



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

ANALYSE UND KLASSIFIKATION DER EINFLÜSSE UND AUSWIRKUNGEN VON EIN- UND AUSSCHALTVORGÄNGEN UND VIBRATIONEN AUF DIE LUFTLAGERUNG EINER MOTORISIERTEN KÜHLTURBINE

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Georg Kartnig

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, Bereich: Konstruktionslehre und
Fördertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Silvia Staflinger

0856831 (E 066 482)

Wien, im Oktober 2016



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Oktober 2016

DANKSAGUNG

Sehr herzlich bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Georg Kartnig für die Betreuung meiner Arbeit. Ein großer Dank geht an meine Kolleginnen und Kollegen bei der Firma Liebherr-Transportation System in Korneuburg für die freundliche Aufnahme und Unterstützung bei all meinen Fragen und Anliegen. Ganz herzlich möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dipl. Ing. Maik Wollweber für seine umfassende Betreuung seitens der Firma bedanken. Er hat das Interesse meiner Arbeit stets geteilt und mir mit Tipps und Ratschlägen weitergeholfen, vielen Dank für die Durchsicht meiner Arbeit. Ebenfalls ein großer Dank geht an Herrn Dipl. Ing. Dr. Gerhard Karlowatz für seine Expertise sowie die Durchsicht meiner Arbeit. Ein besonderer Dank geht an meine Eltern, die meinen gesamten Bildungsweg nicht nur geprägt sondern mich auch in jeder Hinsicht unterstützt und ermutigt haben – herzlichen Dank!

KURZFASSUNG

Liebherr-Transportation Systems in Korneuburg, namhafter Entwickler und Hersteller von Klimasystemen für Schienenfahrzeuge, stattet seit dem Jahr 2000 Hochgeschwindigkeitszüge der Deutschen Bahn (ICE 3) mit luftgestützten Klimaanlage aus. Diese Klimaanlage funktionieren nur mit Luft als Kältemittel und ist somit absolut umweltfreundlich. Nun soll aus wirtschaftlichen Gründen die aktive Magnetlagerung der motorisierten Kühlturbine dieser luftgestützten Klimaanlage durch eine aerodynamische Lagerung, eine konzerneigene Entwicklung, ersetzt werden. Bei der aktiven Magnetlagerung können Dämpfung und Steifigkeit im Betrieb durch Sensoren und Regelung variiert werden, wodurch sie sehr resistent auf Schwingungen reagiert. Diese Aufgabe übernimmt der Magnetlager-Controller. Der Wegfall des Magnetlager-Controllers und der Einsatz eines aerodynamischen Lagers, das den Luftpolster, der für eine stabile Lagerung notwendig ist, nur durch ausreichende Relativbewegung zwischen Rotor und Stator aufbaut, birgt Schädigungspotentiale, die ermittelt und klassifiziert werden müssen. Zum einen haben Ein- und Ausschaltvorgänge der motorisierten Kühlturbine, bei denen es aufgrund zu geringer Drehzahl zu Festkörperreibung zwischen Welle und Lagerschale kommt, eine lebensdauerlimitierende Wirkung. Zum anderen werden Vibrationen und Stöße, die vom Schienenfahrzeug auf das Gerät einwirken, im Gegensatz zur aktiven Magnetlagerung nicht aktiv kompensiert und stellen ebenfalls ein erhebliches Verschleißpotential für eine Luftlagerung dar. Diese Einflüsse und Auswirkungen werden ermittelt und klassifiziert und Handlungsempfehlungen für Gegenmaßnahmen aufgezeigt, um eine Luftlagerung der motorisierten Kühlturbine realisieren zu können.

ABSTRACT

Liebherr-Transportation Systems in Korneuburg, renowned developer and manufacturer for air conditioning systems for rail vehicles, provides air cycle air conditioning systems for German high speed trains (ICE 3, Deutsche Bahn) since the year 2000. This air conditioning system only works with air as refrigerant and hence thoroughly environmentally friendly. For economic reasons the active magnetic bearing of the motorized air cycle machine of the air condition system should be replaced by an aerodynamic bearing which is a company-owned development. The magnetic bearing controller varies damping and stiffness of the active magnetic bearing due to sensors and control and, therefore, the bearing is resistant to vibration. The elimination of the magnetic bearing controller and the use of an aerodynamic bearing, which needs enough rotation speed of the shaft for a stable bearing effect, bears damage potential. These potentials have to be analyzed and classified. On the one hand, start/stop cycles represent a damage potential, since low rotation speed leads to solid state friction between the shaft and the bearing shell which is limiting the lifecycle of the bearing. On the other hand, vibration and shocks deriving from the train cannot be compensated in contrast to an active magnetic bearing and, consequently, represent a damage potential as well. These influences and effects are analyzed and classified and possible countermeasures are demonstrated to allow the application of an aerodynamic bearing for the motorized air cycle machine of the air cycle air conditioning system.

INHALT

1	EINLEITUNG.....	1
2	AUFGABENSTELLUNG	3
2.1	MOTIVATION	4
2.2	FORSCHUNGSFRAGEN.....	4
2.3	METHODOLOGIE	5
3	RAHMENBEDINGUNGEN	6
3.1	LIEBHERR-TRANSPORTATION SYSTEMS GMBH & CO KG.....	6
3.2	LUFTGESTÜTZTE KLIMAAANLAGE – AIR CYCLE HVAC.....	8
3.2.1	Lastprofil und Leistungsaufnahme	9
3.2.2	Funktionsprinzip.....	9
3.2.3	Motorisierte Kühlturbine.....	11
3.3	INTERCITY EXPRESS 3	12
3.3.1	Felddatenanalyse ICE 3.....	13
4	LUFTLAGER VS. MAGNETLAGER.....	15
4.1	MAGNETLAGER.....	16
4.1.1	Magnetlager in der HVAC	18
4.2	LUFTLAGER	20
4.2.1	Flüssiggeschmierte Lager.....	20
4.2.2	Reibungszustände	21
4.2.3	Druckverteilung und Tragfähigkeit.....	23
4.2.4	Gasgeschmierte Lager	24
4.2.5	Aerodynamische Lager	25
4.2.6	Aerodynamische Feder- und Folienlager	25
4.2.7	Luftlager bei Liebherr-Aerospace Toulouse SAS.....	27
5	EIN- UND AUSSCHALTVORGÄNGE DER MOTORISIERTEN KÜHLTURBINE (MKT).....	30
5.1	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	30
5.1.1	Ursachen für Ein- und Ausschaltvorgänge.....	30
5.2	ANALYSE DER EIN- AUSSCHALTVORGÄNGE DER MKT DES MESSZUGES TZ301.....	39
5.2.1	Streckenprofil des Messzuges.....	39
5.2.2	Trennstellenauswertung des Messzuges	41
5.2.3	Ein- und Ausschaltvorgänge der MKT	44
5.3	VIRTUELLE STRECKENABFOLGEN.....	48

5.3.1	Berechnung der Ausschalthäufigkeit der MKT der virtuellen Streckenabfolgen ..	49
5.3.2	München-Dortmund	51
5.3.3	Köln-Basel	52
5.3.4	Virtuelle Streckenabfolge Osten	53
5.3.5	München-Hamburg	54
5.3.6	Berlin-Stralsund	56
5.3.7	Erfurt-Berlin	57
5.3.8	Zusammenfassung	58
6	VIBRATIONSANALYSE DER MOTORISIERTEN KÜHLTURBINE (MKT)	59
6.1	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	59
6.1.1	Ursachen für Schwingungen der MKT	59
6.1.2	Maschinenschwingungen	62
6.1.3	Methoden zur Signalanalyse	63
6.1.4	Schwingungsaufnehmer	75
6.2	ANALYSE DER VIBRATIONEN DER MKT	77
6.2.1	Aufnahme	77
6.2.2	Datenfluss	78
6.2.3	Voranalyse	79
6.2.4	Datenauswahl	80
6.2.5	Detailanalyse	81
6.2.6	Ergebnisse	83
6.2.7	Zusammenfassung	106
7	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	108
7.1	EXTERNE ENERGIEVERSORGUNG	108
7.2	AEROSTATISCHES NOTLAGER	110
7.3	REDUKTION DES MASSENDURCHFLUSSES	113
7.4	LUFTLAGERBESCHICHTUNG	115
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	116
9	LITERATUR	119
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	123
11	TABELLENVERZEICHNIS	127
12	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	128

1 EINLEITUNG

Steigende Komfortbedürfnisse in Schienenfahrzeugen haben dazu geführt, dass besonders Heizung, Lüftung und Kühlung zu immer wichtigeren, unverzichtbaren Bestandteilen geworden sind. Anforderungen an klimatechnische Einrichtungen in Schienenfahrzeugen sind in Normen deklariert.¹ Für Reisezugwagen mit einer zulässigen Geschwindigkeit über 160 km/h ist eine Möglichkeit zum Kühlen laut UIC-Kodex (Internationaler Eisenbahnverband) sogar vorgeschrieben.² Neben den Investitions- und Instandhaltungskosten eines Klimagerätes trägt vor allem der Energieverbrauch zu hohen Kosten bei. Laut dem deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung ist die Klimatisierung nach der Traktion mit 30 % Anteil der zweitgrößte Energieverbraucher bei Schienenfahrzeugen.³ Die Tatsache, dass Klimawandel und Ressourcenknappheit zu Megatrends geworden sind, sowie der steigende ökonomische und ökologische Druck führten dazu, dass Themen wie Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit in der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen immer mehr an Bedeutung gewinnen. Ansätze für die Energieeinsparung und Schadstoffreduktion gewinnen immer mehr an Bedeutung. Obwohl Kältemittel mit hohem Ozonabbaupotenzial inzwischen durch ozonunschädliche ersetzt wurden, ist die Umweltbelastung durch das hohe Treibhauspotential der Kühlmittel in herkömmlichen Kaltdampfklimaanlagen nicht zu vernachlässigen.⁴ Das in sehr vielen Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen eingesetzte Kältemittel R134a stellt deshalb laut Umweltschutzorganisationen keine langfristige Lösung dar. Die Verwendung des natürlichen Kältemittels Isobutan ist nicht nur teuer, sondern wegen der Brennbarkeit auch sicherheitstechnisch bedenklich. Die Entwicklung und Erprobung von CO₂-Klimaanlagen steckt noch in den Kinderschuhen. Nach bisherigen Kenntnissen würde sie aber eine vielversprechende natürliche und umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge darstellen. Die einzige langfristige Lösung nach heutiger Sicht, die den spezifischen Anforderungen des Systems Bahn und den Auflagen des Umweltschutzes gerecht werden, ist die luftgestützte Klimaanlage, die seit Jahren erfolgreich im ICE 3 (2. Bauserie) im Einsatz ist. Die Technologie, die der Luftfahrt entstammt, arbeitet mit Luft als Kühlmedium und ist so absolut umweltfreundlich. Sie weist wesentliche Vorteile bei der Instandhaltung und im Bereich der Teillastregelung auch beim Energieverbrauch auf.⁵ Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge haben nach heutigem Standard eine Lebensdauer von 30 Jahren. Somit sollten diesbezügliche Entscheidungen hinsichtlich der nächsten drei Dekaden getroffen werden. Da man mit zukünftigen umwelttechnischen Restriktionen, wie sie bei PKW-Klimaanlagen bereits existieren, auch im Schienenverkehr zu rechnen hat, wird der Schritt in Richtung natürlicher Kühlmittel unumgänglich. Ebenso ist der Fokus auf die

¹ ISO/DIS 19659, EN 13129, EN 14750, EN 14813

² UIC-Kodex, Nr. 553, 2003, S.3

³ Berlitz, 2013, S.369

⁴ Jänisch, 2016, S.513

⁵ Berlitz, 2013, S.372-374

Reduzierung der Gesamtkosten mit gleichzeitiger Steigerung der Energieeffizienz der klimatechnischen Einrichtungen in Schienenfahrzeugen zu setzen.¹

¹ Krawanja, 2014, S.2

2 AUFGABENSTELLUNG

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Weiterentwicklung einer Klimaanlageentechnologie für Schienenfahrzeuge zu unterstützen. Konkret geht es darum, eine Machbarkeitsstudie zum Austausch einer Komponente dieser Anlage anzufertigen und zwar zur Änderung der Lagerung des Antriebs der motorisierten Kühlturbine, das Herzstück der luftgestützten Klimaanlage. Die bislang eingesetzte Magnetlagerung soll durch eine aerodynamische Lagerung ersetzt werden. Die Auswirkungen dieser Komponentenänderung sollen analysiert und klassifiziert werden.

Liebherr-Transportation Systems in Korneuburg hat einen Zug der deutschen Bahn mit einer luftgestützten Klimaanlage ausgestattet. Um Aussagen über die Wettbewerbsfähigkeit dieser Klimaanlage, bei der als Kältemittel Luft eingesetzt wird, gegenüber herkömmlichen Anlagen treffen zu können, wird eine zweijährige Felddatenanalyse durchgeführt. So kann unter realen Betriebsbedingungen über alle Jahreszeiten der Energieverbrauch ermittelt werden. Im Schienenpersonenverkehr gibt es viele Störgrößen für die Klimatisierung, wie ein- und aussteigende Fahrgäste, Sonneneinstrahlung, Tunnelfahrten, stark variierende Kühlung durch Fahrtwind und vieles mehr. Darum wurde ein umfassendes Messsystem installiert, das eine Vielzahl an Parametern aufnimmt, wie zum Beispiel Innen- und Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Personenbesetzung im Wagon Sonneneinstrahlung, Vibrationen am Klimagerät und vieles mehr.

In der luftgestützten Bahnklimaanlage (Air Cycle HVAC – Heating, Ventilation, Air Condition) wird die Prozessluft mittels einer motorisierten Kühlturbine (MKT) expandiert. Diese Kühlturbine wird im Moment durch ein Magnetlager gestützt, welches man aus wirtschaftlichen Gründen durch eine aerodynamische Luftlagerung ersetzen möchte. Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Einsatzbedingungen einer solchen Luftlagerung in dieser Bahnklimaanlage zu untersuchen. Es sollen Phasen erfasst werden, bei denen das Luftlager nicht den notwendigen Luftpolster für eine stabile Lagerung aufbauen kann und so die Gefahr besteht, dass die Turbine in die Lagerschale absinkt und es zu Festkörperreibung kommt. Da die Klimaanlage wie der Großteil der Verbraucher in Schienenfahrzeugen von der Versorgungsspannung der Oberleitung gespeist wird, sollen hierzu die sogenannten Schutzstrecken¹, also Strecken bei denen der Zug nicht von der Oberleitung mit Strom versorgt wird, theoretisch und praktisch mittels der aufgezeichneten Daten des Messzuges erfasst werden. Diese Schutzstrecken oder neutralen Abschnitte sind durch Trennstellen an jedem Ende versehen², um zum Beispiel zwei aufeinanderfolgende Bahnenergieversorgungssysteme voneinander zu trennen. Da für den Aufbau des Luftpolsters, der für eine reibungsfreie Relativbewegung sorgt, eine ausreichende Relativgeschwindigkeit von Rotor und Stator notwendig ist, sind auch Ein- und

¹ DIN EN 50367:2013-02

² DIN EN 50388:2006-03

Ausschaltvorgänge der Kühlturbine, die aufgrund der Regelung der Klimaanlage passieren, von Bedeutung. Weiters soll die Einwirkung von Vibrationen, Schwingungen und Stößen analysiert werden. Vor allem in bestimmten Fahrsituationen wie Anfahren, Bremsen oder bei etwaigen Unebenheiten möchte man die Bewegungsvorgänge in der Klimaanlage untersuchen, um Aussagen über die zu erwartenden Maximalbelastungen treffen zu können. In beiden Fällen soll das „Worst-Case-Szenario“ möglichst gut erfasst werden, um die Machbarkeit einer Luftlagereinführung bestmöglich beurteilen zu können.

2.1 MOTIVATION

Die Luftlagerung hat gegenüber der Magnetlagerung vor allem wirtschaftliche Vorteile. Sie ist nicht nur günstiger in der Beschaffung, sondern hat auch weniger Komponenten als die jetzt verbaute aktive elektromagnetische Lagerung. Somit ist sie einfacher und kostengünstiger zu warten. Bei der Magnetlagerung hingegen können Dämpfung und Steifigkeit im Betrieb durch Sensoren und Regelung variiert werden, wodurch sie sehr resistent gegenüber Schwingungen ist.¹ Der Magnetlager-Controller (MBC – Magnetic Bearing Controller), der für die Regelung des notwendigen Magnetfeldes zur kontaktfreien Lagerung der Turbine verantwortlich ist, wird im Falle einer Unterbrechung der Spannung durch die Oberleitung mittels Batterie versorgt. Daher stellen Versorgungsunterbrechungen, wie sogenannte Schutzstrecken, im Falle der Magnetlagerung keine lebensdauerlimitierenden Einwirkungen dar, da ein Schwebezustand des Rotors sowohl bei rotierender als auch stillstehender Maschine gewährleistet ist. Dies wäre bei einer aerodynamischen Luftlagerung nicht der Fall, da ein tragender Luftpolster eine gewisse Umfangsgeschwindigkeit der Welle erfordert. Diese und andere Nachteile bei der Verwendung einer anderen Lagerung gilt es in dieser Arbeit theoretisch und praktisch in Bezug auf eine Klimaanlage für Schienenfahrzeuge zu eruieren, um ihnen bei dem Einsatz einer Luftlagerung der Kühlturbine entgegenwirken zu können.

