie in Abbildung 63 dargestellt, von einem rußgeschwärztem kugelförmigen Hohlraum aus, welcher über eine kleine Öffnung im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung steht und die gesamte einfallende Strahlung absorbiert ($\alpha=1$). Um die Forderung nach thermischem Gleichgewicht ($T=\text{konst.}$) aufrechtzuerhalten, muss in weiterer Folge auch $\varepsilon=1$ gelten. Das Modell des Schwarzen Körpers stellt somit einen idealen Absorber bzw. Emitter dar. [vgl. 108, 109, 110]

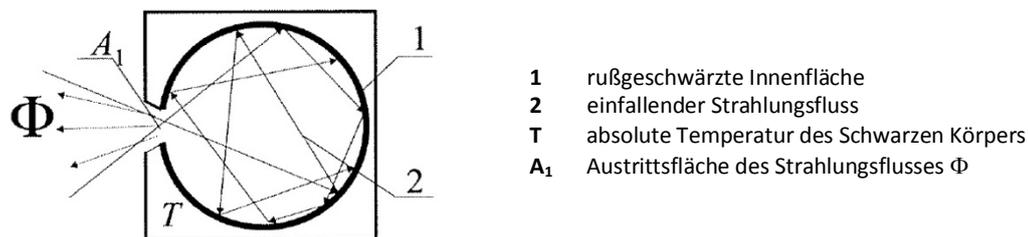


Abbildung 63: Modell des Schwarzen Körpers aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.59

Vor allem bei der Entwicklung der Quantentheorie spielte das Modell des Schwarzen Körpers eine maßgebende Rolle. Bei Untersuchungen zur spektralen Verteilung der Strahlung eines Schwarzen Körpers, stellte sich heraus, dass die tatsächliche Wellenlängenabhängigkeit der Strahlung eines Schwarzen Körpers stark von derjenigen abweicht, wie sie mit den Gesetzen der klassischen Physik berechnet werden kann. Somit führte Max PLANCK um das Jahr 1900 die Hypothese der Quantelung der Energie ein. [vgl. 110]

Daraus entstand schließlich das PLANCK'sche Strahlungsgesetz [108]:

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right]} \text{ in W/(m}^2 \cdot \mu\text{m)} \quad (46)$$

M_{λ} ... spektrale spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers in W/(m²·μm)

λ ... Wellenlänge der Strahlung in μm

T ... Temperatur des Schwarzen Körpers in K

C_1 ... Strahlungskonstante: $C_1 = 2 \cdot \pi \cdot c_0^2 \cdot h$ in W·m²

C_2 ... Strahlungskonstante: $C_2 = c_0 \cdot h/k$ in K·m

c_0 ... Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, $c_0 = 299\,792\,458$ m/s [110]

h ... PLANCK'sches Wirkungsquantum, $h = 6,62606876 \cdot 10^{-34}$ J·s [110]

k ... BOLTZMANN-Konstante, $k = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K [110]

Wird die so berechnete spektrale spezifische Ausstrahlung M_{λ} über der Wellenlänge aufgetragen und wird dies für verschiedene Temperaturen, wie Abbildung 64 zeigt, grafisch dargestellt, so erkennt man, dass sich der Maximalwert der spektralen spezifischen Ausstrahlung bei höheren Temperaturen zu niedrigeren Wellenlängen hin verschiebt. Dieser Sachverhalt wird WIEN'sches Verschiebungsgesetz genannt. [vgl. 108]

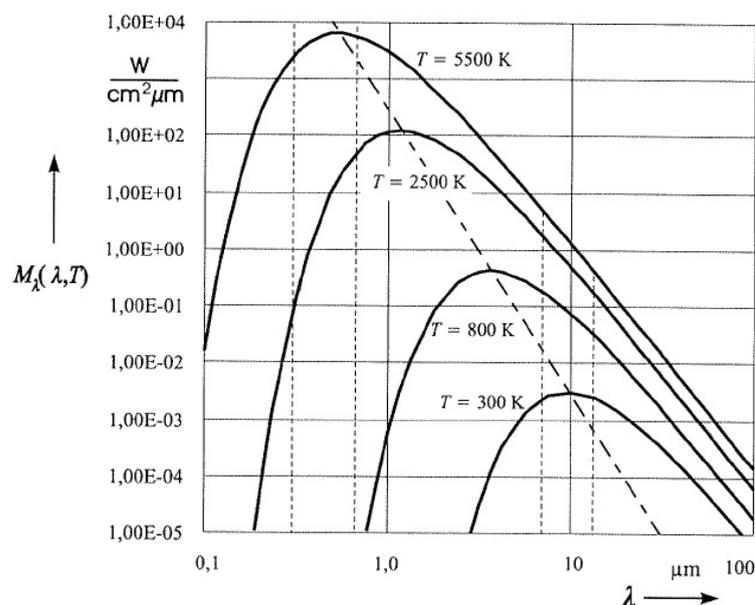


Abbildung 64: PLANCK'sches Strahlungsgesetz für unterschiedliche Temperaturwerte aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.60

Mit Hilfe des WIEN'schen Verschiebungsgesetzes kann auch leicht eine der besonderen Schwierigkeiten, mit welchen Wärmebildgeräte umgehen müssen, gezeigt werden. In

Abbildung 64 sind zwei Bereiche durch gestrichelte Linien hervorgehoben. Nimmt man z.B. die spezifische Ausstrahlung der Sonne ($T=5500\text{K}$), so erkennt man, dass ihr Anteil im sichtbaren Wellenlängenbereich ($0,38$ bis $0,78\mu\text{m}$) um das 400-fache größer ist als im Bereich des thermischen IR (8 bis $14\mu\text{m}$). Vergleicht man jetzt in diesem LIR-Bereich noch einmal die spezifische Ausstrahlung der Sonne mit der eines Schwarzen Körpers mit 300K , so ergibt sich hier erneut ein Verhältnis von $470:1$. Daraus folgt, dass Wärmebildgeräte mit einem besonders geringen Energieangebot auskommen müssen. [vgl. 109]

Die mathematische Beschreibung des WIEN'schen Verschiebungsgesetz zeigt Formel 48, die man erhält, wenn die erste Ableitung der spektralen spezifischen Ausstrahlung nach der Wellenlänge Null gesetzt wird (siehe Formel 47). [vgl. 109]

$$\left[\frac{\partial M_\lambda}{\partial \lambda} \right]_{T=\text{konst.}} = 0 \quad (47)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \text{ K} \cdot \mu\text{m}}{T} \quad (48)$$

5.1.4 Eigenstrahlung realer Körper

Eine wichtige Größe um vom idealen Modell des Schwarzen Körpers auf reale Bedingungen schließen zu können, stellt die Stoffkennzahl Emissionsgrad ε dar. Dieser ist materialabhängig und hängt in weiterer Folge von der Temperatur, der Oberflächenbeschaffenheit und der Abstrahlrichtung ab. Daher ist es auch notwendig den Emissionsgrad experimentell zu bestimmen. Die spezifische Ausstrahlung eines realen Körpers kann durch das PLANCK'sche Strahlungsgesetz (Formel 46) unter Zuhilfenahme des Emissionsgrades wie folgt berechnet werden [vgl. 109]:

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) * M_\lambda(\lambda, T) * d\lambda \text{ in W/m}^2 \quad (49)$$

Bei der Beschreibung des Schwarzen Körpers wurde bereits festgestellt, dass bei Körpern im thermischen Gleichgewicht gilt: $\alpha=\varepsilon$. Dieser Umstand führt zum sogenannten KIRCHHOFF'schen Gesetz (siehe Formel 50), das den Ausgangspunkt für die Dimensionierung von Wärmebildgeräten darstellt. [vgl. 109]

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (50)$$

In Abbildung 65 sind die Emissionsgradverläufe für einzelne ideale Bedingungen dargestellt. [vgl. 109]

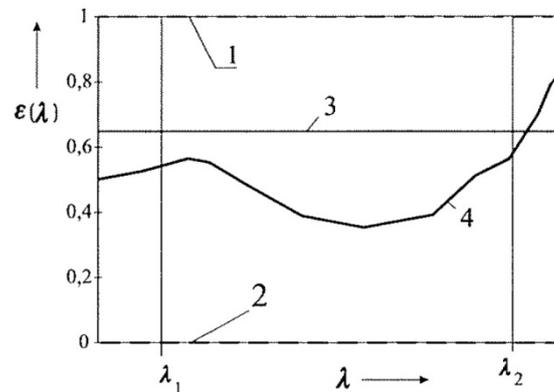


Abbildung 65: Idealisierte Emissionsgradverläufe in Abhängigkeit der Wellenlänge aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.62

- 1...Schwarzer Strahler $\varepsilon(\lambda)=1$; 2...idealer Spiegel $\rho=1$, bzw. ideales Fenster $\tau=1$;
3...grauer Strahler $\varepsilon(\lambda)=\text{konst.}$; 4...selektiver Strahler

Für praktische Anwendungen werden in der Spezialliteratur [109] eine Reihe von experimentell bestimmten Tabellenwerten angegeben. Diese, für allgemeine Definitionen zu verwenden, ist, aufgrund der Vielfalt an möglichen Einflussgrößen, in den meisten Fällen jedoch nicht zulässig. Darum werden in der Praxis Referenzmaterialien mit bekannten und unter Laborbedingungen festgestellten Emissionsgraden zur Kalibration von Wärmebildgeräten verwendet. [vgl. 109]

5.1.5 Thermische Auflösung und Strahlungscontrast

Mit Hilfe der in Formel 51 dargestellten emissionsgradunabhängigen Größe kann eine allgemeingültige Aussage über die thermische Auflösbarkeit von Temperaturdifferenzen getroffen werden. Aufgetragen über der Wellenlänge (siehe Abbildung 66) kann man erkennen, dass bei steigender Objekttemperatur die thermische Auflösung bei kürzeren Wellenlängen ansteigt. [vgl. 109]

$$\frac{1}{\delta T}(\lambda, T) = \frac{\partial M_\lambda / \partial T}{M_\lambda} \text{ in } 1/\text{K} \quad (51)$$

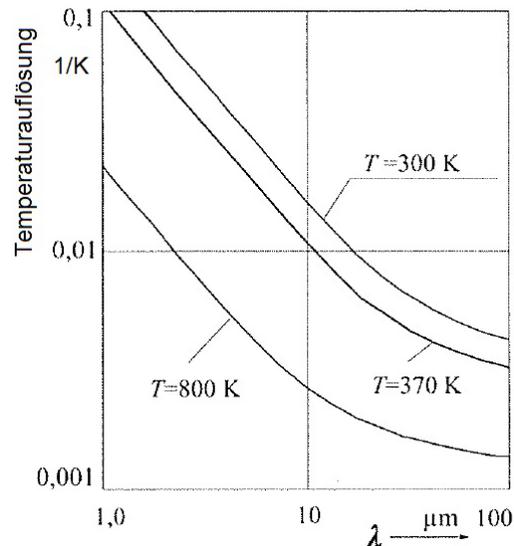


Abbildung 66: Temperatureauflösung $\frac{1}{\delta T}(\lambda, T)$ aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.69

Eine weitere wichtige Größe bei der praktischen Anwendung von Wärmebildgeräten ist der Strahlungscontrast, der eine dimensionslose Größe darstellt und das Verhältnis aus maximaler und minimaler Strahlungsleistung repräsentiert, wie in Formel 52 dargestellt. [vgl. 109]

$$C_M = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{max} + M_{min}} \quad (52)$$

Für Szenen mit Umgebungstemperaturen hilft man sich oft mit der sogenannten T^4 -Näherung. Als Temperaturdifferenz wird dabei $\Delta T = T_t - T_b$ zwischen Objekttemperatur T_t und Hintergrundtemperatur T_b bezeichnet und für $\Delta T \ll T_b$ folgt [109]:

$$C_M = \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_b)T_b + 4\varepsilon_t \Delta T}{(\varepsilon_t + \varepsilon_b)T_b + 4\varepsilon_t \Delta T} \quad (53)$$

Die Formel 53 kann für zwei unterschiedliche Spezialfälle, die für das Verständnis der Probleme bei der Anwendung der Thermografie in der Praxis von besonderer Bedeutung sind, angeschrieben werden. Einerseits ergibt sich für den Strahlungscontrast, wenn die Emissionsgrade von Objekt und Hintergrund nahezu gleich sind [vgl. 109]:

$$C_M = \frac{2\Delta T}{T_b} \quad (54)$$

Ein typisches Beispiel dafür ist die in Abbildung 67 dargestellte Porzellanteekanne mit konstantem Emissionsgrad und unterschiedlichen Temperaturen des heißen Tee als Objekt und der Kanne als Hintergrund. [vgl. 109]

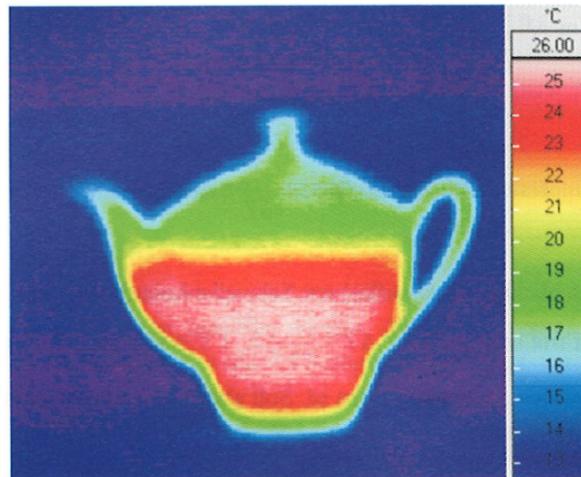


Abbildung 67: Thermogramm einer gefüllten Teekanne aus Porzellan aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.70

Andererseits kann für den Fall, dass die Temperaturen gleich und die Emissionsgrade verschieden sind, geschrieben werden [vgl. 109]:

$$C_M = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_b}{\varepsilon_t + \varepsilon_b} \quad (55)$$

Ein typisches Beispiel hierfür ist eine Hand ($\varepsilon_b=0,98$) mit einem Metallring ($\varepsilon_t=0,03$) wie in Abbildung 68 dargestellt. Dieser erscheint aufgrund des niedrigen Emissions- und des hohen Reflexionsgrades als kalt gegenüber der Hand ($C_M=-0,94$). [vgl. 109]

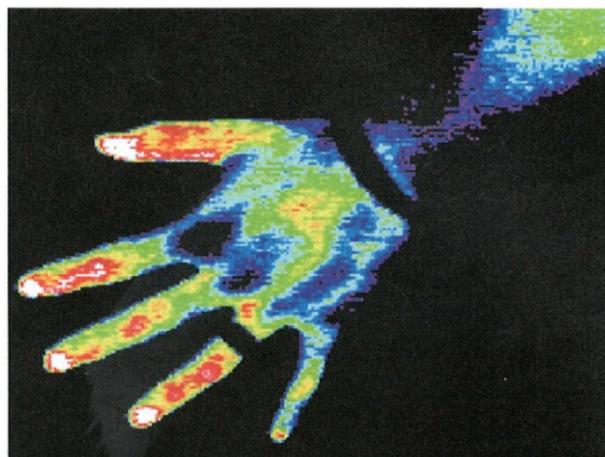


Abbildung 68: Thermogramm einer Hand mit Ring aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.71

Dieser Umstand tritt auch bei der praktischen Anwendung der Thermografie immer wieder auf und es ist entscheidend, dies richtig zu interpretieren.

5.1.6 Die Transmission der Atmosphäre

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Anwendung von Wärmebildgeräten stellt die Reichweite dar. Die Eigenstrahlung eines Objektes, die mit Hilfe des Wärmebildgerätes detektiert werden soll, wird von der Atmosphäre gedämpft, bevor sie auf das Wärmebildgerät trifft. Ein einfaches Modell zur Transmissionsberechnung ist in Abbildung 69 dargestellt. Dieses Modell führt zum sogenannten BOUGUER-BEER'schen Gesetz, das in Formel 56 angeführt ist und besagt, dass der atmosphärische Transmissionsgrad exponentiell mit der Entfernung d zwischen Objekt und Wärmebildgerät abnimmt. [vgl. 109]

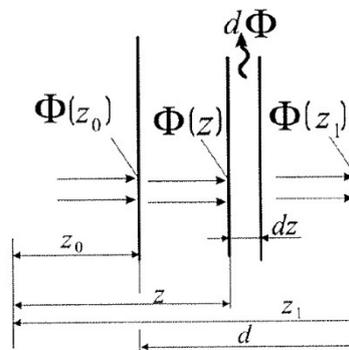


Abbildung 69: Einfaches Modell zur Transmission der Atmosphäre aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.78

$$\tau_A = e^{-\kappa_A \cdot d} \quad (56)$$

- τ_A ... atmosphärischer Transmissionsgrad
- κ_A ... atmosphärischer Dämpfungsfaktor in 1/m
- d ... Reichweite in m

In geringen Höhen lassen sich vor allem drei Einflussgrößen für die atmosphärische Transmission ausmachen, die sich untereinander fast nicht beeinflussen und sich somit einfach zum atmosphärischen Gesamttransmissionsgrad multiplizieren lassen (siehe Formel 57). [vgl. 109]

$$\tau_A(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) * \tau_{CO_2}(\lambda) * \tau_S(\lambda) \quad (57)$$

- τ_{H_2O} ... Transmissionsgrad der molekularen Absorption durch Wasserdampf
- τ_{CO_2} ... Transmissionsgrad der molekularen Absorption durch Kohlendioxid
- τ_S ... Transmissionsgrad der Streuung an den Molekülen

Dieser Zusammenhang kann für eine feste Übertragungstrecke d herangezogen werden. Zur Bestimmung der Reichweite von Wärmebildgeräten muss allerdings mit dem atmosphärischen Dämpfungsfaktor κ_A die Schwächung der Strahlung durch die Atmosphäre beschrieben werden (siehe Formel 58). Dabei werden die Transmissionsgrade τ_{H_2O} , τ_{CO_2} und τ_S für eine Bezugsübertragungstrecke d_0 berechnet, die in der Größenordnung der Reichweite liegt. [vgl. 109]

$$\kappa_A = \frac{1}{d_0} (-\ln \tau_{H_2O} - \ln \tau_{CO_2} - \ln \tau_S) \text{ in } 1/\text{m} \quad (58)$$

Die charakteristische spektrale Verteilung des Transmissionsgrades der Atmosphäre, welche durch die molekulare Absorption zustande kommt, zeigt Abbildung 70. [vgl. 109]

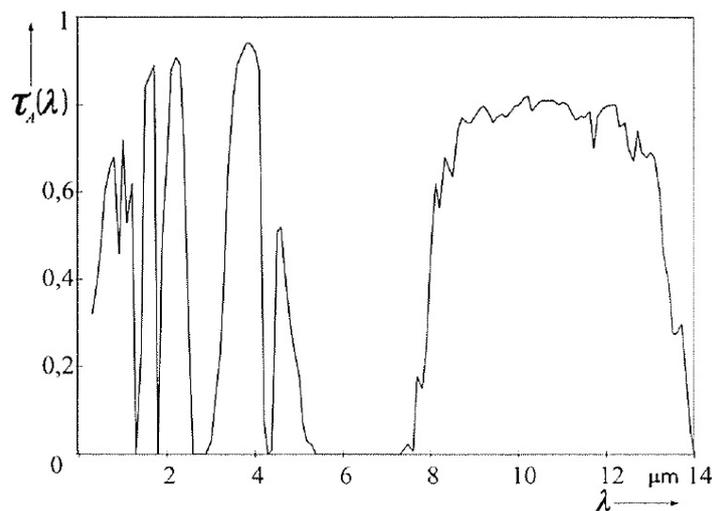


Abbildung 70: Atmosphärischer Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.79

Bedingungen: Länge der Übertragungstrecke $d=1,852\text{km}$; Sichtweite $d_v=20\text{km}$; kondensierbare Wasserdampfmenge $w=17\text{mm}$

Dabei werden jene Wellenlängenintervalle, die durchlässig für die elektromagnetische Strahlung sind, als atmosphärische Fenster bezeichnet. Ihre Auswirkungen auf die Strahlung der Sonne sind in Abbildung 71 dargestellt. [vgl. 109]

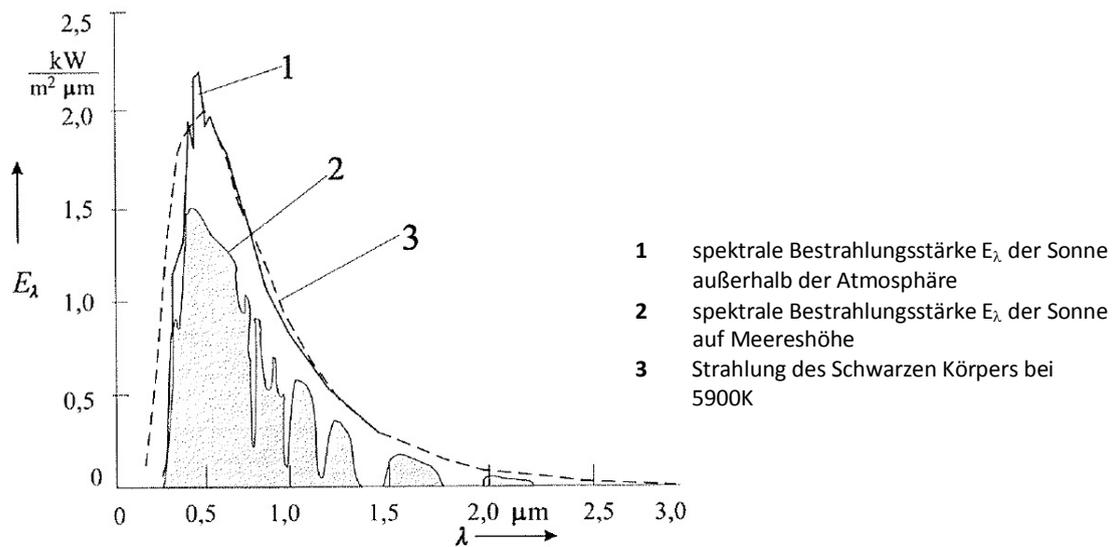


Abbildung 71: Einfall der Sonnenstrahlen durch die atmosphärischen Fenster der Erdlufthülle aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.86

Auf die Wärmebildtechnik haben diese atmosphärischen Fenster entscheidende Auswirkungen, wie man an Abbildung 72 erkennen kann. Hier sind einerseits die Kurven des PLANCK'schen Strahlungsgesetzes für unterschiedliche Temperaturen und andererseits der atmosphärische Transmissionsgrad aus Abbildung 70 über der Wellenlänge aufgetragen. Man erkennt gut, dass das Strahlungsmaximum von Körpern mit Umgebungstemperatur genau mit dem atmosphärischen Fenster im LIR Bereich zwischen 8 und 12µm zusammenfällt. Auch das Strahlungsmaximum von Körpern mit Temperaturen um 800K liegt in einem atmosphärischen Fenster. Diese sind vor allem zur Untersuchung von Abgasen aus Verbrennungsmotoren geeignet. [vgl. 109]

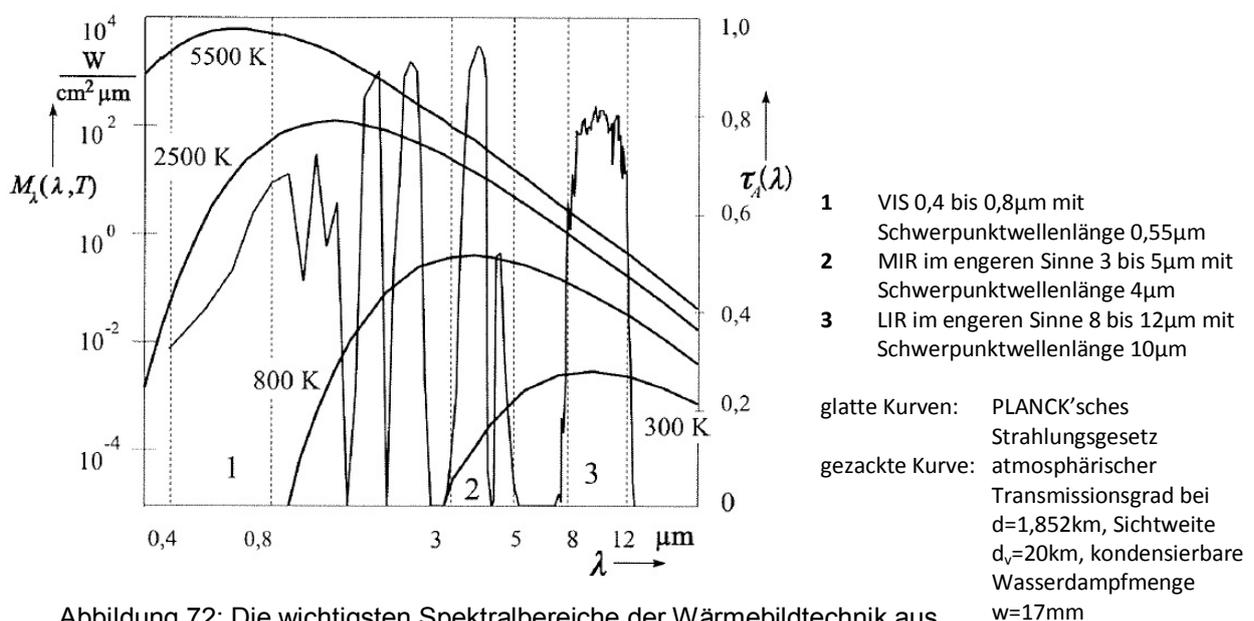


Abbildung 72: Die wichtigsten Spektralbereiche der Wärmebildtechnik aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.87

5.1.7 Detektortypen

In der Literatur werden vor allem drei Hauptanforderungen an Infrarot-Detektoren gestellt [vgl. 109]:

- Wandlung des einfallenden Strahlungsflusses Φ' in eine Spannung oder einen Stromfluss
- Kurze Zeitkonstante t_D zum Aufbau von Echtzeitbildern
- Kleine Pixelgrößen für hohe räumliche Auflösung

5.1.7.1 Detektorempfindlichkeit R_D

Als Detektorempfindlichkeit wird immer die Umwandlung des einfallenden Strahlungsflusses Φ' in eine Spannung U_S bzw. eine Stromstärke I_S bezeichnet (siehe Formel 59). [vgl. 109]

$$R_D = \frac{U_S}{\Phi'} = \frac{U_S}{E \cdot A_D} \text{ bzw. } R_D = \frac{I_S}{\Phi'} = \frac{I_S}{E \cdot A_D} \text{ in V/W bzw. A/W} \quad (59)$$

U_S ... Signalspannung in V

I_S ... Signalstromstärke in A

Φ' ... empfangener Strahlungsfluss in W

E ... Bestrahlungsstärke auf dem Empfänger in W/m²

A_D ... Detektorfläche in m²

Abbildung 73 zeigt die Änderung der Empfindlichkeit über die Wellenlänge. Gut zu erkennen ist hier, dass es zwei unterschiedliche Empfängertypen gibt. Die thermischen Empfänger, die ein relativ konstantes Empfindlichkeitsverhalten über die Wellenlänge an den Tag legen und die Quantenempfänger, welche starke spektrale Veränderungen aufweisen. [vgl. 109]

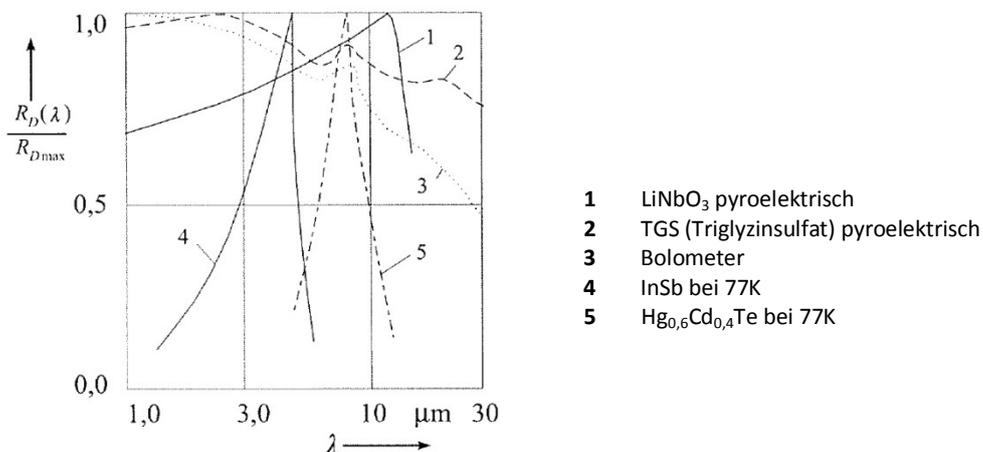


Abbildung 73: Typische relative Empfindlichkeiten unterschiedlicher IR-Empfänger in Abhängigkeit der Wellenlänge aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.156

5.1.7.2 Detektivität

Die als spezifische Detektivität D^* oder auch Nachweisempfindlichkeit bezeichnete Größe, ist die am häufigsten gebrauchte Empfängergröße und stellt ein Charakteristikum über das Rauschverhalten des Empfängers, welches entscheidend für die thermische Auflösung und die Reichweite eines Wärmebildgerätes ist, dar. Berechnet wird sie über den NEP-Wert (noise equivalent power) mit welchem das Eigenrauschen eines Empfängers beschrieben wird. NEP und D^* sind den Formeln 60 und 61 zu entnehmen. [vgl. 109]

$$NEP = \Phi'_{min} = \frac{U_N}{R_D} \text{ in W} \quad (60)$$

$$D^*(\lambda, T_D, f) = \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}{NEP} \text{ in } \frac{\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}} \quad (61)$$

- Φ'_{min} ... Strahlungsfluss der eine Spannung erzeugt die gerade der Rauschspannung U_N entspricht in W
- U_N ... Rauschspannung in V
- R_D ... Detektorempfindlichkeit in V/W
- A_D ... Detektorfläche in m^2
- Δf ... Messbandbreite des Signals in Hz

In Abbildung 74 ist die Wellenlängenabhängigkeit der spezifischen Detektivität dargestellt, wobei ein hoher Wert ein geringes Rauschverhalten des Detektors bedeuten. Die Temperaturabhängigkeit von D^* , wonach die Detektivität von Empfängern zu tiefen Temperaturen hin ansteigt, ist aus Abbildung 74 ebenfalls bereits ersichtlich. Dieser Umstand führt auch dazu, dass der Detektorkühlung eine entscheidende Rolle zukommt. Auch die unterschiedlichen Empfängerarten kristallisieren sich wieder deutlich hervor. Thermische Empfänger besitzen ähnlich wie bei der Empfindlichkeit, ein relativ gleichbleibendes Verhalten über die Wellenlängen, während sich die Detektivität von Quantenempfänger über die Wellenlänge stark verändert. [vgl. 109]

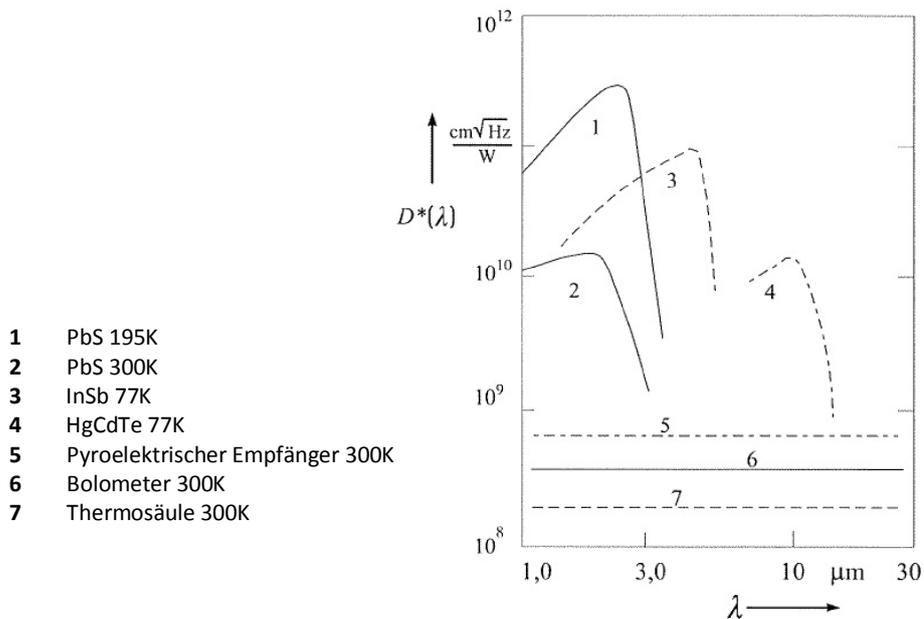


Abbildung 74: Wellenlängenabhängigkeit der spezifischen Detektivität wichtiger IR-Empfänger aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.160

Bei Wärmebildgeräten wird meist jedoch nicht die Detektivität selbst, sondern eine aus ihr resultierende Größe, die NETD (noise equivalent temperature difference), angegeben. Diese Größe (siehe Formel 62) entsteht in Anlehnung an Formel 51, wobei jedoch einige weitere Annahmen getroffen werden [vgl. 109]:

- Objektentfernung groß gegenüber Brennweite
- Objekt ist ein schwarzer Strahler, $\varepsilon(\lambda)=1$
- Transmissionsverluste durch Atmosphäre vernachlässigbar, $\tau_A=1$