2.2 FORSCHUNGSFRAGEN

Da sich Schädigungspotentiale für die luftgelagerte motorisierte Kühlturbine vermutlich vor allem durch die Start/Stopp-Zyklen der motorisierten Kühlturbine und durch Vibrationen des Schienenfahrzeuges ergeben, setzt sich diese Arbeit das Ziel, diese zu analysieren, zu klassifizieren und Handlungsempfehlungen aufzuzeigen. Daraus lassen sich folgende Fragestellungen ableiten.

¹ Roddeck; 2012

- Was sind mögliche Schädigungspotentiale beim Einsatz einer aerodynamischen Luftlagerung der motorisierten Kühlturbine?
- Wie oft und wie lange wird der Zug nicht von der Oberleitung mit Strom versorgt, wo und wie lang sind die Versorgungsunterbrechungen?
- Wie viele Start/Stop-Zyklen der motorisierten Kühlturbine sind bei mittlerer Lebensdauer einer Klimaanlage für Schienenfahrzeuge zu erwarten?
- Welchen Vibrationen und Stößen ist die motorisierte Kühlturbine in bestimmten Fahrsituationen ausgesetzt?
- Welche Maßnahmen sind geeignet, um Schädigungsmechanismen für die Luftlagerung der motorisierten Kühlturbine zu verringern?

2.3 METHODOLOGIE

Aus den erhobenen Daten des Messzuges sollen die Ein- und Ausschaltvorgänge der MKT ausgewertet werden. Problematisch sind vor allem durch Spannungsunterbrechungen hervorgerufene Ausschaltungen der Turbine, durch Schutzstrecken. Schutzstrecken, die bewusst eingebaut werden, um verschiedene Netze zu trennen und zu schützen, wie zum Beispiel bei Landesgrenzen, sollen in einem ersten Schritt theoretisch aus Normen und Datenbanken ermittelt werden. Dem sollen im zweiten Schritt reale Daten aus dem Messzug gegenübergestellt werden. Anhand der Messdaten möchte man die Schutzstrecken ausfindig machen und feststellen, wo sich diese befinden, wie lange sie dauern und wie sie mit der Theorie übereinstimmen. Aus den Ergebnissen sollen die Auswirkungen der Trennstellen über einen längeren Zeitraum abgeschätzt werden, um dann Aussagen über mögliche Probleme bei einer Luftlagerung treffen zu können und anschließend Gegenmaßnahmen aufzuzeigen. Ebenso sollen die tatsächlichen Vibrationen und Stöße an der Klimaanlage ermittelt werden. Dazu wurden zwei Beschleunigungsaufnehmer mit je drei Achssensoren an einem Gerät des Messzuges installiert. Ein Aufnehmer wurde direkt auf der motorisierten Kühlturbine angebracht, der zweite am Gehäuse des Klimagerätes. Anhand der Messdaten soll eine Voranalyse des Bewegungsverlaufes der Turbine ausgearbeitet werden. Vor allem Maximalausschläge müssen ausfindig gemacht und bestimmten Fahrsituationen, wie Anfahren, Bremsen, bestimmten Geschwindigkeiten oder anderen Einflussfaktoren gegenübergestellt werden, um Aussagen über das zeitliche und örtliche Verhalten der Schwingungen, sowie über Maximalbelastungen treffen zu können. Mit diesen Ergebnissen können in einem weiteren Schritt, der nicht mehr Teil dieser Arbeit sein wird, Versuche mit einer luftgelagerten Kühlturbine durchgeführt werden. In einem Teststand soll die MKT mit Schwingungen durch einen Shaker entsprechend den Erregungen dieser Voranalyse beaufschlagt werden. So können Aussagen über einen möglichen Einsatz einer Luftlagerung, beziehungsweise gezielte Maßnahmen bei gewissen Fahrsituationen, bei denen die Klimaanlage hohen Impulsen ausgesetzt ist, getroffen werden.

3 RAHMENBEDINGUNGEN

Im nachfolgenden Kapitel werden die Rahmenbedingungen der Masterarbeit, die in Zusammenarbeit mit der Firma Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG angefertigt wurde, aufgezeigt.

3.1 LIEBHERR-TRANSPORTATION SYSTEMS GMBH & CO KG

Seit der Gründung durch Hans Liebherr im Jahr 1949 ist das Unternehmen Liebherr zu einer Firmengruppe mit weltweit über 130 Gesellschaften und mehr als 41.000 Mitarbeitern angewachsen.

Dezentral aufgebaut ist die Firmengruppe Liebherr in elf selbstständig operierende Produktparten gegliedert. Die Produktbereiche sind Erdbewegung, Mining, Turmdrehkrane, Betontechnik, Fahrzeugkrane, Maritime Krane, Aerospace und Verkehrstechnik, Werkzeugmaschinen und Automationssysteme, Hausgeräte sowie Komponenten. Des Weiteren betreibt Liebherr sechs Hotels in Irland, Österreich und Deutschland. Dachgesellschaft der Firmengruppe ist die Liebherr-International AG in Bulle (Schweiz).

Die Liebherr-Transportation Systems in Korneuburg gehört, wie der Name sagt, zum Geschäftsfeld Aerospace und Verkehrstechnik und ist ein namhafter Hersteller von Systemen und Komponenten für die Bahnindustrie. Das Produktprogramm reicht von konventionellen und luftgestützten Klimaanlageanlagen, hydraulischen Betätigungssystemen bis hin zu elektronischen Komponenten für Schienenfahrzeuge aller Art. ¹

Alexander Friedmann gründete im Jahr 1871 die Firma Alex. Friedmann in Wien, die Injektoren für Lokomotiven und Schiffsdampfmaschinen, eine Erfindung des Firmengründers, erzeugte. Mit dem Ende der Dampflokomotiven spezialisierte sich die Firma auf Niederdruckheizsysteme und Rollenachslagergehäuse. Der steigende Bedarf an Komfort und der Umstand, dass sich diese Zweikanalheizungen auch nachträglich mit Klimaanlageanlagen ausrüsten ließen, führte wohl dazu, dass der heutige Produktschwerpunkt bei Klimaanlageanlagen für Schienenfahrzeuge liegt.

1987 wurde die Firma durch die Siemens AG übernommen, 1997 ging die Firma in das Eigentum der Liebherr Austria Holding über und wurde mit der Bezeichnung Liebherr-Verkehrstechnik GmbH geführt. Im Juni 2000 übersiedelte die Firma vom Standort Wien in das neu errichtete Werk nach Korneuburg. Seit 2004 trägt sie den internationalen

¹ www.liebherr.com

Firmennamen Liebherr-Transportation Systems GmbH. Als eigenständiges Unternehmen ist die Liebherr-Transportation System GmbH & Co KG der Sparte „Aerospace und Verkehrstechnik“ des Liebherr-Konzerns zugeordnet und ist innerhalb des Liebherr-Konzerns das einzige Unternehmen, das die Bahnindustrie bedient.

2006 erwarb Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG die Klimasparte von Bombardier Mannheim und gründete die Tochtergesellschaft Liebherr-Transportation Systems Mannheim GmbH. Seit dem Jahr 2004 fungiert das Schwesterwerk Liebherr Hausgeräte Marica in Bulgarien als zweiter Fertigungsstandort. Dieser steht unter direkter Kontrolle der Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG und firmiert seit 2010 unter Liebherr-Transportation Systems Marica EOOD als Tochter der Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG. Liebherr-Transportation Systems beschäftigt ca. 550 Mitarbeiter. Die Unternehmensstruktur ist in Abbildung 1 dargestellt.¹

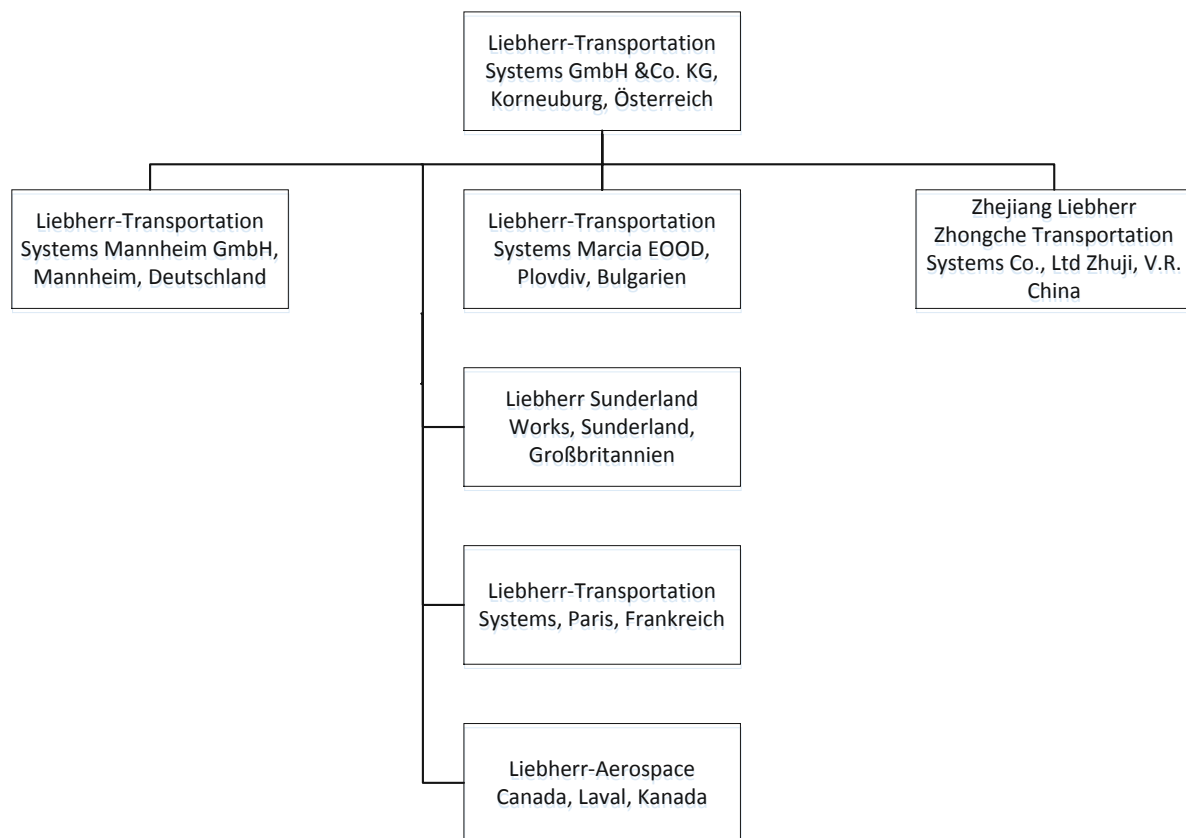


Abbildung 1: Unternehmensstruktur der Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG²

¹ Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

² Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

3.2 LUFTGESTÜTZTE KLIMAANLAGE – AIR CYCLE HVAC

Das luftgestützte Klimatisierungssystem für Schienenfahrzeuge der Fa. Liebherr-Transportation Systems arbeitet mit Luft als Kältemittel und ist daher absolut umweltfreundlich. Es gibt keine direkten Emissionen, die bei den herkömmlichen Technologien durch Leckagen im System verursacht werden. Ebenso werden die indirekten Emissionen reduziert, da Luft nicht, wie andere Kältemittel, erst hergestellt werden muss. Dadurch werden Energie- und Ressourcenverbrauch minimiert.¹ Eingesetzt wurden diese Klimasysteme vorrangig nur in Flugzeugen. Seit ca. 10 Jahren verbaut Liebherr-Transportation Systems diese Klimageräte in Hochgeschwindigkeitszüge der Deutschen Bahn (ICE 3). Die Anlage basiert auf dem Prinzip der Luftabkühlung durch Expansion in einer Turbine. Anders als bei den meisten herkömmlichen Kaldampfanlagen, handelt es sich hier um einen offenen Regelkreis. Der Vorteil besteht bei offenen Systemen in der Funktionstüchtigkeit trotz kleiner Leckagen mit nur geringer Abnahme der Kühleffizienz. So findet man beim offenen Regelkreis mit wenigen Komponenten die höchste Störfestigkeit und Zuverlässigkeit.² In Abbildung 2 ist ein luftgestütztes Klimagerät der Firma Liebherr-Transportation Systems mit offenem Deckel dargestellt, wie es in ICE 3 Zügen der Deutschen Bahn verbaut ist.



Abbildung 2: luftgestütztes Kompaktklimagerät auf Transportrahmen ohne Deckel³

¹ Krawanja, 2014, S.3

² Böhme; 2000; S.90

³ Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

3.2.1 LASTPROFIL UND LEISTUNGS-AUFNAHME

Eine in Mitteleuropa eingesetzte Klimaanlage wird vorwiegend im Teillastbetrieb betrieben. Das bedeutet, dass der Kühlbedarf über das Jahr gesehen nur ein mäßiger ist und ein Betrieb unter Volllast nur sehr selten eintritt. Das Teillastkonzept einer Anlage wirkt sich somit massiv auf den Jahresenergiebedarf aus. Bei Entwicklungsbeginn wurde, im Vergleich zu einer konventionellen R134a-Anlage, ein höherer Energiebedarf der luftgestützten Klimaanlage aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften der Kältemittel erwartet. Nach Versuchen, die die DB Systemtechnik Minden von August 2008 bis August 2009, in jeweils zwei vergleichbaren Wagen durchführte, schnitt die luftgestützte Klimaanlage vor allem im Niedrig- und Teillastbetrieb energetisch besser ab. Da sie auch im Niedriglastbereich noch sehr gut regelbar ist, war dort die Leistungsaufnahme geringer als die der konventionellen Kaltdampfanlage. Nur bei sehr hohen Außentemperaturen, also im Volllastbetrieb, war der Energieverbrauch, wie zu erwarten, höher - mit heißer Luft ist es schwierig zu kühlen.¹ Der Jahresenergieverbrauch der luftgestützten Anlage ist somit in Summe geringer als der einer R134a-Anlage, da Niedrig- und Teillastbetrieb dominieren (siehe Abbildung 3).

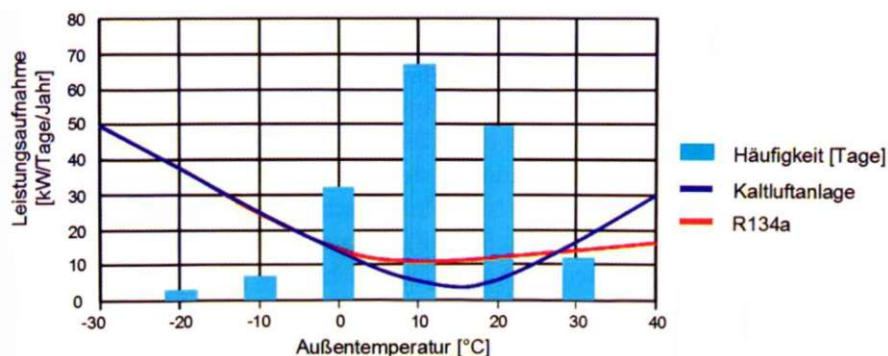


Abbildung 3: modellhafte Gegenüberstellung der Leistungsaufnahme konventioneller R134a und luftgestützter Klimaanlage über der Außentemperaturverteilung in Mitteleuropa²

3.2.2 FUNKTIONSPRINZIP

Die sogenannte Prozessluft wird aus der Umgebung über den Prozesslufteinlasskasten angesaugt und in der Turbine (T) entspannt, wobei eine Druck- und Temperaturabsenkung erfolgt. Frischluft wird angesaugt und mit der aus dem Wagen zuströmenden Umluft in den Mischluftkästen gemischt. Die Zuluftlüfter saugen die Luft aus den Mischluftkästen an und führen sie zum Wärmetauscher. Dort wird die Mischluft mittels der Prozessluft konditioniert und anschließend dem Fahrgastraum zugeführt. In weiterer Folge wird die Prozessluft im

¹ Jänisch, 2016, S.515f

² Berlitz, 2013, S.374

Kompressor (C) wieder auf Umgebungsdruck komprimiert und in die Umgebung über den Prozessluftauslasskasten ausgeblasen. Bei Bedarf wird die kalte Außenluft mithilfe resistiver Heizelemente erwärmt, bevor sie dem Wagen zugeführt wird. Dabei ist die motorisierte Kühlturbine deaktiviert. Das Kondenswasser auf der warmen Seite des Wärmetauschers (Klimaluft), das einerseits aus der Feuchte, die die Außenluft mitbringt, und andererseits aus der Feuchteabgabe der Passagiere stammt, wird auf der kalten Seite des Wärmetauschers (Prozessluft) wieder eingespritzt. Somit wird die sonst verlorene Energie zum Kondensieren des Wassers wieder zurückgewonnen. Geregelt wird die Kälteerzeugung über die Drehzahl der Turbine.¹ Abbildung 4 zeigt den schematischen Funktionsablauf, Abbildung 5 die Luftführung im Gerät.