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}} \text{ in K} \quad (62)$$

k_{eff} ... effektive Blendenzahl

D^* ... Detektivität in $\frac{cm\sqrt{Hz}}{W}$

τ_0 ... Transmission der Optik

A_D ... Detektorfläche in m^2

$\overline{\Delta f}$... Messbandbreite des Signals in Hz

5.1.7.3 Thermische Detektoren

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, sind thermische Detektoren weitestgehend wellenlängenunabhängig, da ihrer Wirkung darauf beruht, die einfallende

Strahlung zuerst in Wärme umzuwandeln. Die so hervorgerufene Temperaturänderung ΔT bewirkt schließlich eine Änderung des elektrischen Signals. Daher ist es zulässig die Empfängergrößen Empfindlichkeit und Detektivität für den spektralen Arbeitsbereich von Wärmebildgeräten als konstant anzunehmen (siehe Formel 63). [vgl. 109]

$$R_D(\lambda) \approx R_{D_{th}} = \text{konst.} \text{ und } D^*(\lambda) \approx D_{th}^* = \text{konst.} \quad (63)$$

Trotz der Temperaturabhängigkeit der Detektivität werden thermische Detektoren aus Kostengründen in den meisten Fällen ohne Kühlung ausgeführt. [vgl. 109]

Bolometer

Ein Bolometer wandelt die Temperaturänderung ΔT mit Hilfe einer WHEATSTONE'schen Messbrücke in eine Widerstandsänderung ΔR um. Das Funktionsprinzip eines Bolometer ist in Abbildung 75 dargestellt. Die mit R_T bezeichneten Widerstände sind temperaturabhängig (Thermistoren) und ändern somit ihren elektrischen Widerstand mit der Temperatur. Solange keine Strahlung auf das Bolometer trifft, ist die Brücke abgeglichen und es fließt kein Strom. Das Bolometer ist so konstruiert, dass eine einfallende Strahlung Φ' auf einen der beiden Thermistoren trifft und somit dessen Widerstand um ΔR_T verschiebt. Dadurch verstimmt sich die WHEATSTONE Brücke und es kommt zu einem Spannungsabfall U_S am Widerstand R_1 . Eine Temperaturänderung ohne Strahlungseinfall wird hingegen vom zweiten Thermistor ausgeglichen und somit entsteht keine Signalspannung. [vgl. 109]

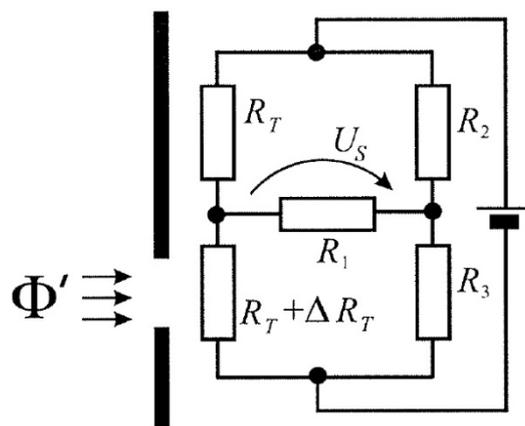


Abbildung 75: Aufbau eines Bolometers aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.164

Thermoelement, Thermosäule

Thermoelemente nutzen die nach dem SEEBECK-Effekt entstehende Spannungsänderung ΔU , die aufgrund eines Temperaturunterschiedes ΔT an der Verbindungsstelle zweier

unterschiedlicher Metalle auftritt. Werden mehrere Thermoelemente in Serie geschaltet, spricht man von einer Thermosäule. Das Funktionsprinzip einer Thermosäule mit der Metallpaarung Sb-Bi ist in Abbildung 76 dargestellt. [vgl. 109]

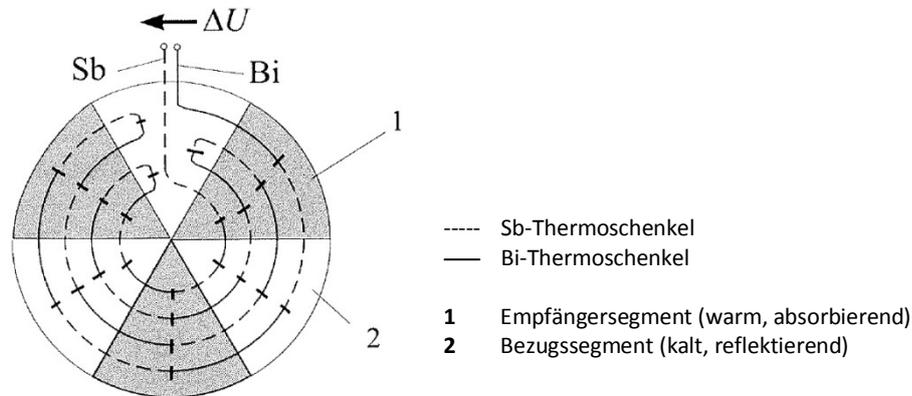


Abbildung 76: Thermosäule in der Ausführungsform eines Pyrometers aus [112]

Pyroelektrische Empfänger

Pyroelektrische Empfänger bestehen aus einem stark asymmetrischen Kristall, der eine permanente elektrische Polarisierung besitzt. Eine Änderung des Strahlungsflusses auf den Kristall bedeutet eine Änderung der Temperatur (ΔT). Diese führt zu einer Änderung der Polarisierung des Kristalles, welche mit Elektroden in Form einer Ladungsänderung ΔQ erfasst werden kann. Das bedeutet, dass pyroelektrische Empfänger nur zur Detektion von Wechsellicht geeignet sind. Das Wirkprinzip ist der Abbildung 77 zu entnehmen. [vgl. 109]

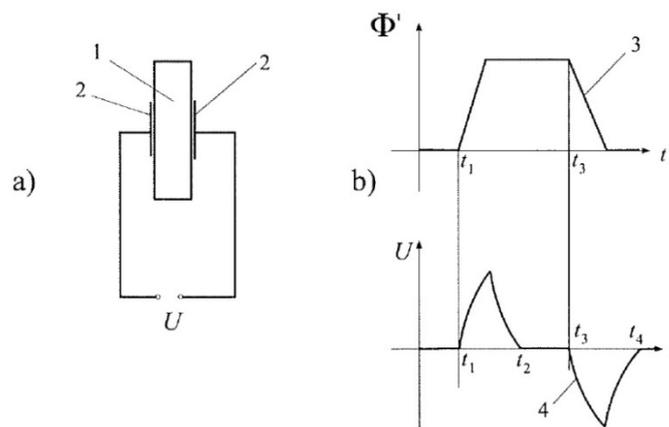


Abbildung 77: Wirkprinzip des pyroelektrischen Eielementempfängers aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.166

- a) grundsätzlicher Aufbau mit A_D als Überdeckungsgebiet der Elektroden
- b) zeitliche Änderung des einfallenden Strahlungsflusses Φ' und der zum Ladungsausgleich notwendigen Spannung U

1...pyroelektrischer Kristall; 2...Elektroden; 3...Strahlungsfluss Φ' ; 4...Signalspannung U

Diese drei Arten von sogenannten Eielementempfängern werden für den praktischen Einsatz in Wärmebildgeräten meist in einer Multielement Bauweise zu sogenannten Empfängerarrays ausgeführt. [vgl.109]

5.1.7.4 Quantenempfänger

IR-Quantenempfänger werden oft auch als Photonen- oder Halbleiterdetektoren bezeichnet und nutzen den inneren Fotoeffekt. Dabei unterscheidet man zwischen Fotoleitern, fotovoltaischen Empfängern und SCHOTTKY-Barriere-Detektoren. Quantenempfänger benötigen ein Mindestmaß an einfallender Energie um überhaupt Strahlung detektieren zu können. Dieses Mindestmaß ist ab dem Überschreiten einer bestimmten Wellenlänge, der sogenannten cut-off Wellenlänge, wie leicht aus der EINSTEIN'schen Gleichung für die Photonenenergie abgeleitet werden kann, nicht mehr gegeben. [vgl. 109, 110]

Diese von EINSTEIN, Anfang des 20. Jahrhunderts aufgestellte und in Formel 64 dargestellte Gleichung, stellte erstmals die Erkenntnis dar, dass Licht neben seiner Welleneigenschaften, die für dessen Ausbreitung verantwortlich sind, auch Teilcheneigenschaften besitzt. Diese werden zur Beschreibung des Energieaustausches zwischen Licht und Materie benötigt. Allgemein wird dieses Phänomen, als Welle-Teilchen-Dualismus, bezeichnet und stellt die allgemeine Charakteristik von Materie dar. [vgl. 110]

$$E = h * \nu = \frac{h * c}{\lambda} > \Delta W \text{ in J} \quad (64)$$

h ... PLANCK'sches Wirkungsquantum, $h=6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$ [110]

ν ... Frequenz in Hz

c ... Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, $c=299\,792\,458 \text{ m/s}$ [110]

λ ... Wellenlänge in m

ΔW ... Energieschwelle zur Spannungsinduktion in J

Fotoleiter

Bei Fotoleitern unterscheidet man zwischen Eigenfotoleitern und Störstellenfotoleitern, die aufgrund ihres Aufbaues oft auch als Eigen- und Störstellenhalbleiter bezeichnet werden. [vgl. 109]

Abbildung 78 zeigt die besonderen Eigenschaften eines Eigenhalbleiters im Vergleich zu einem Leiter und einem Isolator. Als Leiter bezeichnet man Metalle die entweder ein nicht vollständig besetztes Valenzband besitzen, welches durch Anlegen eines elektrischen Feldes zum Leitungsband wird (siehe Abbildung 78a), oder eine Überlappung zweier Bänder aufweisen, welche im Falle eines elektrischen Feldes zu einem kombinierten Valenz-



Leitungsband werden (siehe Abbildung 78b). Hingegen zeichnen sich Isolatoren durch eine große Energielücke zwischen dem vollständig gefüllten Valenzband und dem über der Lücke liegendem Leitungsband aus (siehe Abbildung 78c). Dadurch kann auch ein elektrisches Feld keine Beschleunigung der Elektronen hervorrufen und die Leitfähigkeit des Isolators bleibt sehr gering. Ein Eigenhalbleiter besitzt ebenfalls eine Energielücke zwischen Valenzband und Leitungsband. Somit weisen auch diese Materialien bei tiefen Temperaturen Eigenschaften eines Isolators auf. Mit steigender Temperatur werden aber immer mehr Elektronen durch thermische Anregung in das Leitungsband gehoben und die Leitfähigkeit steigt (siehe Abbildung 78d). [vgl. 110]

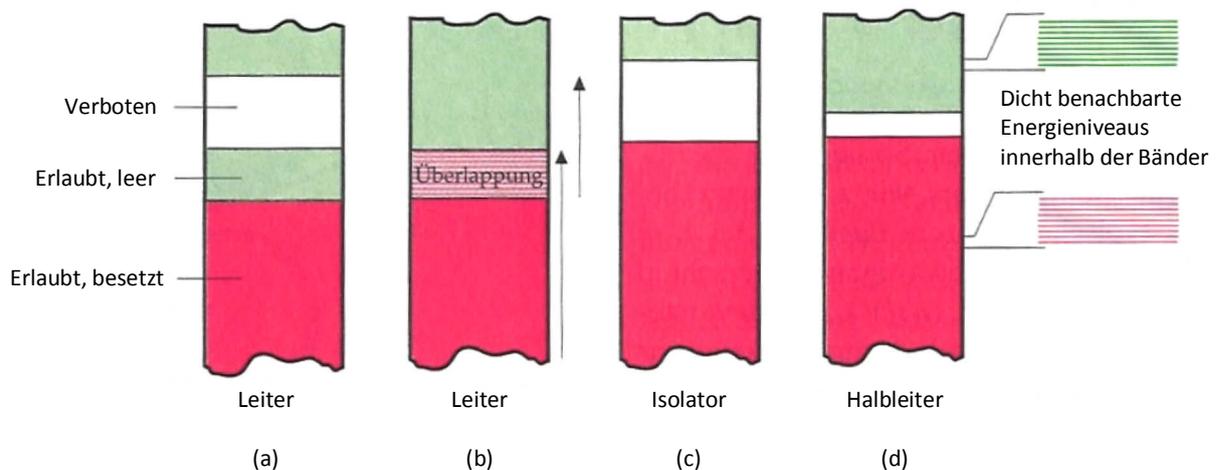


Abbildung 78: Vergleich der Bänderstruktur eines Leiters (a), (b) und eines Isolators (c) mit der eines Halbleiters (d) aus TIPLER/MOSCA [110] S.1236

Um die Leitfähigkeit von Halbleitern auch bei Umgebungstemperaturen zu verbessern, fügt man ihnen Fremdatome hinzu. Durch diesen als Dotierung bezeichneten Vorgang erhält man schließlich Störstellenhalbleiter welche wiederum in n-Halbleiter und p-Halbleiter unterteilt werden. [vgl. 110]

Abbildung 79 zeigt einen typischen n-Halbleiter. Dabei wurde der aus Silizium bestehende Halbleiter an manchen Stellen durch Arsen dotiert. Arsen weist jedoch ein zusätzliches fünftes Valenzelektron auf, welches an der kovalenten Bindung der Nachbaratome nicht teilnimmt und daher nur schwach an das Atom gebunden ist. [vgl. 110]

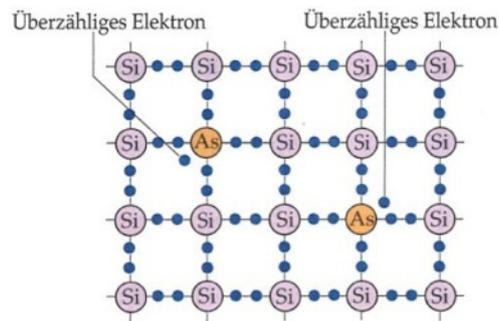


Abbildung 79: Kristallgitter eines n-Halbleiters welcher durch Dotierung eines Siliziumkristalls mit Arsen entsteht aus TIPLER/MOSCA [110] S.1237

Die Bandstruktur des mit Arsen dotierten Siliziumkristalls erhält durch diese überzähligen Elektronen zusätzliche Energieniveaus die sich unterhalb des Leitungsbandes befinden und als Donatorniveaus bezeichnet werden (siehe Abbildung 80). Aus diesen können die überzähligen Elektronen leicht in das darüber liegende Leitungsband angehoben werden und somit zur elektrischen Leitung beitragen. Dadurch, dass bei dieser Art der Dotierung keine positiven Löcher im Valenzband entstehen besteht der Großteil der Ladungsträger aus Elektronen. Diese so erzeugten Halbleiter, werden negative Halbleiter, kurz n-Halbleiter genannt. [vgl. 110]

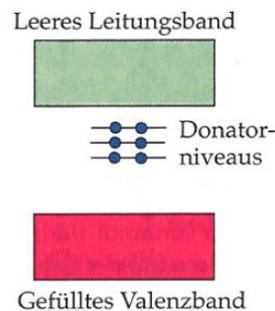


Abbildung 80: Bandstruktur eines n-Halbleiters aus TIPLER/MOSCA [110] S.1237

Wird ein Halbleiter mit Fremdatomen dotiert die weniger Valenzelektronen aufweisen als das Halbleiteratom, so bleibt im Halbleiterkristall ein positives Loch zurück. In Abbildung 81 ist beispielsweise die Dotierung eines Siliziumkristalls mit Gallium dargestellt. [vgl. 110]

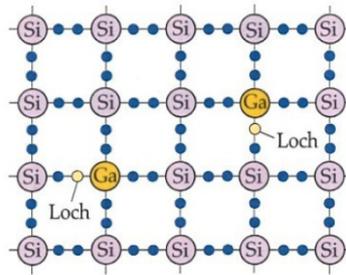


Abbildung 81: Kristallgitter eines p-Halbleiters welcher durch Dotierung eines Siliziumkristalls mit Gallium entsteht aus TIPLER/MOSCA [110] S.1238

Dadurch entstehen oberhalb des gefüllten Valenzbandes leere Energieniveaus, die als Akzeptorniveaus bezeichnet werden, da sie bei thermischer Anregung leicht Elektronen aus dem Valenzband aufnehmen (siehe Abbildung 82). Da bei dieser Art von Störstellenhalbleitern die Ladungsträger zum größten Teil aus positiven Löchern bestehen, nennt man sie auch positive Halbleiter, kurz p-Halbleiter. [vgl. 110]

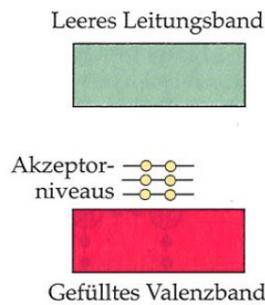


Abbildung 82: Bandstruktur eines p-Halbleiters aus TIPLER/MOSCA [110] S.1238

Abbildung 83 zeigt nochmals eine Gegenüberstellung der drei unterschiedlichen Arten von Fotoleitern in etwas abgeänderter Darstellung.

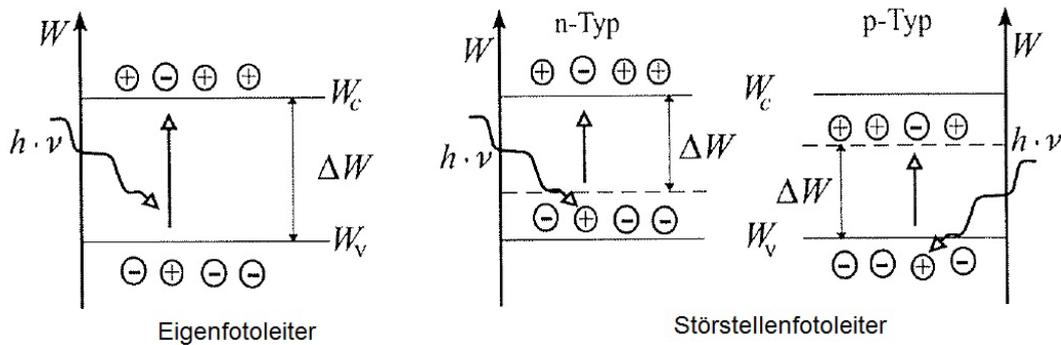


Abbildung 83: Bändermodell der unterschiedlichen Fotoleiterarten aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.177

W_v ...Energieniveau des Valenzbandes; W_c ...Energieniveau des Leitungsbandes; ΔW ...vom Elektron zu überwindende Energielücke; $h \cdot \nu$...Energie des einfallenden Photons; -...Elektronen; +...Defektelektronen

Fotovoltaische Empfänger

Wird ein p-Halbleiter und ein n-Halbleiter kombiniert, so entsteht an der Verbindungsstelle ein sogenannter pn-Übergang. Aufgrund des Konzentrationsgefälles von Löchern und Elektronen in den unterschiedlichen Gebieten kommt es so lange zu einer Diffusion der Elektronen vom p- in das n-Gebiet und der Löcher vom n- in das p-Gebiet, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Im Übergangsbereich kommt es so zu einer Ladungstrennung die eine Potentialdifferenz zur Folge hat und eine weitere Diffusion der Ladungsträger verhindert (siehe Abbildung 84). [vgl. 110]

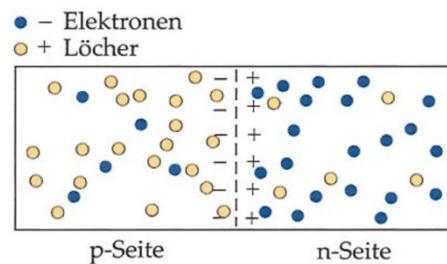


Abbildung 84: pn-Halbleiterübergang aus TIPLER/MOSCA [110] S.1238

Der praktische Einsatz eines pn-Übergangs unterscheidet sich in der Art seiner Schaltung. Wird ein pn-Übergang in Durchlassrichtung geschaltet, so verringert sich die Potentialdifferenz im Übergangsbereich und es kommt zu einem Stromfluss, wie in Abbildung 85a dargestellt. Bei einer Schaltung in Sperrichtung hingegen vergrößert sich die Potentialdifferenz und die Diffusion der Ladungsträger wird noch mehr unterdrückt (siehe Abbildung 85b). [vgl. 110]

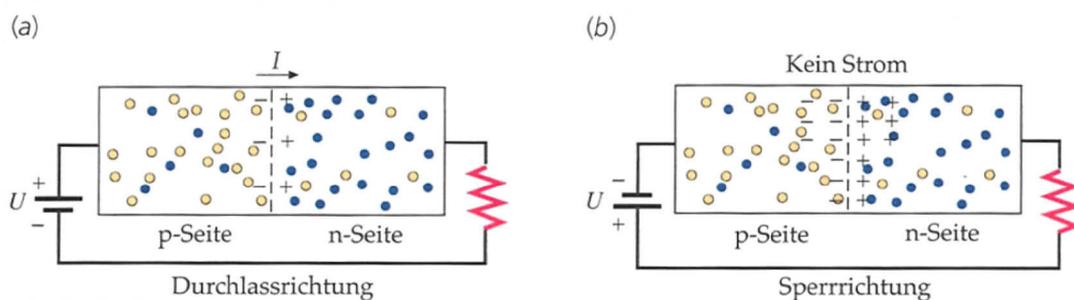


Abbildung 85: Schaltungsarten eines pn-Übergangs aus TIPLER/MOSCA [110] S.1240

- (a) pn-Übergang in Durchlassrichtung geschaltet. Die angelegte Spannung fördert die Diffusion der Löcher von der p-Seite zur n-Seite und der Elektronen von der n-Seite zur p-Seite und führt zu einem Strom I .
- (b) pn-Übergang in Sperrichtung geschaltet. Die angelegte Spannung verhindert die Diffusion der Ladungsträger durch den Übergangsbereich und es fließt kein Strom.

Als fotovoltaische Empfänger kommen Fotodioden zum Einsatz, deren pn-Übergang in Sperrrichtung geschaltet ist. Dabei regen die auf die p-Seite auftreffenden Photonen Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband an. Dadurch erhöht sich die Potentialdifferenz zwischen n- und p-Seite. Werden beide Seiten über einen Widerstand verbunden, so kommt es zu einem Stromfluss. Dabei ist die Stromstärke im Widerstand proportional zur Anzahl der einfallenden Photonen (siehe Abbildung 86). [vgl. 109, 110]

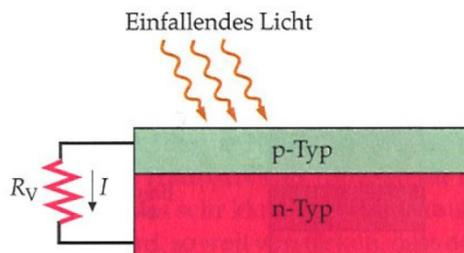


Abbildung 86: pn-Halbleiterübergang in Ausführung einer Fotodiode aus TIPLER/MOSCA [110] S.1241

SCHOTTKY-Barriere-Detektor

Ist ein p-Halbleiter nicht mit einem n-Halbleiter zu einem pn-Übergang verbunden, sondern mit einem IR-typischen Material, wie beispielsweise PtSi, spricht man von einem SCHOTTKY-Barriere-Detektor. Hier wird in ähnlicher Weise wie bei einem pn-Übergang der Fotoeffekt an einem Halbleiter-Metall-Übergang genutzt. [vgl. 109]

5.2 Thermische Messanwendungen in der Instandhaltung

Der Parameter „Temperatur“ ist in der industriellen Instandhaltung in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen als Indikator für die Bereiche Wartung, Inspektion sowie Verbesserung geeignet und besitzt somit einen bedeutenden Einfluss auf die Implementierung einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie.

Zu Beginn dieses Kapitels wurde die Unterscheidung von berührenden und berührungslosen thermischen Messverfahren angeführt. Wie bereits erwähnt, sind berührende Temperaturmessungen, wenn sie nicht bereits bei der Konstruktion einer Maschine oder Anlage vorgesehen wurden, im Nachhinein nur schwer so zu implementieren, dass sie auch vernünftige Messergebnisse liefern. Aus diesem Grund wird im Zusammenhang mit berührenden thermischen Messverfahren auf die Arbeit von KÖBLBACHER/WEILER [1] sowie umfangreich auf STURM/FÖRSTER [4] verwiesen.

Für den Begriff Maschinendiagnose in der zustandsorientierten Instandhaltung mittels berührungsloser thermischer Messverfahren, eignen sich vor allem die Pyrometrie zur Bestimmung absoluter Temperaturwerte, sowie die Thermografie zur Bestimmung räumlicher Temperaturverteilungen.

5.2.1 Pyrometrie

Pyrometer sind IR-Messgeräte zur punktförmigen Bestimmung der Absoluttemperatur mit geringer räumlicher Auflösung. [vgl. 4, 109]

Als mögliches Einsatzfeld, besonders in Zusammenhang mit Kapitel 3, sei hier die Überwachung der Lagertemperaturen bei Nachschmiervorgängen angeführt. Durch eine parallele Messung der Temperatur am Lagergehäuse eines Aggregates während des Nachschmiervorganges, kann die Füllung des Lagerinnenraumes mit Schmierstoff gut abgeschätzt werden. Infolge der erhöhten Walkreibung durch die Zufuhr von neuem Schmierstoff, welcher erst auf Betriebstemperatur und damit auf Betriebsviskosität gebracht werden muss, kommt es zu einer Temperaturerhöhung im Inneren des Lagers. Diese Temperaturerhöhung kann mit Hilfe eines Strahlungspyrometers auch am Lagergehäuse festgestellt werden und liefert somit eine Entscheidungsgröße, wann der Nachschmiervorgang beendet werden sollte.

5.2.2 Thermografie

Anders als die Pyrometrie stellt die Thermografie, aufgrund der durch sie möglichen Sichtbarmachung räumlicher Temperaturverteilungen, eine geeignete Methode zur Maschinen- und Anlagendiagnose für die zustandsorientierte Instandhaltung dar.



Unter dem Begriff thermografische Diagnose stellte in den letzten Jahren vor allem die Gebäudesanierung im Bauwesen den weitaus größten Anwendungsbereich dar. Zur Entwicklung der Thermografie hat aber vor allem die militärische Nutzung sehr stark beigetragen. Sei es zur Überwachung nationaler Staatsgrenzen während der Nachtstunden, als auch für den Einsatz in Kampffjets. [vgl. 109]

Der Einsatz in der industriellen Instandhaltung stellt erst seit einigen Jahren ein weiteres Anwendungsgebiet der Infrarotthermografie dar. Der Grund dafür ist sicherlich unter anderem darin zu sehen, dass bei der thermischen Sanierung fast ausschließlich nach sogenannten Wärmelecks gesucht wird und damit vor allem der thermische Vergleich zwischen der Temperaturreferenz des Mauerwerkes und der Temperatur sogenannter „hot-spots“, meist Fenster oder Türen von Interesse ist. Bei dieser Art der Diagnose können auch relativ unerfahrene Personen bereits Maßnahmen aus den aufgenommenen Thermogrammen ableiten. Bei der industriellen Thermografie von Anlagenkomponenten hingegen stellt die richtige Interpretation der Thermogramme die Schlüsselaufgabe dar und erfordert in den meisten Fällen, einerseits allgemeines Basiswissen der thermografierten Anlagenteile und andererseits eine umfassende Erfahrung im Bereich der Thermografie solcher Anlagen. Nur so lassen sich auch wirklich schadhafte Stellen erkennen bzw. gezielte Prognosen über Zustand und Lebensdauer einer Anlage ableiten.

Angewandt wird die industrielle Thermografie vor allem im Bereich der elektrischen Energieversorgung von Anlagen, da hier vor allem sicherheitstechnische Aspekte für berührungslose Diagnoseverfahren sprechen. Die Thermografie stellt auch eine geeignete Maßnahme zum vorbeugenden Brandschutz in Betrieben dar und bietet somit ein hohes Potential für ein erfolgreiches Arbeitsschutz- und Sicherheitsmanagement. Sie kann bei umfassender Anwendung unter Umständen zu einer Reduktion von Versicherungsprämien führen und damit kann ihr industrieller Einsatz vor allem auch wirtschaftlich begründet werden. Andere wichtige Einsatzfelder sind beispielsweise die Überwachung von Prozesstemperaturen zur Einhaltung prozesstypischer Temperaturverläufe in verfahrenstechnischen Produktions- oder Umwandlungsprozessen. [vgl. 109]

Eine weitere Art der thermografischen Messung stellt die sogenannte „aktive Thermografie“ dar. Diese wird vor allem in der industriellen Fertigung aber zum Teil ebenfalls bereits in der Instandhaltung (vornehmlich Luft- und Raumfahrt) eingesetzt. Sie dient z.B. der Zustandsanalyse von Schichtdicken oder dem Nachweis von Fehlern und Unregelmäßigkeiten in Werkstücken. Dabei wird mit einer zusätzlichen externen Energiequelle ein zeitlich veränderlicher Wärmestrom im Prüfobjekt erzeugt, welcher zu Diffusionsprozessen führt, die mit Hilfe der Wärmebildkamera sichtbar gemacht werden können. [vgl. 119]



5.2.3 Normen in der Temperaturmessung

Die Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungen zur Temperaturmessung führen auch zu einer ebenso großen Bandbreite an Industrienormen die für einzelne Bereiche entwickelt wurden. Tabelle 24 stellt einen Auszug an aktuellen Normen und Richtlinien, mit besonderem Fokus berührungsloser Temperaturmessverfahren dar. Sie erhebt aber in keinem Falle den Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 24: Auszug aktueller Normen und Richtlinien zur Temperaturmessung [113]

Norm, Richtlinie, Techn. Regel	Titel
DIN 54190	Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung
DIN 54190-1:2004 [114]	Allgemeine Grundlagen
DIN 54190-2:2005 [115, 116]	Geräte
DIN 54190-3:2006 [117]	Begriffe
DIN 54191:2009 [118]	Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung elektrischer Anlagen
DIN 54192:2010(Entwurf) [119]	Zerstörungsfreie Prüfung – Aktive Thermografie
DIN 54162:2006 [120]	Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal für die thermografische Prüfung – Allgemeine und spezielle Grundlagen für Stufe 1, 2 und 3
ISO 18434-1:2008 [121]	Zustandsüberwachung und –diagnostik von Maschinen – Thermografie – Teil 1: Allgemeine Methoden
ISO 18436-7:2008 [122]	Zustandsüberwachung und –diagnostik von Maschinen – Anforderungen an die Qualifizierung und Beurteilung von Personal – Teil 7: Thermografie
VDI/VDE 3511	Technische Temperaturmessungen
VDI/VDE 3511 Blatt 1:1996 [123]	Grundlagen und Übersicht über besondere Temperaturmessverfahren
VDI/VDE 3511 Blatt 2:1996 [124]	Berührungsthermometer
VDI/VDE 3511 Blatt 3:1994 [125]	Messverfahren und Messwertverarbeitung für elektrische Berührungsthermometer
VDI/VDE 3511 Blatt 4:2010 [126]	Strahlungsthermometrie
VDI/VDE 3511 Blatt 4.2:2002 [127]	Ergänzungen – Erhaltung der Spezifikation von Strahlungsthermometern
VDI/VDE 3511 Blatt 4.3:2005 [128]	Strahlungsthermometrie – Standard-Test-Methoden für Strahlungsthermometer mit einem Wellenlängenbereich
VDI/VDE 3511 Blatt 4.4:2005 [129]	Strahlungsthermometrie – Kalibrierung von Strahlungsthermometern
VDI/VDE 3511 Blatt 5:1994 [130]	Einbau von Thermometern
VDI 2878 Blatt 1:2010(Entwurf) [131]	Anwendung der Thermografie zur Diagnose in der Instandhaltung – Allgemeine Anforderungen sowie Hinweise für Entscheidungsträger und Verantwortliche
VdS 2858:2004 [132]	VdS Schadenverhütung – Thermografie in elektrischen Anlagen – Ein Beitrag zur Schadenverhütung und Betriebssicherheit

5.2.4 Einführung einer Überwachungsmethode mit thermischem Messprinzip

Die Einführung eines pyrometrischen oder thermografischen Überwachungssystems bedingt einen gewissen zeitlichen Planungshorizont. Eine systematische Vorgehensweise bei der Implementierung einer solchen Inspektionsmethode ist unbedingt einzuhalten, um möglichst früh fundierte Aussagen zum Zustand einer Anlage treffen zu können. MÜHLBERGER [135] spricht in diesem Zusammenhang von einem 3-Phasen Konzept bei der Einführung von Infrarotdiagnosemethoden in der Instandhaltung. In Abbildung 87 ist dieses Konzept grafisch dargestellt. Aus dieser Darstellung ist der Kosten/Nutzen Effekt leicht zu erkennen. Zu Beginn, d.h. in Phase 1, ist in Folge der Anschaffung neuer Geräte mit hohen Investitionskosten zu rechnen. Diese Kosten nehmen dann Schritt für Schritt ab und pendeln sich in Phase 3 auf einem gleichbleibenden Niveau ein.

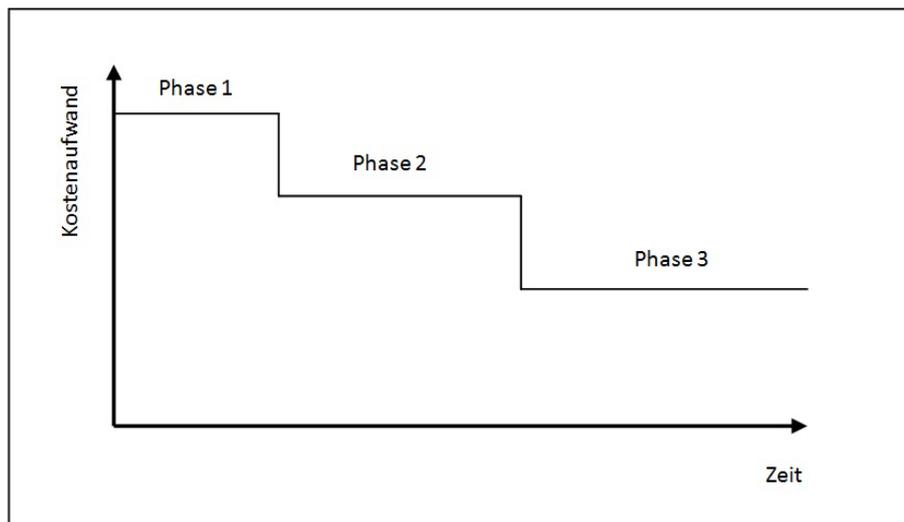


Abbildung 87: 3-Phasen der Implementierung eines Infrarotmesssystems aus MÜHLBERGER [135]

Dabei bedeuten die einzelnen Phasen [vgl. 135]:

- **Phase 1 – Vorbereitung**
Konzept; Gerätebeschaffung; Vorbereitung einer Datenbank;
- **Phase 2 – Anlagenauswahl**
Anweisungen und Benchmarks ermitteln (Normen, Herstellerangaben, usw.)
Messanwendung prüfen; Messverfahren ausarbeiten; Überwachungsintervall festlegen;
- **Phase 3 – Kontinuierliche Messung**
Messung durchführen; Auswertung und Interpretation der Messergebnisse;
Konsequenzen ableiten; Dokumentation;

5.3 Praktische Umsetzung

Da die Thermografie als Diagnosemethode in der zustandsorientierten Instandhaltung ein sehr breites Einsatzfeld aufweist, gilt es in einem ersten Schritt festzulegen, in welchen Bereichen man die Thermografie zur Zustandsbeurteilung einzusetzen gedenkt.

Sie kann einerseits zur Überwachung elektrischer Einheiten, sowie andererseits zur Lagerdiagnostik in rotierenden Maschinen eingesetzt werden.

Da sich die vorhandene firmeninterne Risikoanalyse (siehe dazu umfassend KÖßLBACHER/WEILER [1]) hauptsächlich auf rotierende Maschinen beschränkt, schien es in einer ersten Überlegung sinnvoll, die Thermografie als unterstützendes Diagnose-Tool zur Schwingungsmessung anzuwenden, um Lagerschäden frühzeitig erkennen zu können. Diese Überlegung wurde jedoch sehr bald wieder verworfen, da die Aussagekraft der Thermografie im Bereich der Lagerdiagnostik, im Vergleich zur Schwingungsmessung, nur einen geringen Mehrwert liefern kann. Die Schwingungsmessung ist im Bereich der Lagerdiagnose zu einem viel früheren Zeitpunkt in der Lage, Veränderungen im Lager, sowie sich anbahnende Schäden festzustellen, als dies durch die Thermografie möglich ist. Daher würde ein paralleler Einsatz von Schwingungsmessung und Thermografie hier in erster Linie zu organisatorischem Mehraufwand führen und der Nutzen würde eher gering bleiben.

Der Bereich, in dem die Thermografie ihre Stärken ausspielen kann, ist zweifelsfrei die Überwachung elektrischer Anlagen. Im Vordergrund steht hier das Erkennen fehlerhafter Klemmverbindungen in elektrischen Anlagen, das Auffinden von asymmetrischen Belastungsfällen, sowie die Identifikation von schadhaften elektrischen Bauteilen. Die Thermografie erweist sich aber nicht nur als geeignete Methode für die zustandsorientierte Instandhaltung, sondern liefert hier auch einen wichtigen Beitrag zur Brandverhütung und Betriebssicherheit. [vgl. 133]

Daher befasst sich dieses Kapitel mit der technischen Einführung und Umsetzung von thermografischen Überwachungsmaßnahmen im Bereich der elektrischen Anlagen in den Müllverbrennungsanlagen Spittelau und Flötzersteig der Fernwärme Wien GmbH. Ferner werden auch wirtschaftliche und rechtliche Aspekte, die im Zusammenhang mit der Einführung einer solchen zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie von Bedeutung sind, betrachtet.



5.3.1 Technische Maßnahmen

5.3.1.1 Eingesetzte Thermografiegeräte

Die Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung aus Abschnitt 5.1 sind für die Auswahl und den richtigen Einsatz von Wärmebildkameras von entscheidender Bedeutung. Besonders hervorzuheben in diesem Zusammenhang ist das Emissionsverhalten realer Objekte.

So wird in Wärmebildkameras meist ein Standard-Emissionswert von 0,95 eingestellt, welcher für die meisten Oberflächen gut geeignet ist. Für Materialien die ein sehr geringes Emissionsvermögen aufweisen (vgl. Abbildung 68), ergibt dieser voreingestellte Emissionswerte allerdings sehr ungenaue Ergebnisse. [vgl. 137]

Um diese möglichen Fehlmessungen auszuschließen, erlauben einige Wärmebildgeräte das manuelle Einstellen des Emissionswertes, während dies bei anderen Geräten nicht möglich ist.

Nur die Kenntnis der theoretischen Grundlagen, sowie der Spezifikationen der eingesetzten Hardware erlaubt es, mögliche Messfehler als solche zu erkennen und diese durch gezielte Gegenmaßnahmen auszuschließen, oder Messergebnisse zumindest kritisch zu hinterfragen.

In Tabelle 25 sind die an den Standorten Spittelau und Flötzersteig vorhandenen Wärmebildgeräte mit den wichtigsten technischen Spezifikationen angeführt.

Tabelle 25: Spezifikationen der eingesetzten Wärmebildgeräte [137, 138]

Werk	Spittelau	Flötzersteig
Gerät	Fluke Ti25	Fluke Ti40
Temperaturmessung		
Temperaturmessbereich	-20°C bis +350°C	-20°C bis +350°C
Ungenauigkeit von Temp. Messungen	±2°C oder 2% (bei 25°C); es gilt der größere der beiden Werte	±2°C oder 2% (bei 25°C); es gilt der größere der beiden Werte
Einstellbarer Emissionswert	Ja	Ja
Abbildungsleistung		
Detektortyp	Bolometermatrix 160x120, ungekühltes Mikrobolometer	160x120 FPA (Focal Plane Array), VOX (Vanadiumoxid), ungekühltes Mikrobolometer
Temperaturauflösung (NETD)	≤0,1°C bei 30°C (100mK)	≤0,090°C bei 30°C (90mK)
Infrarot-Spektralbereich	7,5 bis 14µm (langwellig)	8 bis 14µm (langwellig)
Mindestfokusabstand	46cm	50cm
Standard Infrarotobjektiv		
Räumliche Auflösung (IFOV)	2,5mrad	2,6mrad
Mindestfokusabstand	15cm	15cm

5.3.1.2 Anlagenauswahl

Da die bestehende Risikoanalyse, wie bereits erwähnt, hauptsächlich rotierende Maschinen beinhaltet, musste für den Bereich der elektrischen Anlagen eine erweiterte Auswahl an zur Thermografie geeigneten Elektroanlagen durchgeführt werden. Dabei wurden mit Hilfe eines elektrischen Schaltplanes, ausgehend von der Hochspannungsverteilung bis hin zu den Niederspannungshauptverteilungen, alle zur Thermografieüberwachung geeigneten Anlagen dokumentiert und einer ersten Messung unterzogen.

Die Bereiche

- 110kV Schaltanlagen, sowie
- Umspanntrafos 110kV / 10kV

scheiden hier bereits aus, da diese extern durch die Firma Wienstrom gewartet werden und daher kein Zutritt zu diesen Anlagen seitens der Fernwärme Wien besteht.

Auch der Bereich der Mittelspannungsschaltanlagen erweist sich bei genauerer Betrachtung für die Thermografie als wenig geeignet, da die Zugänglichkeit der einzelnen Anlagenteile aufgrund der elektrischen Kapselung nicht gewährleistet ist.

Als geeignet erweisen sich hingegen die Bereiche:

- Eigentrafos 10kV / 0,4kV bzw. 0,7kV
- Frequenzumrichter
- USV und gesicherte Gleichspannungsversorgung
- Niederspannungshauptverteilung
- Notstromaggregat

Somit wurden im Werk Spittelau in einem ersten Schritt 52 und im Werk Flötzersteig 46 elektrische Anlagen definiert, welche in Zukunft periodisch einer Überwachung unterzogen werden (siehe Tabelle 26).



Tabelle 26: Anlagen zur Thermografie

Spittelau			Flötzersteig		
	Nr.	Objekt		Nr.	Objekt
Eigentrafos	T01	Trafo MK1	Eigentrafos	T01	Trafo 1 MKA
	T02	Trafo MK1 / MK2		T02	Trafo 2 MKA
	T03	Trafo MK2		T03	Trafo 3 MKA
	T04	Trafo MK1 Saugzuggebläse		T04	Trafo 4 RRA
	T05	Trafo MK2 Saugzuggebläse		T05	Trafo 5 Denox
	T06	Trafo Netzpumpe 3	Frequenzumrichter	F01	FU Müllkran 1
	T07	Trafo Feuerlöschpumpe 1		F02	FU Müllkran 2
	T08	Trafo NSHV Nord		F03	FU Denox 1
	T09	Trafo NSHV Süd WAB (obere Ebene)		F04	FU Denox 2
	T10	Trafo NSHV Süd Allg. (untere Ebene)		F05	FU Primärluftgebläse 1
	T11	Trafo Feuerlöschpumpe 2		F06	FU Primärluftgebläse 2
	T12	Trafo Netzpumpe 1		F07	FU Primärluftgebläse 3
	T13	Trafo Netzpumpe 2		F08	FU Sekundärluftgebläse 1
	T14	Trafo Allg.		F09	FU Sekundärluftgebläse 2
	T15	Trafo Allg. / HWK		F10	FU Sekundärluftgebläse 3
	T16	Trafo HWK		F11	FU Saugzuggebläse 1
	T17	Trafo HWK1 Frischluftgebläse		F12	FU Saugzuggebläse 2
	T18	Trafo HWK2 Frischluftgebläse		F13	FU Saugzuggebläse 3
Frequenzumrichter	F01	FU MK1 Saugzuggebläse	Niederspannungshauptverteilung	N01	NSHV 400V RRA Kuppl. Zu RRA/MKA
	F02	FU MK2 Saugzuggebläse		N02	NSHV 400V RRA Trafo 4 Einspeisung
	F03	FU Netzpumpe 3		N03	NSHV 400V RRA Feld 0
	F04	FU Netzpumpe 1		N04	NSHV 400V RRA Linie 1
	F05	FU Netzpumpe 2		N05	NSHV 400V RRA Linie 2
	F06	FU HWK1 Frischluftgebläse		N06	NSHV 400V RRA Linie 3
	F07	FU HWK2 Frischluftgebläse		N07	NSHV 400V RRA Feld 4
	F08	FU Netzpumpe 4		N08	NSHV 400V RRA Kompensation
	F09	FU Rez. Gebläse HWK 1		N09	NSHV 400V ARA Allgemein
	F10	FU Rez. Gebläse HWK 2		N10	NSHV 400V ARA Allgemein
	F11	FU Denox Gebläse 1		N11	NSHV 400V ARA Allgemein
	F12	FU Denox Gebläse 2		N12	NSHV 400V ARA KFP 1
	F13	FU Erzeuger Pumpe 1 HWK 1		N13	NSHV 400V ARA KFP 2
	F14	FU Erzeuger Pumpe 2 HWK 1		N14	NSHV 400V ARA NAOH
	F15	FU Erzeuger Pumpe 3 HWK 2		N15	NSHV 400V ARA FU
	F16	FU Erzeuger Pumpe 4 HWK 2		N16	NSHV Kompensation 1
	F17	FU Erzeuger Pumpe 1 MK		N17	NSHV Kompensation 1 BFB06.3
	F18	FU Erzeuger Pumpe 2 MK		N18	NSHV Kompensation 1 BFB07.3
	F19	FU Erzeuger Pumpe 3 MK		N19	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1
	F20	FU Erzeuger Pumpe 4 MK		N20	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2
	F21	FU MK 1 Frischluftgebläse		N21	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)
	F22	FU MK 2 Frischluftgebläse		N22	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3
	F23	FU Druckerhöhungspumpe 1 AKH 2		N23	NSHV LS Kupplung zu RG
	F24	FU Druckerhöhungspumpe 2 AKH 2		N24	NSHV LS Abgang Reserve
NSHV	N01	NSHV 400V MK1		N25	NSHV LS Müllkran
	N02	NSHV 400V MK2		N26	NSHV LS Kleinverbraucher 1
	N03	NSHV Nord		N27	NSHV LS Kleinverbraucher 2
	N04	NSHV Süd WAB (obere Ebene)		N28	USV-Unterverteiler
	N05	NSHV Süd Allgemein (untere Ebene)			
	N06	NSHV 400V Allgemein			
	N07	NSHV 400V HWK 1+2			
	N08	0,4kV Notstromschiene 2 MK			
	N09	0,4kV Notstromschiene 1 Allgemein			
	N10	Notstromverteilung Allg. II			

5.3.1.3 Risikoanalyse

Wie bereits erwähnt, erwies sich die bestehende Risikoanalyse zur Definition des notwendigen Überwachungsintervalls, für die ausgewählten elektrischen Anlagen, als wenig geeignet. Um dem, für die thermografische Überwachung notwendigen Personaleinsatz einen vertretbaren technologischen sowie ökonomischen Rahmen zu geben, ist eine Abstufung des Inspektionsintervalls nach unterschiedlichen Risikoklassen jedoch eine notwendige Vorgehensweise und kann in Hinblick auf die Implementierung eines zustandsorientierten Instandhaltungskonzeptes bereits als gängige Praxis angesehen werden. Somit wurde zur Beurteilung der in Tabelle 26 angeführten Elektro-Anlagen eine verkürzte Form der Risikoanalyse aus KÖßLBACHER/WEILER [1] gewählt, an welcher pro Werk jeweils drei Mitarbeiter aus den Bereichen Elektrotechnik und Betrieb der Fernwärme Wien GmbH teilnahmen.

Da die Vorgehensweise bei der Erstellung einer solchen Risikoanalyse, als auch das Prozedere der Auswertung einer solchen bereits umfassend und detailliert in KÖßLBACHER/WEILER [1] abgehandelt wurde und es auch nicht Teil dieser Arbeit sein soll, werden hier nur die Ergebnisse dieser Bewertung angeführt. Die Auswertung wurde jedoch streng nach der in [1] angeführten Systematik vorgenommen und kann daher, zur vollständigen Nachvollziehbarkeit, dieser entnommen werden. Die dazu notwendigen Einzelergebnisse der Risikobewertung sind den Anhängen D und E zu entnehmen.

Die Lage der bewerteten Anlagen in der Risikomatrix sind für das Werk Spittelau der Tabelle 27 zu entnehmen und für das Werk Flötzersteig der Tabelle 29. Redundante Anlagen sind dabei gestrichelt dargestellt. Sie werden im Endergebnis (siehe Tabelle 28 und Tabelle 30) eine Risikoklasse tiefer eingestuft.



Tabelle 27: Risikomatrix mit den zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Spittelau

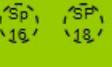
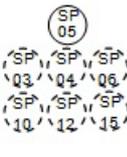
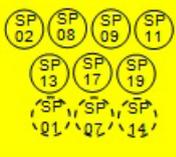
Eintrittswahrscheinlichkeit	Häufig W4	III	II	I	I
	kann auftreten W3	III			
	Selten W2				II
	sehr unwahrscheinlich W1	IV	IV	III	III
		Gering S1	Erheblich S2	Schwer S3	Katastrophal S4
Schadensausmaß					

Tabelle 28: Endbewertung der zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Spittelau

Nr.	Anlage	Bewertung		Risikoklasse	
		Schaden	Wahrsch.	lt. Matrix	reduziert
SP01	Trafo MK	3	2	II	III
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	3	2	II	II
SP03	Trafo Netzpumpe	2	2	III	IV
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	2	2	III	IV
SP05	Trafo NSHV Nord	2	2	III	III
SP06	Trafo NSHV Süd	2	2	III	IV
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	3	2	II	III
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	3	2	II	II
SP09	FU MK Saugzuggebläse	3	2	II	II
SP10	FU Netzpumpe 1,2,3	2	2	III	IV
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	3	2	II	II
SP12	FU Netzpumpe 4	2	2	III	IV
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	3	2	II	II
SP14	FU Denox Gebläse	3	2	II	III
SP15	FU Erzeugerpumpe HWK	2	2	III	IV
SP16	FU Erzeugerpumpe MK	1	2	IV	IV
SP17	FU MK Frischluftgebläse	3	2	II	II
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	2	IV	IV
SP19	NSHV 400V MK	3	2	II	II
SP20	NSHV Nord	2	3	II	II
SP21	NSHV Süd	2	3	II	II
SP22	NSHV 400V Allgemein	2	3	II	II
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	3	3	II	II
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	4	3	I	I
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allgemein	3	3	II	II
SP26	Notstromschiene Allg. II	3	3	II	II



Tabelle 29: Risikomatrix mit den zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Flötzersteig

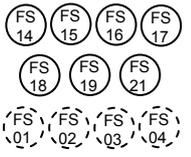
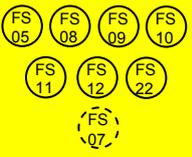
Eintrittswahrscheinlichkeit	Häufig W4	III	II	I	I
	kann auftreten W3	III	II	II	I
	Selten W2				II
	sehr unwahrscheinlich W1	IV	IV	III	III
		Gering S1	Erheblich S2	Schwer S3	Katastrophal S4
Schadensausmaß					

Tabelle 30: Endbewertung der zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Flötzersteig

Nr.	Anlage	Bewertung		Risikoklasse	
		Schaden	Wahrsch.	lt. Matrix	reduziert
FS01	Trafo 1 MKA	2	2	III	IV
FS02	Trafo 2 MKA	2	2	III	IV
FS03	Trafo 3 MKA	2	2	III	IV
FS04	Trafo 4 RRA	2	2	III	IV
FS05	Trafo 5 Denox	3	2	II	II
FS06	FU Müllkran	1	2	IV	IV
FS07	FU Denox	3	2	II	III
FS08	FU Primärluftgebläse	2	2	III	II
FS09	FU Sekundärluftgebläse	2	2	III	II
FS10	FU Saugzuggebläse	3	2	II	II
FS11	NSHV 400V RRA	3	2	II	II
FS12	NSHV ARA	3	2	II	II
FS13	NSHV Kompensation 1	1	2	IV	IV
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	2	2	III	III
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	2	2	III	III
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	2	2	III	III
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	2	2	III	III
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	2	2	III	III
FS19	NSHV LS Abgang Reserve	2	2	III	III
FS20	NSHV LS Müllkran	1	2	IV	IV
FS21	NSHV Kleinverbraucher	2	2	III	III
FS22	USV Unterverteiler	3	2	II	II



5.3.1.4 Inspektion

Die so ausgewählten und bewerteten elektrischen Anlagen sollen zukünftig einer periodischen thermografischen Überwachung unterzogen werden. Das Inspektionsintervall wird dabei an die Risikoklasse der jeweiligen Anlage angepasst (siehe dazu Abschnitt 5.3.2.1). Dabei muss dem Zeitpunkt der Inspektion eine nicht unwesentliche Rolle zugeordnet werden, da es einerseits bei jeder Messung für eine erfolgreiche Interpretation der Ergebnisse wichtig ist, den Betriebszustand der jeweiligen Anlage zu kennen und andererseits der Zeitpunkt so zu wählen ist, dass auch von temporär betriebenen Anlagen (Notstrom, redundante Systeme) brauchbare Messergebnisse erzielt werden können.

Im Zuge des Thermografievorganges selbst, ist die Anlage in eine geeignete Anzahl von Messstellen zu unterteilen, um alle wichtigen Bereiche einer Messung unterziehen zu können. Diese Messstellen werden für jede Anlage auf einem Thermografieblatt (siehe Anhang F und Anhang G) vermerkt. Von diesen Messstellen wird dann pro Inspektionszyklus jeweils ein Thermogramm erstellt.

5.3.1.5 Dokumentation und Interpretation

Zur Dokumentation dienen, wie bereits erwähnt, sogenannte Thermografieblätter. Auf diesen sind neben allgemeinen Informationen über die jeweilige elektrische Anlage, die einzelnen Messstellen mit fotografischer Dokumentation und die Thermogramme der letzten (maximal vier) Messungen angeführt.

Im Anschluss an eine Messung werden die Thermogramme entsprechend ihrer Messstellenzugehörigkeit in die einzelnen Thermografieblätter eingefügt. Dabei ist neben dem Datum der Messung, vor allem der zum Zeitpunkt der Messung vorherrschende Betriebszustand von besonderer Bedeutung. Dieser sollte bei jedem Messvorgang unmittelbar vor oder nach der Messung eruiert werden und ist ebenfalls am Thermografieblatt zu vermerken. Dadurch soll verhindert werden, dass Thermogramme, die zwar von ein und derselben Messstelle stammen, jedoch zu Zeitpunkten mit vollkommen unterschiedlichen Betriebsparametern der jeweiligen Anlage aufgenommen wurden, ohne Differenzierung untereinander verglichen werden.

Danach erfolgt die eigentliche Kernaufgabe der Thermografieüberwachung, die Analyse der aufgenommenen Thermogramme. Die Interpretation kann dabei unter Verwendung der in DIN 54191:2009 [118] angeführten Klassifikation erfolgen. Die Unterteilung der Klassifikation ist in Tabelle 31 dargestellt und wird am Thermografieblatt im Feld „Befund“ vermerkt, in Anlehnung an das Ampelsystem (siehe Tabelle 31) farblich unterlegt und mit einem Kommentar versehen. Sind so alle Messstellen einer Anlage d.h. eines Thermografieblattes beurteilt, wird jene Messstelle mit der kritischsten Beurteilung herangezogen und damit eine



Anlagenklassifikation vorgenommen. Das heißt, werden z. B. bei einer Anlage mit vier Messstellen, drei mit „ok“ und eine mit „TA“ (thermisch auffällig) beurteilt, so ist die Anlage ebenfalls mit „TA“ zu beurteilen. Diese Anlagenbeurteilung soll auf den ersten Seiten der Thermografieblätter erfolgen, wo auch das Datum der jeweils letzten Messung einzutragen ist (siehe Anhang F und Anhang G).

Durch die Möglichkeit, mehrere Messungen auf einem Blatt zu vereinen, sollte sich nach einigen Inspektionszyklen der Vorteil ergeben, verschiedene Messergebnisse untereinander vergleichen zu können um damit eine Entscheidungshilfe für die Interpretation vorzufinden.

Tabelle 31: Beurteilung thermischer Auffälligkeiten nach DIN 54191:2009 [118]

Klassifikation	Bedeutung	erweiterte Beschreibung
ok	keine Auffälligkeit	
TA	thermische Auffälligkeit	Zustand, der nicht mit betriebs- und bauartbedingtem Verhalten zu erklären ist.
GTA	gefährliche thermische Auffälligkeit	Thermische Auffälligkeit, die unmittelbar zu Ausfall, Brand oder Beschädigung führen kann.
kb	kein Befund möglich	
NTA	sonstige Auffälligkeit nichtthermischer Art	

Die Thermografieblätter können in elektronischer Form verwaltet werden, oder in der jeweils aktualisierten Version ausgedruckt in einem Ordner aufbewahrt werden und somit beispielsweise zur Vorlage während einer Überprüfung durch die Brandschutzversicherung herangezogen werden.

Da in der Norm DIN 54191:2009 [118] nur bedingt Anhaltswerte angegeben werden, weder wie die Klassifikation zu erfolgen hat, noch was die daraus abzuleitenden Konsequenzen betrifft, muss hier eine eigene Definition erfolgen. Eine Möglichkeit, wie die Klassifikation und die darauf anzuwendende Strategie erfolgen könnte, ist in Tabelle 32 angeführt.

Tabelle 32: Klassifikation und Strategie der einzelnen Gefährdungsstufen

	Bedeutung	Klassifikation	Strategie
GTA	Gefährliche thermische Auffälligkeit	Bei außergewöhnlich hohen Absoluttemperaturen; Bei außergewöhnlich hoher Asymmetrie; Bei offensichtlichem Bauteilversagen; Bei hoher Brandgefahr;	Instandsetzung bzw. Verbesserung Auffälligkeiten so rasch als möglich beseitigen und Anlagenzustand nach Möglichkeit verbessern.
TA	Thermische Auffälligkeit	Bei auffällig erhöhten Absoluttemperaturen; Bei auffälliger Asymmetrie; Bei möglichem Bauteilversagen; Bei Absoluttemperaturen die eine Brandgefahr darstellen können;	Inspektion (evtl. auch Instandsetzung bzw. Verbesserung) Inspektionsintervall verkürzen, evtl. zu geeignetem Zeitpunkt Instandsetzen bzw. Verbessern.
ok	Keine Auffälligkeit	Bei (für das jeweilige Bauteil) normalen Absoluttemperaturen;	Inspektion Inspektionsintervall beibehalten
NTA	Sonstige Auffälligkeit nicht thermischer Art	Bei Auffälligkeiten und Schäden nicht thermischen Ursprungs; Bei auffälligen Sicherheitsrisiken;	Inspektion (evtl. auch Instandsetzung bzw. Verbesserung) Inspektion in geeigneter Weise vertiefen, bei geeignetem Zeitpunkt Instandsetzen bzw. Verbessern.
kb	Kein Befund möglich	Bei Anlagenstillstand; Bei Sicherheitsabdeckungen die eine Messung verhindern; Bei sonstigen Umständen die keinen Befund zulassen;	Verbessern Nach Möglichkeit Maßnahmen ergreifen die einen Befund in Zukunft möglich machen.

Die Anhänge F und G beinhalten die Auflistung aller Thermografieblätter mit deren Risikoklasse, dem Datum der letzten Messung und dem für dieses Datum entsprechenden Anlagenbefund. Exemplarisch sind im Weiteren einige Thermografieblätter abgebildet, geordnet nach der Art der Anlage und dem entsprechenden elektrischen Symbol, welches die Anlage im einpoligen Übersichtsschaltbild verkörpert.

5.3.1.6 Der Thermografieprozess

Zur einheitlichen Vorgehensweise im Zuge der Thermografieüberwachung wurde der sogenannte „Thermografieprozess“ erstellt. In diesem Prozessfließbild, wie in Abbildung 88 dargestellt, sind alle notwendigen Schritte angeführt, die während eines Überwachungszyklus‘ durchlaufen werden müssen. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass nach erfolgter Messung und Interpretation der Ergebnisse, diese vom zuständigen technischen Referenten einem Quercheck unterzogen werden. Damit wird dem 4-Augen-Prinzip Rechnung getragen und man vermeidet, dass sich die Interpretationsverantwortung auf eine Person beschränkt.

Solange keine besonderen Auffälligkeiten festgestellt werden, besteht der Thermografieprozess aus einer Abfolge routinemäßiger Überwachungsarbeiten, welche bei der planmäßigen Thermografie beginnen und nach erfolgter Klassifikation enden (schwarzer Pfad im Thermografieprozess). Werden jedoch Auffälligkeiten festgestellt, welche in ihren Auswirkungen kritische Folgen mit sich ziehen können, so sind entsprechende Gegenmaßnahmen vorzunehmen (roter Pfad im Thermografieprozess). Diese Maßnahmen sind gemeinsam durch den Thermografie-Experten und den zuständigen technischen Referenten zu definieren und können sowohl aus Instandsetzungs- als auch aus Verbesserungsmaßnahmen bestehen.

Der Erfolg der durchgeführten Korrekturmaßnahme ist durch eine weitere Thermografimessung zu dokumentieren. Aus den Thermogrammen vor und nach erfolgter Korrektur ist ein Bericht zu erstellen, welcher das identifizierte Problem, sowie die getätigten Maßnahmen und das Ergebnis dieser Maßnahmen zum Inhalt hat. Die Korrekturmaßnahme sollte im Idealfall eine Reduktion der Klassifikation bewirken und damit eine Rückkehr in den routinemäßigen Überwachungszyklus zur Folge haben.



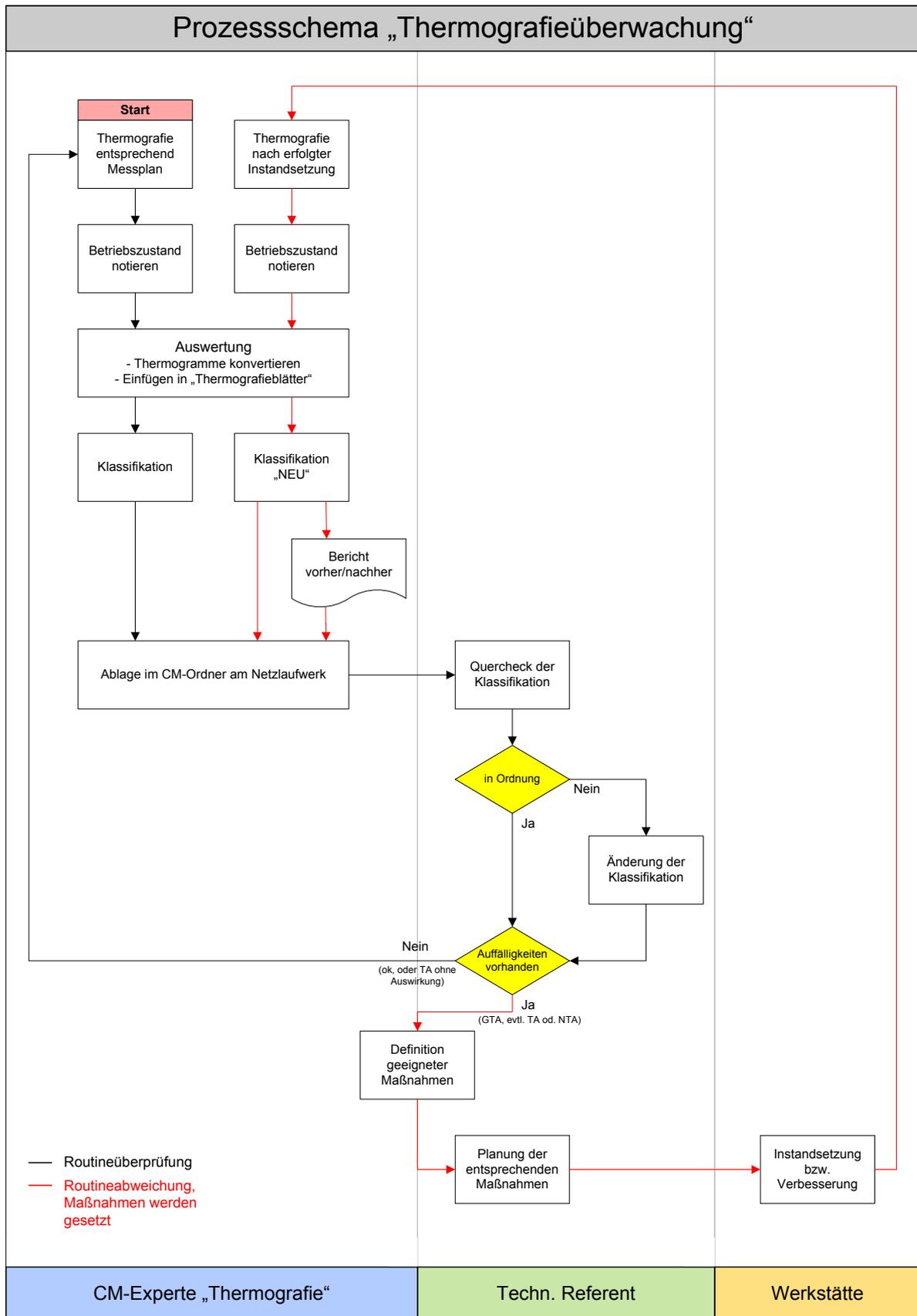


Abbildung 88: Prozessschema der Thermografieüberwachung

5.3.2 Wirtschaftliche Maßnahmen

Ein bedeutendes Problem, mit dem sich die industrielle Instandhaltung immer wieder konfrontiert sieht, ist der Vorwurf, primär ein Kostenverursacher zu sein. Dieser Vorwurf kann sich unter Umständen bei der Wahl einer offensiveren Instandhaltungsstrategie, d.h. weg von ausfallorientierter, hin zu zustandsorientierter Instandhaltung, sogar noch verschärfen. Der Grund dafür kann darin gesehen werden, dass bei einer funktionierenden vorbeugenden oder zustandsorientierten Instandhaltung viele Störfälle, Reparaturen oder Ausfälle kaum noch bzw. in ihrer Häufigkeit weit weniger oft auftreten, als dies bei einer defensiven Instandhaltungsstrategie der Fall ist. Ein Schaden der aufgrund einer offensiven Instandhaltungsstrategie gar nicht auftritt, ist schwer durch statistische oder ökonomische Kennzahlen zu berücksichtigen. Somit weisen solche Kennzahlen in erster Linie meist die finanziellen Aufwendungen eines Unternehmens oder einer Abteilung aus, welche für Maßnahmen und technische Hilfsmittel zur Zustandsbeurteilung aufgewendet werden. Das Einsparungsausmaß bzw. die Kostenreduktion, die jedoch durch die Anwendung solcher Maßnahmen erreicht werden bleibt meist im Dunkeln.