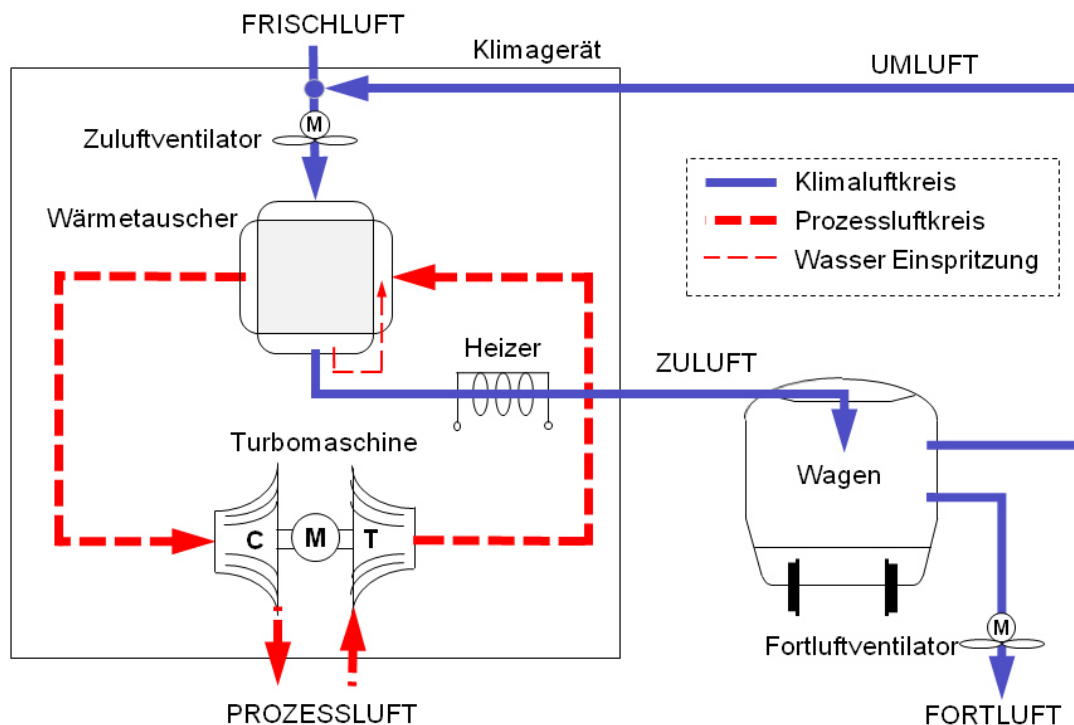


Abbildung 4: Schematische Darstellung der luftgestützten Klimaanlage²

¹ Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

² Krawanja, 2014, S.3

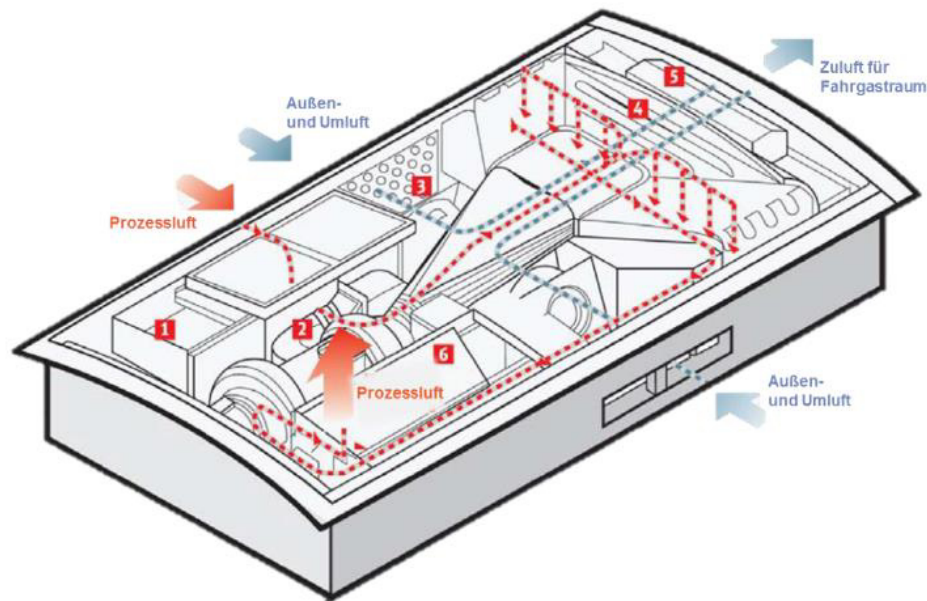


Abbildung 5: Luftführung im luftgestützten Kompaktklimagerät (1-Prozesslufteinlasskasten, 2-Motorisierte Kühlturbine, 3-Zuluftlüfter, 4-Wärmetauscher, 5-Hauptheizregister, 6-Prozessluftauslasskasten)¹

3.2.3 MOTORISIERTE KÜHLTURBINE

Die motorisierte Kühlturbine (MKT) erzeugt die erforderliche Kühlleistung. Auf einer Welle sitzen die Turbine sowie der Kompressor und der Antrieb. Die Welle wird bisher magnetisch gelagert. Die Möglichkeit eines Tausches dieser Lagerung mit einer aerodynamischen Luftlagerung wird in dieser Arbeit behandelt. Der Antrieb erfolgt über einen Synchronmotor mit stufenloser Drehzahlregelung. Der Synchronmotor wird durch einen ständigen Luftstrom vom Kühlturbinenlüfter gekühlt und die variable Drehzahl wird über den Motor-Controller geregelt. Die maximale Motorleistung beträgt 38 kW und der Drehzahlbereich liegt zwischen 0 und 38.000 U/min. Die einströmende Luft wird in der Turbine expandiert, dadurch abgekühlt und anschließend über den Turbinenauslass zum Wärmetauscher gefördert. Im Verdichter wird die Prozessluft auf Umgebungsdruck verdichtet und anschließend über den Verdichteraustritt nach außen abgegeben. Abbildung 6 zeigt die motorisierte Kühlturbine mit ihren Komponenten.

¹ DB AG

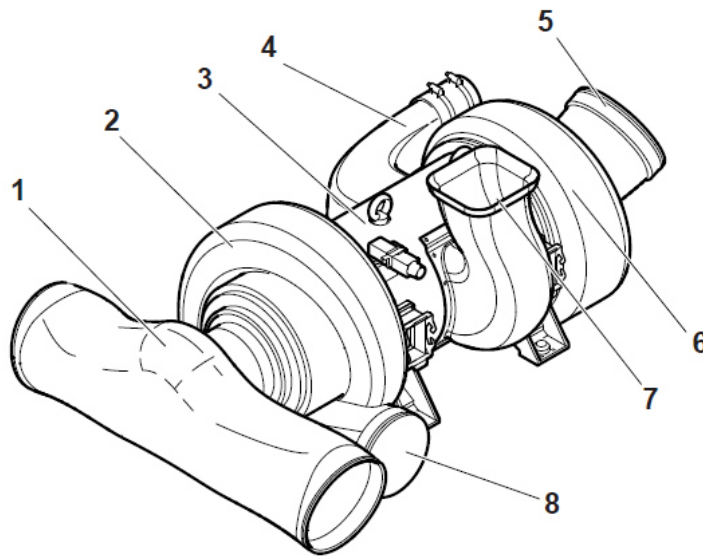


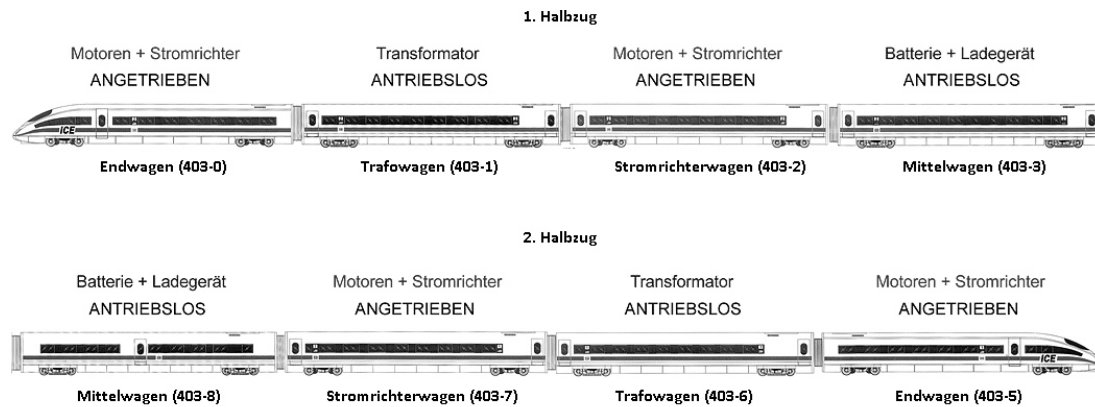
Abbildung 6: Motorisierte Kühlturbine (1-Verdichtereintritt, 2-Turboverdichter, 3-Motorgehäuse, 4-Kühlluftzuführung, 5-Turbinenauslass zum Wärmetauscher, 6-Turbine, 7-Kühlluftabführung, 8-Verdichteraustritt)¹

Nach Versuchen am Funktionsmuster der Klimaanlage in der Klimakammer bei Liebherr-Transportation Systems in Korneuburg beträgt die Anlaufzeit vom Startbefehl bis zum Erreichen der vollen Drehzahl 66 Sekunden und die Zeit vom Stoppbefehl bis zum Stillstand 48 Sekunden. Die Komponenten dieses Funktionsmusters entsprechen den im ICE 3 eingebauten, sind jedoch für eine bessere Zugänglichkeit etwas weiter auseinandergezogen.

3.3 INTERCITY EXPRESS 3

Der ICE 3 Baureihe 403 ist ein Hochgeschwindigkeitszug, der eine Geschwindigkeit bis zu 330 km/h erreicht. Die Antriebsausrüstung befindet sich unterflur über den Zug verteilt. Vier der acht Wagen stellen eine eigene elektrische Traktionsanlage dar. Es gibt pro Zug jeweils zwei Endwagen (EW1:403.0/ EW8:403.5), Trafowagen (TW2:403.1/ TW7:403.6), Stromrichterwagen (SW3:403.2/ SW6:403.7) und Mittelwagen (MW4:403.3/ MW5:403.8) mit den zugehörigen Wagennummern. Die Wagenübersicht ist in Abbildung 7 dargestellt. Aus praktischen Gründen und da die Aufzeichnung der Messdaten so aufgeteilt wurde, werden die ersten vier Wagen von nun an erster Halbzug genannt und die nächsten vier zweiter Halbzug. Die beiden Stromabnehmer sind an der zwischen den beiden Trafowagen verlaufenden Hochspannungsleitung angeschlossen.

¹ Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

Abbildung 7: Wagenübersicht ICE 3 Baureihe 403, 1. Serie¹

3.3.1 FELDDATENANALYSE ICE 3

Um Aussagen über den Energieverbrauch des luftgestützten Kompaktklimagerätes (KKG) und somit über die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber herkömmlichen Anlagen treffen zu können, wird eine umfassende Felddatenanalyse durchgeführt. Gemessen wird an einem ICE 3 der Baureihe 403 der 1. Serie, dem Triebzug 301 (Tz301), der im nachfolgenden oft als Messzug bezeichnet wird. Für die Messung wurde ein umfassendes Messkonzept entwickelt und Sensoren und Messeinrichtungen an einem der acht Kompaktklimageräte und in den Wagen TW7 und TW2 des Messzuges verbaut. Der entnommene Datensatz setzt sich zusammen aus Daten, die die Regelung des KKGs betreffen und im Klimarechner des jeweiligen Gerätes gespeichert werden, Daten, die am Feldbus (MVB – Multifunctional Vehicle Bus) des Zuges auslesbar sind und Daten aus den zusätzlich verbauten Messeinrichtungen. Die über den MVB übertragenen Daten und die des Klimarechners werden von der Messausrüstung nur alle zehn Sekunden pro Halbzug ausgelesen und gespeichert. Unter anderen werden Werte wie die relative Feuchte und Temperatur der Außen- und Innenluft, die Position des Zuges, die Sonneneinstrahlung, die Passagierbesetzung, der barometrische Luftdruck und die Vibrationen am Klimagerät mittels Messsensorik erfasst.

All die gesammelten Daten vom MVB, Klimarechner und von den zusätzlichen Sensoren werden auf einem weiteren Messrechner zusammengetragen, mit einem Zeitstempel versehen und in Dateien, Logfiles genannt, lokal abgespeichert. Die Übertragung zu stationären Geräten der Firma Liebherr-Transportation Systems Korneuburg erfolgt stündlich per UMTS-Modem und über das Mobilfunknetz.

¹ <http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com>

Zur Datenauswertung und -analyse werden eine Datenbanklandschaft und eine Software für die Messdatenerfassung mit integrierter Vorverarbeitung aufgebaut.

Ziel dieser Felddatenanalyse ist zum einen die Ermittlung der Leistungs- und Energieverbrauchsdaten über alle Jahreszeiten aus den physikalischen Messungen, zum anderen die Darstellung der Gesamtbetriebskosten (TCO=Total Cost of Ownership) anhand der ermittelten Werte und zusätzlicher Informationen des Betreibers. Um die gewonnenen Betriebsdaten zu referenzieren, damit Aussagen über die Wettbewerbsfähigkeit getroffen werden können, werden Daten des ICE-T mit einer Kaltdampfklimateanlage (VCS – Vapor Cycle System) herangezogen, die von der Deutschen Bahn gemessen und zur Verfügung gestellt werden.

4 LUFTLAGER VS. MAGNETLAGER

Die Aufgabe der Lagerung ist es, zueinander relativ bewegende Teile nahezu reibungs- und verschleißfrei zu führen.¹ Eine Einteilung der Lagerarten ist nach der Relativbewegung (Gleitlager und Wälzlager), der Bewegungsform (kontinuierlich bewegte und oszillierende) sowie der Belastungsrichtung (Axial- und Radiallager) möglich. Ebenso ist eine Klassifizierung nach der Art des Schmierstoffes üblich. Hier werden flüssig- und gasgeschmierte Lager und Trockenlager unterschieden. Abbildung 8 zeigt eine mögliche Einteilung der Lagerarten in Bezug auf die beiden Lagermechanismen Magnetlager und Luftlager, auf die etwas näher eingegangen wird.

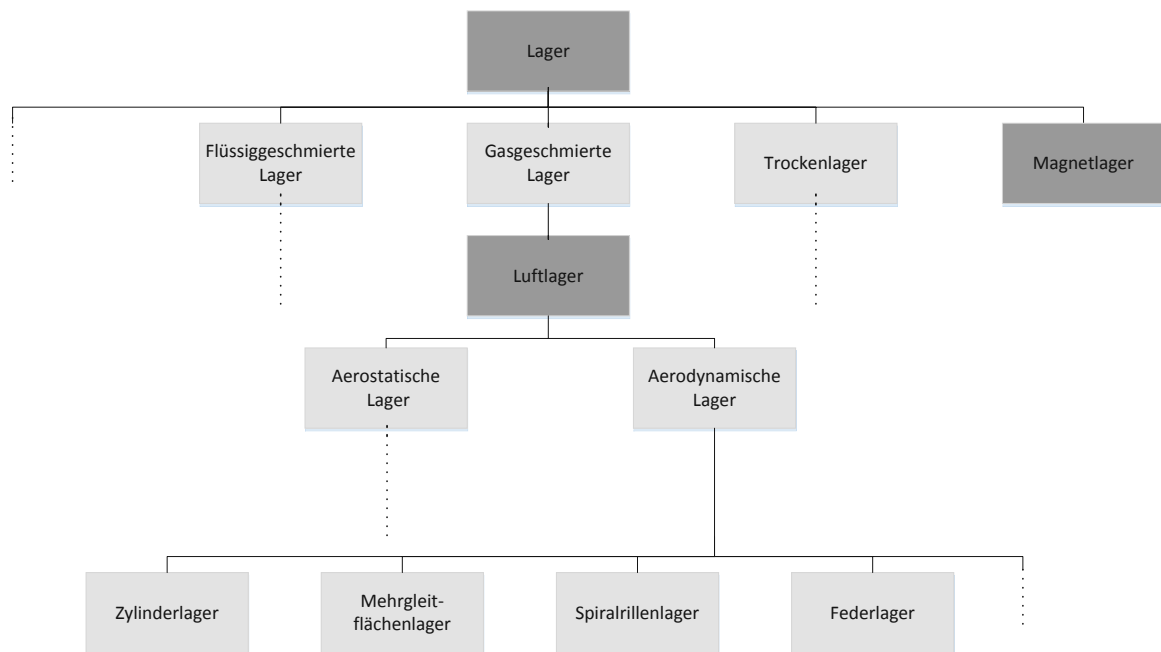


Abbildung 8: Einteilung der Lagerarten²

¹ Deters; 2014; S.G96

² Risse, 2001, S.6

4.1 MAGNETLAGER

Ein Magnetlager ermöglicht eine Lagerung eines Systems ohne Materialkontakt und zwar durch den Einsatz von Sensoren, Regler, Leistungsverstärkern und Elektromagneten. Ausgenommen ist die Bauart, die mit einem Permanentmagneten funktioniert, auch passive magnetische Lagerung genannt¹, und daher keine Stromversorgung benötigt.² Hier wird nachfolgend nur die aktive elektromagnetische Lagerung betrachtet, im englischen Active Magnetic Bearing, kurz AMB genannt, die mit einem komplexen mechatronischen Controller funktioniert.³ Da die aktive Magnetlagerung ein typisches mechatronisches System darstellt, ist es eine Sonderform der Lagerung und nicht einteilbar in übliche Lagerklassen (siehe Abbildung 8). Magnetlager werden vor allem bei Anwendungen mit hohen Drehzahlen eingesetzt, nämlich über 20.000 U/min, wo konventionelle Wälzlager oder hydrodynamische Gleitlager versagen.⁴ Die aktive Dämpfung, Verschleiß- und Schmiermittelfreiheit und Sauberkeit lassen die Magnetlagerung gegenüber anderen Lagerlösungen attraktiv wirken.⁵ Durch den geringen Verschleiß des Lagers ist die Lebensdauer hoch und der Wartungsaufwand sehr gering. Nachfolgend sind einige der wichtigsten Eigenschaften der Magnetlagerungen nach Bartz 2014 aufgelistet.⁶

Die bedeutendsten Vorteile einer Magnetlagerung sind:

- Berührungsfreiheit
- Schmiermittelfreiheit
- Geringer Wartungsaufwand
- Hohe Zuverlässigkeit
- Großer Drehzahlbereich
- Kleine elektrische Verluste (insbesondere aber bei Permanentmagnetlagerungen)
- Hohe Laufruhe
- Niedrige Geräuschpegel
- Hohe statische Steifigkeit
- Automatische Unwuchtkompensation im Betrieb
- Prozessdatenerfassung
- Elektronische Beeinflussbarkeit der Steifigkeit und Dämpfung