Somit liegt es meist an der Unternehmensphilosophie wie die Instandhaltung innerhalb eines Betriebes gesehen wird und ob der Schritt in Richtung einer vorbeugenden oder zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie eingeschlagen wird.

Wird die Entscheidung getroffen, Maßnahmen zur Zustandsbeurteilung von Maschinen und Anlagen einzuführen, so stellt sich bei der Implementierung einerseits die Frage, ob man diese Maßnahmen firmenintern durch Eigenpersonal, oder firmenextern durch eine Fremdvergabe bewerkstelligen will. Dazu ist es in einem ersten Schritt notwendig ein geeignetes Überwachungsintervall, sowie, den dafür erforderlichen Personalaufwand zu bestimmen. Dazu wird in diesem Kapitel, mit Hilfe der über die Risikoanalyse aus Abschnitt 5.3.1.3 festgelegten Risikobeurteilung, eine Studie über den Personalbedarf bei unterschiedlichen Überwachungsphilosophien angestellt. Abschließend wird eine Gegenüberstellung von Eigenleistung oder Fremdvergabe durchgeführt.

5.3.2.1 Personalaufwand Thermografieüberwachung

Die Zustandsüberwachung mit Hilfe der Thermografie gliedert sich grob in drei Prozesse. Diese drei Grundprozesse, „Messen“, „Konvertierung“ und „Auswertung“ liefern die spezifischen Daten, auf welchen die weitere Berechnung des Personalbedarfs beruht. Tabelle 33 zeigt die drei Grundprozesse mit den ihnen zugeteilten spezifischen Zeitwerten.



Tabelle 33: Spezifischer Zeitbedarf der drei Grundprozesse der Thermografieüberwachung

Nr	Prozess	Dauer [min]	
1.	Messen	4	pro Bild
2.	Konvertierung	0,15	pro Bild
3.	Auswertung	5	pro Bild

Messen = Aufnahme der Thermografiebilder und Erhebung des Betriebszustandes

Konvertierung = Bilder auf PC speichern und in jpeg umwandeln

Auswertung = Einfügen der Bilder in das jeweilige Thermografieblatt und Interpretation

Die in einzelne Messstellen unterteilten Elektro-Anlagen (siehe Thermografieblätter, Anhang F und Anhang G), wurden in Tabelle 34 entsprechend ihrer Risikoklasse aufgeteilt.

Tabelle 34: Anlagen zur Thermografie unterteilt nach Messstellen und Risikoklassen

	Spittelau						Flötzersteig							
	Anlagen	Messstellen					gesamt	Anlagen	Messstellen					gesamt
		RK I	RK II	RK III	RK IV				RK I	RK II	RK III	RK IV		
Trafo	18	0	4	7	7	18	5	0	2	0	6	8		
FU	24	0	50	4	92	146	13	0	30	12	20	62		
NSHV	10	6	34	0	0	40	28	0	67	15	12	94		
gesamt:	52	6	88	11	99	204	46	0	99	27	38	164		

Mit dieser Unterteilung sowie dem spezifischen Zeitbedarf der drei Grundprozesse aus Tabelle 33, ergeben sich je nach Überwachungsphilosophie und zur Verfügung stehendem Personal, eine Vielzahl an möglichen Inspektionsvarianten. Als Anhaltswert wurde daher pro Werk eine Studie erstellt, die fünf mögliche Varianten gegenüberstellt. Diese Varianten sind für das Werk Spittelau in Tabelle 35 bis Tabelle 39 angeführt. Tabelle 40 bis Tabelle 44 gelten in analoger Weise für das Werk Flötzersteig.

Die Studie reicht dabei von einer sehr offensiven Überwachungsstrategie mit einem sehr hohen Personalaufwand, wie unter Variante 1 dargestellt, bis hin zu einer eher defensiven Überwachungsstrategie mit geringem Personalaufwand wie in Variante 5. Die dazugehörigen grafischen Darstellungen (Abbildung 89 bis Abbildung 98) zeigen den Anteil der einzelnen Risikoklassen am gesamten Überwachungsaufwand.

Als Kompromiss zwischen einem vertretbaren Personalaufwand und einer angemessenen Anzahl an Messungen pro Jahr, wurde die Variante 4 ausgewählt. Dabei werden Anlagen der Risikoklasse I dreimal jährlich einer Messung unterzogen, Anlagen der Risikoklasse II zweimal jährlich und Anlagen der Risikoklasse III werden einmal jährlich überwacht. Die Anlagen der Risikoklasse IV werden alle 24 Monate einer thermografischen Überwachung unterzogen (siehe Tabelle 38 bzw. Tabelle 43). Das so ermittelte Überwachungsintervall wurde schließlich in einem übersichtlichen Messplan (siehe Anhang H und I) dargestellt.

Tabelle 35: Spittelau, Personalaufwand, Variante 1

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	2	6	1	329,4	5,5
II	3	4	21	3220,8	53,7
III	4	3	9	301,95	5,0
IV	6	2	21	1811,7	30,2
gesamt:				94,4	

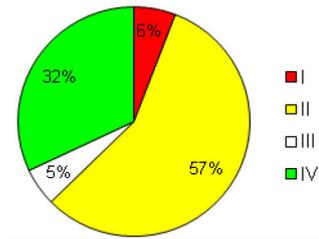


Abbildung 89: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 1

Tabelle 36: Spittelau, Personalaufwand, Variante 2

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	3	4	1	219,6	3,7
II	4	3	21	2415,6	40,3
III	6	2	9	201,3	3,4
IV	12	1	21	905,85	15,1
gesamt:				62,4	

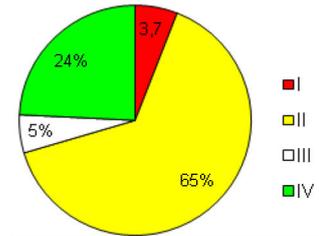


Abbildung 90: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 2

Tabelle 37: Spittelau, Personalaufwand, Variante 3

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	3	3	1	164,7	2,7
II	6	2	21	1610,4	26,8
III	12	1	9	100,65	1,7
IV	12	1	21	905,85	15,1
gesamt:				46,4	

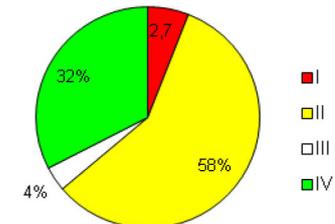


Abbildung 91: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 3

Tabelle 38: Spittelau, Personalaufwand, Variante 4

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	3	3	1	164,7	2,7
II	6	2	21	1610,4	26,8
III	12	1	9	100,65	1,7
IV	24	0,5	21	452,925	7,5
gesamt:				38,8	

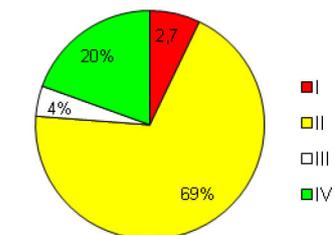


Abbildung 92: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 4

Tabelle 39: Spittelau, Personalaufwand, Variante 5

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	4	3	1	164,7	2,7
II	6	2	21	1610,4	26,8
III	12	1	9	100,65	1,7
IV	0	0	21	0	0,0
gesamt:				31,3	

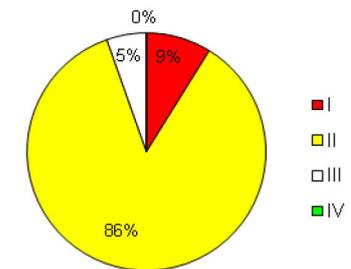


Abbildung 93: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 5

Tabelle 40: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 1

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	2	6	0	0	0,0
II	3	4	26	3623,4	60,4
III	4	3	11	741,15	12,4
IV	6	2	9	695,4	11,6
gesamt:				84,3	

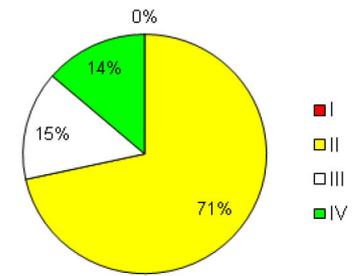


Abbildung 94: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 1

Tabelle 41: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 2

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	3	4	0	0	0,0
II	4	3	26	2717,55	45,3
III	6	2	11	494,1	8,2
IV	12	1	9	347,7	5,8
gesamt:				59,3	

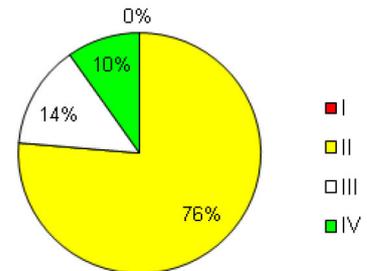


Abbildung 95: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 2

Tabelle 42: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 3

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	4	3	0	0	0,0
II	6	2	26	1811,7	30,2
III	12	1	11	247,05	4,1
IV	12	1	9	347,7	5,8
gesamt:				40,1	

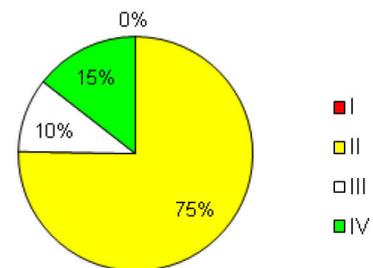


Abbildung 96: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 3

Tabelle 43: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 4

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	4	3	0	0	0,0
II	6	2	26	1811,7	30,2
III	12	1	11	247,05	4,1
IV	24	0,5	9	173,85	2,9
gesamt:				37,2	

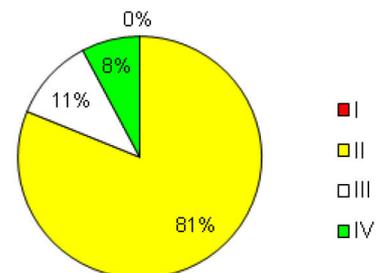


Abbildung 97: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 4

Tabelle 44: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 5

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
[-]	[Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	4	3	0	0	0,0
II	6	2	26	1811,7	30,2
III	12	1	11	247,05	4,1
IV	0	0	9	0	0,0
gesamt:				34,3	

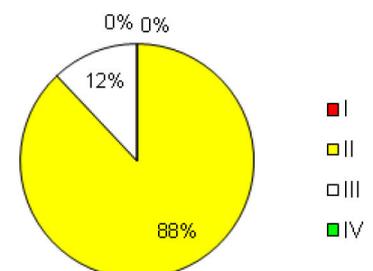


Abbildung 98: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 5

5.3.2.2 Eigenvergabe – Fremdvergabe Thermografieüberwachung

Um einen wirtschaftlichen Vergleich über die zu erwartenden Kosten bei der Einführung einer thermografischen Überwachung von Elektroanlagen in Bezug auf Eigen- oder Fremdvergabe zu erhalten, wurde eine Angebotseinholung am Dienstleistungsmarkt für eine industrielle Infrarotthermografie durchgeführt. Dieses so erhaltene Angebot beinhaltet die Erstmessung aller zur Thermografie vorausgewählten Anlagen wie in Tabelle 26 angeführt. Aus diesen Eckdaten wurde ein Kostenvergleich erstellt. Dieser ist in Tabelle 45 dargestellt. Die Kosten der Fremdvergabe verstehen sich dabei als Werte exklusive Mehrwertsteuer und ohne Berücksichtigung evtl. anfallender Reise- und Hotelkosten. Als Basis für die Eigenvergabe wurde der Mittelwert der Stundensätze der mit der Thermografie Überwachung betrauten CM-Experten der Fernwärme Wien GmbH verwendet. Der dazu notwendige Zeitaufwand ist aus den Aufstellungen der Tabelle 33 und der Tabelle 34 entnommen. Der höhere Zeitbedarf bei Eigenvergabe im Vergleich zur Fremdvergabe (siehe Pos. 2, in Tabelle 45) kann damit begründet werden, dass einerseits die Planungs- und Vorbereitungsarbeiten, wie unter Pos. 1 angeführt, hier mit eingerechnet wurden und zum anderen, dass sich die mit der Thermografie Überwachung betrauten Mitarbeiter noch in der Lernphase befinden. Das bedeutet weiter, dass sich der Zeitaufwand nach einer gewissen Einlaufphase noch verkürzen kann. Weitere Kosten, die bei einer Eigenvergabe entstehen und hier nicht berücksichtigt sind, sind die Kosten für Seminare und Schulungen der auszubildenden Thermografie-Experten.

Tabelle 45: Kostenvergleich der Erstmessung aller vorausgewählten Anlagen zur Thermografie bei Eigen- oder Fremdvergabe

Pos.	Ablauf	Eigenvergabe		Fremdvergabe	
		Dauer ¹	Kosten ²	Dauer ³	Kosten ^{3,4}
		[h]	[EUR]	[h]	[EUR]
1	Planungs- und Vorbereitungsarbeiten	-	-	-	500
2	Durchführung der Messung	25,5	918	18	1900
3	Auswertung	31,6	1137,6	-	1300
gesamt		57,1	2055,6	18	3700

¹ Die Dauer der einzelnen Positionen ergibt sich aus den Angaben aus Tabelle 33 und Tabelle 34

² Stundensatz des CM-Experten "Thermografie": 36 EUR

³ Angebotseinholung eines entsprechenden Dienstleisters für Infrarotthermografie

⁴ Kosten exkl. MwSt., sowie Reise- und Hotelkosten

Entscheidender als der Kostenvergleich der Erstmessung ist jedoch sicherlich der Vergleich der aufzubringenden Kosten während eines Kalenderjahres. Dazu wurden die Kosten der Erstmessung aus Tabelle 45, auf den tatsächlichen Überwachungsaufwand eines Kalenderjahres, nach der ausgewählten Überwachungsvariante 4 (siehe Tabelle 38 bzw.



Tabelle 43), hochgerechnet. Das so erhaltene Ergebnis ist in Tabelle 46 angeführt und weist eine deutliche Kostenersparnis bei Eigenvergabe der Thermografie Überwachung aus. Ein weiterer Effekt, der sich positiv auf dieses Ergebnis auswirkt, ist der bereits vorhandene Bestand an Thermografiegeräten in den Werken Spittelau und Flötzersteig. Dadurch ist es möglich ohne besondere Investitionskosten die Thermografie Überwachung in Eigenregie abzudecken.

Tabelle 46: Kostenvergleich aller Thermografie Messungen eines Kalenderjahres nach Überwachungsvariante 4 bei Eigen- oder Fremdvergabe

Pos.	Ablauf	Eigenvergabe		Fremdvergabe	
		Dauer ¹	Kosten ²	Dauer ³	Kosten ^{3,4}
		[h]	[EUR]	[h]	[EUR]
1	Planungs- und Vorbereitungsarbeiten	-	-	-	500
2	Durchführung der Messung	33,2	1195,2	24,2	2559,2
3	Auswertung	42,8	1540,8	-	1751,0
gesamt		76	2736	24,2	4810,2

¹ Die Dauer der einzelnen Positionen ergibt sich aus den Angaben aus Tabelle 33 und Tabelle 34

² Stundensatz des CM-Experten "Thermografie": 36 EUR

³ Angebotseinholung eines entsprechenden Dienstleisters für Infrarotthermografie, hochgerechnet auf den Überwachungsaufwand während eines Kalenderjahres nach Überwachungsvariante 4

⁴ Kosten exkl. MwSt., sowie Reise- und Hotelkosten

5.3.3 Rechtliche Aspekte

Die Überprüfung und Überwachung elektrischer Systeme kann immer aus zwei, vermeintlich unterschiedlichen, Perspektiven betrachtet werden. Da sind zum Einen die gesetzlich vorgeschriebenen Prüfungen, welche in erster Linie dem Personenschutz dienen und zum Anderen die Prüfungen des Anlagenzustandes um die Verfügbarkeit einer Anlage zu steigern. Da man jedoch allgemein davon ausgeht, dass 30% aller Brände elektrische Energie als Ursache haben und das Brandrisiko durch regelmäßige Überprüfung elektrischer Systeme, ungeachtet der Intention der Überprüfung, erheblich reduziert werden kann, tragen beide Sichtweisen dazu bei, den Personenschutz innerhalb eines Unternehmens deutlich zu erhöhen. [vgl. 159]

Im Folgenden werden die nationalen gesetzlichen Bestimmungen, in welchen die Überprüfung elektrischer Anlagen geregelt ist, kurz vorgestellt und die wichtigsten Aussagen bezüglich dieser Arbeit wiedergegeben. Des Weiteren wird versucht, die in diesem Kapitel behandelte thermografische Überwachung elektrischer Anlagen, dem Inhalt der einzelnen Bestimmungen thematisch zuzuordnen.

5.3.3.1 Elektrotechnikgesetz (ETG) – 1992

Im ETG 1992 [160] werden zwar noch keine genauen Überprüfungsintervalle für elektrische Systeme genannt, es wird aber vor allem auf die Gewährleistung der Betriebssicherheit, sowie auf die Sicherheit von Personen verwiesen. In diesem Zusammenhang wird auch bereits die Instandhaltung benannt. [vgl. 159]

So heißt es in § 3 Abs. 1 unter dem Titel „Sicherheitsmaßnahmen auf dem Gebiet der Elektrotechnik“:

„Elektrische Betriebsmittel und elektrische Anlagen sind innerhalb des ganzen Bundesgebietes so zu errichten, herzustellen, instandzuhalten und zu betreiben, dass ihre Betriebssicherheit, die Sicherheit von Personen und Sachen ferner in ihrem Gefährdungs- und Störungsbereich der sichere und ungestörte Betrieb anderer elektrischer Anlagen und Betriebsmittel sowie sonstiger Anlagen gewährleistet ist.“ [160]

5.3.3.2 Elektrotechnikverordnung (ETV) – 2002

In der ETV 2002, in der Fassung 2010 [161], wird die europäische Norm ÖVE/ÖNORM EN 50110:2008 [162] für verbindlich erklärt. Darin werden allgemein gültige Maßstäbe für die



Arbeit mit elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln gegeben. So heißt es etwa zum sicheren Betrieb elektrischer Anlagen unter Punkt 4.1.101:

„Elektrische Anlagen sind den zum Zeitpunkt der Errichtung gültig gewesenen Errichtungsbestimmungen entsprechend in ordnungsgemäßem Zustand zu erhalten. Bei Änderung der Betriebsbedingungen, z.B. Art der Betriebsstätte (trocken, feucht oder explosionsgefährdet), müssen die bestehenden Anlagen den jeweiligen Anforderungen bzw. Beanspruchungen angepasst werden.“ [162]

Noch wichtiger, in Zusammenhang mit Mängeln die durch eine thermografische Überwachung elektrischer Anlagen entdeckt werden, scheint allerdings der Punkt 4.1.102 zu sein:

„Werden an und in elektrischen Anlagen Mängel beobachtet, die eine Gefahr für Personen, Nutztiere oder Sachen zur Folge haben, so sind unverzüglich Maßnahmen zur Beseitigung der Mängel zu treffen. Sofern es die Betriebsverhältnisse nicht erlauben, die Mängel unmittelbar zu beseitigen, ist die Gefahr zunächst einzuschränken, z.B. durch Absperren, Kenntlichmachen, Anbringen von Schildern. Der Anlagenverantwortliche ist unverzüglich zu benachrichtigen.

Schadhafte elektrische Betriebsmittel dürfen nicht benutzt werden, es sei denn, dass ihre Weiterbenutzung offensichtlich gefahrlos ist. Behelfsmäßig ausgebesserte Betriebsmittel dürfen nur kurze Zeit benutzt werden, wenn zwingende Gründe dies rechtfertigen, z.B. Aufrechterhalten wichtiger Betriebsfunktionen; die Instandsetzung muss unverzüglich veranlasst werden.“ [162]

Auch über die Prüfung elektrischer Anlagen werden allgemeine Aussagen getroffen, Fristen werden jedoch auch hier nicht genannt. So heißt es unter Punkt 5.3.3.1:

„Der Zweck von Prüfungen besteht in dem Nachweis, dass eine elektrische Anlage den Sicherheitsvorschriften und den Errichtungsnormen entspricht; die Prüfungen können den Nachweis des ordnungsgemäßen Zustandes der Anlage einschließen. Sowohl neue Anlagen als auch bestehende Anlagen nach Änderungen und Erweiterungen müssen vor ihrer Inbetriebnahme einer Prüfung unterzogen werden. Elektrische Anlagen müssen in geeigneten Zeitabständen geprüft werden. Wiederkehrende Prüfungen sollen Mängel aufdecken, die nach der Inbetriebnahme aufgetreten sind und den Betrieb behindern oder Gefährdungen hervorrufen können.“ [162]



Unter Punkt 5.3.3.4 wird noch einmal auf die unverzügliche Behebung von aufgedeckten Mängeln hingewiesen:

„Mängel, die eine unmittelbare Gefahr bilden, müssen unverzüglich behoben oder fehlerhafte Teile außer Betrieb genommen und gegen Wiedereinschalten gesichert werden.“ [162]

Da die thermografische Überwachung unter normalen Betriebsbedingungen durchgeführt wird, ist auch der Punkt 6.3 „Arbeiten unter Spannung“ hier besonders hervorzuheben. Dabei sind vor allem die im Anhang dieser Norm angeführten Mindestabstände zu spannungsführenden Teilen zu berücksichtigen.

5.3.3.3 Elektroschutzverordnung (ESV) – 2003

Die ESV 2003 [83] stellt eine Verordnung zum ArbeitnehmerInnenschutzgesetz (ASchG) dar und beinhaltet in den §§ 1 und 2 allgemeine Anweisungen zum Schutz von Arbeitnehmer/innen vor Gefahren durch elektrischen Strom, sowie zur Arbeit an unter Spannung stehenden Teilen mit Verweisen auf die Norm ÖVE EN 50110. Für den allgemeinen Betrieb von elektrischen Anlagen stellt die ESV 2003 [83] eine entscheidende Erweiterung dar, da in ihr unter § 3 erstmals allgemeinen Prüffristen für elektrische Anlagen angeführt werden. So heißt es etwa unter § 3 Abs. 1:

„Die Zeitabstände der wiederkehrenden Prüfungen von elektrischen Anlagen im Sinne des Punkt 5.3.3.1 der ÖVE EN 50110-1:1997-06 (EN 50110-2-100 eingearbeitet) betragen längstens fünf Jahre.“ [83]

Abschließend kann gesagt werden, dass aus rechtlicher Sicht, bei der Einführung thermografischer Überwachungsmaßnahmen an elektrischen Anlagen, vor allem die in der Norm ÖVE EN 50110 angeführten Sicherheitsabstände zu stromführenden Teilen zu beachten sind. Des Weiteren müssen identifizierte Mängel an elektrischen Komponenten, zum ehestmöglichen Zeitpunkt behoben werden.

Im Allgemeinen stellt die geplante Thermografie Überprüfung von Elektroanlagen in ihrer Art und auch in der geplanten Häufigkeit, im Vergleich zu der gesetzlich geforderten Prüffrist von fünf Jahren, eine Überprüfungsmaßnahme dar, die deutlich über die vom Gesetz geforderten Maßnahmen hinausgeht. Befolgt man diese gesetzlichen Anweisungen, so steht einer erfolgreichen Einführung einer solchen Überwachungsmethode nichts mehr im Wege.



6. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit in kompakter Art und Weise noch einmal angeführt und die daraus resultierenden Erkenntnisse diskutiert.

6.1 Bereich „Schmierung“

Im Bereich der Schmierung wurde der Fokus dieser Arbeit besonders auf das Werk Spittelau gerichtet, da die Ausgangssituation hier das größte Verbesserungspotential darlegte. Die durchgeführten Maßnahmen bestanden in aufeinanderfolgenden Einzelschritten, deren Zielsetzung eine Optimierung der Schmierstoffbewirtschaftung war. Die nachfolgend angeführten Einzelschritte wurden in Form sogenannter „Schmierblätter“ (siehe Anhang A) für jedes Aggregat zusammengeführt.

- Analyse der Ausgangssituation im Bereich der Tribologie
- Aufnahme der einzelnen Schmierstellen
- Aufnahme der eingesetzten Schmierstoffsorten
- Reduktion der Schmierstoffsorte auf ihre spezifischen Eigenschaften
- Schmierstoffsortenreduktion
- Definition der Nachschmierintervalle und –mengen

Aus den so gewonnen Daten wurde abschließend ein Schmierplan für ein Kalenderjahr erstellt (siehe Anhang B).

Im Sinne des Prozessmanagements und zur Systematisierung der Nachschmier Tätigkeiten wurde ein eigenes Prozessfließbild für den Prozess „Schmierung“ erstellt. Darin finden sowohl die routinemäßigen Wartungstätigkeiten gemäß Schmierplan, als auch außerplanmäßige Auffälligkeiten ihre Berücksichtigung (siehe Abbildung 55).

Im Zuge der wirtschaftlichen Betrachtungsweise wurde der Personalbedarf im Bereich der Nachschmierertätigkeiten für beide Werke erhoben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 47 und Tabelle 48 enthalten.

Tabelle 47: Personalaufwand Nachschmierung, Spittelau

Zeit pro Schmierungsvorgang: 5 min				
Schmierungen pro Jahr	Jahresmannstunden			[%]
	[min]	[h]		
RK I	36	180	3,0	0,7
RK II	2646	13230	220,5	49,5
RK III	128	640	10,7	2,4
RK IV	152	760	12,7	2,8
RK k.A.	2387	11935	198,9	44,6
gesamt	5349	26745	445,8	100
spezifisch**	2674,5	13372,5	222,9	

** spezifisch bedeutet in diesem Zusammenhang, bezogen auf eine Verbrennungslinie

Tabelle 48: Personalaufwand Nachschmierung, Flötzersteig

Zeit pro Schmierungsvorgang: 5 min				
Schmierungen pro Jahr	Jahresmannstunden			[%]
	[min]	[h]		
RK I	0	0	0,0	0,0
RK II	4029	20145	335,8	75,3
RK III	186	930	15,5	3,5
RK IV	2243	11215	186,9	41,9
RK k.A.	3898	19490	324,8	72,9
gesamt	10356	51780	863,0	100
ohne Rost*	7038	35190	586,5	
spezifisch**	2346	11730	195,5	

* im Werk Flötzersteig ist der Vorschubrost händisch zu schmieren, während im Werk Spittelau dieser von einer Zentralschmieranlage geschmiert wird
 ** spezifisch bedeutet in diesem Zusammenhang, bezogen auf eine Verbrennungslinie

Aus diesen Ergebnissen wird ersichtlich, dass im Werk Flötzersteig pro Jahr ca. doppelt so viel Zeit für die Nachschmierung aufgewendet werden muss, als im Werk Spittelau, was auf konstruktionsbedingte Umstände zurückzuführen ist. Bei der spezifischen Betrachtung des Zeitaufwandes pro Linie, wandelt sich das Bild allerdings in Richtung Mehraufwand im Werk Spittelau. Dies ist mit dem umfangreicheren Bestand an Aggregaten (wie in Kapitel 3 „Anlagenbeschreibung“ erörtert) zu erklären. Die Konsequenzen aus diesem Ergebnis sind die, dass im Werk Flötzersteig ca. 45% der jährlichen Arbeitszeit eines Arbeiters für Nachschmierertätigkeiten vorgesehen werden müssen. Im Werk Spittelau liegt dieser Wert bei ca. 25%. In der Praxis verschieben sich jedoch beide Prozentsätze etwas nach unten, da nicht für alle Schmierstellen ein bestimmter Arbeiter zuständig ist, sondern manche Bereiche (Müllkran, Schlackenkran) vom Produktionspersonal übernommen werden.

Den Abschluss der Schmierungsthematik bildete die engere Auswahl geeigneter Aggregate, an welchen in Zukunft eine Zustandsbeurteilung mit Hilfe einer Ölanalyse durchgeführt werden könnte, sowie der finanzielle Aufwand der für die einmalige Analyse dieser Aggregate zu erwarten ist.

6.2 Bereich „Thermografie“

Im Bereich der Thermografie bestand der Beginn dieser Arbeit in der Auswahl geeigneter elektrischer Anlagen, an welchen eine periodische thermografische Überwachung auch effektiv angewendet werden kann. Nach einer kurzen Risikobewertung wurden diese Anlagen einer umfangreichen Erstmessung unterzogen.

Die Ergebnisse dieser Erstmessung bildeten sodann die Grundlage zum Aufbau einer geeigneten Dokumentationsmethode. Dafür wurde für jede Einzelanlage ein „Thermografieblatt“ (siehe Anhang F und G) erstellt, welches Platz für jeweils vier Thermogramme einer Messstelle sowie deren individuelle Interpretation bietet. Die Interpretation der aufgenommenen Thermogramme stellt die eigentliche Kernaufgabe im Bereich der Zustandsbeurteilung mit Hilfe der Thermografie dar. Als Basis für die Klassifikation wurde dafür die Norm DIN 54191:2009 [118] herangezogen. Da diese jedoch nur die allgemeine Klassifikation beschreibt, aber kaum Hilfe bei der Interpretation der Ergebnisse liefert, wurde eine eigene Definition der unterschiedlichen Klassifikationsstufen erstellt. Diese ist in Tabelle 49 abgebildet.

Auch für die Zustandsbeurteilung mit Hilfe der Thermografie wurde ein Prozessfließbild erstellt, welches den Prozessablauf der thermografischen Überwachung in einzelnen Schritten und den jeweiligen Zuständigkeiten verdeutlicht (siehe Abbildung 88).

Um die Wirtschaftlichkeit der anzuwendenden Thermografieüberwachung zu berücksichtigen, wurde eine Studie mit fünf unterschiedlichen Überwachungsintervallen und dem damit verbundenen Personalaufwand erstellt. Als Kompromiss zwischen einem minimalen Personalaufwand und einer adäquaten Anzahl an Messungen pro Jahr, entschied man sich schließlich für die in Tabelle 50 und Tabelle 51 angeführten Intervalle.

Mit Hilfe einer Angebotseinholung eines Dienstleisters für Elektrothermografie, wurden zum Abschluss ein Kostenvergleich zwischen der Eigenleistung der Thermografieüberwachung und einer Fremdvergabe durchgeführt. Das Ergebnis dabei war, dass die Fremdvergabe pro Jahr ca. die doppelten Kosten verursachen würde, als die Eigenleistung.

Auch die rechtlichen Aspekte wurden in einem kurzen Abriss über die wichtigsten nationalen Gesetze bezüglich der Überwachung von Elektroanlagen betrachtet. Dabei kann gesagt werden, dass die Thermografie eine Maßnahme bildet, die deutlich über die vom Gesetz geforderten Prüfungsmaßnahmen hinausgeht.



Tabelle 49: Klassifikation und Strategie der einzelnen Gefährdungsstufen

	Bedeutung	Klassifikation	Strategie
GTA	Gefährliche thermische Auffälligkeit	Bei außergewöhnlich hohen Absoluttemperaturen; Bei außergewöhnlich hoher Asymmetrie; Bei offensichtlichem Bauteilversagen; Bei hoher Brandgefahr;	Instandsetzung bzw. Verbesserung Auffälligkeiten so rasch als möglich beseitigen und Anlagenzustand nach Möglichkeit verbessern.
TA	Thermische Auffälligkeit	Bei auffällig erhöhten Absoluttemperaturen; Bei auffälliger Asymmetrie; Bei möglichem Bauteilversagen; Bei Absoluttemperaturen die eine Brandgefahr darstellen können;	Inspektion (evtl. auch Instandsetzung bzw. Verbesserung) Inspektionsintervall verkürzen, evtl. zu geeignetem Zeitpunkt Instandsetzen bzw. Verbessern.
ok	Keine Auffälligkeit	Bei (für das jeweilige Bauteil) normalen Absoluttemperaturen;	Inspektion Inspektionsintervall beibehalten
NTA	Sonstige Auffälligkeit nicht thermischer Art	Bei Auffälligkeiten und Schäden nicht thermischen Ursprungs; Bei auffälligen Sicherheitsrisiken;	Inspektion (evtl. auch Instandsetzung bzw. Verbesserung) Inspektion in geeigneter Weise vertiefen, bei geeignetem Zeitpunkt Instandsetzen bzw. Verbessern.
kb	Kein Befund möglich	Bei Anlagenstillstand; Bei Sicherheitsabdeckungen die eine Messung verhindern; Bei sonstigen Umständen die keinen Befund zulassen;	Verbessern Nach Möglichkeit Maßnahmen ergreifen die einen Befund in Zukunft möglich machen.

Tabelle 50: Spittelau, Personalaufwand, Variante 4

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
	[-] [Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	3	3	1	164,7	2,7
II	6	2	21	1610,4	26,8
III	12	1	9	100,65	1,7
IV	24	0,5	21	452,925	7,5
gesamt:				38,8	

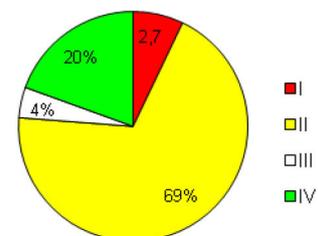


Abbildung 99: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am gesamten Inspektionsaufwand, Variante 4

Tabelle 51: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 4

RK	Mess-intervall	Anz. Messungen pro Jahr	Anz. Anlagen	Jahres-mannstunden	
	[-] [Monate]	[-]	[-]	[min]	[h]
I	4	3	0	0	0,0
II	6	2	26	1811,7	30,2
III	12	1	11	247,05	4,1
IV	24	0,5	9	173,85	2,9
gesamt:				37,2	

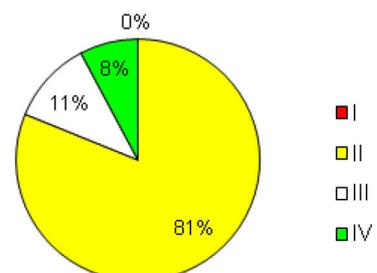


Abbildung 100: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am gesamten Inspektionsaufwand, Variante 4

7. Ausblick

Die Diagnosemethoden zur Zustandsbeurteilung mit welchen sich diese Arbeit befasst, bilden ein sehr geeignetes Mittel um langfristig in Richtung einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie zu gelangen. Werden die angedachten und zum Teil auch bereits eingeführten Maßnahmen auch in Zukunft weiterverfolgt und einer kontinuierlichen Optimierung und Verbesserung unterzogen, so ist es möglich, auf den hier behandelten Gebieten CM-Experten heranzubilden, welche in der Lage sein werden, identifizierte Probleme, durch Erfahrungswerte richtig zu interpretieren und damit Instandsetzungsmaßnahmen auf ein Minimum zu reduzieren.

Im Bereich der Schmierung ist es dafür notwendig, den erstellten Prozess der „Schmierungstätigkeit“ in seiner gesamten Ausprägung, anzuwenden. Dabei sollen die neu berechneten Nachschmierintervalle und –mengen, sowie die bereits bestehenden, bei der alltäglichen Arbeit überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Auch wird es wichtig sein im Bereich der Nachschmiertätigkeit, den intensiven Kontakt mit den Experten der Schwingungsanalyse zu suchen, da sich deren Aufgabengebiet ebenfalls auf die Lagerung rotierender Maschinen erstreckt und sich hier Abstimmungsmöglichkeiten ergeben werden. An jenen Aggregaten, die für eine Ölanalyse geeignet erscheinen, sollte eine erste Analyse des Schmier- bzw. Hydrauliköls durchgeführt werden, um somit ebenfalls das bestehende Ölwechselintervall zu überprüfen und durch die Ergebnisse der Ölanalyse entscheidende Erkenntnisse für die zukünftige Öleinsatzdauer zu erhalten. Generell ist eine Erstanalyse an ausgewählten Aggregaten sehr zu befürworten, da diese auch für die Entscheidung von evtl. einzuführenden periodischen Ölanalysen erste wichtige Hinweise liefern kann.

Im Bereich der Thermografieüberwachung stellt ebenfalls der erstellte „Thermografieprozess“ in Kombination mit dem ausgewählten Überwachungsintervall das entscheidende Kriterium dar. Hier ist es ganz besonders wichtig, dass vor allem während der Einführungsphase der thermografischen Überwachung den mit dieser Aufgabe betrauten Mitarbeitern, die notwendige Zeit und Unterstützung entgegengebracht wird. Auch die Weiterbildung in Form von Seminaren und der Erfahrungsaustausch mit Experten auf diesem Gebiet, ist in der Frühphase von entscheidender Bedeutung und sollte unbedingt berücksichtigt werden. Einen weiteren wichtigen Erfolgsfaktor stellt die kontinuierliche Pflege der aufgebauten Dokumentationsstruktur, in Form der Thermografiblätter dar. Dadurch wird gewährleistet, in Zukunft, von bereits vergangenen Messungen zu lernen und aktiv zum Aufbau einer Art „Krankheitsakte“ für die jeweilige Anlage beizutragen.



8. Verzeichnisse

8.1 Literatur

- [1] Kößlbacher M., Weiler A., „Methoden der Zustandsorientierten Instandhaltung am Beispiel der MVA Spittelau & Flötzersteig“, Bachelorarbeit, Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben (2009)
- [2] Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [3] Schmid R., „Optimierung des Reinvestitionszeitpunktes von Öltransformatoren durch systematische Anlagenwertführung und Zustandsbeurteilung“, Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz (2008)
- [4] Sturm A., Förster R., „Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung“, Stuttgart: B. G. Teubner (1990)
- [5] Sturm A., „Verfahrenskatalog Technische Diagnostik von Energieanlagen“, IH Zittau, OR-GREB-IfK Vetschau (1981) zit. nach Sturm A., Förster R., „Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung“, Stuttgart: B. G. Teubner (1990)
- [6] Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [7] Kuhn E., „Zur Tribologie der Schmierfette – Eine energetische Betrachtungsweise des Reibungs- und Verschleißprozesses“, Renningen, Expert Verlag (2009)
- [8] Gódor I., Skript zur Vorlesung „Tribologie für Maschinenelemente“, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Department Product Engineering, Montanuniversität Leoben, Stand: Wintersemester 2009/10

- [9] Jost H. P. (Chairman), „Lubrication (Tribology) Education and Research – A report on the present position and industry's needs“, London, Her Majesty's Stationery Office (1966) zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [10] Fleischer G., Gröger H., Thum H., „Verschleiß und Zuverlässigkeit“, Berlin, VEB Verlag Technik (1980)
- [11] Kuhn E., „Tribologische Beurteilung des zeitabhängigen Verhaltens von Schmierfetten“, Tribologie und Schmierstechnik, 43(1996)5 zit nach Kuhn E., „Zur Tribologie der Schmierfette – Eine energetische Betrachtungsweise des Reibungs- und Verschleißprozesses“, Renningen, Expert Verlag (2009)
- [12] Holland J., „Die Grundlagen der Reibung und ihre Bedeutung für die Funktionsfähigkeit von Maschinenelementen“, in: „Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen“ (Czichos H., federführender Autor), Grafenau, Expert-Verlag (1982) zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [13] Krause H., Scholten J., „Verschleiß – Grundlagen und systematische Behandlung“, VDI-Z. 21 Nr. 15/16 (1979) zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [14] Vogelpohl G., „Die Stribeck-Kurve als Kennzeichen des allgemeinen Reibungsverhaltens geschmierter Gleitflächen“, VDI-Z. 96 Nr. 9 (1954), zit nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [15] Roloff/Matek, „Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung“, 14. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Verlag (2000)

- [16] Archard J.F., „Contact and rubbing of flat surfaces“, J. Appl. Phys. 24 (1953), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [17] Wellinger K., Uetz H., „Gleitverschleiß, Spülverschleiß, Strahlverschleiß unter Wirkung von körnigen Stoffen“, VDI Forschungsheft 449, Forsch. Ing. Wes. 21 (1955), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [18] Föhl J., „Möglichkeiten des Verschleißschutzes von Bauteilen gegenüber abrasivem und erosivem Verschleiß“, in: Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen, Grafenau, Expert-Verlag (1982), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [19] Zum Gahr, K.-H., „Furchungverschleiß duktiler Metalle“, Z. Metallkde. 73 (1982), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [20] e-mail Kontakt mit Herrn Michal Stengl, THD Engineer, ExxonMobil Business Support Center Czechia s.r.o., Praha, Anfrage: 01.10.2010
- [21] Holm R., „Electrical Contacts“, Stockholm, Gebers Verlag (1946), Berlin, Springer (1967), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [22] Lancaster J.K., „A review of the influence of environmental humidity and water on friction, lubrication and wear“, Tribology International 23 (1990), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [23] Quinn T.F.J., „The role of oxidation in the mild wear of steel“, Brit. J. Appl. Phys. 13 (1962), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und



- Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [24] Hong H., Hochman R.F., Quinn T.F.J., „A New Approach to the Oxidational Theory of Mild Wear“, Tribol. Trans. 31 (1988) zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [25] Suh N.P., „The delamination theory of wear“, Wear 25 (1973), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [26] Waterhouse R.B., „Fretting corrosion“, Oxford: Pergamon Press (1972), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [27] DIN EN 60422 (VDE 0370-2): Richtlinie zur Überwachung und Wartung von Isolierölen auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln (IEC 60422:2005); Deutsche Fassung EN 60422:2006, Ausgabe: 2007-02
- [28] Stribeck R., „Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager“, VDI-Z. 46 (1902), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [29] Glaeser W.A., Erickson R.C. Dufrane K.F., „Tribology: The science of combatting wear“, Lubric. Engng. 48 Nr. 11, zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [30] Bartz W.J., „Reibungs und Schmierzustände“, in: Bartz W.J. (Hrsg.), „Handbuch der Betriebsstoffe für Kraftfahrzeuge Teil 2“, Expert, Grafenau (1983), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [31] Dowson D., Higginson G.R., „Elastohydrodynamic Lubrication – SI Edition“, Pergamon, Oxford (1977), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch –



- Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [32] DIN 1306: Dichte – Begriffe, Angaben, Ausgabe: 1984-06
- [33] DIN 51757: Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen – Bestimmung der Dichte, Ausgabe: 2010-03
- [34] DIN EN ISO 3675: Rohöl und flüssige Mineralölerzeugnisse – Bestimmung der Dichte im Labor – Aräometer-Verfahren (ISO 3675:1998), Ausgabe: 1999-11
- [35] DIN EN ISO 12185: Rohöl und Mineralölerzeugnisse – Bestimmung der Dichte – U-Rohr-Oszillationsverfahren (ISO 12185:1996), Ausgabe: 1997-11
- [36] DIN ISO 2049: Mineralölerzeugnisse – Bestimmung der Farbe (ASTM-Skala) (ISO 2049:1996), Ausgabe: 2001-06
- [37] DIN EN ISO 2592: Mineralölerzeugnisse – Bestimmung des Flamm- und Brennpunktes – Verfahren mit offenem Tiegel nach Cleveland (ISO 2592:2000), Ausgabe: 2002-09
- [38] DIN 51755: Prüfung von Mineralölen und anderen brennbaren Flüssigkeiten; Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel, nach Abel-Pensky, Ausgabe: 1974-03
- [39] DIN ISO 2977: Mineralölerzeugnisse und Lösemittel aus Kohlenwasserstoffen – Bestimmung des Anilinpunktes und Misch-Anilinpunktes (ISO 2977:1997), Ausgabe: 2000-11
- [40] DIN ISO 3733: Mineralölerzeugnisse und bituminöse Bindemittel – Bestimmung des Wassergehaltes – Destillationsverfahren (ISO 3733:1999), Ausgabe: 2003-02
- [41] DIN 51777-1: Prüfung von Mineralöl-Kohlenwasserstoffen und Lösemitteln; Bestimmung des Wassergehaltes nach Karl Fischer; Direktes Verfahren, Ausgabe: 1983-03

- [42] DIN 51777-2: Prüfung von Mineralöl-Kohlenwasserstoffen und Lösemitteln; Bestimmung des Wassergehaltes nach Karl Fischer; Indirektes Verfahren, Ausgabe: 1974-09
- [43] ISO 3734: Mineralölerzeugnisse – Bestimmung des Gehaltes an Wasser und Sediment in Rückstandsölen – Zentrifugenverfahren, Ausgabe: 1997-08
- [44] ISO 2137: Mineralölerzeugnisse und Schmierstoffe – Bestimmung der Konuspenetration von Schmierfetten und Petrolatum, Ausgabe: 2007-12
- [45] DIN 51579: Prüfung von Paraffin – Bestimmung der Nadelpenetration, Ausgabe: 2010-03
- [46] DIN ISO 3448: Flüssige Industrie-Schmierstoffe – ISO-Viskositätsklassifikation (ISO 3448:1992), Ausgabe: 2010-02
- [47] SAE J 306: Automotiv Gear Lubricant Viscosity Classification, Ausgabe: 2005-06
- [48] SAE J 300: Engine Oil Viscosity Classification, Ausgabe: 2009-01
- [49] DIN 51818: Schmierstoffe; Konsistenz-Einteilung für Schmierfette; NLGI-Klassen, Ausgabe: 1981-12
- [50] DIN ISO 281: Wälzlager – Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (ISO 281:2007), Ausgabe: 2010-10
- [51] DIN 51825: Schmierstoffe – Schmierfette K – Einteilung und Anforderungen, Ausgabe: 2004-06
- [52] Mullet G.W., „Grease lubrication ob rolling bearings“, Tribology Int. 6 Nr 2, zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [53] FAG Kugelfischer Georg Schäfer AG, „Schmierung von Wälzlagern“, Publ. Nr. WL 81 115/4 DA, Schweinfurt, (2002)

- [54] DIN 51502: Schmierstoffe und verwandte Stoffe; Kurzbezeichnung der Schmierstoffe und Kennzeichnung der Schmierstoffbehälter, Schmiergeräte und Schmierstellen, Ausgabe: 1990-08
- [55] DIN 51501: Schmierstoffe; Schmieröle L-AN; Mindestanforderungen, Ausgabe: 1979-11
- [56] DIN 51517-1: Schmierstoffe – Schmieröle – Teil1: Schmieröle C; Mindestanforderungen, Ausgabe: 2009-06
- [57] DIN 51517-2: Schmierstoffe – Schmieröle – Teil 2: Schmieröle CL; Mindestanforderungen, Ausgabe: 2009-06
- [58] DIN 51517-3: Schmierstoffe – Schmieröle Teil 3: Schmieröle CLP; Mindestanforderungen, Ausgabe: 2009-06
- [59] ISO 6743-9: Schmierstoffe, Industrieöle und verwandte Erzeugnisse (Klasse L) – Klassifikation – Teil 9: Familie X (Fette), Ausgabe: 2003-04
- [60] Wuttke W., „Tribophysik“, Leipzig, VEB Fachbuchverlag (1986), zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [61] Wahl H., „Verschleißprobleme im Braunkohlenbergbau“, Braunkohle 3 (1951) zit. nach Czichos H., Habig K.-H., „Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2003)
- [62] Bartz W.J., „Kraftübertragung durch Lagerungen“, in: Bartz W.J. (Hrsg.), „Gleitlager als moderne Maschinenelemente“, Expert, Ehningen (1993), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [63] Wills J.G., „Lubrication fundamentals“, Marcel Dekker, New York (1980), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)

- [64] Congram G.E., "Proper bearing lubrication can prolong equipment life", Oil an Gas J. 75 Nr 7 (1977), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [65] Bartz W.J., "Schmierfette – Zusammensetzung, Eigenschaften, Prüfung und Anwendung", Renningen-Malmsheim, Expert Verlag (2000)
- [66] DIN 51515-1: Schmierstoffe und Reglerflüssigkeiten für Turbinen – Mindestanforderungen – Teil 1: Turbinenöle TD für normale thermische Beanspruchung, Ausgabe: 2010-02
- [67] DIN 51515-2: Schmierstoffe und Reglerflüssigkeiten für Turbinen – Mindestanforderungen – Teil 2: Turbinenöle TG für erhöhte thermische Beanspruchung, Ausgabe: 2010-02
- [68] DIN 51826: Schmierstoffe – Schmierfette G – Einteilung und Anforderungen, Ausgabe: 2005-01
- [69] DIN 51509-1: Auswahl von Schmierstoffen für Zahnradgetriebe; Schmieröle, Ausgabe: 1976-06
- [70] DIN 51509-2: Schmierstoffe; Auswahl von Schmierstoffen für Zahnradgetriebe; Plastische Schmierstoffe, Ausgabe: 1988-12
- [71] Frenker-Hackfort H., „Schmierung von Rollenketten“, Konstr., Elem., Meth. 19 Nr. 4 (1982), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [72] Kraus M., „Entwicklung einer wartungsfreien Kette“, T+S Tribologie u. Schmierungstech. Tech. Ber. 08-98 (1998), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [73] Worobjew N.W., „Kettentriebe“, VEB Technik, Berlin (1953), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)



- [74] Schneider R., Brandt R., Röckert E., „Beitrag zur Schmierung von Kettentrieben“, Schmierungstech. 20 Nr 1 (1989), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [75] DIN ISO 10823: Hinweise zur Auswahl von Rollenkettenantrieben (ISO 10823:2004), Ausgabe: 2006-10
- [76] DIN ISO 10823 Berichtigung 1: Hinweise zur Auswahl von Rollenkettenantrieben (ISO 10823:2004), Berichtigung zu DIN ISO 10823:2006-10 (ISO 10823:2004/Cor. 1:2008), Ausgabe: 2009-01
- [77] DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung, Ausgabe: 2003-06
- [78] Krasemann H., „Betriebliche Maßnahmen zur Standzeitverlängerung der Druckflüssigkeit – Optimierung der Hydrauliksysteme“, T+S Tribologie u. Schmierungstech. Tech. Ber. 07-97 (1997), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [79] ISO 4406: Fluidtechnik – Hydraulik-Druckflüssigkeiten – Zahlenschlüssel für den Grad der Verschmutzung durch feste Partikel, Ausgabe: 1999-12
- [80] Ali W.Y., „Predictive maintenance by ferrographic oil analysis“, Tribologie u. Schmierungstech. 43 Nr. 6 (1996), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [81] Krethe R., „Möglichkeiten und Grenzen der Ferrographie“, T+S Tribologie u. Schmierungstech. Tech. Ber. 17-00 (2000), zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [82] DIN 51574: Prüfung von Schmierstoffen – Probenahme von Schmierölen aus Verbrennungskraftmaschinen, Ausgabe: 2004-09
- [83] Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, BGBl. II Nr. 424/2003, „424. Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit zum Schutz der Sicherheit

- und der Gesundheit der Arbeitnehmer/innen vor Gefahren durch den elektrischen Strom (Elektroschutzverordnung 2003 – ESV 2003)“, Jahrgang 2003, Ausgegeben am 12. September 2003
- [84] DIN ISO 2137: Mineralölerzeugnisse – Schmierfett und Petrolatum – Bestimmung der Konuspenetration (ISO 2137:1985), Ausgabe: 1997-08
- [85] DIN 51562-1: Viskosimetrie – Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter – Teil 1: Bauform und Durchführung der Messung, Ausgabe: 1999-01
- [86] DIN 51817: Prüfung von Schmierstoffen – Bestimmung der Ölabscheidung aus Schmierstoffen unter statischen Bedingungen, Ausgabe: 1998-04
- [87] Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH, Produkt Information „Renolit Duraplex EP 2“, PI 5-3451, PM 5, 06/09, Online unter URL: <http://www.heizoel-herrmann.de/cms/wp-content/uploads/2009/11/Fuchs-Renolit-Duraplex-EP2.pdf>, Stand: August 2010
- [88] Shell Deutschland Oil GmbH, Produkt Information „Shell Alvania RL – Hochleistungs-Mehrzweckfette für Wälz- und Gleitlager“, 03-2007, Online unter URL: http://www.mcbutikken.dk/download_pdf.php?id=558.35.70.pdf, Stand: August 2010
- [89] ASTM D 445: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), Ausgabe: 2009
- [90] ASTM D 2270: Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 and 100°C, Ausgabe: 2004
- [91] ASTM D 92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, Ausgabe: 2005
- [92] ASTM D 97: Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products, Ausgabe: 2009
- [93] DIN 51524-2: Druckflüssigkeiten – Hydrauliköle – Teil 2: Hydrauliköle HLP; Mindestanforderungen, Ausgabe: 2006-04

- [94] DIN 51524-2 Berichtigung 1: Druckflüssigkeiten – Hydrauliköle – Teil 2: Hydrauliköle HLP; Mindestanforderungen, Berichtigung zu DIN 51524-2:2006-04, Ausgabe: 2006-09
- [95] ExxonMobil Lubricants & Specialities, Produkt Information „Mobil DTE Oil Named Series – Premium Performance Circulating Lubricants“, 2007, Online unter URL: http://www.mobil.com/USA-English/Lubes/PDS/glxxenindmomobil_dte_named.pdf, Stand: August 2010
- [96] ExxonMobil Lubricants & Specialities, Produkt Information „Mobil DTE 20 Series – Hydraulic Oils“, 2007, Online unter URL: http://www.mobil.com/Germany-German/Lubes/PDS/glxxdeindmomobil_dte_20.pdf, Stand: August 2010
- [97] Schmiermittel und Sonderprodukte von ExxonMobil, Produkt Information “Mobilgear 600 Series – Gear Oil“, 2001, Online unter URL: http://www.oelmaier.de/produkte/schmierstoffe/produktinformationen/industrieeole/mobilgear_600.pdf, Stand: August 2010
- [98] ASTM D 217: Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease, Ausgabe: 2010
- [99] ASTM D 2265: Standard Test Method for Dropping Point of Lubricating Grease Over Wide Temperature Range, Ausgabe: 2006
- [100] Schmiermittel und Sonderprodukte von ExxonMobil, Produkt Information „Mobil Greasrex 47 – Automotive Grease“, 2007, Online unter URL: http://www.mobil.com/Austria-German/Lubes/PDS/EUXXDEGRSMOMobil_Greasrex_47.aspx, Stand: August 2010
- [101] Schmiermittel und Sonderprodukte von ExxonMobil, Produkt Information „Mobilux EP 0, 1, 2, 3, 460 and 004 – Grease“, 12-2005, Online unter URL: http://www.oelmaier.de/produkte/schmierstoffe/produktinformationen/fette/mobilux_ep.pdf, Stand: August 2010
- [102] ExxonMobil Lubricants & Specialities, Produkt Information „Mobiltemp SHC Series – Grease“, 2007, Online unter URL: http://www.mobil.com/USA-English/Lubes/PDS/glxxengrsmobiltemp_shc.pdf, Stand: August 2010



- [103] ExxonMobil Lubricants & Specialities, Produkt Information „Mobilfluid 125 – Extra High Performance Power Transmission Fluid“, 2007, Online unter URL: http://www.secpet.com.tr/uploads/products/files/glxxencv/mobilfluid_125.pdf, Stand: August 2010
- [104] Schmiermittel und Sonderprodukte von ExxonMobil, Produkt Information „Mobil Glygoyle 11, 22 and 30 – High Performance Lubricants“, 2007, Online unter URL: http://www.oel-maier.de/produkte/schmierstoffe/produktinformationen/industrieele/glygoyle_11_22_30.pdf, Stand: August 2010
- [105] ExxonMobil Lubricants & Specialities, Produkt Information „Mobil DTE 10M Series – Hydraulic Oils“, 2007, Online unter URL: http://www.mobil.com/USA-English/Lubes/PDS/glxxenindmobil_dte_10m.pdf, Stand: August 2010
- [106] ExxonMobil Lubricants & Specialities, Produkt Information „Mobil Delvac 1330, 1340, 1350 – Heavy Duty Diesel Engine Oils“, 2007, Online unter URL: http://www.mobil.com/Australia-English/Lubes/PDS/glxxencv/mobil_delvac_1330_1340_1350.pdf, Stand: August 2010
- [107] Middlebrook H., “Relubrication periods for antifriction bearings”, Engng. 218 Nr 11 (1978) zit. nach Möller U. J., Nassar J., „Schmierstoffe im Betrieb“, 2. Auflage, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer Verlag (2002)
- [108] Werner A., Skript zur Vorlesung „Wärmeübertragung“, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Department Metallurgie, Montanuniversität Leoben, 1. Auflage: Oktober 2008
- [109] Schuster N., Kolobrodov V.G., „Infrarotthermographie“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Weinheim, Wiley-VCH Verlag (2004)
- [110] Tipler P.A., Mosca G., „Physik für Wissenschaftler und Ingenieure“, 2. Auflage, München, Spektrum Akademischer Verlag (2006)

- [111] Schober H., „Das Sehen“, Bd. I, Darmstadt, Markewitz-Verlag (1950) zit. nach Schuster N., Kolobrodov V.G., „Infrarotthermographie“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Weinheim, Wiley-VCH Verlag (2004)
- [112] Foot J., Weltpatent WO 86/07450 (1986), zit. nach Schuster N., Kolobrodov V.G., „Infrarotthermographie“, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Weinheim, Wiley-VCH Verlag (2004)
- [113] <http://www.beuth.de> Stand: August 2010
- [114] DIN 54190-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Ausgabe: 2004-08
- [115] DIN 54190-2: Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 2: Geräte, Ausgabe: 2005-08
- [116] DIN 54190-2(Entwurf): Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 2: Geräte, Ausgabe: 2010-08
- [117] DIN 54190-3: Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 3: Begriffe, Ausgabe: 2006-02
- [118] DIN 54191: Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung elektrischer Anlagen, Ausgabe: 2009-03
- [119] DIN 54192(Entwurf): Zerstörungsfreie Prüfung – Aktive Thermografie, Ausgabe: 2010-01
- [120] DIN 54162: Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal für die thermografische Prüfung – Allgemeine und spezielle Grundlagen für Stufe 1, 2 und 3, Ausgabe: 2006-09
- [121] ISO 18434-1: Zustandsüberwachung und –diagnostik von Maschinen – Thermografie – Teil 1: Allgemeine Methoden, Ausgabe: 2008-03
- [122] ISO 18436-7: Zustandsüberwachung und –diagnostik von Maschinen – Anforderungen an die Qualifizierung und Beurteilung von Personal – Teil 7: Thermografie, Ausgabe: 2008-10

- [123] VDI/VDE 3511 Blatt 1: Technische Temperaturmessungen – Grundlagen und Übersicht über besondere Temperaturmessverfahren, Ausgabe: 1996-03
- [124] VDI/VDE 3511 Blatt 2: Technische Temperaturmessungen – Berührungsthermometer, Ausgabe: 1996-04
- [125] VDI/VDE 3511 Blatt 3: Technische Temperaturmessungen – Messverfahren und Messwertverarbeitung für elektrische Berührungsthermometer, Ausgabe: 1994-11
- [126] VDI/VDE 3511 Blatt 4: Technische Temperaturmessungen – Strahlungsthermometrie, Ausgabe: 2010-05
- [127] VDI/VDE 3511 Blatt 4.2: Technische Temperaturmessungen – Ergänzungen – Erhaltung der Spezifikation von Strahlungsthermometern, Ausgabe: 2002-01
- [128] VDI/VDE 3511 Blatt 4.3: Technische Temperaturmessungen – Strahlungsthermometrie – Standard-Test-Methode für Strahlungsthermometer mit einem Wellenlängenbereich, Ausgabe: 2005-07
- [129] VDI/VDE 3511 Blatt 4.4: Technische Temperaturmessungen – Strahlungsthermometrie – Kalibrierung von Strahlungsthermometern, Ausgabe: 2005-07
- [130] VDI/VDE 3511 Blatt 5: Technische Temperaturmessungen – Einbau von Thermometern, Ausgabe: 1994-11
- [131] VDI 2878 Blatt 1(Entwurf): Anwendung der Thermografie zur Diagnose in der Instandhaltung – Allgemeine Anforderungen sowie Hinweise für Entscheidungsträger und Verantwortliche, Ausgabe: 2010-07
- [132] VdS 2858: VdS Schadenverhütung – Thermografie in elektrischen Anlagen – Ein Beitrag zur Schadenverhütung und Betriebssicherheit, Ausgabe: 2004-03
- [133] Bäumer H., Fachartikel „Thermografie elektrischer Anlagen nach VdS 2860 (Teil 2)“, BL Automation GbR Bielefeld, Online unter URL: <http://www.voltimum.at/news/1499/s/Thermografie-elektrischer-Anlagen-nach-VdS-2860-Teil-2.html>, Stand: August 2010



- [134] Jerusalem M., „Castrol Predict – Zustandsorientierte Instandhaltung“, BP Condition Monitoring Industrial Lubricants & Services, Gent/Belgien in VDI Berichte Nr. 1991, „Instandhaltung auf dem Prüfstand“, 28. VDI/VDEh-Forum Instandhaltung 2007, Düsseldorf, VDI Verlag GmbH (2007)
- [135] Mühlberger W., „Infrarotdiagnose in der Instandhaltung (Thermographie) – Die Infrarotdiagnose in der Instandhaltung sollte ganzheitlich betrachtet werden“, WMTZ – Walter Mühlberger Thermoanalyse Zerstörungsfreie Prüfung, Poing bei München in VDI Berichte Nr. 1991, „Instandhaltung auf dem Prüfstand“, 28. VDI/VDEh-Forum Instandhaltung 2007, Düsseldorf, VDI Verlag GmbH (2007)
- [136] Rötzel A., „Instandhaltung – eine betriebliche Herausforderung“, 4. aktualisierte Auflage, Berlin; Offenbach, VDE Verlag (2009)
- [137] Fluke Corporation, Bedienungshandbuch: „Ti9, Ti10, Ti25, TiRx, TiR and TiR1 – Thermal Imagers“, August 2007, Rev. 1, 2/09 (German), PN 2803044
- [138] Fluke Corporation, Bedienungshandbuch: „TiR2, TiR3, TiR4, Ti40, Ti45, Ti50, Ti55 – IR FlexCam Thermal Imagers“, January 2007, Rev. 2, 5/09 (German)
- [139] DIN EN 60599 (VDE 0370-7): In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte – Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase (IEC 60599:1999 + A1:2007); Deutsche Fassung EN 60599:1999 + A1:2007, Ausgabe: 2008-02
- [140] Grüßer S., „Das moderne Rollenverständnis des Instandhalters – Veränderte Qualifikationsanforderungen an den Instandhalter als Person erfordern moderne Qualifikationskonzepte“, InfraServ Knapsack, Hürth in VDI Berichte Nr. 1991, „Instandhaltung auf dem Prüfstand“, 28. VDI/VDEh-Forum Instandhaltung 2007, Düsseldorf, VDI Verlag GmbH (2007)
- [141] Grüßer S., „Die Instandhaltung als Basis der kontinuierlichen Verbesserung – Werkzeuge und Praxisbeispiele für unterschiedliche Instandhaltungsorganisationen von Morgen“, InfraServ Knapsack, Hürth in VDI Berichte Nr. 1927, „Instandhaltungs-Performance im Fokus“, 27. VDI/VDEh-Forum Instandhaltung 2006, Düsseldorf, VDI Verlag GmbH (2006)

- [142] Gohrens H.-W., „Management und Psychologie des Überzeugens in Veränderungsprozessen – Die Waffen der Einflussnahme“, Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH, Duisburg in VDI Berichte Nr. 1991, „Instandhaltung auf dem Prüfstand“, 28. VDI/VDEh-Forum Instandhaltung 2007, Düsseldorf, VDI Verlag GmbH (2007)
- [143] Nebel T., Prüß H., „Anlagenwirtschaft“, München, Wien, Oldenbourg Verlag (2006), zit. nach Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [144] Seicht G., „Industrielle Anlagenwirtschaft“, in Schweitzer M. (Hrsg.), „Industriebetriebslehre“, zit. nach Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [145] Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [146] Männel W., „Integrierte Anlagenwirtschaft“, in Männel W. (Hrsg.), „Integrierte Anlagenwirtschaft“, Köln, TÜV Rheinland Verlag (1988) zit. nach Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [147] Nakajima S., „Management der Produktionseinrichtungen: Total Productive Maintenance“, Frankfurt/Main, Campus Verlag (1995) zit. nach Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts-

- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [148] Al-Radhi M., Heuer J., „Total Productive Maintenance: Konzept, Umsetzung, Erfahrung“, München, Wien, Hanser Verlag (1995) zit. nach Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [149] Löschnauer J., Pichler T., Schiefer E., „Overall Equipment Effectivness (OEE) als Steuerungsinstrument in Produktionssystemen – Komplexitätsbeherrschung bei verketteten Aggregaten“ in Biedermann H. (Hrsg.), „Komplexitätsorientiertes Anlagenmanagement – Methoden, Konzepte und Lösungen für Produktion und Instandhaltung“, 20. Instandhaltungsforum, Köln, TÜV Media GmbH (2006)
- [150] DIN EN 13306 (Entwurf): Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung, Ausgabe: 2008-10
- [151] Biedermann H., „Effektivitäts- und Effizienzsteigerung in der Instandhaltung – Methoden und deren Wirkung“ in Biedermann H. (Hrsg.), „Leistungs- und kostenorientiertes Anlagenmanagement – Gestaltungselemente zur Kostenminimierung und Effizienzsteigerung“, Köln, TÜV Media Verlag (2004) zit. nach Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [152] Kirchner A., „Beitrag zur Optimierung der Kesselwasserkonditionierung der MVA Spittelau in betriebstechnischer Hinsicht“, Magisterarbeit, Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben (2004)
- [153] Umweltbundesamt GmbH, Abteilung Abfallwirtschaft (Hrsg.), „Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2008“, Online unter URL: <http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at> Stand: Juni 2009