Die Nachteile im Vergleich zu Gleit- oder Wälzlagerungen sind:

¹ Roddeck; 2012; S.448

² Niemann; 2005; S.695

³ Roddeck; 2012; S.448

⁴ Roddeck; 2012; S.448

⁵ Roddeck; 2012; S.449

⁶ Bartz, 2014, S.314

- Geringe Kraftdichten
- Relativ geringere dynamische Steifigkeit
- Hoher Platzbedarf
- Hoher Preis

Das Funktionsprinzip des Magnetlagers kann wie folgt beschrieben werden. Mittels Sensor wird permanent die Abweichung des Rotors von seiner Soll-Lage gemessen. Daraus erzeugt der Regler ein Stellsignal, womit der Strom des Elektromagneten über den Leistungsverstärker und somit das Magnetfeld so gesteuert wird, dass der Rotor in seiner Soll-Lage schwebt. Steifigkeit und Dämpfung können also durch den Regler eingestellt werden. So kann das Lager auch als Schwingungsisolator verwendet werden.¹ Abbildung 9 zeigt das Funktionsprinzip einer aktiven magnetischen Lagerung. Durch die aufwendige Regelung und den komplexen Aufbau sind Magnetlager jedoch sehr teuer. Eine vollständige Magnetlagerung besteht aus mindestens zwei Radiallagern und einem Axiallager wie in Abbildung 10 dargestellt.² Bei einem Elektronikausfall würde der Rotor abstürzen, in diesem Fall sorgt ein Fanglager, meist ein zusätzliches Wälzlager, für die Kontaktfreiheit zwischen Rotor und Stator.³

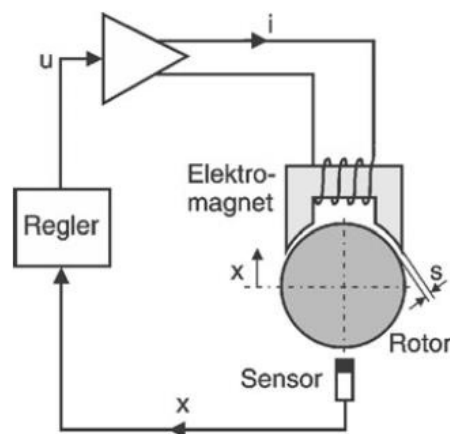


Abbildung 9: Funktionsprinzip einer aktiven Magnetlagerung⁴

¹ Gasch; 2006; S.360

² Roddeck; 2012; S.448

³ Gasch; 2006; S.360

⁴ Roddeck; 2012; S.448

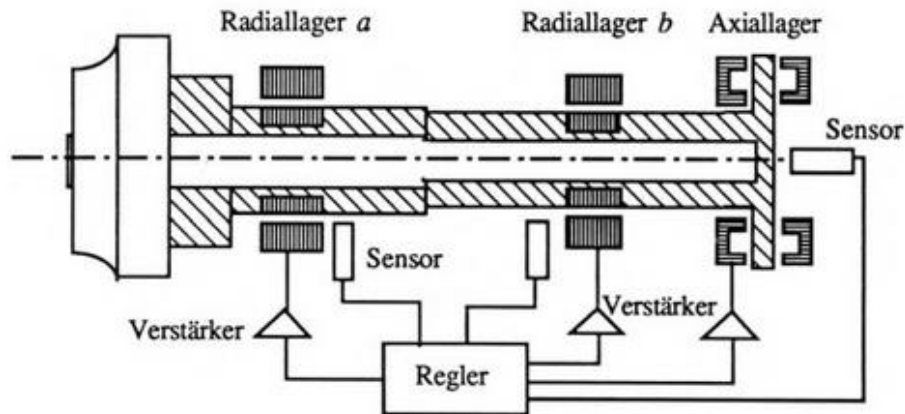


Abbildung 10: Beispiel einer vollständigen aktiven Magnetlagerung einer Welle¹

4.1.1 MAGNETLAGER IN DER HVAC

Bei der in der luftgestützten Klimaanlage der Fa. Liebherr-Transportation Systems eingesetzten Lagerung für die motorisierte Kühlturbine handelt es sich um eine aktive elektromagnetische Lagerung. Zwei einheitliche Lagerpatronen sind am linken und rechten Ende des Turbinengehäuses eingebaut (siehe Abbildung 11). Jede dieser Lagerpatronen beinhaltet jeweils vier Elektromagnete, die jeweils paarweise gegenüber liegen. Pro Magnetpaar ist ein induktiver Sensor eingebaut, einer für die x-Richtung, einer für die y-Richtung. Jede Lagerpatrone beinhaltet außerdem jeweils eine Axiallagerspule, die die Bewegungen in axialer Richtung unterbinden (siehe Abbildung 12). Stromversorgung, Signalverarbeitung und Verstärkung sowie die Schnittstellen zum Klimaregler und Motor-Controller sind die Aufgaben des Magnetlager-Controllers (MBC). Herrscht eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Position, wird diese durch Magnetfeldveränderungen ausgeglichen. Der Magnetlager-Controller wird unterbrechungsfrei über die Batterie des Zuges (110 V DC) elektrisch versorgt. So kann eine Aufrechterhaltung der Lagerung auch bei einer Versorgungsunterbrechung der Nebenverbraucher garantiert werden. Der Schwebezustand wird sofort bei Einschalten des Klimareglers realisiert, das aktive Kompensieren der Unwucht des Rotors erst ab einer gewissen Drehzahl und zwar ab etwa 12.000 U/min.

¹ Roddeck; 2012; S.449

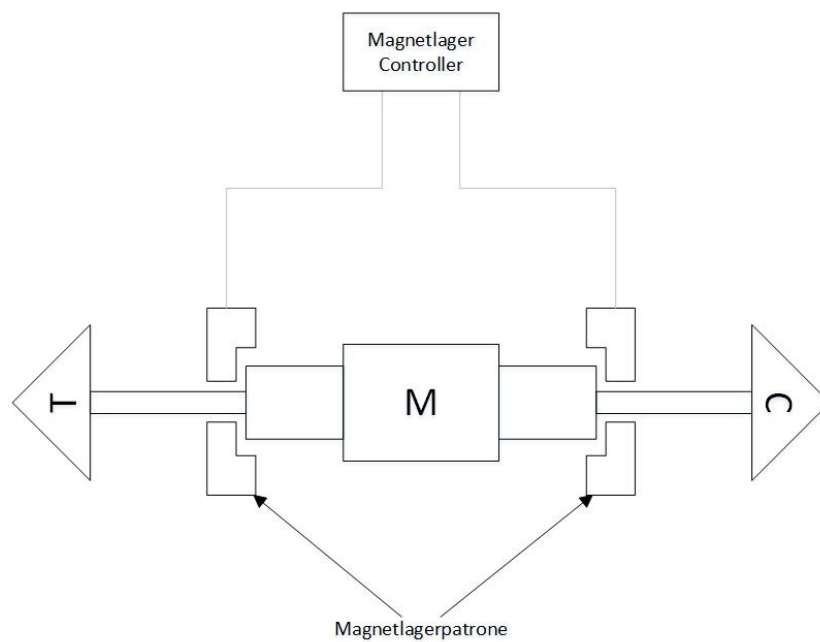


Abbildung 11: Blockdiagramm der MKT mit Magnetlagerung, T-Turbine, M-Motor, C-Kompressor

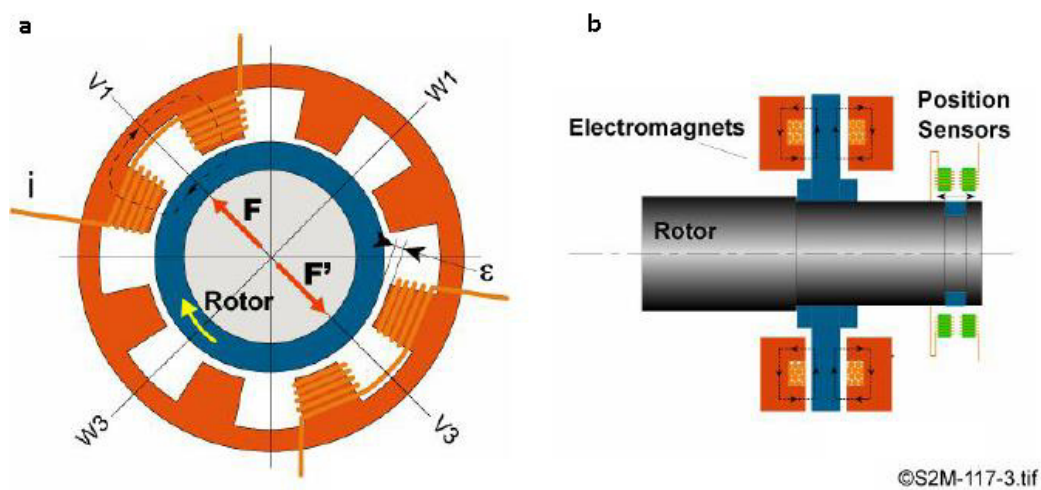


Abbildung 12: Magnetlagerung der MKT (S2M), a-Radiallager, b-Axiallager¹

¹ S2M

4.2 LUFTLAGER

Luftlager gehören zur Gruppe der Gleitlager und zur Untergruppe der gasgeschmierten Lager (siehe Abbildung 8).¹ Geschmiert sind sie nur mit Luft, was sie geeignet für Reinräume macht. Luft ist so gut wie immer und überall vorhanden. Man entnimmt sie der Umgebung, gegebenenfalls muss sie noch gereinigt und komprimiert werden und gibt sie dorthin auch wieder ab. Somit ist kein geschlossener Kreislauf wie bei anderen Schmierstoffen oder eine aufwendige Abdichtung notwendig. Luftlager lassen sich grob einteilen nach der Art der Druckerzeugung. Wird der Druck im Lagerinneren, also durch Relativbewegung von Rotor und Stator erzeugt, spricht man von einem aerodynamischen Lager. Bei von außen zugeführter Druckversorgung ist die Rede von aerostatischen Lagern.² Im Folgenden wird auf das Funktionsprinzip vor allem von aerodynamischen Lagern eingegangen.

4.2.1 FLÜSSIGGESCHMIERTE LAGER

Da sich die Funktionsprinzipien der gasgeschmierten und der fluidgeschmierten Lager sehr ähneln, wird hier zunächst auf die hydrodynamische Gleitlagerung eingegangen. Als Schmierstoff werden hier Flüssigkeiten beziehungsweise Gase eingesetzt. Die Gestaltung der Gleitflächen ist wesentlich, da der Schmierstoff, in diesem Fall Luft, an den Gleitflächen haften muss. Ebenso benötigt er eine gewisse Viskosität. Der Gleitraum muss eine sich verengende Gestalt annehmen und eine gewisse Relativgeschwindigkeit zwischen Rotor und Stator muss gegeben sein, um einen hydrostatischen Druck zu erzeugen und so eine kontaktfreie Lagerung zu gewährleisten.³

Ein hydrostatischer Druck entsteht durch das Stauen der an den Gleitflächen haftenden und der von der bewegten Fläche mitgenommenen Flüssigkeit in einem verengenden Durchflussquerschnitt. Die Querschnittverengung, also die Bildung eines Staupraumes, bei Radiallagern Keilspalt genannt, ist maßgeblich. Ohne sie ist der Aufbau von hydrostatischem Druck nicht möglich.⁴

Bei einer Radiallagerung, die den Zapfen einer Welle umschließt, wirkt eine radial gerichtete Normalkraft, durch das Gewicht der Welle, die Zahnkraft oder ähnliches, auf die Bohrung. Bei Rotation entsteht unter Last eine Verengung beziehungsweise Erweiterung des Lagerspalts, ein Keilspalt. Die kleinste und größte Spalthöhe liegen sich jeweils gegenüber und summiert ergibt sich das Lagerspiel.⁵

¹ Bartz; 1993; S.2

² Bartz; 2014; S.7f

³ Künne; 2008; S.71

⁴ Künne; 2008; S.77

⁵ Künne; 2008; S.79

Fließt keine Flüssigkeit ab, wird also der ganze Stauraum von dem gleichen Flüssigkeitsvolumen durchströmt, so muss bei einer Verengung des Querschnittes die mittlere Fließgeschwindigkeit zunehmen und vice versa.

4.2.2 REIBUNGSZUSTÄNDE

Die Reibungszahl $\mu = F_R/F$ beschreibt das Reibungsverhalten. Sie drückt aus, wie groß die der Bewegung entgegengebrachte Reibungskraft F_R im Verhältnis zur Lagerkraft F ist und hängt von den Gleitflächen und deren Oberflächenbeschaffenheit ab.

Im Stillstand herrscht keine Kontaktfreiheit zwischen Zapfen und Bohrung, die Welle liegt an der Lagerbohrung auf. Der Spaltabstand an unterster Stelle beträgt Null. Beginnt sich die Welle zu drehen, herrscht also zu Beginn Festkörperreibung, auch Anlauf- oder Ruhereibung genannt. Diese ist relativ hoch und verringert sich mit zunehmender Drehzahl¹, da mit zunehmender Geschwindigkeit aufgrund der Haftwirkung immer mehr Schmierstoff in den Spalt zwischen Welle und Bohrung gepresst wird. Dies führt zu einer Stauung des Schmierstoffes, wodurch sich der hydrodynamische Druck erhöht, der die Welle anhebt.² Es herrscht Mischreibung, eine Kombination aus Festkörperreibung und Flüssigkeitsreibung. Die Gleitflächen werden nicht vollständig voneinander getrennt. Bei ansteigender Drehzahl hebt sich die Welle höher und es kommt zur Flüssigkeitsreibung, die Exzentrizität der Welle verringert sich. Bei weiter steigender Drehzahl sind Zapfenmittelpunkt und Bohrungsmittelpunkt nahezu gleich (siehe Abbildung 13). Wird der notwendige Druck im Lager mittels Pumpe außerhalb des Lagers erzeugt, handelt es sich um ein hydrostatisches, beziehungsweise aerostatisches Gleitlager.³ Dadurch entfällt das Problem der Festkörperreibung beim Anfahren und bei geringen Drehzahlen, dafür sind zusätzliche Einrichtungen erforderlich, die zu höheren Kosten führen. Bei Festkörperreibung und auch Mischreibung kommt es zu hohem Verschleiß. Ein permanentes Start/Stopp-Verhalten wirkt sich demnach schlecht auf die Lebensdauer des Lagers aus. Aus diesem Grund sind Luftlagern Grenzen gesetzt und hohe Anforderungen an die Gleitflächen gegeben.⁴

¹ Künne, 2008, S. 80

² Wittel; 2015; S. 570

³ Wittel; 2015; S. 561

⁴ Wittel; 2015; S. 564

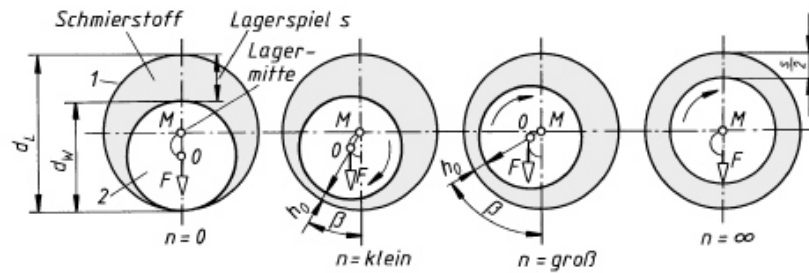


Abbildung 13: Lage der Wellenmitte im Stillstand und bei steigender Drehzahl n^1

Die verschiedenen Reibungszustände, die in hydrodynamischen Gleitlagern vorkommen, sind in der schematischen Stribeck-Kurve in der nachstehenden Abbildung 14 dargestellt. 1902 führte Stribeck Versuche durch, mit denen er die Abhängigkeit der Reibungszahl μ , der Schmierstoffviskosität η , der Drehzahl der Welle n und der spezifischen Lagerbelastung $\bar{p}$ nachwies.²

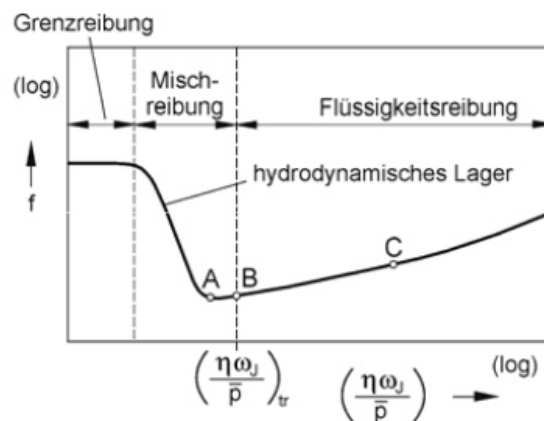


Abbildung 14: Stribeck-Kurve (schematisch), f Reibungszahl, η Schmierstoffviskosität, ω Winkelgeschwindigkeit der Welle, $\bar{p}$ spezifische Lagerbelastung, $(\eta\omega/\bar{p})$ bezogener Reibungsdruck, $(\eta\omega/\bar{p})_{tr}$ bezogener Reibungsdruck beim Übergang von Misch- zur Flüssigkeitsreibung³

Je kleiner die Lagerkraft F ist, beziehungsweise je größer die Drehzahl n und die Zähigkeit η des Schmierstoffes sind, desto eher ist Flüssigkeitsreibung zu erreichen.⁴

¹ Wittel; 2015; S. 570

² Künne; 2008; S. 79

³ Steinhilper; 2012; S.82

⁴ Wittel; 2015; S. 571

4.2.3 DRUCKVERTEILUNG UND TRAGFÄHIGKEIT

Damit der Flüssigkeitsfilm die auftretenden Lagerkräfte übertragen kann und so eine Flüssigkeitsreibung ermöglicht, müssen die Gleitflächen entsprechend gestaltet sein und sich so bewegen, dass ein Druck aufgebaut wird, der mit den äußeren Kräften im Gleichgewicht steht. Der an den Gleitflächen haftende Schmierstoff wird vom Zapfen mit genügend hoher Drehzahl mitgenommen und in den Keilspalt gedrängt. Dadurch entsteht eine Druckerhöhung, die die Gleitflächen bis auf die kleinste Spaltdicke bei Vollschnierung h_0 auseinanderdrängt.¹

Bei Flüssigkeitsreibung schwimmt der Zapfen auf dem Schmierfilm, also muss zwischen der Lagerkraft F_N und der Tragkraft der Flüssigkeit F_F Gleichgewicht bestehen. Die Tragkraft hängt vom Flüssigkeitsdruck p ab. Der mittlere Flüssigkeitsdruck $\bar{p}$, der in Richtung der Belastung wirkt, multipliziert mit der projizierten Lagerfläche $b * d$, wobei b der Lagerbreite entspricht und d dem Lagerdurchmesser, ergibt die Tragkraft F_F . Die Gleichgewichtsbedingung lautet also folgendermaßen:²

$$\bar{p} = \frac{F_n}{b * d} \quad (1)$$

Wie in Abbildung 15 ersichtlich, steigt der Druck bis kurz vor der engsten Stelle des Keilspaltes an, danach fällt er ab.