- [154] Fernwärme Wien GmbH, Stabsstelle Unternehmenskommunikation, Juli 2009
- [155] Fernwärme Wien GmbH (Hrsg.), „Die Technik der thermischen Abfallbehandlungsanlage Flötzersteig“, Broschüre Flötzersteig
- [156] Fernwärme Wien GmbH (Hrsg.), „Umweltinformation 2008 der Anlage Flötzersteig“, Online unter URL:
http://www.wienenergie.at/media/files/2008/Umweltinformation_FS08_5190.pdf
Stand: Juni 2009
- [157] Biedermann H., „Performance Based Maintenance – Ein Konzept zur leistungsorientierten Instandhaltung“, in Biedermann H. (Hrsg.), „Performance Based Maintenance“, Köln, TÜV-Verlag (1999) zit. nach Biedermann H., „Wertschöpfendes Management in der Anlagen- und Produktionswirtschaft“, in Biedermann H. (Hrsg.), „Wertschöpfendes Instandhaltungs- und Produktionsmanagement – Erfolgreich durch Innovation in Management und Technologie“, 21. Instandhaltungsforum, Köln, TÜV Media GmbH (2007)
- [158] Gragger M., „Wissensbilanz: Entwicklung und Implementierung eines Bewertungsinstrumentes zur strategischen Planung und Steuerung im F&E-Management unter besonderer Berücksichtigung immaterieller Vermögenswerte“, Montanuniversität Leoben (2004) zit. nach Schröder W., „Modell zur Bewertung eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements – Aufbau, Ausgestaltung und methodische Anwendung“, Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben (2009)
- [159] Weinzierl G., „Die Prüfung und Instandhaltung von Elektroanalgen und elektrischen Geräten“, METEG GmbH, Online unter URL: http://www.hjh-waermetechnik.at/dok/Gesetze_u_Vorschriften.pdf, Stand: September 2010
- [160] Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, BGBl. Nr. 106/1993, „106. Bundesgesetz über Sicherheitsmaßnahmen, Normalisierung und Typisierung auf dem Gebiet der Elektrotechnik (Elektrotechnikgesetz 1992 – ETG 1992)“, Jahrgang 1993, Ausgegeben am 12. Februar 1993



- [161] Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, BGBl. II Nr. 223/2010, „223. Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der die Elektrotechnikverordnung 2002 geändert wird (Elektrotechnikverordnung 2002/A2 – ETV 2002/A2)“, Jahrgang 2010, Ausgegeben am 12. Juli 2010
- [162] ÖVE/ÖNORM EN 50110-1: Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 1: Europäische Norm (Teil 2-100: Nationale Ergänzungen eingearbeitet) (Berichtigung 1:2008-09 eingearbeitet), Ausgabe: 2008-09

8.2 Abkürzungen

Abs.	Absatz
AGMA	American Gear Manufacturers Association
AKH	Allgemeines Krankenhaus
Allg.	Allgemein
Anz.	Anzahl
AP	Anilinpunkt
API	American Petroleum Institute
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ASchG	ArbeitnehmerInnenschutzgesetz
ASTM	American Society for Testing and Materials
Auftragsdoku	Auftragsdokumentation
AW	anti wear
barü	bar-Überdruck
Bez.	Bezeichnung
BWW	Betriebliches Vorschlagswesen
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CM	condition monitoring
Denox	Entstickungsanlage
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN EN	Deutsche Übernahme einer Europäischen Norm
DIN EN ISO	Deutsche Übernahme einer europäischen ISO-Norm
DIN ISO	Deutsche Übernahme einer ISO-Norm
EDV	Elektrodynamische Venturi Wäsche
E-Filter	Elektrofilter
EHD	elastohydrodynamische Schmierungstheorie
EN	Europäische Norm
EP	extrem pressure
Erz.	Erzeuger
ESV	Elektroschutzverordnung
ET	Ersatzteil
ETG	Elektrotechnikgesetz
ETV	Elektrotechnikverordnung
e.V.	eingetragener Verein
EVA	economic value added
evtl.	eventuell
exkl.	exklusiv
FIR	ferne Infrarotstrahlung
FS	Flötzersteig
FU	Frequenzumrichter
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
griech.	griechisch
GTA	gefährliche thermische Auffälligkeit
HWK	Heißwasserkessel
ICP	Inductively Coupled Plasma
IH	Instandhaltung
Int.	Intern
IR	infrarote Strahlung
ISO	International Organization for Standardization
ISO-VG	ISO-Viscosity-Grades
k.A.	keine Angabe

kb	kein Befund möglich
KS	Kupplungs-Seite
Kuppl.	Kupplung
L1, L2, L3	Linie 1, Linie 2, Linie 3
LCC	life cycle costing
LKW	Lastkraftwagen
LS	Lüfter-Seite bzw. Leistungsschalter
lt.	laut
MA	Mitarbeiter/-innen
MIR	mittlere Infrarotstrahlung
MK, MKA	Müllkessel
MTTR	mean time to recover
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	Mega Watt
MwSt.	Mehrwertsteuer
NEP	noise equivalent power
NETD	noise equivalent temperature difference
NIR	nahe Infrarotstrahlung
NLGI	National Lubricating Grease Institute
Nr.	Nummer
NSHV	Niederspannungshauptverteilung
NTA	sonstige Auffälligkeit nichtthermischer Art
OEE	overall equipment effectiveness
ÖNORM	Österreichische Norm, Herausgeber: Austrian Standards Institute
ÖNORM En	österreichische Übernahme einer Europäischen Norm
ÖVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
Pos.	Position
PS	Pumpen-Seite
QM	Qualitätsmanagement
ROCE	return on capital employed
RGWT	Rauchgaswärmetauscher
ROI	return on investment
RK	Risikoklasse
RRA	Rauchgasreinigungsanlage
S1	Schadensausmaßwert mit der niedrigsten Bewertung
S2	Schadensausmaßwert mit der zweitniedrigsten Bewertung
S3	Schadensausmaßwert mit der zweithöchsten Bewertung
S4	Schadensausmaßwert mit der höchsten Bewertung
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	selective catalytic reduction
SI	Système international d'unités (Internationales Einheitensystem)
SP	Spittelau
TA	thermische Auffälligkeit
Techn.	Technisch
TEEP	total effective equipment productivity
TPM	total productive maintenance
Trafo	Transformator
USV	Unabhängige Spannungsversorgung
usw.	und so weiter
UV	ultraviolette Strahlung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
vgl.	vergleiche
VIS	visuell
VT-Verhalten	Viskosität-Temperatur-Verhalten
VP-Verhalten	Viskosität-Druck-Verhalten



W1	Eintrittswahrscheinlichkeitswert mit der niedrigsten Bewertung
W2	Eintrittswahrscheinlichkeitswert mit der zweitniedrigsten Bewertung
W3	Eintrittswahrscheinlichkeitswert mit der zweithöchsten Bewertung
W4	Eintrittswahrscheinlichkeitswert mit der höchsten Bewertung
Wahrsch.	Wahrscheinlichkeit
z.B.	zum Beispiel

8.3 Tabellen

Tabelle 1: Reibungszustände [6]	27
Tabelle 2: Schematische Darstellung der Grundformen von Verschleißpartikeln und ihrer Entstehungsmechanismen aus WUTTKE [60]	36
Tabelle 3: Eigenschaften legierter und unlegierter Schmieröle aus MÖLLER/NASSAR S. 100	44
Tabelle 4: Parameter zur Beschreibung von Schmierstoffen (1) [vgl. 2].....	45
Tabelle 5: Parameter zur Beschreibung von Schmierstoffen (2) [vgl. 2].....	46
Tabelle 6: f_1 -Werte zur Fettfüllung aus MÖLLER/NASSAR [2] S. 306.....	55
Tabelle 7: Nachschmierfrist für Lagertyp I (Kugellager, Zylinderrollenlager, Nadellager, und Schrägkugellager mittels Fettpresse) aus MIDDLEBROOK [106]	56
Tabelle 8: Nachschmierfristen für Lagertyp II (Tonnenlager, Kegelrollenlager und Axialkugellager mittels Fettpresse) aus MIDDLEBROOK [106].....	56
Tabelle 9: Minderungsfaktor der Nachschmierfrist [vgl. 2, 53].....	57
Tabelle 10: Verträglichkeit unterschiedlicher Schmierfette nach der Art ihres Verdickers [20].....	58
Tabelle 11: Gegenüberstellung der im Werk Flötzersteig eingesetzten konsistenten Schmierstoffe (Schmierfette) [87, 88]	71
Tabelle 12: Gegenüberstellung der im Werk Flötzersteig eingesetzten Schmier- und Hydrauliköle [95, 96, 97].....	71
Tabelle 13: Gegenüberstellung der im Werk Spittelau eingesetzten konsistenten Schmierstoffe (Schmierfette) [100, 101, 102].....	73
Tabelle 14: Gegenüberstellung der im Werk Spittelau eingesetzten Schmier- und Hydrauliköle [95, 96, 97, 103, 104, 105, 106]	73
Tabelle 15: Berechnung der Nachschmierintervalle und –mengen Motorlager für das Werk Spittelau.....	77
Tabelle 16: Berechnung der Nachschmierintervalle und –mengen Lager Pumpe/Laufrad für das Werk Spittelau	78
Tabelle 17: Personalaufwand Nachschmierung, Spittelau	82
Tabelle 18: Personalaufwand Nachschmierung, Flötzersteig.....	82
Tabelle 19: Kosten zur Optimierung tribotechnischer Maßnahmen am Dienstleistungsmarkt	83
Tabelle 20: Auswahl geeigneter Aggregate für die Zustandsbeurteilung mit Hilfe der Ölanalyse, Spittelau	84
Tabelle 21: Auswahl geeigneter Aggregate für die Zustandsbeurteilung mit Hilfe der Ölanalyse, Flötzersteig.....	85
Tabelle 22: Kosten einer Ölanalyse an ausgewählten Aggregaten	85



Tabelle 23: Visuelle und energetische Größen zur Beschreibung des Strahlungstransportes aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.53	91
Tabelle 24: Auszug aktueller Normen und Richtlinien zur Temperaturmessung [113].....	115
Tabelle 25: Spezifikationen der eingesetzten Wärmebildgeräte [137, 138].....	118
Tabelle 26: Anlagen zur Thermografie.....	120
Tabelle 27: Risikomatrix mit den zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Spittelau.....	122
Tabelle 28: Endbewertung der zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Spittelau	122
Tabelle 29: Risikomatrix mit den zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Flötzersteig	123
Tabelle 30: Endbewertung der zur Thermografie ausgewählten Anlagen, Flötzersteig	123
Tabelle 31: Beurteilung thermischer Auffälligkeiten nach DIN 54191:2009 [118]	125
Tabelle 32: Klassifikation und Strategie der einzelnen Gefährdungsstufen.....	126
Tabelle 33: Spezifischer Zeitbedarf der drei Grundprozesse der Thermografieüberwachung.....	130
Tabelle 34: Anlagen zur Thermografie unterteilt nach Messstellen und Risikoklassen.....	130
Tabelle 35: Spittelau, Personalaufwand, Variante 1.....	131
Tabelle 36: Spittelau, Personalaufwand, Variante 2.....	131
Tabelle 37: Spittelau, Personalaufwand, Variante 3.....	131
Tabelle 38: Spittelau, Personalaufwand, Variante 4.....	131
Tabelle 39: Spittelau, Personalaufwand, Variante 5.....	131
Tabelle 40: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 1	132
Tabelle 41: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 2	132
Tabelle 42: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 3	132
Tabelle 43: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 4	132
Tabelle 44: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 5	132
Tabelle 45: Kostenvergleich der Erstmessung aller vorausgewählten Anlagen zur Thermografie bei Eigen- oder Fremdvergabe	133
Tabelle 46: Kostenvergleich aller Thermografie Messungen eines Kalenderjahres nach Überwachungsvariante 4 bei Eigen- oder Fremdvergabe	134
Tabelle 48: Personalaufwand Nachschmierung, Spittelau	139
Tabelle 49: Personalaufwand Nachschmierung, Flötzersteig.....	139
Tabelle 50: Klassifikation und Strategie der einzelnen Gefährdungsstufen.....	141
Tabelle 51: Spittelau, Personalaufwand, Variante 4.....	141
Tabelle 52: Flötzersteig, Personalaufwand, Variante 4	141
Tabelle 53: Auflistung der Anhänge	172

8.4 Abbildungen

Abbildung 1: Unterteilung des Instandhaltungsbegriffes nach DIN 31051 [77] in Anlehnung an RÖTZEL [136] S.13.....	3
Abbildung 2: Instandhaltungsphilosophien und ihr unterschiedlicher Beitrag zur Wertschöpfung aus [157]	4
Abbildung 3: Einordnung der Anlagenwirtschaft aus [143].....	6
Abbildung 4: 3-dimensionale Darstellung der Integrierten Anlagenwirtschaft nach MÄNNEL aus [146]	6
Abbildung 5: Betriebszeitmodell mit den dazugehörigen Verlustquellen aus [149] S.102.....	8
Abbildung 6: Bestimmung der OEE über die vier Unterkennzahlen aus [149] S.103.....	9
Abbildung 7: Aufbau und Aufgaben des Instandhaltungsmanagements aus SCHRÖDER [145] S.102	10
Abbildung 8: Bezugsrahmen des Instandhaltungsmanagements aus [151, 158]	11
Abbildung 9: Gesamtmodell des Instandhaltungsmanagements aus SCHRÖDER [145] S.190	12
Abbildung 10: MVA Spittelau [154]	13
Abbildung 11: Verfahrensschema MVA Spittelau [154].....	15
Abbildung 12: MVA Flötzersteig [154].....	16
Abbildung 13: Verfahrensschema MVA Flötzersteig [154]	18
Abbildung 14: Oberflächenrauheit aus MÖLLER/NASSAR [2] S.4.....	22
Abbildung 15: Schematische Einteilung der Reibungsarten nach der Kinematik in einem „Reibungsdreieck“ aus [12].....	24
Abbildung 16: Zykloidische Bahn der Kontaktstellen eines Rollkörpers aus FLEISCHER (Hrsg.) S.23 [10]	25
Abbildung 17: Reibungswiderstand bei Gleit- und Rollreibung aus MÖLLER/NASSAR [2] S.8.....	26
Abbildung 18: Typische Varianten der Bohrreibung aus FLEISCHER (Hrsg.) [10] S.24.....	26
Abbildung 19: Wälzreibung auf einer Zahnflanke aus MÖLLER/NASSAR [2] S.9.....	26
Abbildung 20: STRIBECK-Kurve (klassische Darstellung) aus MÖLLER/NASSAR [2] S.14	28
Abbildung 21: STRIBECK-Kurve (bei Gleitreibung für An- und Auslauf) aus DROSTE [16]	28
Abbildung 22: Verschleißmessgrößen am Beispiel eines tribologischen Systems aus zwei rotierenden Zylindern (1), (2) aus CZICHOS/HABIG [2] S.115.....	29
Abbildung 23: Unterteilung der vier Haupt-Verschleißmechanismen aus GÓDOR [8].....	30
Abbildung 24: Detailprozesse des abrasiven Verschleißes aus Zum GAHR [19]	32

Abbildung 25: Einfaches Modell des adhäsiven Verschleißes aus CZICHOS/HABIG [6] S.127	32
Abbildung 26: Modell des tribochemischen Verschleißes aus CZICHOS/HABIG [6] S.129...	33
Abbildung 27: Delaminationstheorie aus Gódor [8].....	34
Abbildung 28: Mögliche Arten der Rissbildung bei Wälzverschleiß aus CZICHOS/HABIG [6] S.135	37
Abbildung 29: Modelldarstellung des zentralen Stoßes zwischen zwei Bauteilen (1) und (2) aus CZICHOS/HABIG [6] S.136	37
Abbildung 30: Furchungverschleiß in den zwei Erscheinungsformen „Zwei-Körper- Abrasion“ und „Drei-Körper-Abrasion“ aus CZICHOS/HABIG [6] S.140	38
Abbildung 31: Tief-Hochlagen-Charakteristik des Furchungverschleißes aus WAHL [61]...	39
Abbildung 32: Schema der Schmierzustände in Abhängigkeit von Mindestschmierfilmdicke und Lagerdruck aus GLAESER (Hrsg.) [29]	40
Abbildung 33: Druckdifferentialgleichung der hydrodynamischen Schmierungstheorie nach REYNOLDS aus CZICHOS/HABIG [6] S.227.....	41
Abbildung 34: Dimensionslose REYNOLD'sche Differentialgleichung für Radiallager aus CZICHOS/HABIG [6] S.228	42
Abbildung 35: Schema der Bewegungsvorgänge in laminar strömenden NEWTON'schen Flüssigkeiten aus MÖLLER/NASSAR [2] S.160.....	46
Abbildung 36: Einsatzgrenzen von Radiallagern aus BARTZ [62]	47
Abbildung 37: Einsatzgrenzen von Axiallagern aus BARTZ [62].....	47
Abbildung 38: Schematische Darstellung des Anlaufvorganges eines hydrodynamischen Gleitlagers aus MÖLLER/NASSAR [2] S.272.....	48
Abbildung 39: Aufbau eines Wälzlagers (Kegelrollenlager) aus MÖLLER/NASSAR [2] S.285.....	49
Abbildung 40: Belastungsrichtungen bei Wälzlagern aus MÖLLER/NASSAR [2] S.286	49
Abbildung 41: Arten von Wälzkörpern aus MÖLLER/NASSAR [2] S.287.....	50
Abbildung 42: Druckbeanspruchung und –entlastung von Wälzkörpern aus MÖLLER/NASSAR [2] S.288	50
Abbildung 43: Vereinfachte Viskositätsauswahl für Wälzlagerschmieröle durch das Verhältnis aus Lagerbohrung, Drehzahl und Einsatztemperatur aus MÖLLER/NASSAR [2] S.296	52
Abbildung 44: Ölwechselfrist bei Wälzlagerölschmierung in Abhängigkeit von Ölmenge und Lagerbohrung aus [53] S.43.....	53
Abbildung 45: Schmierfettauswahl für Wälzlagerfettsschmierung in Abhängigkeit von lagerabhängigem Drehzahlkennwert $k_a \cdot n \cdot d_m$ und Belastungsverhältnis P/C aus [53] S.27.....	54
Abbildung 46: Temperaturanstieg in einem fettgeschmierten Wälzlager aus WILLS [63].....	54

Abbildung 47: Nachschmierfristen bei fettgeschmierten Wälzlagern aus CONGRAM [64]	55
Abbildung 48: Einsatzgrenzen für Zahnradgetriebe aus MÖLLER/NASSAR [2] S.324	59
Abbildung 49: Elastohydrodynamischer Schmierfilm aus MÖLLER/NASSAR [2] S.325.....	59
Abbildung 50: Verschleißdiagramm Kettengelenk aus MÖLLER/NASSAR [2] S.367.....	61
Abbildung 51: Schmierungsarten für Rollenketten in Abhängigkeit von Kettengeschwindigkeit und Kettenteilung aus MÖLLER/NASSAR [2] S.369	62
Abbildung 52: Messbereich der Verschleißpartikelbestimmungsmethoden aus [134].....	65
Abbildung 53: Gegenüberstellung der Partikelkonzentrationen im Öl in Abhängigkeit der Betriebsdauer aus [134].....	66
Abbildung 54: Beispielberechnung des Nachschmierintervalles aus CONGRAM [64]	75
Abbildung 55: Prozessschema der Schmierung	80
Abbildung 56: Anteil der einzelnen RK am gesamten Nachschmier-aufwand, Spittelau	82
Abbildung 57: Anteil der einzelnen RK am gesamten Nachschmier-aufwand, Flötzersteig ...	82
Abbildung 58: Das elektromagnetische Spektrum aus TIPLER/MOSCA [110] S.971.....	87
Abbildung 59: V_{\square} -Kurve aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.51.....	89
Abbildung 60: Strahlungsausbreitung ausgehend von einem Flächenelement dA aus WERNER [108] S.172	90
Abbildung 61: Gegenüberstellung des (a) ebenen Winkels \square und des (b) Raumwinkels \square aus WERNER [108] S.172.....	90
Abbildung 62: Strahlungstransport von Quelle zu Empfänger aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.53.....	91
Abbildung 63: Modell des Schwarzen Körpers aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.59	93
Abbildung 64: PLANCK'sches Strahlungsgesetz für unterschiedliche Temperaturwerte aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.60	94
Abbildung 65: Idealisierte Emissionsgradverläufe in Abhängigkeit der Wellenlänge aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.62.....	96
Abbildung 66: Temperaturlösung $\delta T(\lambda, T)$ aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.69	97
Abbildung 67: Thermogramm einer gefüllten Teekanne aus Porzellan aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.70.....	98
Abbildung 68: Thermogramm einer Hand mit Ring aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.71	98
Abbildung 69: Einfaches Modell zur Transmission der Atmosphäre aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.78.....	99
Abbildung 70: Atmosphärischer Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.79.....	100

Abbildung 71: Einfall der Sonnenstrahlen durch die atmosphärischen Fenster der Erdlufthülle aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.86	101
Abbildung 72: Die wichtigsten Spektralbereiche der Wärmebildtechnik aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.87.....	101
Abbildung 73: Typische relative Empfindlichkeiten unterschiedlicher IR-Empfänger in Abhängigkeit der Wellenlänge aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.156.....	102
Abbildung 74: Wellenlängenabhängigkeit der spezifischen Detektivität wichtiger IR-Empfänger aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.160.....	104
Abbildung 75: Aufbau eines Bolometers aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.164.....	105
Abbildung 76: Thermosäule in der Ausführungsform eines Pyrgometers aus [112]	106
Abbildung 77: Wirkprinzip des pyroelektrischen Enelementempfängers aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.166.....	106
Abbildung 78: Vergleich der Bänderstruktur eines Leiters (a), (b) und eines Isolators (c) mit der eines Halbleiters (d) aus TIPLER/MOSCA [110] S.1236	108
Abbildung 79: Kristallgitter eines n-Halbleiters welcher durch Dotierung eines Siliziumkristalls mit Arsen entsteht aus TIPLER/MOSCA [110] S.1237	109
Abbildung 80: Bandstruktur eines n-Halbleiters aus TIPLER/MOSCA [110] S.1237	109
Abbildung 81: Kristallgitter eines p-Halbleiters welcher durch Dotierung eines Siliziumkristalls mit Gallium entsteht aus TIPLER/MOSCA [110] S.1238	110
Abbildung 82: Bandstruktur eines p-Halbleiters aus TIPLER/MOSCA [110] S.1238	110
Abbildung 83: Bändermodell der unterschiedlichen Fotoleiterarten aus SCHUSTER/KOLOBRODOV [109] S.177.....	110
Abbildung 84: pn-Halbleiterübergang aus TIPLER/MOSCA [110] S.1238.....	111
Abbildung 85: Schaltungsarten eines pn-Übergangs aus TIPLER/MOSCA [110] S.1240 ...	111
Abbildung 86: pn-Halbleiterübergang in Ausführung einer Fotodiode aus TIPLER/MOSCA [110] S.1241	112
Abbildung 87: 3-Phasen der Implementierung eines Infrarotmesssystems aus MÜHLBERGER [135]	116
Abbildung 88: Prozessschema der Thermografieüberwachung	128
Abbildung 89: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 1.....	131
Abbildung 90: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 2.....	131
Abbildung 91: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 3.....	131
Abbildung 92: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 4.....	131
Abbildung 93: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 5.....	131
Abbildung 94: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 1 ...	132
Abbildung 95: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 2 ...	132
Abbildung 96: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 3 ...	132

Abbildung 97: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 4 ...	132
Abbildung 98: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am Inspektionsaufwand, Variante 5 ...	132
Abbildung 99: Spittelau, Anteil der einzelnen RK am gesamten Inspektionsaufwand, Variante 4	141
Abbildung 100: Flötzersteig, Anteil der einzelnen RK am gesamten Inspektionsaufwand, Variante 4.....	141

Anhang

Tabelle 52: Auflistung der Anhänge

Anhang	Seite
Anhang A – Schmierblätter Spittelau der Risikoklassen I und II	A-1
Anhang B – Fettschmierplan Spittelau	A-17
Anhang C – Fettschmierplan Flötzersteig	A-21
Anhang D – Einzelergebnisse der Risikobewertung der zur Thermografieüberwachung ausgewählten Elektroanlagen, Spittelau	A-23
Anhang E – Einzelergebnisse der Risikobewertung der zur Thermografieüberwachung ausgewählten Elektroanlagen, Flötzersteig	A-32
Anhang F – Auszug aus den Thermografieblättern, Spittelau	A-41
Anhang G – Auszug aus den Thermografieblättern, Flötzersteig	A-58
Anhang H – Thermografie Überwachungsplan, Spittelau	A-70
Anhang I – Thermografie Überwachungsplan, Flötzersteig	A-71

Anhang A – Schmierblätter Spittelau der Risikoklassen I und II

	Aggregat	RK	Schmierstellen	Schmiermittel	Menge	Intervall	Seite
Abfallanlieferung/Lagerung	Müllkran 1+2	II	Greiferhydraulik	Mobil DTE 24	140 l	1x jährl.	A-2 bis A-5
			Hubwerkgetriebe	Mobilgear 632	27 l	1x jährl.	
			Katzfahrwerkgetriebe	Mobilgear 632	1,5 l	1x jährl.	
			Kranfahrwerkgetriebe	Mobilgear 632	2,5 l	1x jährl.	
			Katzlaufrad	Mobil Greasrex 47		1x wöch.	
			Katzlaufrad Antrieb	Mobil Greasrex 47		1x wöch.	
			Kranlaufrad	Mobil Greasrex 47		1x wöch.	
			Seiltrommel	Mobil Greasrex 47		1x wöch.	
	Fettschmierstellen	Mobil Greasrex 47		1x wöch.			
Thermische Behandlung	Brennerluftgebläse MK1 + MK2	II	Motorlager	Mobil Greasrex 47		1x jährl.	A-6
	Primärluftgebläse MK1 + MK2	II	Motorlager	Mobil Greasrex 47	26 g	3x jährl.	A-7
			Ölbad Laufrad	Mobil DTE Heavy Medium	6 l	1x jährl.	
Sekundärluftgebläse MK1 + MK2	II	Motorlager	Mobilux EP 3	26 g	3x jährl.	A-8	
		Laufradlager	Mobilux EP 3	25 g	6x jährl.		
Rauchgasreinigung	Denox Verbrennungsluftgebläse 1+2	II	Laufradlager	Mobilux EP 3	36 g	12x jährl.	A-9
	Klopfwerke E-Filter MK1 + MK2	II	Getriebemotor	Mobilgear 632	1,5 l	1x jährl.	A-10
			Getriebemotor	Mobilgear 632	4 l	1x jährl.	
	Prozesswasserpumpe 1+2 MK1 + MK2	II	Motorlager	Mobil Greasrex 47	20 g	1x jährl.	A-11
			Pumpenlager	Mobiltemp SHC 100	28 g	1x jährl.	
	Prozesswasserpumpe 5 MK1 + MK2	II	Motorlager	Mobil Greasrex 47	21 g	1x jährl.	A-12
			Pumpenlager	Mobiltemp SHC 100	28 g	1x jährl.	
	Saugzuggebläse MK1 + MK 2	I	Motorlager LS	Mobil Greasrex 47	49 g	6x jährl.	A-13
			Motorlager KS	Mobil Greasrex 47	49 g	12x jährl.	
			Laufradlager KS	Renolit Duraplex 2	27 g	12x jährl.	
Laufradlager PS			Renolit Duraplex 2	106 g	12x jährl.		
Reststoffentsorgung	Ascheschnecke MK1 + MK2	II	Getriebemotor Schnecke	Mobilgear 636	4 l	1x jährl.	A-14
			Getriebemotor Zellenrad	Mobilgear 636	1,5 l	1x jährl.	
			Zellenrad	Mobilux EP 004		1x jährl.	
	Aschentrogsschnecke 1+2	II	Getriebemotor Schnecke	Mobilgear 632	7 l	1x jährl.	A-15
			Getriebemotor Zellenrad	Mobilgear 632	1,5 l	1x jährl.	
			Zellenrad	Mobilux EP 004		1x jährl.	
	Rohrkettenträger	II	Kettengeräte	Mobilgear 632	16 l / 30 l	1x jährl.	A-16
			Zellenrad	Mobilgear 632	1,5 l / 4,5 l	1x jährl.	
			Schmierstellen	Mobil Greasrex 47		1x jährl.	

Müllkran 1 + 2

1x Greiferhydraulik pro Kran:

Schmierstoff: Mobil DTE 24
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 32
 Viskosität (40°C): 31,5mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 98 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +220°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -27°C (ASTM D 97)
Hydrauliköl DIN 51524 – HLP 32

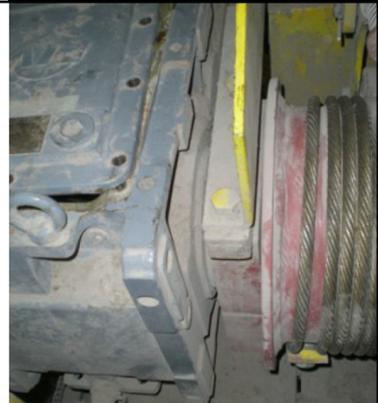
Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 140 l (gesamter Inhalt)



1x Hubwerkgetriebe pro Kran:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 320
 Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 27 l (gesamter Inhalt)



2x Katzfahrwerkgetriebe pro Kran:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 320
 Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 1,5 l (gesamter Inhalt)



2x Kranfahrwerkgetriebe pro Kran:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 320
 Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 2,5 l (gesamter Inhalt)



2x Katzlauftrad pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47
Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex
 Grundöl: Mineralöl
 NLGI-Klasse: 1,5
 Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)
 Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich
Nachschmiermenge:

2x Katzlauftrad Antrieb pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47
Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex
 Grundöl: Mineralöl
 NLGI-Klasse: 1,5
 Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)
 Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich
Nachschmiermenge:

4x Kranlauftrad pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47
Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex
 Grundöl: Mineralöl
 NLGI-Klasse: 1,5
 Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)
 Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich
Nachschmiermenge:

2x Seiltrommel pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich

Nachschmiermenge:

1x Greifer Schmierstelle 1 pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47**Eigenschaften:** Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich**Nachschmiermenge:**

6x Greifer Schmierstelle 2 pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47**Eigenschaften:** Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich**Nachschmiermenge:**

6x Greifer Schmierstelle 3 pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47**Eigenschaften:** Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich**Nachschmiermenge:**

6x Greifer Schmierstelle 4 pro Kran:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47**Eigenschaften:** Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x wöchentlich**Nachschmiermenge:**

Brennerluftgebläse MK1 + MK2

1x Motor Lager 1 pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge:



Primärluftgebläse MK1 + MK2

1x Motor Lager LS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 3x jährlich

Nachschmiermenge: 26 g



1x Motor Lager KS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 3x jährlich

Nachschmiermenge: 26 g



1x Ölbad Laufrad pro Linie:

Schmierstoff: Mobil DTE Heavy Medium

Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl

ISO Viskosität Klasse: 68

Viskosität (40°C): 68mm²/s (ASTM D 445)

Viskositätsindex: 95 (ASTM D 2270)

Flammpunkt: +223°C (ASTM D 92)

Pourpoint: -15°C (ASTM D 97)

Schmieröl DIN 51517 – CL 68

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 6 l (gesamter Inhalt)



Sekundärluftgebläse MK1 + MK2

1x Motor Lager LS pro Linie:

Schmierstoff: Mobilux EP 3

Eigenschaften: Verdicker: Lithiumseifen-Basis

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 3

Grundölviskosität (40°C): 160mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 235 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +190°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 3x jährlich

Nachschmiermenge: 26 g



1x Motor Lager KS pro Linie:

Schmierstoff: Mobilux EP 3

Eigenschaften: Verdicker: Lithiumseifen-Basis

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 3

Grundölviskosität (40°C): 160mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 235 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +190°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 3x jährlich

Nachschmiermenge: 26 g



2x Lager Laufrad pro Linie:

Schmierstoff: Mobilux EP 3

Eigenschaften: Verdicker: Lithiumseifen-Basis

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 3

Grundölviskosität (40°C): 160mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 235 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +190°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 6x jährlich

Nachschmiermenge: 25 g



Denox Verbrennungsluftgebläse 1 + 2

1x Laufradlager 1 pro Aggregat:

Schmierstoff: Mobilux EP 3

Eigenschaften: Verdicker: Lithiumseifen-Basis

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 3

Grundölviskosität (40°C): 160mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 235 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +190°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 12x jährlich

Nachschmiermenge: 36 g



1x Laufradlager 2 pro Aggregat:

Schmierstoff: Mobilux EP 3

Eigenschaften: Verdicker: Lithiumseifen-Basis

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 3

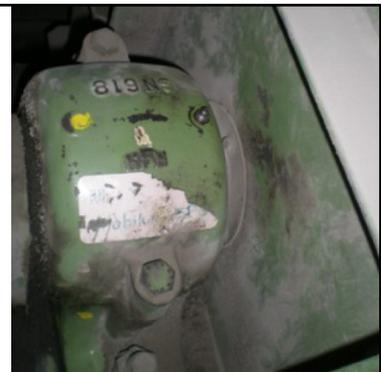
Grundölviskosität (40°C): 160mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 235 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +190°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 12x jährlich

Nachschmiermenge: 36 g



Klopfwerke E-Filter MK1 + MK2

4x Getriebemotor motorseitig pro Linie:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
ISO Viskosität Klasse: 320
Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 1,5 l (gesamter Inhalt)



4x Getriebemotor antriebseitig pro Linie:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
ISO Viskosität Klasse: 320
Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 4 l (gesamter Inhalt)



Prozesswasserpumpe 1 + 2 MK1 + MK2

2x Motor Lager LS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 20 g



2x Motor Lager KS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 20 g



2x Pumpenlager KS pro Linie:

Schmierstoff: Mobiltemp SHC 100

Eigenschaften: Verdicker: organo-clay, non-soap

Grundöl: synthetisches polyalphaolefin (PAO)