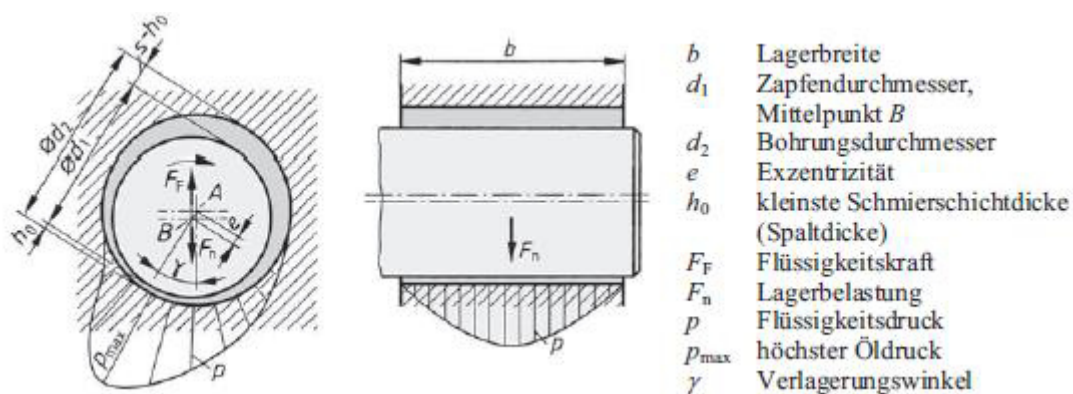


Abbildung 15: Verhalten der Lager im Bereich der Flüssigkeitsreibung³

¹ Wittel; 2015; S. 564

² Künne, 2008, S. 81

³ Künne; 2008; S.81

4.2.4 GASGESCHMIERTE LAGER

Bei der Gaslagerung sorgt ein gasförmiger Schmierstoff für die Trennung der Lagerflächen, in diesem Fall Luft.

Ganz allgemein besteht ein Luftlager aus zwei festen Körpern und einer dünnen komprimierten Luftschicht, die für eine kontaktfreie Relativbewegung der beiden Körper sorgt.¹ Man unterscheidet zwei Arten der Luftlagerung, die aerostatische und die aerodynamische Lagerung. Bei der aerostatischen Lagerung wird der Luftpolster mit von außen zugeführtem Luftdruck erzeugt. Die aerodynamische Lagerung hingegen funktioniert rein durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Rotor und Stator.²

Aufgrund der sauberen Schmierung, der Umweltfreundlichkeit und der Einsatzmöglichkeiten in kritischen Temperaturbereichen rücken Luftlager immer mehr in den Vordergrund. Ein großer Vorteil von Luft als Schmierstoff ist die niedrige Viskosität. Diese sorgt für geringe Energieverluste auch bei sehr engen Lagerspalten.³ Ölgeschmierte Lager beispielsweise versagen bei hohen Temperaturen, da die Öl-Viskosität mit der Temperatur stark abnimmt, was zu einer kritischen Reduktion des Schmierfilms führt.⁴ Die Viskosität der Luft ist nicht beziehungsweise nur sehr gering temperaturabhängig. Hier steigt die Viskosität mit der Temperatur sogar leicht an.⁵ Luftgeschmierte Lager werden vorrangig bei sehr hohen Geschwindigkeiten, niedrigen Lasten, hoher Genauigkeit, bei außerordentlichen Temperaturbereichen und bei hohen Anforderungen hinsichtlich Reinheit eingesetzt.⁶ Im Gegensatz zu flüssiggeschmierten Lagern ist keine externe Schmiermittelzufuhr notwendig. Dies bewirkt eine Gewichts- und Kostenreduktion und, da keine Flüssigschmierung herrscht, ergibt sich ein erheblich geringerer Wartungsaufwand.⁷ Aufgrund der wenigen Komponenten ist eine Luftlagerung auch kostengünstiger. Nachteile der Luftlagerung sind die hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Lagerflächen. Luftgelagerte Systeme müssen sehr genau justiert und ausgeglichen werden um Unwuchtkräfte zu minimieren. Da Luft im Gegensatz zu Öl kompressibel ist, ist eine geringere Steifigkeit in Luftlagern erreichbar. Man versucht bei aerostatischen Lagern mit einem Druckbereich bis maximal 10 bar zu arbeiten, da im Gegensatz zu inkompressiblen Flüssigkeiten ein höherer Druck nur mit sehr viel Energie erreichbar wäre. Weiters ist die Viskosität von Gasen wesentlich geringer als die von Öl, dadurch ist die Tragfähigkeit aerodynamischer Lagerungen kleiner als die hydrodynamischer Lagerungen bei gleichen Abmessungen und Umfangsgeschwindigkeiten.⁸

¹ Bartz; 2014; S.7

² Bartz; 1993; S.8

³ Bartz; 2014; S.7

⁴ Khonsari; 2008; S. 350

⁵ Bartz; 1993; S.7

⁶ Iordanoff; 2008; S.387

⁷ Khonsari; 2008; S. 350

⁸ Bartz; 1993; S.18

Bei rein aerodynamischer Lagerung bildet sich der Luftspalt erst ab einer gewissen Drehzahl, somit ergibt sich davor Festkörperkontakt und Fressgefahr an den Lagerflächen.¹

4.2.5 AERODYNAMISCHE LAGER

Das Funktionsprinzip der aerodynamischen Luftlager gleicht dem der ölversorgten hydrodynamischen Lager.² Der Druck im Lagerspalt entsteht dadurch, dass sich die Lagerflächen gegeneinander bewegen. Der Aufbau des Luftpolsters erfolgt wie bei flüssiggeschmierten Gleitlagern durch Druck im Keilspalt. Die Luft wird zufolge Newtonscher Reibung in den Keilspalt gedrückt. Durch die Kompressibilität der Luft entstehen so ein Druckberg im verengenden Spalt und ein Unterdruckgebiet im divergenten. Dies sorgt für die Stabilisierung des Lagers. Dieser keilförmige Spalt ergibt sich meist aus der Exzentrizität der Welle. Bei axialen Lagern kann konstruktiv, durch Keilplatten oder durch stufenförmige Segmente, für einen verengten Raum gesorgt werden.³

Luftlager mit glatter Lagerwand sind wegen der geringen Dämpfung anfällig bei niederfrequenten Stößen. Betriebssicherheit herrscht nur in einem eingeschränkten Bereich bei niedrigen Drehzahlen. Werden Keilplatten, Taschen, Nuten, Kanäle oder Folien angebracht, kann dieser Bereich erweitert werden.⁴ Bei Luftlagern mit Rillen in den Lagerflächen etwa entsteht der Druck dadurch, dass die Luft zur Mitte der Spur gedrängt wird und sich dort staut.⁵ Aufgrund der Erwägung eines aerodynamischen Federlagers für die Lagerung der motorisierten Kühlturbine in der Air-Cycle-Klimaanlage für Schienenfahrzeuge bei Liebherr-Transportation Systems GmbH wird hier nur auf dieses näher eingegangen.

4.2.6 AERODYNAMISCHE FEDER- UND FOLIENLAGER

Durch Anbringen von Federn und Folien im Lagerspalt kann der Effekt der Luftkomprimierung ebenso erleichtert werden. Dank des Einsatzes von nachgiebigen, beschichteten Folien wird die Stabilität der Lagerung erhöht. Die Folien wirken dämpfend und unterstützen den Luftpolsteraufbau. Die elastischen Elemente schmiegen sich an die Gegenfläche und erzeugen so einen Keilspalt.⁶

¹ Bartz; 2014; S.8

² Bartz; 2014; S.5

³ Bartz; 1993; S.8,12

⁴ Bartz; 2014; S.233

⁵ Bartz; 2014; S.8

⁶ Bartz; 2014; S.9

Eingesetzt werden solche Federlager vor allem in schnelllaufenden Systemen zum Beispiel in Schreib-Lese-Köpfen für magnetische Festplatten-Laufwerke und für die Lagerung der Kühlturbine von Klimaanlage in Flugzeugen.¹

4.2.6.1 RADIALLAGER

Ein typisches Radialfolienlager, wie in Abbildung 16 dargestellt und wie man es in der Turbomaschine verwenden möchte, besteht aus einer dünnen Oberfolie und einer gewellten Puffer-Folie darunter. Diese Puffer-Folie agiert wie eine Feder. Ein Ende der Oberfolie ist frei, das andere ist üblicherweise an der Lagerbohrung befestigt. Der Luftpolster formt sich zwischen Rotor und der losen Oberfolie. Bei Unterdruck im Schmierfilm beginnt die Folie zu flattern. Diese flattert dann zwischen Rotor und Puffer-Folie und kontrolliert so die Schmierfilm Verteilung. Die Folie hört erst dann auf zu flattern, wenn sie in den Keilspalt gedrückt wird. Die Oberfolie wird meist speziell beschichtet, um den Verschleiß bei den Start- und Stopphasen zu reduzieren.² Durch die elastische Lagerschalenstruktur vermindert sich die Steifigkeit der Lagerung, somit wirkt sie unempfindlicher auf Stöße im niederen Frequenzbereich.³

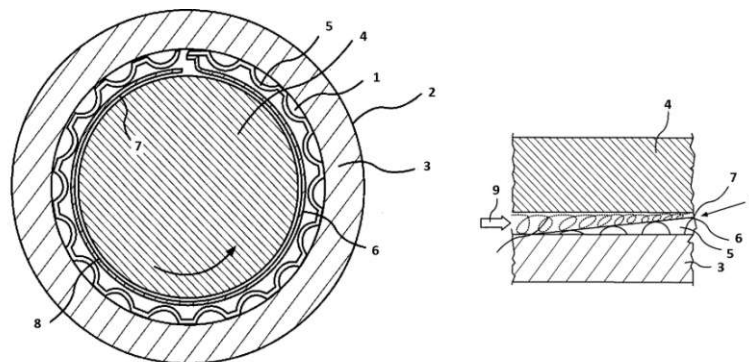


Abbildung 16: Aerodynamisches Radialfolienlager, 1-Folienlager, 2-Lagergehäuse, 3-Lagerring, 4-Welle, 5-Wellfolie, 6-Deckfolie, 7-Gleitschicht, 8-Luftspalt⁴

¹ Khonsari; 2008; S.350

² Agrawal; 1997; S.1

³ Bartz; 1993; S.131

⁴ Knopp; 2011

4.2.6.2 AXIALLAGER

Das Axiallager, das zum Einsatz in der Turbomaschine kommen soll, ist ein sogenanntes Axialkippssegmentlager¹ wie in Abbildung 17 dargestellt. Es ist ähnlich dem oben angeführten Radiallager aufgebaut. Um einen Keilspalt zu erzeugen sind hier mehrere Einzelfolien angebracht mit jeweils einer Wellfolie darunter. Die Funktionsweise gleicht der des Radiallagers zuvor (siehe Abbildung 17).

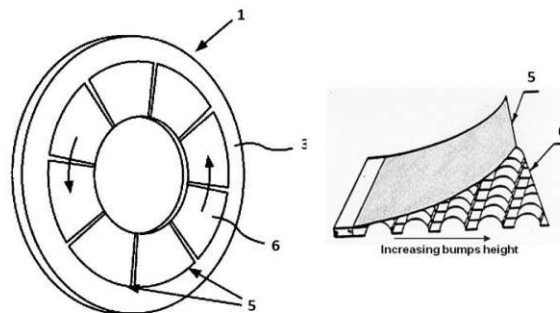


Abbildung 17: Axialfolienlager und schematischer Darstellung des Luftspalts, 1-Folienlager, 3-Lagererring, 4-Welle, 5-Wellfolie, 6-Deckfolie, 7-Gleitschicht, 8-Luftspalt, 9-Luftstrom^{2,3}

4.2.7 LUFTLAGER BEI LIEBHERR-AEROSPACE TOULOUSE SAS

Liebherr-Aerospace Toulouse SAS entwickelt und fertigt Luftmanagementsysteme für die Luftfahrtindustrie, unter anderem ein aerodynamisches Federlager, das seit Jahren in Air Cycle Klimaanlage in Flugzeugen eingesetzt wird. Abbildung 18 zeigt ein solches Radial- sowie Axiallager von Liebherr-Aerospace Toulouse SAS.

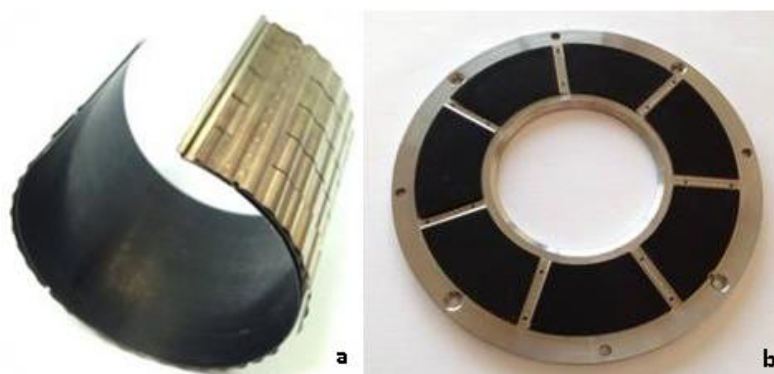


Abbildung 18: Luftlager bei Liebherr-Aerospace, a-Radiallager, b-Axiallager¹

¹ Bartz; 2014; S.234

² Knopp; 2011

³ Liebherr-Aerospace Toulouse SAS

Nun möchte man diese konzerneigene Entwicklung auch für Klimasysteme in Schienenfahrzeugen anwenden. Einer von vielen Unterschieden von Klimaanlage in Flugzeugen zu jenen in Schienenfahrzeugen ist der Antrieb. Während bei Zügen die Klimaanlage mit einem Elektromotor angetrieben werden, werden die bisher von Liebherr-Aerospace Toulouse eingebauten Klimasysteme in Flugzeugen mit Zapfluft, die abgezapfte Luft vom Kompressor des Triebwerkes, angetrieben. Diese Zapfluft liefert soviel Energie, dass die maximale Drehzahl in wenigen Sekunden erreicht wird und somit die kritische Drehzahl, die für den Aufbau des Luftpolsters im Luftlager notwendig ist, schnell überschritten wird. Da beim Flugbetrieb die Anforderungen an eine Klimaanlage sehr hoch sind und neben einer angenehmen Umgebungstemperatur vor allem genügend Luftdruck sowie Sauerstoff bereitgestellt werden müssen, läuft die Klimaanlage während eines Fluges durchgehend. In der Regel haben Flugzeuge mehrere redundante Anlagen als Sicherheit im Falle eines Ausfalles. Daher kommt es in der Luftfahrt zu nur einem Start/Stopp Zyklus der motorisierten Kühlturbine je Flug. Ein Start/Stopp Zyklus bedeutet ein Einschalt- und ein Ausschaltvorgang der Turbine. Da man also davon ausgeht, dass nie mehr als 100.000 Start/Stopp-Zyklen während einer Lebensdauer von 30 Jahren eintreten werden, wurde ein Belastungstest dieses Ausmaßes des Luftlagers durchgeführt, der positiv ausfiel. Das Luftlager hält also 100.000 Start/Stopp-Zyklen unter pneumatischem Antrieb aus. Mehr Zyklen wurden nicht getestet, da dies nicht notwendig war. Für eine motorbetriebene MKT mit Luftlagerung wurde die Mindestdrehzahl, die zum Aufbau eines Luftpolsters zum Anheben der Welle notwendig ist, mit 7.500 U/min angenommen. Diese Werte leiten sich aus Laborwerten der pneumatisch angetriebenen luftgelagerten MKT für die Luftfahrt ab. Unter Realbedingungen treten Vibrationen und Stöße auf, die den Erhalt des Luftpolsters erschweren, darum nimmt man hier eine Minimaldrehzahl von etwa 15.000 U/min an, um eine stabile Lagerung zu gewährleisten. Höchste zulässige beziehungsweise mögliche Geschwindigkeit der Turbomaschine, in die man ein Luftlager einsetzen möchte, sind 74.000 U/min.

Das Lagerspiel beträgt 200 μm . Den minimalen Lagerspalt, um einen Luftpolster zu erzeugen, nimmt man mit 20 μm an. Bei laufendem Betrieb kann der Lagerspalt auch ein Minimum von 5-10 μm betragen, um den Luftpolster aufrecht zu erhalten. Es liegt nahe, dass dieser kleine Spalt bei zusätzlichen äußeren Vibrationen und Stößen leicht zu überwinden ist.

¹ Liebherr- Systems GmbH & Co KG

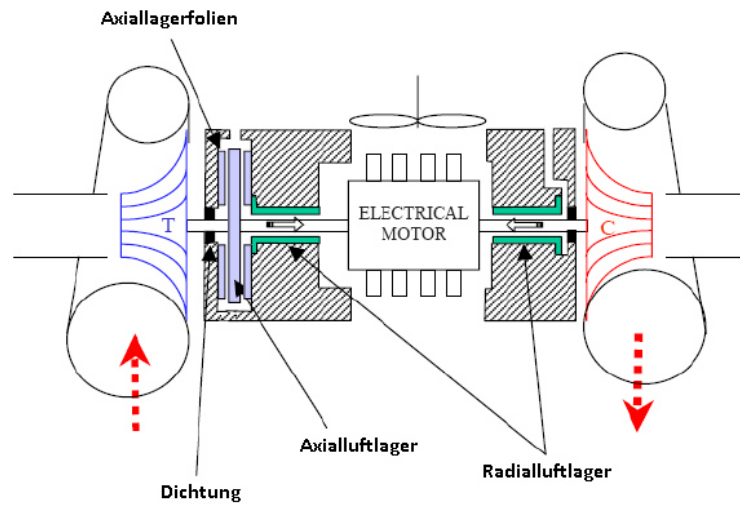


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Luftlager in der MKT¹

Der Rotor ist aus rostfreiem Stahl, die Wellfolie und die Deckfolie des Lagers sind aus sogenanntem Inconel, eine nickelbasierte Stahllegierung. Die Deckfolie ist zusätzlich mit Polytetrafluorethylen (PTFE), auch unter dem Handelsnamen Teflon bekannt, zur Reibungsminderung und zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit beschichtet.

¹ Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH

5 EIN- UND AUSSCHALTVORGÄNGE DER MOTORISIERTEN KÜHLTURBINE (MKT)

Da für den Aufbau eines Luftpolsters, der für eine kontaktlose Lagerung eines aerodynamischen Luftlagers sorgt, eine ausreichend hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Rotor und Stator nötig ist, stellen Ein- und Ausschaltvorgänge der Turbine ein Problem dar. Jeder Ein- und Ausschaltvorgang bedeutet eine Festkörperreibung zwischen Welle und Lagerschaft und so eine Reduktion der Lebensdauer. Nachfolgend werden Ursachen für Ein- und Ausschaltvorgänge aufgezeigt sowie die Ergebnisse der Analyse des Messzuges dargestellt und eine Abschätzung deren Bedeutung für die Lebensdauer der Klimaanlage abgegeben.

5.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Im Folgenden wird auf die theoretischen Grundlagen der Ein- und Ausschaltvorgänge der Kühlturbine eingegangen. Ursachen werden aufgezeigt und anschließend theoretisch fundiert.

5.1.1 URSACHEN FÜR EIN- UND AUSSCHALTVORGÄNGE

Ein Ausschalten der Turbine bedeutet den Übergang von der rotierenden Welle zum Stillstand. Ein solcher Vorgang kann von verschiedenen Ereignissen ausgelöst werden. Zum einen kann durch die Regelung der Klimaanlage, die je nach Kühlbedarf mehr oder weniger Kühlleistung vorgibt, ein Ein- oder Ausschaltvorgang erzeugt werden. Zum anderen kann eine Unterbrechung der Energieversorgung der Klimaanlage zum Stillstand der Turbine führen. Hierbei kann zwischen gewollten Unterbrechungen der Energieversorgung gesprochen werden, wie zum Beispiel am Ende einer Fahrt und sogenannten Trennstellen unterschieden werden. Die Klimaanlage wird wie andere Hilfsbetriebe in Schienenfahrzeugen von der Versorgungsspannung der Oberleitung gespeist. Trennstellen sind Strecken, bei denen die Oberleitung spannungslos, der Zug also nicht von der Oberleitung mit Strom versorgt wird. Diese Trennstellen treten während der Fahrt auf, der Zug überwindet sie mit reiner kinetischer Energie. Trennstellen können fix im Streckennetz vorkommen, um beispielsweise verschiedene Bahnstromsysteme an Landesgrenzen zu trennen, ebenso können Streckenabschnitte der Oberleitung situationsbedingt abgeschaltet werden. Versorgungsunterbrechungen lassen sich demnach in sogenannte gewollte Versorgungsunterbrechungen und in Versorgungsunterbrechungen während der Fahrt

unterteilen. Die Versorgungsunterbrechungen während der Fahrt werden hier als Trennstellen bezeichnet. Trennstellen können fix im Streckennetz verbaut sein, dann werden sie Schutzstrecken genannt und lassen sich weiter unterscheiden in Systemtrennstellen und Phasentrennstellen (siehe Kapitel 5.1.1.1.3).

Schädigungspotentiale beim Einsatz eines Luftlagers sah man anfangs vor allem in Schutzstrecken, Strecken die fix eingebaut sind und bei denen der Zug aus diversen sicherheitstechnischen Gründen nicht mit Strom von der Oberleitung versorgt wird. In solchen Fällen würde die Turbine auslaufen und der notwendige Luftpolster für eine stabile Lagerung fällt zusammen. Da der aktuell verbaute Magnetlager-Controller, der für den Erhalt eines ausreichenden Lagerspalts zuständig ist (siehe Kap. 4.1.14.1.1), in diesem Fall mittels Batterie versorgt wird, waren Schutzstrecken bisher kein Problem. Da diese Schutzstrecken fix im Streckennetz eingebaut sind, wurden dazu Daten von der Deutschen Bahn angefordert.

Nach fortgeschrittenen Analysen der Daten des Messzuges stellte sich heraus, dass regelungsbedingte Ein- und Ausschaltvorgänge einen erheblichen Anteil der gesamten Schaltvorgänge ausmachen. Regelungsbedingt bedeutet, bedingt durch die Komfortanforderung im Wagon meldet der Klimarechner das Signal „Klimaanlage einschalten“ beziehungsweise „ausschalten“, wenn die Drehzahlvariierung nicht ausreicht. Ebenso tauchten versorgungslose Strecken auf, die man laut den für diese Arbeit von der Deutschen Bahn bereitgestellten Daten nicht vermutet hätte, beziehungsweise die sich nicht zwingend an der gleichen Stelle wiederholten. Demzufolge wird im nachstehenden Abschnitt zwischen regelungsbedingten und spannungsbedingten Ein- und Ausschaltvorgängen unterschieden. Ebenso wird zwischen Schutzstrecken und Trennstellen differenziert.

5.1.1.1 VERSORGUNGSUNTERBRECHUNGEN

Um den Vorgang der Versorgungsunterbrechungen besser zu verstehen, wird nun auf die Energieversorgung bei Bahnen allgemein eingegangen.

5.1.1.1.1 STROMSYSTEME ELEKTRISCHER TRAKTION

Zwei wesentliche Besonderheiten der elektrischen Traktion sind zum einen, dass sich die notwendige Energie zur Fortbewegung nicht am Fahrzeug befindet und zum anderen, dass sich der Verbraucher im Versorgungsnetz bewegt.¹ Aus vorrangig historischen Gründen gibt es verschiedene Bahnstromversorgungssysteme, die sich in Spannung und Frequenz unterscheiden.

¹ Jänisch; 2016; S.217

Die häufigsten Stromarten in der Fahrleitung der Hauptbahnen sind Gleichstrom 1,5 kV und 3 kV, Einphasenwechselstrom 16 2/3 Hz, 15 kV und Einphasenwechselstrom 50 Hz, 25 kV. Da diese Systeme technisch gleichwertig sind und wirtschaftlich kaum Unterschiede aufweisen lohnt sich eine Umstellung bereits elektrifizierter Netze kaum. Für Neuelektrifizierungen kommt großteils nur der Einphasenwechselstrom mit Landesfrequenz (50 Hz beziehungsweise 60 Hz) in Frage, da für den Einphasenwechselstrom mit verminderter Frequenz (16 2/3 Hz) eine separate Energieversorgung notwendig ist.¹ Die unterschiedlichen Bahnstromsysteme in Europa sind in nachfolgender Abbildung 20 dargestellt.

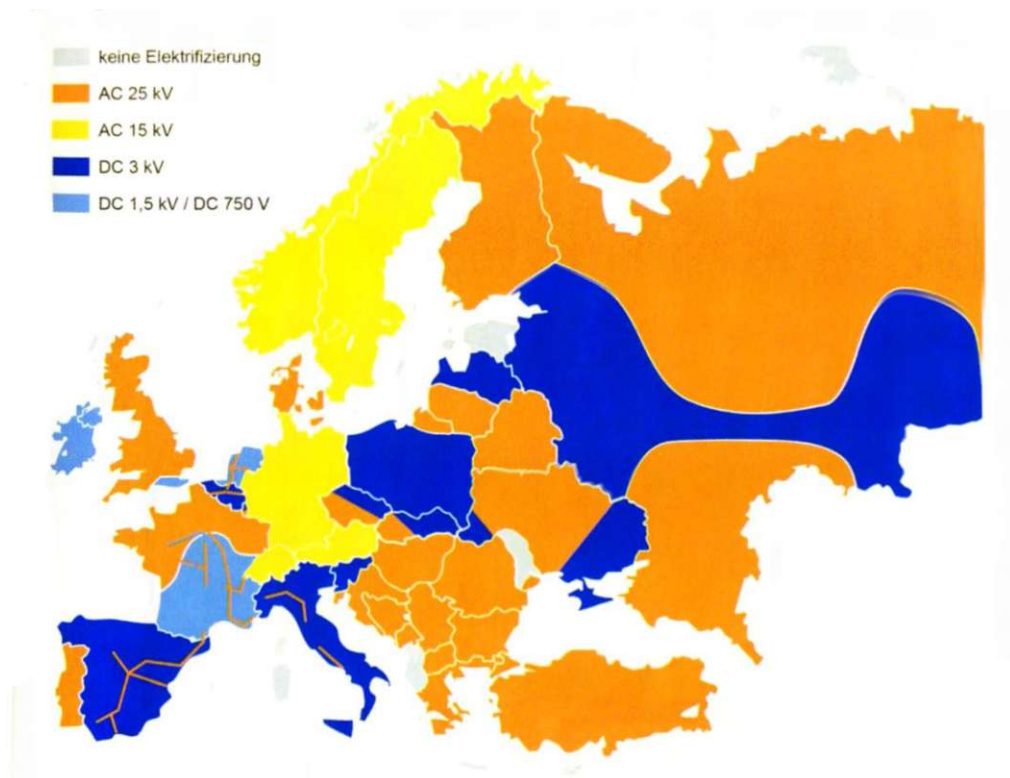


Abbildung 20: Fahrdrahtspannungen in Europa²

5.1.1.1.2 ENERGIEVERSORGUNG ELEKTRISCHER BAHNEN

Für die Energieversorgung elektrischer Bahnen mit Gleichstrom oder Wechselstrom ist ein zweipoliger Anschluss nötig.³ Die Fahrleitung, isoliert und gegen Erde unter Spannung stehend, bildet den einen, die nicht isolierten Fahrschienen, den anderen Pol. Die Stromversorgung mit Gleichstrom, Drehstrom und Einphasenwechselstrom mit unverminderter Frequenz elektrischer Triebfahrzeuge wird aus dem allgemeinen Landesnetz, also aus Kraftwerken und Drehstrom-Übertragungsleitungen der allgemeinen

¹ Fendrich; 2013; S.681ff

² Janicki; 2016; S.172

³ Filipović; 2015; S.173

Landesversorgung bezogen. Die Unterwerke, die an geeigneten Hochspannungspunkten an das Landesnetz angeschlossen sind, speisen dann die Fahrleitungen.¹

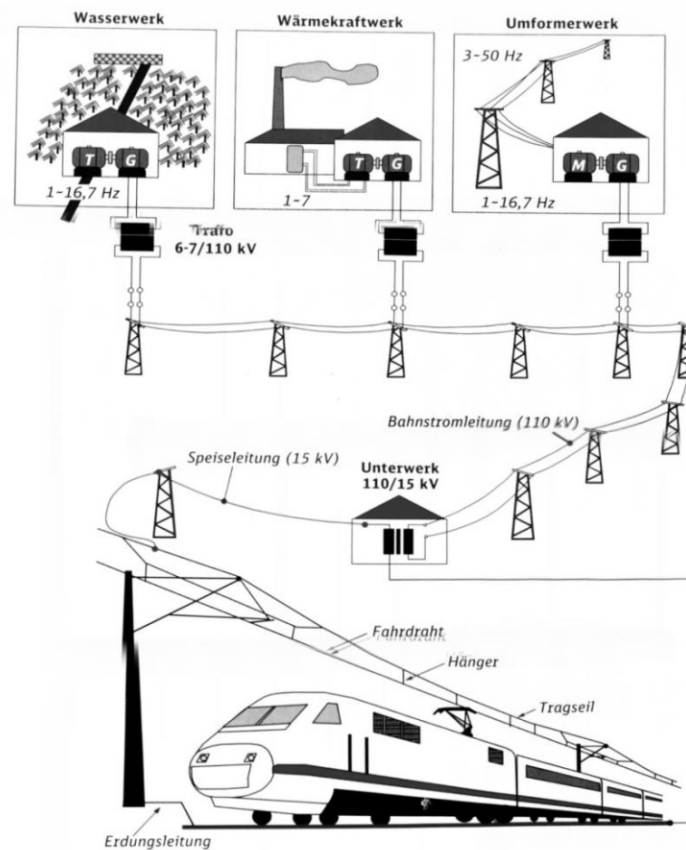


Abbildung 21: Das System Elektrische Bahn²

Auch bei Energieversorgung mit Einphasenwechselstrom mit verminderter Frequenz kann die Energie aus dem Landesnetz entnommen werden, jedoch sind dann Umformwerke für die Umformung von 50 Hz auf 16 2/3 Hz notwendig, die die Bahnfahrleitung speisen. Diesen Energiebezug nennt man dezentrale Stromversorgung. Erfolgt die Speisung aus einem eigenen Bahnstromnetz mit bahneigenen Kraftwerken, herrscht eine zentrale Stromversorgung. Schweden und Norwegen werden beispielsweise dezentral versorgt, Österreich und die Schweiz zentral. In Deutschland findet man beide Versorgungsarten.³

5.1.1.1.2.1 Energieversorgung der deutschen Bahn

Die DB Netz AG betreibt in ihrem Oberleitungsnetz Einphasenwechselstrom mit 15 kV und 16,7 Hz.⁴ Da die Stromart der Bahn nicht der der üblichen Landesversorgung gleicht, war ein

¹ Filipović; 2015; S.257

² Janicki; 2008; S. 153

³ Filipović; 2015; S.257

⁴ DB

eigenes, vom Landesnetz getrenntes Bahnstromverteilungssystem notwendig. Dieses eigene Bahnstromnetz der Deutschen Bahn AG wird mit der Nennspannung 2 AC 110 kV 16,7 Hz betrieben, hat eine Ausdehnung von ca. 7.800 km Trassenlänge und versorgt in etwa 180 Bahnunterwerke.¹ Einspeist wird das bahneigene Stromnetz von Kraftwerken mit 16,7 Hz Nennfrequenz oder zentraler Umformer- und Umrichterwerken, die die Frequenz der von verschiedenen Energieversorgungsunternehmen zugeführten Energie anpassen.² Das 110 kV-Bahnstromverteilungssystem transportiert die Energie zu den Unterwerken, die gleichmäßig auf das Bahnnetz verteilt sind. In den Unterwerken wird der Strom auf 15 kV umgespannt und die Energie über die Speiseleitung an die Oberleitungen des Unterwerksspeisebezirkes abgegeben³ (siehe Abbildung 21). Dezentral werden die Fahrleitungen der Deutschen Bahn nur in Bereichen gespeist, in denen aus historischen Gründen das zentrale Bahnübertragungsnetz nicht vorhanden ist, was vorrangig in Norddeutschland der Fall ist. Hier wird der 50-Hz-Drehstrom aus der Landesenergieversorgung entnommen und mittels dezentralen Umrichter- oder Umformerwerken die Nenngrößen der Spannung auf 15 kV und der Frequenz von 50 Hz auf die Sonderfrequenz $50/3 = 16\frac{2}{3}$ Hz umgewandelt.⁴ Diese Strecken müssen von zentral gespeisten Strecken mit der Frequenz von 16,7 Hz wegen der Frequenzdifferenz mit Schutzstrecken getrennt werden.⁵ Die Oberleitung ist längs in Abschnitte unterteilt, die bei Störungen oder Wartungen separat abgeschaltet werden können. Abbildung 22 zeigt in einem Prinzipschaltbild den Unterschied zwischen dezentraler und zentraler Versorgung der Bahnstromversorgung mit der Sonderfrequenz 16,7 Hz.