NLGI-Klasse: 2

Grundölviskosität (40°C): 100mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +260°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 28 g



2x Pumpenlager PS pro Linie:

Schmierstoff: Mobiltemp SHC 100

Eigenschaften: Verdicker: organo-clay, non-soap

Grundöl: synthetisches polyalphaolefin (PAO)

NLGI-Klasse: 2

Grundölviskosität (40°C): 100mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +260°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 28 g



Prozesswasserpumpe 5 MK1 + MK2

1x Motor Lager LS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 21 g



1x Motor Lager KS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 21 g



1x Pumpenlager KS pro Linie:

Schmierstoff: Mobiltemp SHC 100

Eigenschaften: Verdicker: organo-clay, non-soap

Grundöl: synthetisches polyalphaolefin (PAO)

NLGI-Klasse: 2

Grundölviskosität (40°C): 100mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +260°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 28 g



1x Pumpenlager PS pro Linie:

Schmierstoff: Mobiltemp SHC 100

Eigenschaften: Verdicker: organo-clay, non-soap

Grundöl: synthetisches polyalphaolefin (PAO)

NLGI-Klasse: 2

Grundölviskosität (40°C): 100mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280 (ASTM D 217)

Tropfpunkt: +260°C (ASTM D 2265)

Schmierintervall: 1x jährlich

Nachschmiermenge: 28 g



Saugzuggebläse MK1 + MK2

1x Motor Lager LS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 6x jährlich

Nachschmiermenge: 49 g



1x Motor Lager KS pro Linie:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47

Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 1,5

Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)

Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 12x jährlich

Nachschmiermenge: 49 g



1x Laufrad Lager KS pro Linie:

Schmierstoff: Renolit Druaplex 2

Eigenschaften: Verdicker: Lithium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 2

Walkpenetration (25°C): 265-295

obere Gebrauchstemp.: +160°C

untere Gebrauchstemp.: -30°C

Schmierfett DIN 51825 – KP 2 P -30

Schmierintervall: 12x jährlich

Nachschmiermenge: 27 g



1x Laufrad Lager PS pro Linie:

Schmierstoff: Renolit Druaplex 2

Eigenschaften: Verdicker: Lithium-Komplex

Grundöl: Mineralöl

NLGI-Klasse: 2

Walkpenetration (25°C): 265-295

obere Gebrauchstemp.: +160°C

untere Gebrauchstemp.: -30°C

Schmierfett DIN 51825 – KP 2 P -30

Schmierintervall: 12x jährlich

Nachschmiermenge: 106 g



Ascheschnecke MK1 + MK2

4x Getriebemotor Schnecke pro Linie:

Schmierstoff: Mobilgear 636
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 680
 Viskosität (40°C): 680mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 90 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +285°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -9°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 680

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 4 l (gesamter Inhalt)



2x Getriebemotor Zellenrad pro Linie:

Schmierstoff: Mobilgear 636
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 680
 Viskosität (40°C): 680mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 90 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +285°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -9°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 680

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 1,5 l (gesamter Inhalt)



2x Zellenrad pro Linie:

Schmierstoff: Mobilux EP 004
Eigenschaften: Verdicker: Lithiumseifen-Basis
 Grundöl: Mineralöl
 NLGI-Klasse: 00
 Grundölviskosität (40°C): 160mm²/s (ASTM D 445)
 Walkpenetration (25°C): 415 (ASTM D 217)
freigegeben nach: SEW R32/302

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge:



Aschentrogsschnecke 1 + 2

1x Getriebemotor Schnecke pro Linie:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 320
 Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 7 l (gesamter Inhalt)



1x Getriebemotor Zellenrad pro Linie:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 320
 Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 1,5 l (gesamter Inhalt)



1x Zellenrad pro Linie:

Schmierstoff: Mobilux EP 004
Eigenschaften: Verdicker: Lithiumseifen-Basis
 Grundöl: Mineralöl
 NLGI-Klasse: 00
 Grundölviskosität (40°C): 160mm²/s (ASTM D 445)
 Walkpenetration (25°C): 415 (ASTM D 217)
freigegeben nach: SEW R32/302

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge:



Rohrkettenförderer

2x Kettengetriebe:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 320
 Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 16 l bzw. 30 l (gesamter Inhalt)



2x Zellenrad:

Schmierstoff: Mobilgear 632
Eigenschaften: Grundöl: Mineralöl
 ISO Viskosität Klasse: 320
 Viskosität (40°C): 320mm²/s (ASTM D 445)
 Viskositätsindex: 97 (ASTM D 2270)
 Flammpunkt: +265°C (ASTM D 92)
 Pourpoint: -18°C (ASTM D 97)
Schmieröl DIN 51517 – CLP 320

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge: 1,5 l bzw. 4,5 l (gesamter Inhalt)

4x Schmierstellen:

Schmierstoff: Mobil Greasrex 47
Eigenschaften: Verdicker: Kalzium-Komplex
 Grundöl: Mineralöl
 NLGI-Klasse: 1,5
 Grundölviskosität (40°C): 150mm²/s (ASTM D 445)
 Walkpenetration (25°C): 280-310 (ASTM D 217)

Schmierintervall: 1x jährlich
Nachschmiermenge:



Tabelle B 2: Fettschmierplan Spittelau (2)

KW Rundgang	Risiko-klasse	Schmiermittel	Menge	Schmierung Jahr	Jänner			Feber				März					April				Mai				Juni				Juli				August				September				Oktober				November				Dezember							
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Erzeugerpumpe HWK1 + HWK2		2																																																						
Motorlager LS	III	Mobil Greasrex 47	48 g	1																																																				
Motorlager KS	III	Mobil Greasrex 47	42 g	2																																																				
Erzeugerpumpe MK 1+2+3+4		4																																																						
Motorlager	III	Mobil Greasrex 47	26 g	2																																																				
Kesselspeisewasserpumpe 1+2+3+4		4																																																						
Motorlager	III	Mobil Greasrex 47		1																																																				
Pumpenlager	III	Mobil Greasrex 47	6 g	3																																																				
Netzpumpe 1+2+3		3																																																						
Motorlager LS	IV	Mobil Greasrex 47	49 g	6																																																				
Motorlager KS	IV	Mobil Greasrex 47	49 g	12																																																				
Pumpenlager KS	IV	Mobil Greasrex 47	35 g	3																																																				
Pumpenlager PS	IV	Mobil Greasrex 47	20 g	4																																																				
Bogenzahnkupplung	IV	Mobil Greasrex 47																																																						
Netzpumpe 4		1																																																						
Motorlager	IV	Mobil Greasrex 47		1																																																				
Reduzierstation 1+2+3		3																																																						
Spindelmutter	k.A.	Mobil Greasrex 47		0,5																																																				
Rez Gebläse HWK1 + HWK2		2																																																						
Motorlager	k.A.	Mobil Greasrex 47		1																																																				
Rückschlagklappe HWK1 + HWK2		2																																																						
Fettschmierstellen	k.A.	Mobil Greasrex 47		1																																																				
Verbrennungsluftgebläse HWK1 + HWK2		2																																																						
Motorlager LS	k.A.	Mobil Greasrex 47	65 g	1																																																				
Motorlager KS	k.A.	Mobil Greasrex 47	57 g	2																																																				
Laufradlager KS	k.A.	Mobil Greasrex 47	36 g	1																																																				
Laufradlager PS	k.A.	Mobil Greasrex 47	65 g	1																																																				

Anhang D – Einzelergebnisse der Risikobewertung der zur Thermografieüberwachung ausgewählten Elektroanlagen, Spittelau

- Gruppenleiter Elektrotechnik – Tabelle D 1 & D 2

- Werkstättenleiter E-Werkstätte – Tabelle D 3 & D 4

- Schaltmeister Schicht 4 – Tabelle D 5 & D 6

- Worst Case Auswertung der Einzelbewertungen – Tabelle D 7 & D 8

Tabelle D 1: Bewertung Schadensausmaß durch Gruppenleiter Elektrotechnik

Nr.	Gewichtungskategorie Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit				
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalien-austritt	Emissions-überschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagen-stillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen
SP01	Trafo MK	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	1	3	1	4	3	2	2	1
SP03	Trafo Netzpumpe	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP05	Trafo NSHV Nord	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP06	Trafo NSHV Süd	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	1	1	1	3	3	2	1	1
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	1	1	1	3	1	2	1	1
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	1	3	1	4	3	3	2	1
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	1	1	1	4	3	2	2	1
SP12	FU Netzpumpe 4	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	1	1	1	1	1	2	2	1
SP14	FU Denox Gebläse	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	1	2	1	3	3	2	2	1
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SP19	NSHV 400V MK	1	1	3	1	3	3	3	2	1
SP20	NSHV Nord	1	1	1	1	1	1	2	1	1
SP21	NSHV Süd	1	1	1	1	3	3	3	2	1
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	1	1	1	1	1	2	2	1
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	1	1	1	3	3	3	2	1
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	4	2	3	3	3	3	4	2	3
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	4	2	1	3	1	3	3	2	3
SP26	Notstromverteilung Allg. II	4	1	1	3	1	3	3	2	1

Tabelle D 2: Bewertung Eintrittswahrscheinlichkeit durch Gruppenleiter Elektrotechnik

Nr.	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungs Intervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethode	Schutzsystem
SP01	Trafo MK	1	2	3	2	1	1	2	2	2	1
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	2	3	2	1	1	2	3	2	1
SP03	Trafo Netzpumpe	1	2	3	2	1	1	2	2	2	1
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	2	3	2	1	1	2	2	2	1
SP05	Trafo NSHV Nord	1	2	3	2	1	1	2	2	2	1
SP06	Trafo NSHV Süd	1	2	3	2	1	1	1	2	2	1
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	2	3	2	1	1	1	2	2	1
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	2	3	2	1	1	1	2	2	1
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	2	3	2	1	1	1	1	1	1
SP12	FU Netzpumpe 4	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP14	FU Denox Gebläse	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	2	3	2	1	1	2	1	1	1
SP19	NSHV 400V MK	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
SP20	NSHV Nord	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
SP21	NSHV Süd	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
SP26	Notstromverteilung Allg. II	1	1	3	4	1	1	2	1	4	1

Tabelle D 3: Bewertung Schadensausmaß durch Werkstättenleiter E-Werkstätte

Nr.	Gewichtungskategorie Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit				
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalien-austritt	Emissions-überschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagen-stillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen
SP01	Trafo MK	1	2	3	3	4	1	1		3
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	2	3	3	4	3	2	1	3
SP03	Trafo Netzpumpe	1	2	1	1	2	1			2
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	1	1	2	2	1	1		1
SP05	Trafo NSHV Nord	1	1	1	1	1	1	1		2
SP06	Trafo NSHV Süd	1	2	1	1	1	2	1		2
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	3	3	3	4	2	1		3
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	3	3	3	4	2	1		3
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	2	3	3	4	3	2	2	3
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	1	1	1	1	1		1		2
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	1	3	3	4	2	1		3
SP12	FU Netzpumpe 4	1	1	1	1	2	1			2
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	1	3	3	4	3	2	2	2
SP14	FU Denox Gebläse	1	2	3	3	3	2	1	2	2
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	1	1	1	2	2	1		2
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	1	1	1	1	1	1		1
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	1	3	3	3	3	2	1	2
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	1	1	1	1	1	1		2
SP19	NSHV 400V MK	1	1	3	3	4	2	1		3
SP20	NSHV Nord	1	1	1	1	1	1	1		2
SP21	NSHV Süd	1	1	1	1	2	2	1	1	2
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	1	1	1	1	2	1		2
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	1	3	3	4	2	2		3
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	1	1	3	3	4	1	2	2	3
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	1	1	1	1	2	2	1		2
SP26	Notstromverteilung Allg. II	1	1	1	1	2	2	1		2

Tabelle D 4: Bewertung Eintrittswahrscheinlichkeit durch Werkstättenleiter E-Werkstätte

Nr.	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungs Intervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethoden	Schutzsystem
SP01	Trafo MK	1	3	3	3	1	1	1	2	1	1
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
SP03	Trafo Netzpumpe	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	2	3	3	1	1	1	1	1	1
SP05	Trafo NSHV Nord	1	2	3	3	1	1	1	1		2
SP06	Trafo NSHV Süd	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	3	3	3	1	1	1	2	1	1
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	3	3	3	1	1	1	2	1	1
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	3	3	3	1	1	1	1		1
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	2	3	3	3	1	1	1	2		1
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	3	3	3	1	1	1	2		1
SP12	FU Netzpumpe 4	2	3	3	3	1	1	1	1		
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	3	3	3	1	1	1	1		1
SP14	FU Denox Gebläse	1	3	3	3	1	1	2	2		4
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	3	3	3	1	1	1	2		
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	3	3	3	1	1	1	2		
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	3	3	3	1	1	1	1		1
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	3	3	3	1	1	1	1		
SP19	NSHV 400V MK	1	3	3	3	1	1	1	1		
SP20	NSHV Nord	1	3	3	3	1	1	1	1		4
SP21	NSHV Süd	1	3	3	3	1	1	1	1		4
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	3	3	3	1	1	1	1		4
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	3	3	3	1	1	1	2		4
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	1	3	3	3	1	1	1	1		4
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	1	3	3	3	1	1	1	1		4
SP26	Notstromverteilung Allg. II	1	2	2	3	1	1	1	2		4

Tabelle D 5: Bewertung Schadensausmaß durch Schaltmeister Schicht 4

Nr.	Gewichtungskategorien Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit				
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalienaustritt	Emissionsüberschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagenstillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen
SP01	Trafo MK	1	1	3		3	1			1
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	1	3		3				3
SP03	Trafo Netzpumpe	1	1	1		1	1			1
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	1	1		1	1			1
SP05	Trafo NSHV Nord	1	1	1		1	1			1
SP06	Trafo NSHV Süd	1	1	1		1	1			1
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	1	2		2	2			2
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	1	3		2	2			2
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	1	3		3				3
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	1	1	1		1	1			1
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	1	3		1	1			1
SP12	FU Netzpumpe 4	1	1	1		1	1			1
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	1	3		1				1
SP14	FU Denox Gebläse	1	1	3		2				
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	1	1		1				1
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	1	1		1	1			1
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	1	3		3				3
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	1	1		1	1			1
SP19	NSHV 400V MK	1	1	3		3				3
SP20	NSHV Nord	1	1	1		1	1			1
SP21	NSHV Süd	1	1	1			1			1
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	1	1		1	1			1
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	1	3		2	2			2
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	1	1	3		3				3
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	1	1	1		1	1			1
SP26	Notstromverteilung Allg. II	1	1	1		1	1			1

Tabelle D 6: Bewertung Eintrittswahrscheinlichkeit durch Schaltmeister Schicht 4

Nr.	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungs Intervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethode	Schutzsystem
SP01	Trafo MK	1	3	4	2	1	1	1			1
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	3	4	2	1	2	1			1
SP03	Trafo Netzpumpe	1	3	4	2	1	2	1			1
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	3	4	2	1	2	1			2
SP05	Trafo NSHV Nord	1	3	4	2	1	1	1			2
SP06	Trafo NSHV Süd	1	3	4	2	1	1	1			2
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	3	4	2	1	1	1			1
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	3	4	2	1	2	1			1
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	3	4	2	1	2	1			1
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	1	3	4	2	1	2	1			1
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	3	4	2	1	2	1			1
SP12	FU Netzpumpe 4	1	3	4	2	1	2	1			1
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	3	4	2	1	2	1			1
SP14	FU Denox Gebläse	1	3	4	2	1	2	1			1
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	3	4	2	1	2	1			1
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	3	4	2	1	2	1			1
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	3	4	2	1	2	1			1
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	3	4	2	1	2	1			1
SP19	NSHV 400V MK	1	3	4	2	1	1	1			1
SP20	NSHV Nord	1	3	4	2	1	1	1			1
SP21	NSHV Süd	1	3	4	2	1	1	1			1
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	3	4	2	1	1	1			1
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	3	4	2	1	1	1			1
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	1	3	4	2	1	1	1			1
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	1	3	4	2	1	1	1			1
SP26	Notstromverteilung Allg. II	1	1	4	2	1	1	1			1

Tabelle D 7: Worst Case Schadenswerte aus den Einzelwerten

Nr.	Gewichtungskategorien Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit					gewichteter Gesamtwert Schaden
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalien- austritt	Emissions- überschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagen- stillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen	
SP01	Trafo MK	1	2	3	3	4	1	2	1	3	3
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	2	3	3	4	3	2	2	3	3
SP03	Trafo Netzpumpe	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2
SP05	Trafo NSHV Nord	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2
SP06	Trafo NSHV Süd	1	2	1	1	1	2	2	1	2	2
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	3	3	3	4	3	2	1	3	3
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	3	3	3	4	2	2	1	3	3
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	2	3	3	4	3	3	2	3	3
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	1	3	3	4	3	2	2	3	3
SP12	FU Netzpumpe 4	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	1	3	3	4	3	2	2	2	3
SP14	FU Denox Gebläse	1	2	3	3	3	2	2	2	2	3
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	1	3	3	3	3	2	2	3	3
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
SP19	NSHV 400V MK	1	1	3	3	4	3	3	2	3	3
SP20	NSHV Nord	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2
SP21	NSHV Süd	1	1	1	1	3	3	3	2	2	2
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	1	3	3	4	3	3	2	3	3
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	4	2	3	3	4	3	4	2	3	4
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	4	2	1	3	2	3	3	2	3	3
SP26	Notstromverteilung Allg. II	4	1	1	3	2	3	3	2	2	3

Tabelle D 8: Worst Case Wahrscheinlichkeitswerte aus den Einzelwerten

Nr.	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungsintervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethode	Schutzsystem	Gesamtwert Wahrscheinlichkeit
SP01	Trafo MK	1	3	4	3	1	1	2	2	2	1	2
SP02	Trafo MK Saugzuggebläse	1	3	4	3	1	2	2	3	2	1	2
SP03	Trafo Netzpumpe	1	3	4	3	1	2	2	2	2	1	2
SP04	Trafo Feuerlöschpumpe	1	3	4	3	1	2	2	2	2	2	2
SP05	Trafo NSHV Nord	1	3	4	3	1	1	2	2	2	2	2
SP06	Trafo NSHV Süd	1	3	4	3	1	1	1	2	2	2	2
SP07	Trafo Allg. bzw. HWK	1	3	4	3	1	1	1	2	2	1	2
SP08	Trafo HWK Frischluftgebläse	1	3	4	3	1	2	1	2	2	1	2
SP09	FU MK Saugzuggebläse	1	3	4	3	1	2	2	1	1	1	2
SP10	FU Netzpumpe 1, 2, 3	2	3	4	3	1	2	2	2	1	1	2
SP11	FU HWK Frischluftgebläse	1	3	4	3	1	2	1	2	1	1	2
SP12	FU Netzpumpe 4	2	3	4	3	1	2	2	1	1	1	2
SP13	FU Rez. Gebläse HWK	1	3	4	3	1	2	2	1	1	1	2
SP14	FU Denox Gebläse	1	3	4	3	1	2	2	2	1	4	2
SP15	FU Erzeuger Pumpe HWK	1	3	4	3	1	2	2	2	1	1	2
SP16	FU Erzeuger Pumpe MK	1	3	4	3	1	2	2	2	1	1	2
SP17	FU MK Frischluftgebläse	1	3	4	3	1	2	2	1	1	1	2
SP18	FU Druckerhöhungspumpe AKH 2	1	3	4	3	1	2	2	1	1	1	2
SP19	NSHV 400V MK	1	3	4	4	1	1	2	1	4	1	2
SP20	NSHV Nord	1	3	4	4	1	1	2	1	4	4	3
SP21	NSHV Süd	1	3	4	4	1	1	2	1	4	4	3
SP22	NSHV 400V Allgemein	1	3	4	4	1	1	2	1	4	4	3
SP23	NSHV 400V HWK 1+2	1	3	4	4	1	1	2	2	4	4	3
SP24	0,4kV Notstromschiene 2 MK	1	3	4	4	1	1	2	1	4	4	3
SP25	0,4kV Notstromschiene 1 Allg.	1	3	4	4	1	1	2	1	4	4	3
SP26	Notstromverteilung Allg. II	1	2	4	4	1	1	2	2	4	4	3

Anhang E – Einzelergebnisse der Risikobewertung der zur Thermografieüberwachung ausgewählten Elektroanlagen, Flötzersteig

- Gruppenleiter Elektrotechnik – Tabelle E 1 & E 2

- Werkstättenleiter Stv. E-Werkstätte – Tabelle E 3 & E 4

- Kraftwerkselektriker Schicht 4 – Tabelle E 5 & E 6

- Worst Case Auswertung der Einzelbewertungen – Tabelle E 7 & E 8

Tabelle E 1: Bewertung Schadensausmaß durch Gruppenleiter Elektrotechnik

Nr	Gewichtungskategorien Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit				
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalien-austritt	Emissions-überschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagen-stillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen
FS1	Trafo 1 MKA	1	1	2	1	3	1	1	1	1
FS2	Trafo 2 MKA	1	1	2	1	3	1	1	1	1
FS3	Trafo 3 MKA	1	1	2	1	3	1	1	1	1
FS4	Trafo 4 RRA	1	1	2	1	3	1	1	1	1
FS5	Trafo 5 Denox	1	1	3	3	4	3	4	2	1
FS6	FU Müllkran	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS7	FU Denox	1	1	3	3	4	1	3	3	1
FS8	FU Primärluftgebläse	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS9	FU Sekundärluftgebläse	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS10	FU Saugzuggebläse	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS11	NSHV 400V RRA	1	1	3	3	4	3	4	2	1
FS12	NSHV ARA	1	1	3	3	4	3	4	2	1
FS13	NSHV Kompensation 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS19	NSHV LS Abgang Reserve	1	1	2	1	3	3	2	2	1
FS20	NSHV LS Müllkran	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS21	NSHV Kleinverbraucher	1	1	2	1	3	1	1	1	1
FS22	USV Unterverteiler	1	1	3	3	3	3	2	1	1

Tabelle E 2: Bewertung Eintrittswahrscheinlichkeit durch Gruppenleiter Elektrotechnik

Nr	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungs Intervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethoden	Schutzsystem
FS1	Trafo 1 MKA	1	2	3	2	1	1	2	1	3	1
FS2	Trafo 2 MKA	1	2	3	2	1	1	2	1	3	1
FS3	Trafo 3 MKA	1	2	3	2	1	1	2	1	3	1
FS4	Trafo 4 RRA	1	2	3	2	1	1	2	1	3	1
FS5	Trafo 5 Denox	1	2	3	2	1	1	2	1	4	1
FS6	FU Müllkran	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
FS7	FU Denox	1	1	3	2	1	1	2	1	3	1
FS8	FU Primärluftgebläse	1	1	3	2	1	1	2	1	3	1
FS9	FU Sekundärluftgebläse	1	1	2	1	3	3	2	2	1	1
FS10	FU Saugzuggebläse	1	1	2	1	3	3	2	2	1	1
FS11	NSHV 400V RRA	1	3	3	2	1	1	2	1	3	1
FS12	NSHV ARA	1	3	3	2	1	1	2	1	3	1
FS13	NSHV Kompensation 1	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1
FS19	NSHV LS Abgang Reserve	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1
FS20	NSHV LS Müllkran	1	2	3	4	1	1	2	1	4	1
FS21	NSHV Kleinverbraucher	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1
FS22	USV Unterverteiler	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1

Tabelle E 3: Bewertung Schadensausmaß durch Werkstättenleiter Stv. E-Werkstätte

Nr	Gewichtungskategorien Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit				
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalien-austritt	Emissions-überschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagen-stillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen
FS01	Trafo 1 MKA	1	2	1	1	1	1	1	1	1
FS02	Trafo 2 MKA	1	2	1	1	1	1	1	1	1
FS03	Trafo 3 MKA	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS04	Trafo 4 RRA	1	2	1	1	2	2	1	1	1
FS05	Trafo 5 Denox	1	1	3	3	4	3	4		1
FS06	FU Müllkran	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS07	FU Denox	1	1	2	2	2	2	2	2	1
FS08	FU Primärluftgebläse	1	1	2	2	2	2	2	2	2
FS09	FU Sekundärluftgebläse	1	1	2	2	2	2	2	2	2
FS10	FU Saugzuggebläse	1	2	3	3	3	3	1	1	1
FS11	NSHV 400V RRA	1	1							1
FS12	NSHV ARA	1	3	2	2	2	2		2	1
FS13	NSHV Kompensation 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS19	NSHV LS Abgang Reserve	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS20	NSHV LS Müllkran	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS21	NSHV Kleinverbraucher	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS22	USV Unterverteiler	1	1	3	3	3	3			2

Tabelle E 4: Bewertung Eintrittswahrscheinlichkeit durch Werkstättenleiter Stv. E-Werkstätte

Nr	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungsintervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethode	Schutzsystem
FS01	Trafo 1 MKA	1	2	2	2	1	1	1	2		
FS02	Trafo 2 MKA	1	2	2	2	1	1	1	2		
FS03	Trafo 3 MKA	1	2	2	2	1	1	1	2		
FS04	Trafo 4 RRA	1	2	2	2	1	1	1	2		
FS05	Trafo 5 Denox	1	2	2	2	1	1	1	2		
FS06	FU Müllkran	2	2		3	2	1	1	2		
FS07	FU Denox	1	2		2	1	1	1	2		1
FS08	FU Primärluftgebläse	1	2		2	1	1	1	2		1
FS09	FU Sekundärluftgebläse	1	2		2	1	1	1	2		1
FS10	FU Saugzuggebläse	1	2		2	2	1	1	2		1
FS11	NSHV 400V RRA	2	2		2	1	1	1	2		
FS12	NSHV ARA	2	2		2	1	1	1	2		
FS13	NSHV Kompensation 1	1	2		2	1	1	1	2		
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	2		2	1	1	1	2		
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	2		2	1	1	1	2		
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	2		2	1	1	1	2		
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	2		2	1	1	1	2		
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	2		2	1	1	1	2		
FS19	NSHV LS Abgang Reserve	1	2		2	1	1	1	1		
FS20	NSHV LS Müllkran	2	2		2	1	1	1	2		
FS21	NSHV Kleinverbraucher	2	2		2	1	1	1	2		
FS22	USV Unterverteiler	2	2		2	1	1	1	2		4

Tabelle E 5: Bewertung Schadensausmaß durch Kraftwerkselektriker Schicht 4

Nr	Gewichtungskategorien Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit				
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalienaustritt	Emissionsüberschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagenstillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen
FS01	Trafo 1 MKA	1	3	1	1	1	1	2		1
FS02	Trafo 2 MKA	1	3	1	1	1	1	2		1
FS03	Trafo 3 MKA	1	1	1	1	1	1	2		1
FS04	Trafo 4 RRA	1	3	1	1	1	1	2		1
FS05	Trafo 5 Denox	1	1	3	3	1	4	4		1
FS06	FU Müllkran	1	1	1	1		1	2	1	1
FS07	FU Denox	1	1	1	1		1	1	1	1
FS08	FU Primärluftgebläse	1	1	3	3		3	2	2	1
FS09	FU Sekundärluftgebläse	1	1	3	3		1	2	2	1
FS10	FU Saugzuggebläse	1	1	3	3		3	2		1
FS11	NSHV 400V RRA									
FS12	NSHV ARA									
FS13	NSHV Kompensation 1									
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	1	1	1	1	1	1		1
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	1	1	1	1	1	1		1
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	1	1	1	1	1	1		1
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	1	1	1	1	1	1		1
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	1	1	1	1	1	1		1
FS19	NSHV LS Abgang Reserve									
FS20	NSHV LS Müllkran	1	1	1	1			1		1
FS21	NSHV Kleinverbraucher	1	2	3				1	1	1
FS22	USV Unterverteiler	1	1	3	3		3	4		1

Tabelle E 6: Bewertung Eintrittswahrscheinlichkeit durch Kraftwerkselektriker Schicht 4

Nr	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungs Intervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethode	Schutzsystem
FS01	Trafo 1 MKA	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS02	Trafo 2 MKA	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS03	Trafo 3 MKA	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS04	Trafo 4 RRA	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS05	Trafo 5 Denox	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS06	FU Müllkran	2	2		2		1	1	1	1	1
FS07	FU Denox	1	1		2	1	1	1	1	1	1
FS08	FU Primärluftgebläse	1	1		2	1	1	1	1	1	1
FS09	FU Sekundärluftgebläse	1	1		2		1	1	1	1	1
FS10	FU Saugzuggebläse	1	1		2	1	1	1	1	1	1
FS11	NSHV 400V RRA										
FS12	NSHV ARA										
FS13	NSHV Kompensation 1										
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	2		1	1	1	1	1	1	1
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	2		1	1	1	1	1	1	1
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	2		1	1	1	1	1	1	1
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS19	NSHV LS Abgang Reserve										
FS20	NSHV LS Müllkran	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS21	NSHV Kleinverbraucher	1	2		2	1	1	1	1	1	1
FS22	USV Unterverteiler	1	2		2	1	1	1	1	1	1

Tabelle E 7: Worst Case Schadenswerte aus den Einzelwerten

Nr	Gewichtungskategorien Bewertung Schaden	Mensch		Recht		Wirtschaftlichkeit					
		Sicherheit u. Gesundheit v. Mitarbeitern	Stoff- und Chemikalien-austritt	Emissions-überschreitung	Behördliche Konsequenzen	Notaus	Anlagenstillstand	Stillstand des Aggregates	Unterschreitung wichtiger Betriebsparameter	Schäden an nachfolgenden Baugruppen	gewichteter Gesamtwert Schaden
FS01	Trafo 1 MKA	1	3	2	1	3	1	2	1	1	2
FS02	Trafo 2 MKA	1	3	2	1	3	1	2	1	1	2
FS03	Trafo 3 MKA	1	1	2	1	3	1	2	1	1	2
FS04	Trafo 4 RRA	1	3	2	1	3	2	2	1	1	2
FS05	Trafo 5 Denox	1	1	3	3	4	4	4	2	1	3
FS06	FU Müllkran	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
FS07	FU Denox	1	1	3	3	4	2	3	3	1	3
FS08	FU Primärluftgebläse	1	1	3	3	3	3	2	2	2	3
FS09	FU Sekundärluftgebläse	1	1	3	3	3	3	2	2	2	3
FS10	FU Saugzuggebläse	1	2	3	3	3	3	2	2	1	3
FS11	NSHV 400V RRA	1	1	3	3	4	3	4	2	1	3
FS12	NSHV ARA	1	3	3	3	4	3	4	2	1	3
FS13	NSHV Kompensation 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	1	2	1	3	3	2	2	1	2
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	1	2	1	3	3	2	2	1	2
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	1	2	1	3	3	2	2	1	2
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	1	2	1	3	3	2	2	1	2
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	1	2	1	3	3	2	2	1	2
FS19	NSHV LS Abgang Reserve	1	1	2	1	3	3	2	2	1	2
FS20	NSHV LS Müllkran	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FS21	NSHV Kleinverbraucher	1	2	3	1	3	1	1	1	1	2
FS22	USV Unterverteiler	1	1	3	3	3	3	4	1	2	3

Tabelle E 8: Worst Case Wahrscheinlichkeitswerte aus den Einzelwerten

Nr	Bewertung Wahrscheinlichkeit	Probleme in der Vergangenheit	Alter/ Lebensdauer	Wartungsintervall	Überwachungsintervall	Betriebsparameter	Faktor Mensch	Erfahrung	Handhabung von gemeldeten Mängeln	Zustandserfassung durch geeignete Prüfmethode	Schutzsystem	Gesamtwert Wahrscheinlichkeit
FS01	Trafo 1 MKA	1	2	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS02	Trafo 2 MKA	1	2	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS03	Trafo 3 MKA	1	2	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS04	Trafo 4 RRA	1	2	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS05	Trafo 5 Denox	1	2	3	2	1	1	2	2	4	1	2
FS06	FU Müllkran	2	2	3	4	2	1	2	2	4	1	2
FS07	FU Denox	1	2	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS08	FU Primärluftgebläse	1	2	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS09	FU Sekundärluftgebläse	1	2	2	2	3	3	2	2	1	1	2
FS10	FU Saugzuggebläse	1	2	2	2	3	3	2	2	1	1	2
FS11	NSHV 400V RRA	2	3	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS12	NSHV ARA	2	3	3	2	1	1	2	2	3	1	2
FS13	NSHV Kompensation 1	1	2	3	4	1	1	2	2	4	1	2
FS14	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	1	2	3	4	1	1	2	2	3	1	2
FS15	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	1	2	3	4	1	1	2	2	3	1	2
FS16	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	1	2	3	4	1	1	2	2	3	1	2
FS17	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	1	2	3	4	1	1	2	2	3	1	2
FS18	NSHV LS Kupplung zu RG	1	2	3	4	1	1	2	2	3	1	2
FS19	NSHV LS Abgang Reserve	1	2	3	4	1	1	2	1	3	1	2
FS20	NSHV LS Müllkran	2	2	3	4	1	1	2	2	4	1	2
FS21	NSHV Kleinverbraucher	2	2	3	4	1	1	2	2	3	1	2
FS22	USV Unterverteiler	2	2	3	4	1	1	2	2	3	4	2

Anhang F – Auszug aus den Thermografieblättern, Spittelau

Tabelle F 1: Anlagen zur Thermografie Spittelau (1)