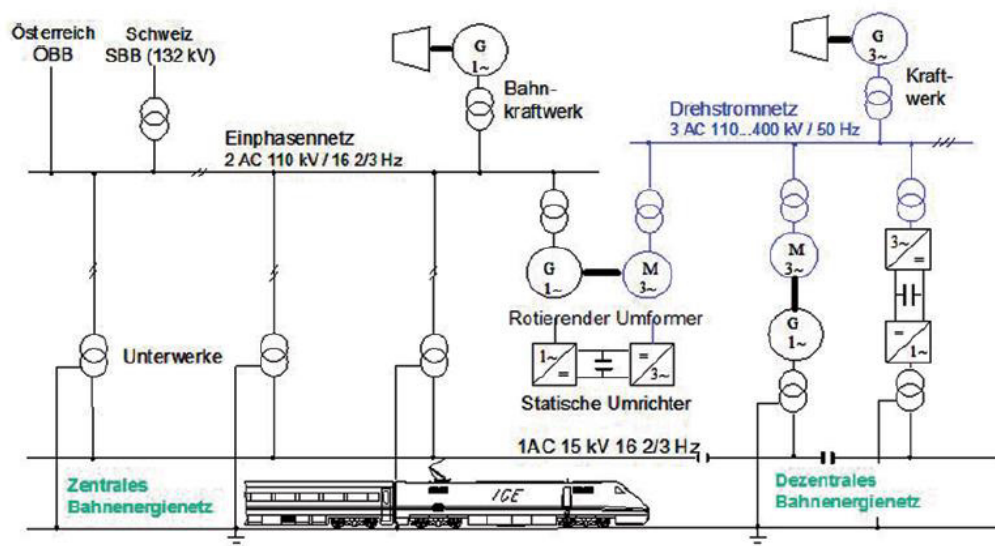


Abbildung 22: Prinzipschaltbild der Bahnenergieversorgung mit Sonderfrequenz 16,7Hz⁶

¹ Fendrich; 2013;S. 692

² Fendrich; 2013;S. 692

³ Janicki; 2008; S. 152

⁴ Fendrich; 2013;S. 694

⁵ Fendrich; 2013;S. 694

⁶ Fendrich;2013;S.693

5.1.1.1.3 SCHUTZSTRECKEN

Schutzstrecken sind Bereiche, in denen das Triebfahrzeug ohne Spannungsversorgung ist, also kein Strom von der Fahrleitung über den Stromabnehmer eingespeist wird. Diese Schutzstrecken oder neutralen Abschnitte sind durch Trennstellen an jedem Ende versehen¹ und werden mit ausgeschaltetem Hauptschalter, der die Einspeisung von Energie aus dem Stromversorgungsnetz über den beziehungsweise die Stromabnehmer für Traktion und Hilfsbetriebe ermöglicht, teilweise auch mit gesenktem Stromabnehmer mit Schwung durchfahren. Der Motor erhält also keinen Strom während der Durchfahrt, das Bordnetz wird teilweise mit Batterie versorgt. Die erforderlichen Maßnahmen hängen von den Energieversorgungssystemen, sowie von der Anordnung der Stromabnehmer und der Fahrgeschwindigkeit ab.² Das Schalten des Hauptschalters erfolgt in der Regel automatisch.³ Die Norm DIN EN 50388 (Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität) definiert neutrale Abschnitte als „Abschnitt einer Fahrleitung mit einer Trennstelle an jedem Ende ausgestattet, um aufeinander folgende elektrische Abschnitte, die in Spannung oder Phase differieren, gegen Verbindung bei Stromabnehmerdurchgang zu schützen.“ Die Anforderungen für die Auslegung von Schutzstrecken besagen, dass der Zug in der Lage sein muss, die Trennstelle zu durchfahren, ohne dass sie überbrückt wird. Züge mit parallelgeschalteten Stromabnehmer mit einem Abstand von maximal 400 Meter müssen sie mit angehobenen Stromabnehmern durchfahren können und angemessene Maßnahmen sind vorzusehen, um eine Wiederanfahrt des Zuges zu ermöglichen, falls dieser innerhalb der Schutzstrecke zum Stehen gekommen ist. Können die Anforderungen zur Nichtüberbrückung nicht erfüllt werden, müssen die Stromabnehmer über die gesamte Länge der Schutzstrecke gesenkt werden.⁴ Sogenannte kurze Schutzstrecken finden Anwendung für Geschwindigkeiten unter 160 km/h. Die Schutzstrecke ist hier kürzer ($D \leq 8 \text{ m}$) als der kleinste Abstand von zwei Stromabnehmern am Triebfahrzeug und ist mit ausgeschaltetem Hauptschalter zu durchfahren. Ist die Schutzstrecke länger ausgeführt als der größte Abstand zwischen den elektrisch verbundenen äußersten Stromabnehmern eines Triebfahrzeuges ($L < 400 \text{ m}$), so spricht man von einer langen Schutzstrecke. Alle Stromabnehmer sind hier zumindest kurzzeitig gleichzeitig innerhalb der Schutzstrecke, dadurch wird ein Überbrücken der Schutzstrecke in jedem Fall vermieden. Diese Schutzstrecken können auch im Hochgeschwindigkeitsverkehr eingesetzt werden.⁵ Abbildung 23 zeigt die Ausführung der langen und verkürzten Schutzstrecke.

¹ DIN EN 50388:2006-03

² DIN EN 50388:2006-03

³ DIN EN 50388:2006-03

⁴ DIN EN 50367:2013-02

⁵ DB

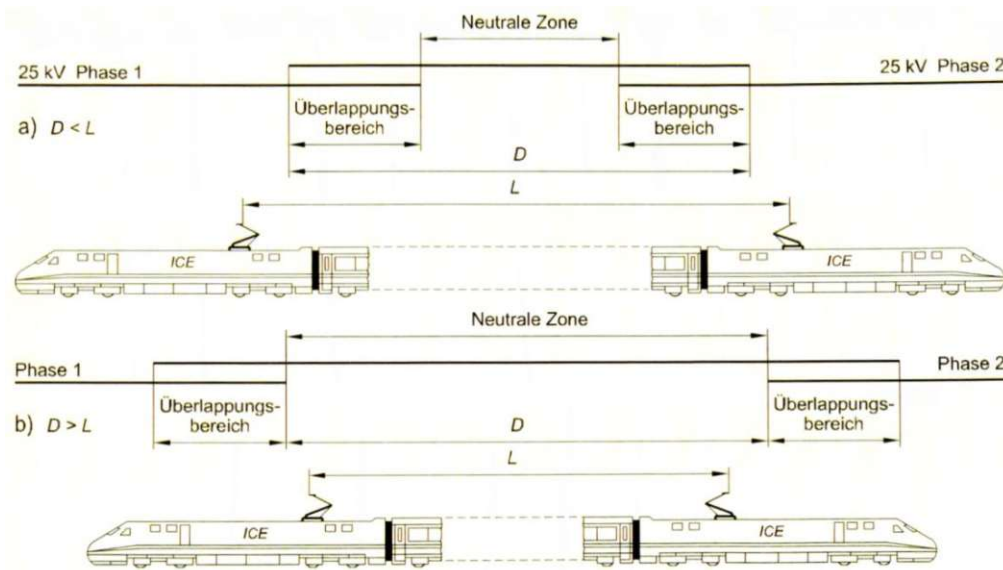


Abbildung 23: Varianten der Schutzstreckenausführung, a- $D < L$, b- $D > L$ ¹

Schutzstrecken können als Systemtrennstellen oder als Phasentrennstelle ausgeführt sein.

5.1.1.1.3.1 Systemtrennstellen

Systemtrennstellen dienen dazu, zwei aufeinanderfolgende unterschiedliche Energieversorgungssysteme voneinander zu trennen, um beispielsweise den weiteren Betrieb beim Wechsel vom Wechselstrombetrieb mit 16,7 Hz wie in Deutschland und Österreich auf den Gleichstrombetrieb mit 1,5 kV wie in den Niederlanden zu ermöglichen.² In nachstehender Tabelle sind mehr Systemtrennstellen der Deutschen Bahn aufgeführt. Bei Systemtrennstellen, die mit angehobenen Stromabnehmern befahren werden, ist der Leistungsschalter zuvor automatisch zu öffnen, die Spannung des neuen Energieversorgungssystem muss am Stromabnehmer erkannt werden, um die entsprechenden Stromkreise einzuschalten. Müssen die Stromabnehmer gesenkt werden, muss die Schutzstrecke sicherstellen, dass bei unabsichtlich gehobenen Stromabnehmern keine Überbrückung der Strecke erfolgt und dass das Ausschalten beider Energieversorgungssysteme ausgelöst wird. Ist ein Absenken der Stromabnehmer erforderlich, wird dies, in der Regel durch Steuersignale ausgelöst, automatisch durchgeführt.³ Der Systemwechsel erfolgt manchmal auch an Bahnhöfen (Grenzbahnhof) mittels Umschaltung der Gleisversorgung.⁴

¹ Biesenack; 2006;S.388

² Wolpensinger;2011

³ DIN EN 50388:2006-03

⁴ Filipović; 2015; S.270

Systemtrennstellen im DB-Netz treten auf:

- Grenzübergänge nach Frankreich, Dänemark und Luxemburg (25 kV, 50 Hz)
- Grenzübergänge nach Belgien und Tschechien (25 kV, 50 Hz und 3 kV, DC)
- Grenzübergänge in die Niederlande (25 kV, 50 Hz und 1,5 kV DC)
- Grenzübergänge nach Polen (3 kV, DC)
- Grenzübergänge in die Schweiz und nach Österreich (ebenfalls 15 kV, 16,7 Hz, Schutzstrecken hier nur zur Zählung beziehungsweise aufgrund unterschiedlicher Fahrweise des übergeordneten Netzes)
- Übergänge zu verschiedenen Straßenbahnnetzen mit 750 V DC innerhalb Deutschlands¹

5.1.1.1.3.2 Phasentrennstelle

Zur Reduzierung der Spannungsunsymmetrie müssen bei Einspeisung vom Dreiphasenstrom die drei Phasen aufgeteilt werden und immer beim jeweils nächsten Unterwerk eine andere Spannung genommen werden. Speisebereiche, die aus verschiedenen Phasen des Drehstromlandesnetzes versorgt werden, müssen ebenfalls getrennt werden. Diese Trennung nennt man Phasentrennstelle.

Die Phasentrennstellen müssen von den Zügen mit ausgeschaltetem Hauptschalter durchfahren werden.² Eine Senkung des Stromabnehmers ist in der Regel nicht notwendig.³ Da das Netz der Deutschen Bahn mit verminderter Frequenz betrieben wird, kommen Phasentrennstellen in dieser Form nicht vor.⁴

Phasentrennstellen im Netz der Deutschen Bahn können aber auch andere Gründe haben, wie zum Beispiel Bereiche des übergeordneten 110-kV-Bahnstromleitungsnetz, die eventuell in Inselbetrieb fallen können, sind Phasentrennstellen in der Oberleitung erforderlich, um zu hohe Ausgleichsströme zu vermeiden. Ebenso werden bei der Auftrennung von Oberleitungsverbindungen neutrale Abschnitte eingesetzt, um den Kurzschlussstrom im Oberleitungsbereich zu begrenzen oder um Schaltanlagen zu vermeiden. Zur Trennung der Oberleitungsbereiche die aus unterschiedlichen vorgelagerten Netzen versorgt werden, werden ebenfalls Schutzstrecken als Phasentrennstellen ausgeführt eingesetzt. Der Grund ist die unterschiedliche Frequenz, wie zum Beispiel bei der Versorgung aus dem bahneigenen 110-kV-Bahnstromleitungsnetz mit der Sollfrequenz 16,7 Hz gegenüber der Versorgung direkt aus dem öffentlichen 50-Hz-Versorgungsnetz, wobei die 50 Hz über Umformerwerke zu $50/3 = 16 \frac{2}{3}$ Hz umgeformt werden. Diese obwohl sehr kleine Differenz in der Frequenz bedarf einer Trennung. Dies wäre die Trennung von zentraler und dezentraler Versorgung.

¹ DB

² Fendrich; 2013; S.690

³ DIN EN 50388:2006-03

⁴ DB

Durch die spannungslosen Bereiche haben diese Schutzstrecken energetische und bahnbetriebliche Nachteile.

5.1.1.2 REGELUNG AIR CYCLE HVAC

Der Klimaregler (KR), der an den Fahrzeugbus (MVB - Multifunction Vehicle Bus) angeschlossen ist und so mit dem zentralen Steuergerät (ZSG) kommunizieren kann, vergleicht die Innenraumtemperatur mit der Solltemperatur des Fahrzeugraums und passt so die notwendige Leistung der Klimaanlage bei einer Abweichung an. Die Leistungskomponenten der Klimaanlage werden aus dem Bordnetz elektrisch versorgt. Die Steuerung der Klimaanlage kann entweder zentral über das Display im Zugbegleiterabteil oder im Fahrerstand erfolgen. Zusätzlich kann die Klimaanlage in jedem Wagen jeweils einzeln ausgeschaltet werden. Die Temperatur im Wagen wird ständig gemessen. Diese muss abhängig von der Umgebungstemperatur in einem bestimmten Bereich liegen¹. Nach der Norm DIN EN 13129:2013-12 hängt die Solltemperatur wie in Abbildung 24 dargestellt von der Außentemperatur ab, um die Behaglichkeit zu garantieren. Zusätzlich müssen die Sollwerte um mindestens ± 2 K verstellbar sein. Je nach Abweichung der Solltemperatur von der Isttemperatur wird über eine Leistungsvorgabe der MKT die Drehzahl gesenkt beziehungsweise erhöht und so die Kälteleistung der Anlage angepasst. Die Leistungsvorgabe ist ein Wert, der sich prozentuell auf die maximale Aufnahmeleistung bezieht.

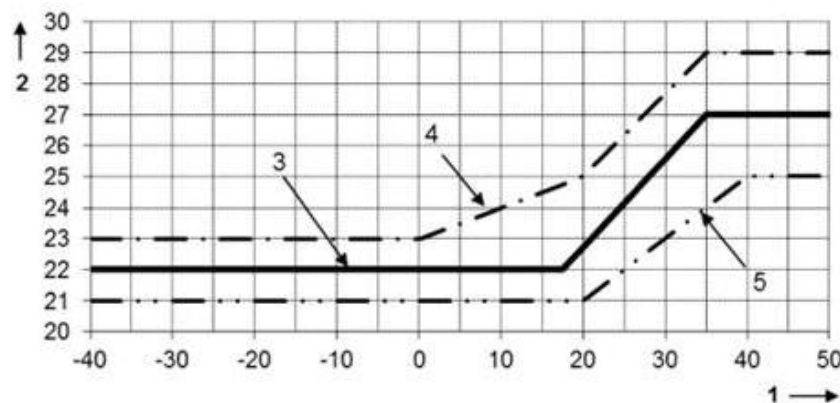


Abbildung 24: Vorgeschlagene Regelkurve und Begrenzungen für die Innentemperatur; 1-Mittelwert der Außentemperatur in °C, 2-Sollwert der Innentemperatur in °C, 3-vorgeschlagene Kurve, 4-obere Grenze, 5-untere Grenze²

¹ DIN EN 13129:2013-12

² DIN EN 13129:2013-12

5.2 ANALYSE DER EIN- AUSSCHALTVORGÄNGE DER MKT DES MESSZUGES TZ301

Im folgenden Kapitel werden alle Schritte zur Analyse der Ein- und Ausschaltvorgänge der MKT erläutert und die Ergebnisse dargestellt.

5.2.1 STRECKENPROFIL DES MESSZUGES

Aus den aufgezeichneten Daten des Messzuges ICE3 Tz301 wurde im Zeitraum vom 01. Dezember 2015 bis 29. Februar 2016 ein Streckenprofil abgeleitet. Der Zeitraum wurde gewählt, da man vermutete, mit einem Jahresquartal das Streckenprofil ausreichend abbilden zu können. Zur Untersuchung wurden die Messdaten des zweiten Halbzuges herangezogen. Aus den Zeitstempeln und GPS-Aufzeichnungen verglichen mit Fahrplan-, beziehungsweise Zugnummern- und Streckendaten der Deutschen Bahn wurden die befahrenen Strecken des Testzuges ermittelt. Wie in Abbildung 25 zu sehen, liegen die Hauptstrecken des Messzuges zwischen Dortmund und München und weiterhin zwischen Basel und Köln. Zur Darstellung der Streckenfrequentierung wurden die Strecken in kürzere Abschnitte aufgeteilt.