Nr.	RK	Objekt	Letzte Messung	Letzter Befund ¹
Eigentrafos				
T01	III	Trafo MK1	27.04.10	ok
T02	III	Trafo MK1 / MK2	27.04.10	ok
T03	III	Trafo MK2	27.04.10	ok
T04	II	Trafo MK1 Saugzuggebläse	27.04.10	ok
T05	II	Trafo MK2 Saugzuggebläse	27.04.10	ok
T06	IV	Trafo Netzpumpe 3	27.04.10	ok
T07	IV	Trafo Feuerlöschpumpe 1	27.04.10	ok
T08	III	Trafo NSHV Nord	27.04.10	ok
T09	IV	Trafo NSHV Süd WAB (obere Ebene)	27.04.10	ok
T10	IV	Trafo NSHV Süd Allg. (untere Ebene)	27.04.10	ok
T11	IV	Trafo Feuerlöschpumpe 2	27.04.10	ok
T12	IV	Trafo Netzpumpe 1	27.04.10	ok
T13	IV	Trafo Netzpumpe 2	27.04.10	ok
T14	III	Trafo Allg.	27.04.10	ok
T15	III	Trafo Allg. / HWK	27.04.10	ok
T16	III	Trafo HWK	27.04.10	ok
T17	II	Trafo HWK1 Frischluftgebläse	27.04.10	ok
T18	II	Trafo HWK2 Frischluftgebläse	27.04.10	ok
Frequenzumrichter				
F01	II	FU MK1 Saugzuggebläse	27.04.10	TA
F02	II	FU MK2 Saugzuggebläse	27.04.10	ok
F03	IV	FU Netzpumpe 3	27.04.10	TA
F04	IV	FU Netzpumpe 1	27.04.10	TA
F05	IV	FU Netzpumpe 2	27.04.10	ok
F06	II	FU HWK1 Frischluftgebläse	27.04.10	ok
F07	II	FU HWK2 Frischluftgebläse	27.04.10	ok
F08	IV	FU Netzpumpe 4	27.04.10	ok
F09	II	FU Rez. Gebläse HWK 1	27.04.10	ok

1 Klassifikation der Prüfergebnisse nach DIN 54191:2009: **ok** = kein Auffälligkeit; **TA** = thermische Auffälligkeit; **GTA** = gefährliche thermische Auffälligkeit; **kb** = kein Befund möglich; **NTA** = sonstige Auffälligkeit nicht thermischer Art;



Tabelle F 2: Anlagen zur Thermografie Spittelau (2)

Nr.	RK	Objekt	Letzte Messung	Letzter Befund ²
F10	II	FU Rez. Gebläse HWK 2	27.04.10	TA
F11	III	FU Denox Gebläse 1	27.04.10	ok
F12	III	FU Denox Gebläse 2	27.04.10	ok
F13	IV	FU Erzeuger Pumpe 1 HWK 1	27.04.10	TA
F14	IV	FU Erzeuger Pumpe 2 HWK 1	05.05.10	TA
F15	IV	FU Erzeuger Pumpe 3 HWK 2	27.04.10	ok
F16	IV	FU Erzeuger Pumpe 4 HWK 2	27.04.10	ok
F17	IV	FU Erzeuger Pumpe 1 MK	27.04.10	ok
F18	IV	FU Erzeuger Pumpe 2 MK	27.04.10	ok
F19	IV	FU Erzeuger Pumpe 3 MK	27.04.10	ok
F20	IV	FU Erzeuger Pumpe 4 MK	27.04.10	ok
F21	II	FU MK 1 Frischluftgebläse	27.04.10	TA
F22	II	FU MK 2 Frischluftgebläse	27.04.10	ok
F23	IV	FU Druckerhöhungspumpe 1 AKH 2	27.04.10	GTA
F24	IV	FU Druckerhöhungspumpe 2 AKH 2	27.04.10	GTA

Niederspannungshauptverteilung

N01	II	NSHV 400V MK1	27.04.10	ok
N02	II	NSHV 400V MK2	27.04.10	ok
N03	II	NSHV Nord	27.04.10	ok
N04	II	NSHV Süd WAB (obere Ebene)		
N05	II	NSHV Süd Allgemein (untere Ebene)	27.04.10	ok
N06	II	NSHV 400V Allgemein	27.04.10	ok
N07	II	NSHV 400V HWK 1+2	27.04.10	ok
N08	I	0,4kV Notstromschiene 2 MK	27.04.10	ok
N09	II	0,4kV Notstromschiene 1 Allgemein	27.04.10	ok
N10	II	Notstromverteilung Allg. II	27.04.10	ok
N11	k.A.	Notstrom NSHV Süd (obere Ebene)		
N11	k.A.	Notstrom Prozessanlagen		
N12	k.A.	Notstrom Sicherheitsversorgung		
N13	k.A.	NSHV mit Umschaltautomatik		
N14	k.A.	EMERSON-USV Abgangsverteiler NSHV Süd (obere Ebene)		
N15	k.A.	USV neu		

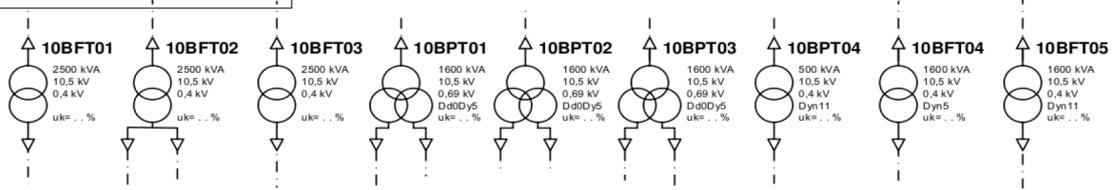
2 Klassifikation der Prüfergebnisse nach DIN 54191:2009: **ok** = kein Auffälligkeit; **TA** = thermische Auffälligkeit; **GTA** = gefährliche thermische Auffälligkeit; **kb** = kein Befund möglich; **NTA** = sonstige Auffälligkeit nicht thermischer Art;



Eigentrafos

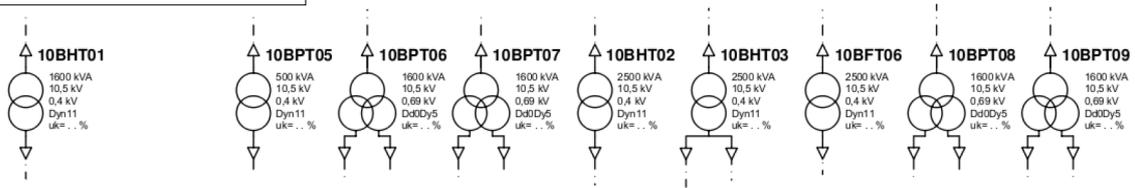
10kV / 0,4kV bzw. 0,7kV

10kV Schiene 1:



Nr.	Symbol	Objekt	10kV Schiene
T01		MK 1	10BCA05 (18BCA05)
T02		MK 1 / MK 2	10BCA06 (18BCA06)
T03		MK 2	10BCA07 (18BCA07)
T04		MK 1 Saugzuggebläse	10BCA08 (18BCA08)
T05		MK 2 Saugzuggebläse	10BCA09 (18BCA09)
T06		Netzpumpe 3	10BCA10 (18BCA10)
T07		Feuer Löschpumpe 1	10BCA11 (18BCA11)
T08		NSHV Nord	10BCA12 (18BCA12)
T09		NSHV Süd WAB (obere Ebene)	10BCA13 (18BCA13)

10kV Schiene 2:



Nr.	Symbol	Objekt	10kV Schiene
T10		NSHV Süd Allg. (untere Ebene)	10BCB17 (18BCB17)
T11		Feuer Löschpumpe 2	10BCB19 (18BCB19)
T12		Netzpumpe 1	10BCB20 (18BCB20)
T13		Netzpumpe 2	10BCB21 (18BCB21)
T14		Allgemein	10BCB22 (18BCB22)
T15		Allg. / HWK	10BCB23 (18BCB23)
T16		HWK	10BCB24 (18BCB24)
T17		HWK 1 Frischlufthebläse	10BCB25 (18BCB25)
T18		HWK 2 Frischlufthebläse	10BCB26 (18BCB26)

T01 Trafo MK 1

Technische Details:

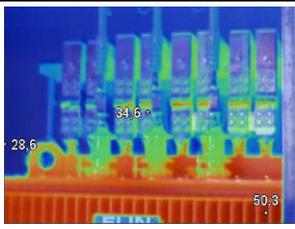
Baujahr : -
Fabrikat : Elin
Type : TDQ 253 A01S1K49
Prinzip : Öltransformator
OS Spannung : 20000 V
US Spannung : 400 V
Nennleistung : 2500 kVA



Messstellen:

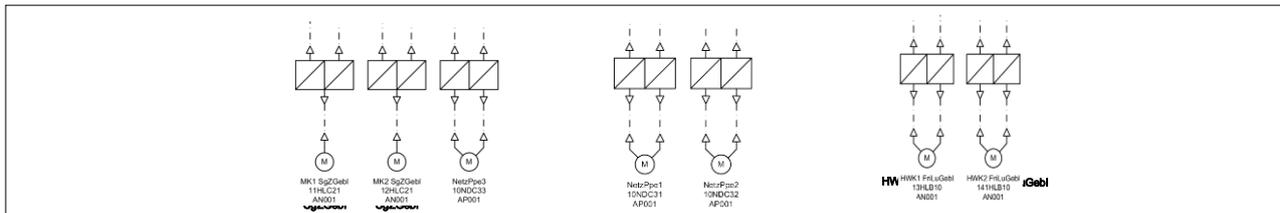
Nr.	Stelle	Foto	Anweisung
1	Elektrische Anschlüsse		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen

Messungen:

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
60A, 900kW			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

Frequenzrichter

0,7kV:



Nr.	Symbol	Objekt	Bezeichnung	10kV Schiene
F01		MK 1 Saugzuggebläse	11BFR12	10BCA08 (18BCA08)
F02		MK 2 Saugzuggebläse	11BFR22	10BCA09 (18BCA09)
F03		Netzpumpe 3	18BFQ3	10BCA10 (18BCA10)
F04		Netzpumpe 1	18BFQ1	10BCB20 (18BCB20)
F05		Netzpumpe 2	18BFQ2	10BCB21 (18BCB21)
F06		HWK 1 Frischluffgebläse	13BFP1	10BCB25 (18BCB25)
F07		HWK 2 Frischluffgebläse	13BFP2	10BCB26 (18BCB26)

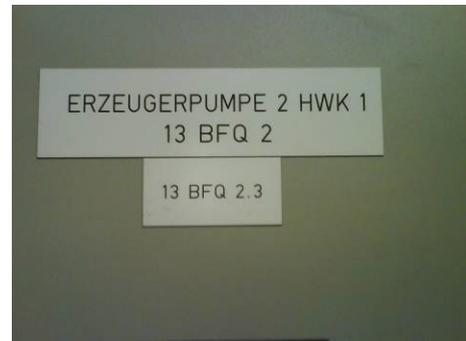
0,4kV:

Nr.	Objekt	Bezeichnung
F08	Netzpumpe 4	18BFQ4
F09	Rez. Gebläse HWK 1	13BFR1
F10	Rez. Gebläse HWK 2	13BFR2
F11	Denox Gebläse 1	11BFS02
F12	Denox Gebläse 2	11BFS02
F13	Erzeuger Pumpe 1 HWK 1	13BFQ1
F14	Erzeuger Pumpe 2 HWK 1	13BFQ2
F15	Erzeuger Pumpe 3 HWK 2	13BFQ3
F16	Erzeuger Pumpe 4 HWK 2	13BFQ4
F17	Erzeuger Pumpe 1 MK	11BFS11
F18	Erzeuger Pumpe 2 MK	11BFS12
F19	Erzeuger Pumpe 3 MK	11BFS13
F20	Erzeuger Pumpe 4 MK	11BFS14
F21	MK 1 Frischluftgebläse	
F22	MK 2 Frischluftgebläse	
F23	Druckerhöhungspumpe 1 AKH 2	13BFQ51 13BFQ52
F24	Druckerhöhungspumpe 2 AKH 2	18BFQ51 18BFQ52

F14 FU Erzeuger Pumpe 2 HWK 1

Technische Details:

Baujahr :
Fabrikat :
Type :
Prinzip :
Netzanschlussspannung :
Netzfrequenz :
Nennleistung :
Nennstrom :

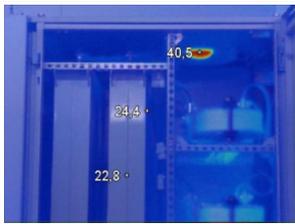


Messstellen:

Nr.	Stelle	Foto	Anweisung
1	Schaltschrank 2.1 (Bereich oben)		Thermografie der elektrischen Leiter mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
2	Schaltschrank 2.1 (Bereich mitte)		
3	Schaltschrank 2.1 (Bereich unten)		
4	Schaltschrank 2.2 (Bereich mitte)		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
5	Schaltschrank 2.2 (Bereich unten)		
6	Schaltschrank 2.3 (Bereich oben)		Thermografie der Automaten und der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
7	Schaltschrank 2.3 (Bereich mitte)		
8	Schaltschrank 2.3 (Bereich unten)		
9	Schaltschrank 2.3 (Bereich unten)		

Messungen:

• Messstelle 1

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

• Messstelle 2

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten.			

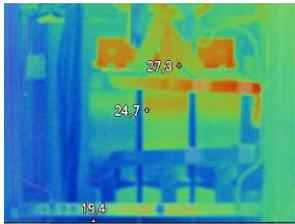
• Messstelle 3

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten.			

• Messstelle 4

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten.			

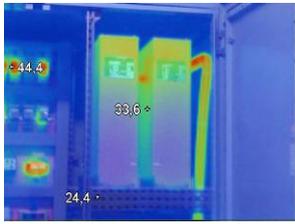
• Messstelle 5

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten.			

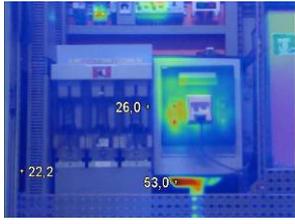
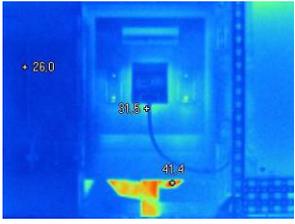
• Messstelle 6

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: TA	Befund:	Befund:	Befund:
Einzelne Automaten über 50°C.			

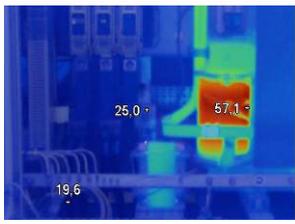
• Messstelle 7

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten.			

• Messstelle 8

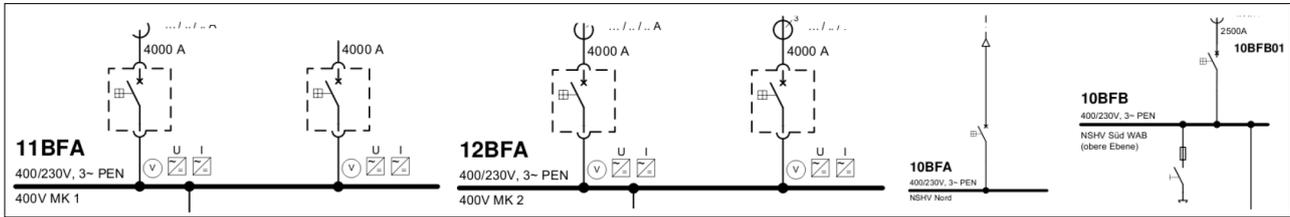
27.04.10	05.05.10	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%	Last ca. 50%		
			
Befund: GTA	Befund: ok	Befund:	Befund:
Eindeutige Asymmetrie der Anspeisung erkennbar.	Symmetrische Belastung nach Austausch der Sicherungseinsätze und Nachziehen aller Klemmverbindungen.		

• Messstelle 9

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Last ca. 50%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Spule auf über 57°C sollte jedoch kein Problem sein.			

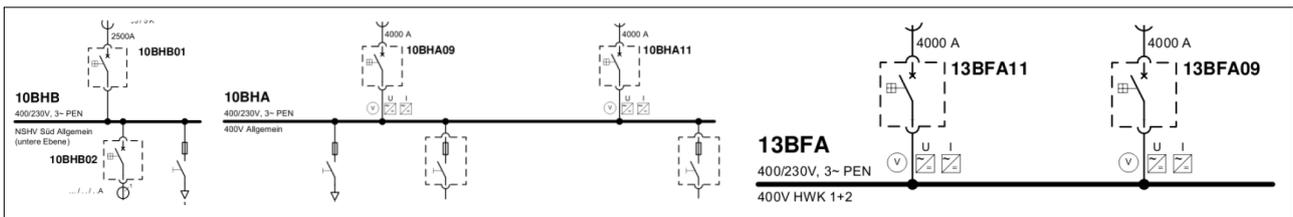
Niederspannungshauptverteilung

10kV Schiene 1:



Nr.	Symbol	Objekt	10kV Schiene
N01		400V MK1	10BCA05 (18BCA05), 10BCA06 (18BCA06)
N02		400V MK2	10BCA06 (18BCA06), 10BCA07 (18BCA07)
N03		NSHV Nord	10BCA12 (18BCA12)
N04		NSHV Süd WAB (obere Ebene)	10BCA13 (18BCA13)

10kV Schiene 2:



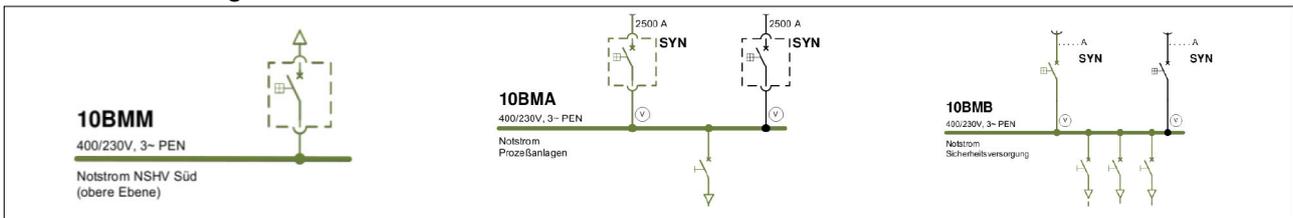
Nr.	Symbol	Objekt	10kV Schiene
N05		NSHV Süd Allgemein (untere Ebene)	10BCB17 (18BCB17)
N06		400V Allgemein	10BCB22 (18BCB22), 10BCB23 (18BCB23)
N07		400V HWK 1+2	10BCB23 (18BCB23), 10BCB24 (18BCB24)

Notstrom MK:



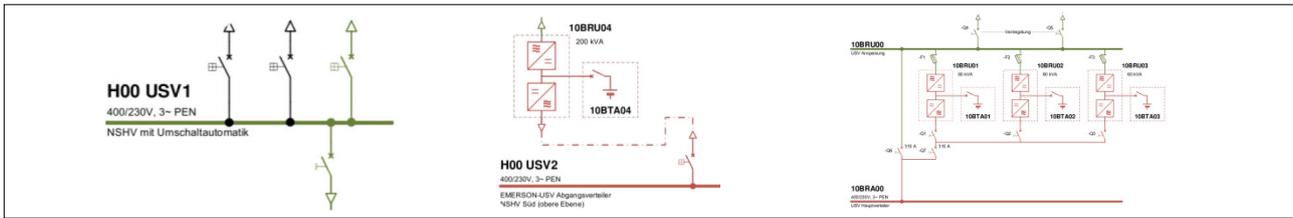
Nr.	Symbol	Objekt
N08	<p>11BMA 400/230V, 3~ PEN Notstrom MK 1</p>	Notstrom MK 1
N09	<p>12BMA 400/230V, 3~ PEN Notstrom MK 2</p>	Notstrom MK 2

Notstrom Allgemein:



Nr.	Symbol	Objekt
N10	<p>10BMM 400/230V, 3~ PEN Notstrom NSHV Süd (obere Ebene)</p>	Notstrom NSHV Süd (obere Ebene)
N11	<p>10BMA 400/230V, 3~ PEN Notstrom Prozessanlagen</p>	Notstrom Prozessanlagen
N12	<p>10BMB 400/230V, 3~ PEN Notstrom Sicherheitsversorgung</p>	Notstrom Sicherheitsversorgung

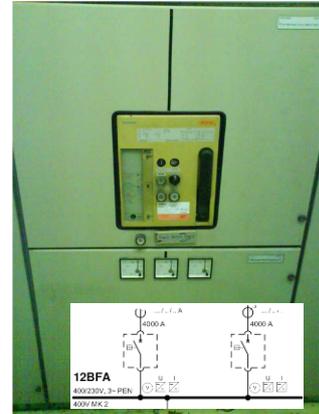
USV:



Nr.	Symbol	Objekt
N13		NSHV mit Umschaltautomatik
N14		EMERSON-USV Abgangverteiler NSHV Süd (obere Ebene)
N15		USV neu

N02 NSHV 400V MK2

Technische Details:

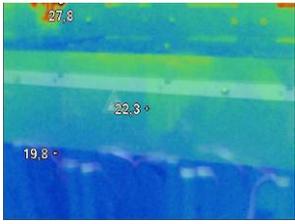


Messstellen:

Nr.	Stelle	Foto	Anweisung
1	Anschlüsse 0,4kV MK2 Einsp1 LS von 18BCA07 (MK2)		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
2	Anschlüsse Rückseite 0,4kV MK2 Einsp1 LS von 18BCA07 (MK2)		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
3	Anschlüsse 0,4kV MK2 Einsp2 LS von 18BCA06 (MK2/MK1)		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
4	Anschlüsse Rückseite 0,4kV MK2 Einsp2 LS von 18BCA06 (MK2/MK1)		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen

Messungen:

• Messstelle 1

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Außer Betrieb			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

• Messstelle 2

27.04.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Außer Betrieb			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

- Messstelle 3

Datum	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Befund:	Befund:	Befund:	Befund:

- Messstelle 4

Datum	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Befund:	Befund:	Befund:	Befund:

Anhang G – Auszug aus den Thermografieblättern, Flötzersteig

Tabelle G 1: Anlagen zur Thermografie Flötzersteig (1)

Nr.	RK	Objekt	Letzte Messung	Letzter Befund ³
Eigentrafos				
T01	IV	Trafo 1 MKA	10.06.10	ok
T02	IV	Trafo 2 MKA	10.06.10	ok
T03	IV	Trafo 3 MKA	10.06.10	ok
T04	IV	Trafo 4 RRA	10.06.10	ok
T05	II	Trafo 5 Denox	10.06.10	ok
Frequenzumrichter				
F01	IV	FU Müllkran 1		
F02	IV	FU Müllkran 2		
F03	III	FU Denox 1	13.07.10	ok
F04	III	FU Denox 2	13.07.10	ok
F05	II	FU Primärluftgebläse 1	13.07.10	TA
F06	II	FU Primärluftgebläse 2	13.07.10	TA
F07	II	FU Primärluftgebläse 3	13.07.10	TA
F08	II	FU Sekundärluftgebläse 1	13.07.10	TA
F09	II	FU Sekundärluftgebläse 2	13.07.10	TA
F10	II	FU Sekundärluftgebläse 3	13.07.10	TA
F11	II	FU Saugzuggebläse 1	13.07.10	ok
F12	II	FU Saugzuggebläse 2	13.07.10	ok
F13	II	FU Saugzuggebläse 3	13.07.10	ok

³ Klassifikation der Prüfergebnisse nach DIN 54191:2009: **ok** = kein Auffälligkeit; **TA** = thermische Auffälligkeit; **GTA** = gefährliche thermische Auffälligkeit; **kb** = kein Befund möglich; **NTA** = sonstige Auffälligkeit nicht thermischer Art;



Tabelle G 2: Anlagen zur Thermografie Flötzersteig (2)

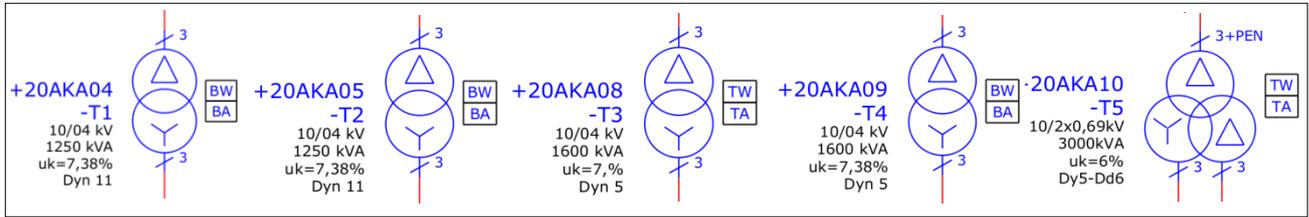
Nr.	RK	Objekt	Letzte Messung	Letzter Befund ⁴
Niederspannungshauptverteilung				
N01	II	NSHV 400V RRA Kuppl. Zu RRA/MKA	13.07.10	ok
N02	II	NSHV 400V RRA Trafo 4 Einspeisung	13.07.10	ok
N03	II	NSHV 400V RRA Feld 0	13.07.10	ok
N04	II	NSHV 400V RRA Linie 1	13.07.10	ok
N05	II	NSHV 400V RRA Linie 2	13.07.10	TA
N06	II	NSHV 400V RRA Linie 3	13.07.10	ok
N07	II	NSHV 400V RRA Feld 4	13.07.10	ok
N08	II	NSHV 400V RRA Kompensation		
N09	II	NSHV 400V ARA Allgemein	13.07.10	ok
N10	II	NSHV 400V ARA Allgemein	13.07.10	ok
N11	II	NSHV 400V ARA Allgemein	13.07.10	ok
N12	II	NSHV 400V ARA KFP 1	13.07.10	ok
N13	II	NSHV 400V ARA KFP 2	13.07.10	ok
N14	II	NSHV 400V ARA NAOH	13.07.10	ok
N15	II	NSHV 400V ARA FU	13.07.10	ok
N16	IV	NSHV Kompensation 1	13.07.10	TA
N17	IV	NSHV Kompensation 1 BFB06.3	13.07.10	ok
N18	IV	NSHV Kompensation 1 BFB07.3	13.07.10	ok
N19	III	NSHV LS Einspeisung 1 Trafo 1	13.07.10	ok
N20	III	NSHV LS Einspeisung 2 Trafo 2	13.07.10	ok
N21	III	NSHV LS Kupplung zu MCC (BFA)	13.07.10	ok
N22	III	NSHV LS Einspeisung 3 Trafo 3	13.07.10	ok
N23	III	NSHV LS Kupplung zu RG	13.07.10	ok
N24	III	NSHV LS Abgang Reserve	13.07.10	ok
N25	III	NSHV LS Müllkran	13.07.10	ok
N26	III	NSHV LS Kleinverbraucher 1	13.07.10	TA
N27	III	NSHV LS Kleinverbraucher 2	13.07.10	ok
N28	II	USV-Unterverteiler	13.07.10	ok

4 Klassifikation der Prüfergebnisse nach DIN 54191:2009: **ok** = kein Auffälligkeit; **TA** = thermische Auffälligkeit; **GTA** = gefährliche thermische Auffälligkeit; **kb** = kein Befund möglich; **NTA** = sonstige Auffälligkeit nicht thermischer Art;



Eigentrafos

10kV / 0,4kV bzw. 0,7kV



Nr.	Symbol	Objekt
T01	<p>+20AKA04 -T1 10/04 kV 1250 kVA uk=7,38% Dyn 11</p>	Trafo 1 MKA
T02	<p>+20AKA05 -T2 10/04 kV 1250 kVA uk=7,38% Dyn 11</p>	Trafo 2 MKA
T03	<p>+20AKA08 -T3 10/04 kV 1600 kVA uk=7,%, Dyn 5</p>	Trafo 3 MKA
T04	<p>+20AKA09 -T4 10/04 kV 1600 kVA uk=7,38% Dyn 5</p>	Trafo 4 RRA
T05	<p>+20AKA10 -T5 10/2x0,69kV 3000kVA uk=6% Dy5-Dd6</p>	Trafo 5 Denox

T05 Trafo 5 Denox

Technische Details:

Baujahr :
Fabrikat :
Type :
Prinzip :
OS Spannung :
US Spannung :
Nennleistung :



Messstellen:

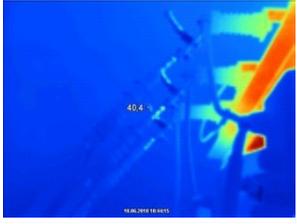
Nr.	Stelle	Foto	Anweisung
1	Elektrische Anschlüsse	<p>The photograph shows the internal electrical connections of the transformer. Two callout circles are present: circle 1 points to a specific connection point, and circle 2 points to another connection point.</p>	Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
2			

Messungen:

- Messstelle 1

10.06.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

- Messstelle 2

10.06.10	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

Frequenzumrichter

Nr.	Objekt	Bezeichnung
F01	Müllkran 1	20SMA01
F02	Müllkran 2	20SMA02
F03	Denox 1	20BPA01
F04	Denox 2	20BPB01
F05	Primärluftgebläse 1	21BPF01
F06	Primärluftgebläse 2	22BPF01
F07	Primärluftgebläse 3	23BPF01
F08	Sekundärluftgebläse 1	21BPG01
F09	Sekundärluftgebläse 2	22BPG01
F10	Sekundärluftgebläse 3	23BPG01
F11	Saugzuggebläse 1	21BPA01
F12	Saugzuggebläse 2	22BPA01
F13	Saugzuggebläse 3	23BPA01

F06 FU Primärluftgebläse 2

Technische Details:

Baujahr :
Fabrikat :
Type :
Prinzip :
Netzanschlussspannung : 400VAC
Netzfrequenz : 50Hz
Nennleistung :
Nennstrom :

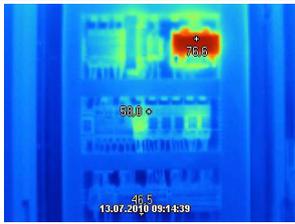


Messstellen:

Nr.	Stelle	Foto	Anweisung
1	+22BPF01 (Bereich oben)		Thermografie der Automaten und der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
2	+22BPF01 (Bereich mitte)		
3	+22BPF01 (Bereich unten)		

Messungen:

• Messstelle 1

13.07.2010	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
70%			
			
Befund: TA	Befund:	Befund:	Befund:
Umgebungstemp. 50°C			

• Messstelle 2

13.07.2010	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
70%			
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:

• Messstelle 3

Datum	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

Niederspannungshauptverteilung

Nr.	Objekt	Bezeichnung
N01	NSHV 400V RRA	Kupplung zu RRA/MKA
N02		Trafo 4 Einspeisung
N03		Feld 0
N04		Linie 1
N05		Linie 2
N06		Linie 3
N07		Feld 4
N08		Kompensation
N09	NSHV 400V ARA	Allgemein
N10		20BJG01
N11		20BJG02
N12		20BJG03
N13		KFP 1
N14		KFP 2
N15		NAOH
N16	NSHV Kompensation 1	FU
N17		20BJG07
N18		20BFB06.3
N19	NSHV LS	20BFB07.3
N20		Einspeisung 1 Trafo 1
N21		Einspeisung 2 Trafo 2
N22		Kupplung zu MCC (BFA)
N23		Einspeisung Trafo 3
N24		Kupplung zu RG
N25		Abgang Reserve
N26		Müllkran
N27		Kleinverbraucher 1
N28	USV-Unterverteiler	Kleinverbraucher 2
		20BRB01

N16 NSHV Kompensation 1

Technische Details:

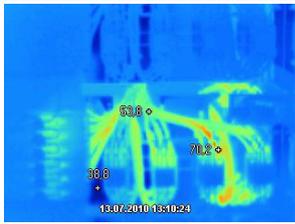


Messstellen:

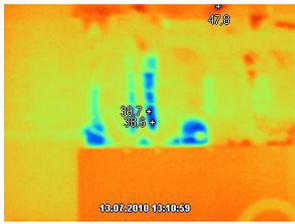
Nr.	Stelle	Foto	Anweisung
1	Schaltschrank links		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
2			
3			
4	Schaltschrank rechts		Thermografie der Anschlüsse mit besonderem Fokus auf: <ul style="list-style-type: none"> • Asymmetrische Belastung • Absolut-Temperaturen
5			
6			

Messungen:

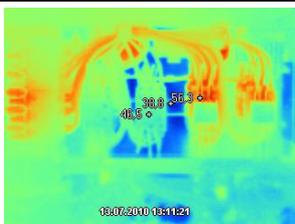
• Messstelle 1

13.07.2010	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
			
Befund: TA	Befund:	Befund:	Befund:
Klemmungen?			

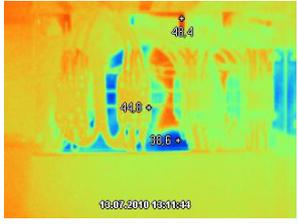
• Messstelle 2

13.07.2010	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

• Messstelle 3

13.07.2010	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

• Messstelle 4

13.07.2010	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
			
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

• Messstelle 5

Datum	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

• Messstelle 6

Datum	Datum	Datum	Datum
Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:	Betriebszustand:
Befund: ok	Befund:	Befund:	Befund:
Keine Auffälligkeiten			