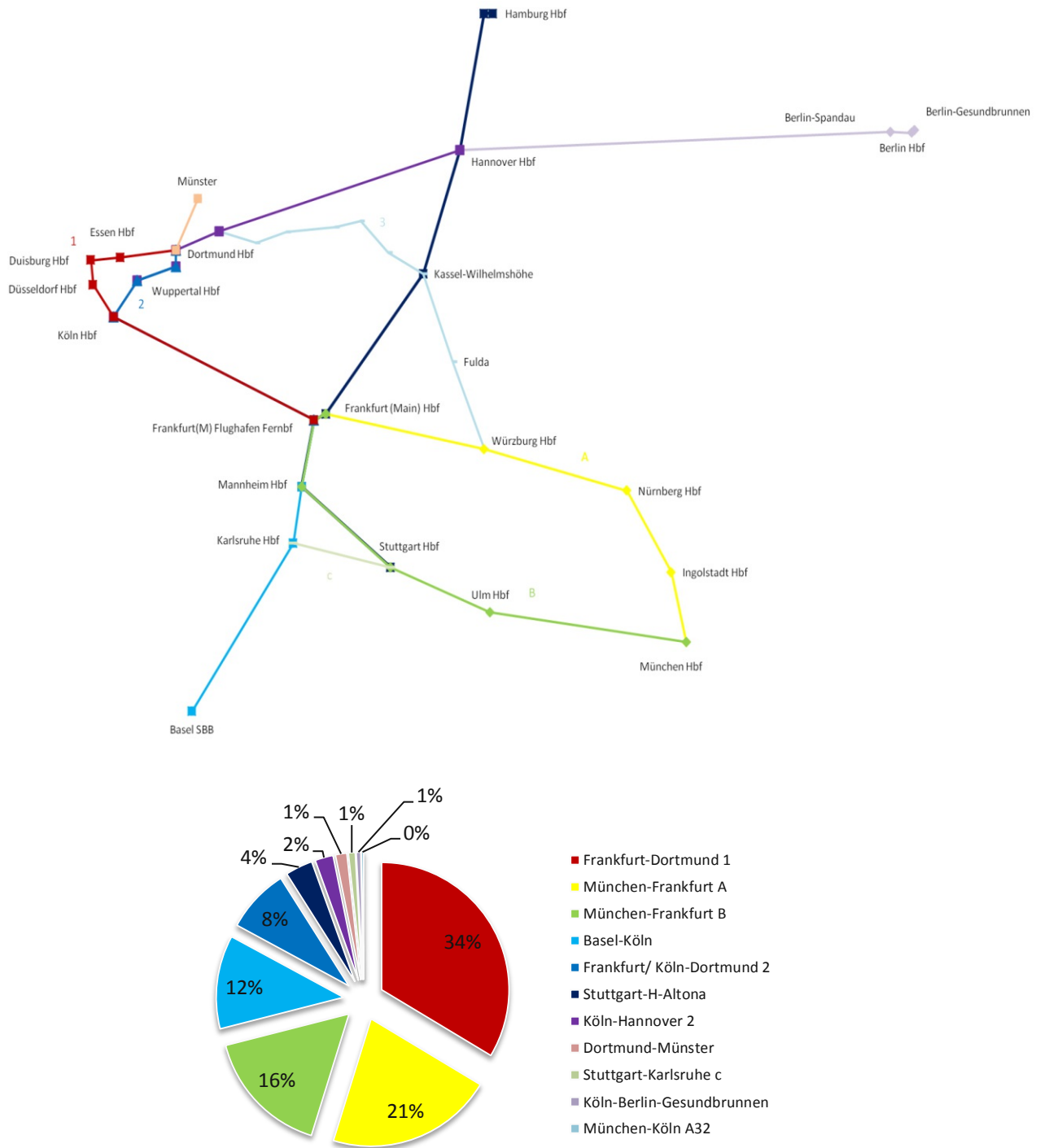


Abbildung 25: Streckenauswertung des Messzuges Dez15-Feb16

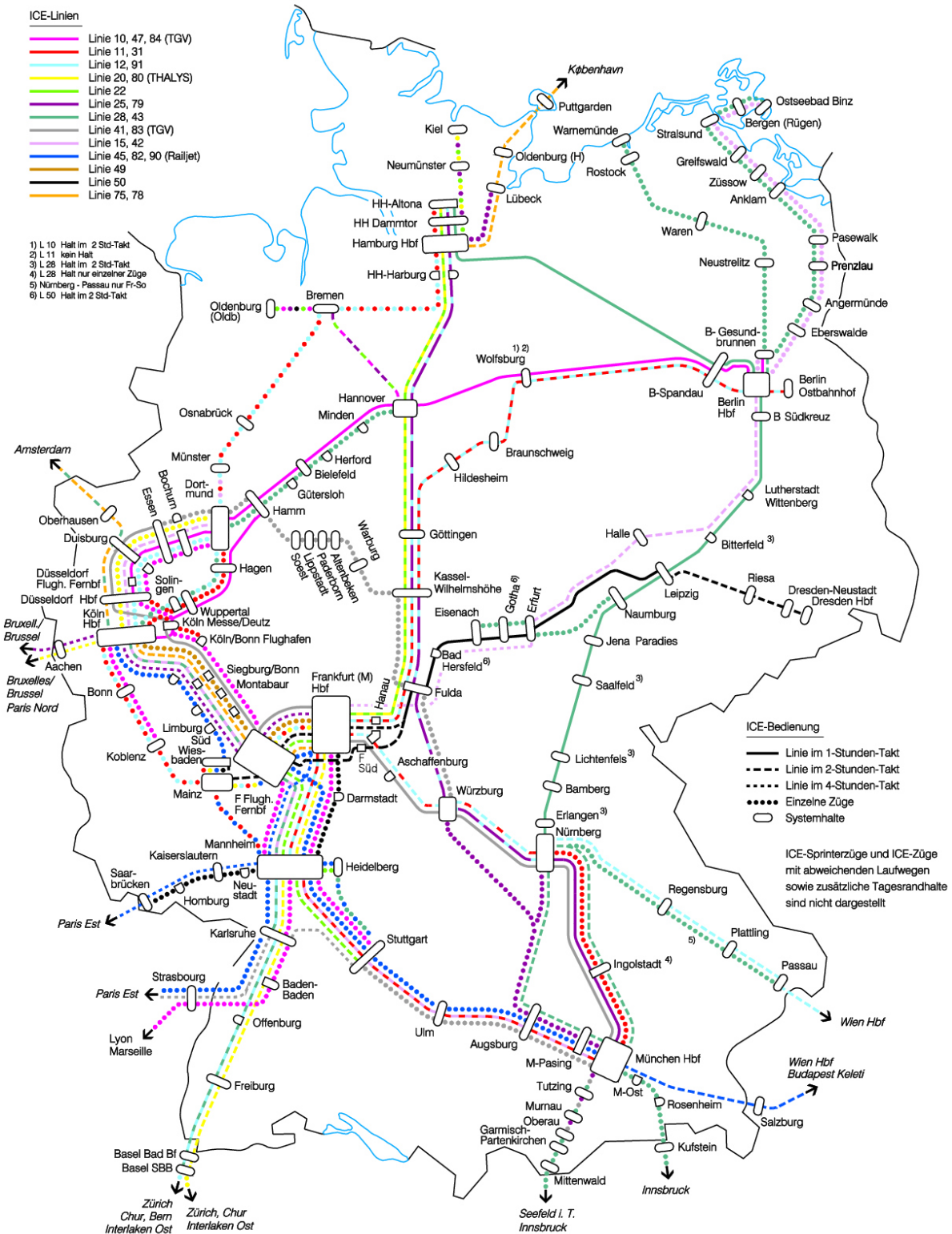
Die meistbefahrenste Strecke ist die zwischen Dortmund und München über Düsseldorf und Nürnberg, wie aus der Abbildung ersichtlich. Die Strecke Dortmund bis München und retour über Stuttgart ist die nächst häufigste. Sehr oft fährt der Zug auch zwischen Basel und Köln.

5.2.2 TRENNSTELLENAUSWERTUNG DES MESSZUGES

Weiters wurden im selben Zeitraum, also vom 01. Dezember 2015 bis 29. Februar 2016 die gefahrenen Strecken auf mögliche Schutzstrecken untersucht. Dafür wurde die Versorgungsspannung der Nebenverbraucher (wie beispielsweise Beleuchtung, Heizung; Klimatisierung, Lüftung usw.) beziehungsweise die Umschaltung auf den Batteriebetrieb aus den aufgezeichneten Messdaten für die vier Wagons im zweiten Halbzug untersucht. Ermittelt wurden jene Ereignisse, bei denen keine Versorgungsspannung vorhanden war, beziehungsweise Batteriebetrieb verzeichnet wurde und der Zug gefahren ist, also bei einer Zuggeschwindigkeit größer als 0 km/h. Verglichen mit Zeitstempeln, GPS-Daten und den Ergebnissen aus der Streckenauswertung ließ sich eine örtliche und zeitliche Verteilung dieser Ereignisse darstellen. Wiederum verglichen mit Wiederholungen der Vorkommnisse je Strecke und den angeforderten Schutzstreckendaten der Deutschen Bahn ergaben sich nur zwei Schutzstrecken, die immer an der gleichen Stelle der jeweiligen Strecke vorkamen. Andere Unterbrechungen, die zwar auch während der Fahrt erkennbar waren, müssen entweder Folgen von Messfehlern beziehungsweise Aufzeichnungsfehler oder von situationsbedingtem Abschalten der Versorgungsspannung gewisser Streckenabschnitte sein. Die Oberleitungen sind in Streckenabschnitte geteilt, die unabhängig voneinander einzeln abgeschaltet werden können. Grund für solche Ausschaltungen sind Vorkommnisse wie etwa auf die Oberleitung gefallene Objekte oder Wartungen. Im Folgenden werden spannungslose Abschnitte während der Fahrt, die nicht als Schutzstrecken verzeichnet sind, als Trennstellen bezeichnet.

Aus den erhaltenen Schutzstreckendaten der Deutschen Bahn in Verbindung mit den ermittelten, dazugehörigen GPS-Daten ergab sich, wie die Theorie vermuten ließ, eine vorrangige Verteilung derselben im Osten. Da die Schutzstrecken in den Daten nicht genau definiert sind, sondern nur einer Strecke mit Kilometerangabe von Betriebsstelle zu Betriebsstelle zugeordnet sind, beziehen sich diese GPS-Daten jeweils auf den Beginn der Strecke. Auf dem Streckennetz des Testzuges befinden sich laut Daten nur zwei dieser Schutzstrecken (siehe Abbildung 27). Im Infrastrukturregister der Deutschen Bahn AG, welches mithilfe der interaktiven Karte¹ zu finden ist und welche die technischen und betrieblichen Informationen zu Strecken, Betriebsstellen, Brücken, Tunnel und Bahnübergängen beinhaltet, wurden die Schutzstrecken auf das ICE-Netz reduziert. Die von ICE-Zügen befahrenen Strecken sind nach Deutscher Bahn die in Abbildung 26 dargestellten.

¹ http://stredax.dbnetze.com/ISRViewer/public_html_de/svg/index.html



Kartografie: DB Netz AG, Geoinformationsmanagement - Visualisierung (I.NPP 41(V))
 Im Galluspark 23, 60326 Frankfurt am Main
 info@netzwerk.geodaten@deutschebahn.com

Redaktion: DB Fernverkehr AG
 P.FBZ 21 (We)
 Stand: Dezember 2015

Abbildung 26: ICE Netz 2016 der DB¹

¹ DB AG, 2016

Insgesamt wurden 71 Trennstellen gemessen. Davon wurden 45-mal die beiden verzeichneten Schutzstrecken durchfahren, das heißt 26-mal durchfuhr der Zug spannungslose Strecken, die nicht als Schutzstrecken verzeichnet sind. Da diese Strecken willkürlich verteilt sind und nur manchmal an derselben Stelle auftauchen, sind sie vermutlich situationsbedingt aufgrund von Wartungsarbeiten oder Baustellen abgeschaltet worden. Eine Häufigkeitsverteilung der Dauern dieser Strecken ist in Abbildung 28 zu sehen. Da die Erfassung der Messmerkmale nur alle 10 Sekunden erfolgt, wurden bei den Dauern jeweils 20 Sekunden aufgerechnet um den größtmöglichen Wert zu bekommen. Die Dauern,



Abbildung 27: Strecken des Messzuges mit gemessenen Trennstellen und Schutzstrecken laut DB

die im folgenden Diagramm also 20 Sekunden betragen, entsprechen einem einzigen Eintrag in den Logfiles. Sie können nicht vernachlässigt werden, sind aber mit hoher Unsicherheit behaftet, da es sich auch um Aufzeichnungs- oder Messfehler handeln könnte. Man sieht die häufigste Unterbrechungsdauer beträgt 60 Sekunden.

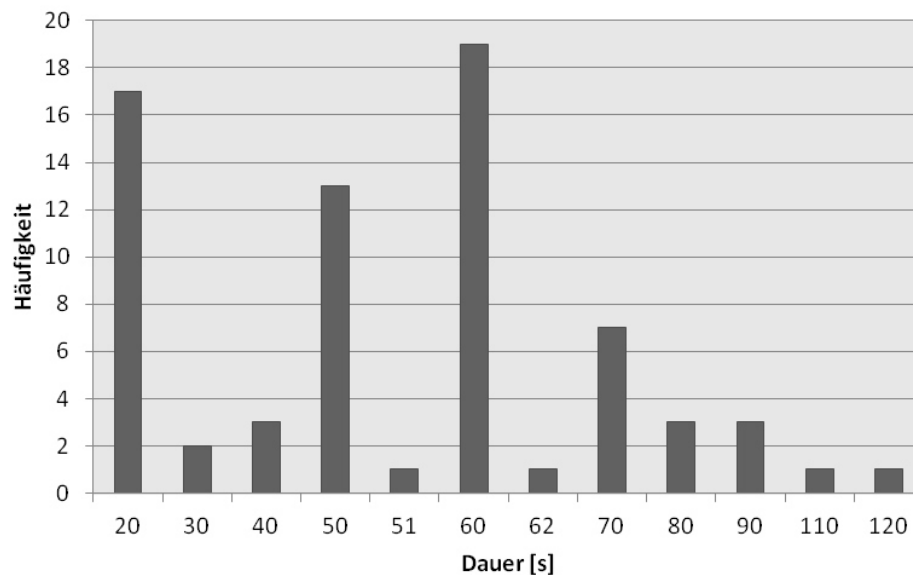


Abbildung 28: Häufigkeit der max. Dauer der gemessenen Versorgungsunterbrechungen

5.2.3 EIN- UND AUSSCHALTVORGÄNGE DER MKT

Da die Verwendung eines Luftlagers vor allem durch den Verschleiß aufgrund der Festkörperreibung bei zu geringer Drehzahl problematisch werden kann, sind die Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge der motorisierten Kühlturbine (MKT) von Interesse. Die Ein- und Ausschaltvorgänge variieren über das Jahr durch verschiedene Klimabedingungen, deshalb wurden die gesamten Messaufzeichnungen untersucht. Da ein Logfile im Durchschnitt die Daten eines Tages zusammenfasst und pro zehn Sekunden mehr als 2.000 Messdaten enthält, wurde für diese Messung die Datenflut komprimiert. So wurden jeweils die Aufzeichnungen eines ganzen Kalendermonats zusammengefasst, die bloß den Zeitstempel, die Drehzahl der Kühlturbine, die Spannung der Nebenverbraucher sowie den Batteriebetrieb vom zweiten Wagon des zweiten Halbzuges und die Geschwindigkeit des Zuges enthalten. Anschließend wurden jene Ereignisse ermittelt, bei denen die Turbine anläuft, die Drehzahl also von 0 auf > 0 U/min wechselt sowie bei denen die Turbine stoppt, die Drehzahl also von > 0 auf 0 U/min wechselt. Davon abgezogen wurden all jene Einschaltungen der MKT, die nur einen Eintrag in den Logfiles, also nur 10 Sekunden dauerten, da diese Einträge möglicherweise Aufzeichnungsfehler darstellen. Die Daten der Drehzahl wurden in den Logfiles als $\text{U/min} \cdot 10^{-2}$ aufgrund der Speicherung normiert. Bei einer gestörten Kommunikation beziehungsweise einer Fehlermeldung vom Motor-

Controller wird für die Drehzahl eine Fehlermeldung ausgegeben. Die Fehlermeldung lautet 111. Durch die Normierung ergibt das den Wert 66 in den Logfiles. Diese Zeilen, in denen die Drehzahl der MKT eine Fehlermeldung enthielt, also 66 betrug, wurden ebenfalls gelöscht. Weiters wurden die Spannungsunterbrechungen ermittelt. Es wurde untersucht, wie oft die Spannung der Nebenverbraucher von den üblichen 587 V auf 0 V wechselte, beziehungsweise umgekehrt. Des Weiteren wurde analysiert, wann die MKT aufgrund dieser Spannungsunterbrechungen ausgeschaltet wurde. Dazu wurden jene Einträge ermittelt, bei denen die Spannung auf 0 V wechselt, eine Drehzahl der Turbomaschine aber noch vorhanden war, beziehungsweise die Drehzahl gerade auf 0 U/min wechselte. Ebenso wurden die Spannungsunterbrechungen während der Fahrt, die hier genannten Trennstellen, ermittelt. Die Aufzeichnung der Messdaten startete im Juni 2015. Um Aussagen über die Start/Stop-Zyklen der MKT über eine Lebensdauer von 30 Jahren zu erhalten, wurde ein Jahr analysiert und zwar von Juli 2015 bis einschließlich Juni 2016. Die Messdaten des Monats Juli sind mit Vorsicht zu genießen, da die Felddatenanalyse noch in der Aufbauphase steckte und deshalb viele Versuche und Tests durchgeführt wurden. Die Ein- und Ausschaltvorgänge sind also in diesem Monat wahrscheinlich nicht realitätsgetreu, da ein kontinuierlicher Passagierbetrieb erst Mitte Juli aufgenommen wurde. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 1 sowie grafisch dargestellt in Abbildung 29 ersichtlich.

Dargestellt sind hier die Ausschaltungen der MKT, die Stopps, die den Start/Stop-Zyklen entsprechen.

Tabelle 1: Auswertungen der gesamten Ausschalthäufigkeit der MKT, der spannungsbedingten, der regelungsbedingten, der Spannungsunterbrechungen sowie der Trennstellen über Monate, * Daten der Versorgungsspannung nicht vorhanden – Daten des Batteriebetriebs wurde herangezogen, **keine Information verfügbar

Tage	Monat	Jahr	MKT Stopps gesamt	MKT Stopps aufgrund Spannungs- unterbrechung	MKT Stopps aufgrund der Regelung	Spannungs- unterbrechungen gesamt	Spannungs- unterbrechungen während der Fahrt (Trennstellen)
31	Juli	2015	524	136	388	211*	**
31	August	2015	329	79	250	138*	26
31	September	2015	554	37	517	108*	14
30	Oktober	2015	598	45	553	173	18
31	November	2015	407	36	371	166	23
30	Dezember	2015	398	26	372	152	18
31	Januar	2016	229	20	209	179	29
31	Februar	2016	226	13	213	152	22
29	März	2016	312	16	296	145	28
30	April	2016	206	62	144	330	8
31	Mai	2016	632	85	547	221	47
30	Juni	2016	727	177	550	272	73
Σ			5142	732	4410	2247	306

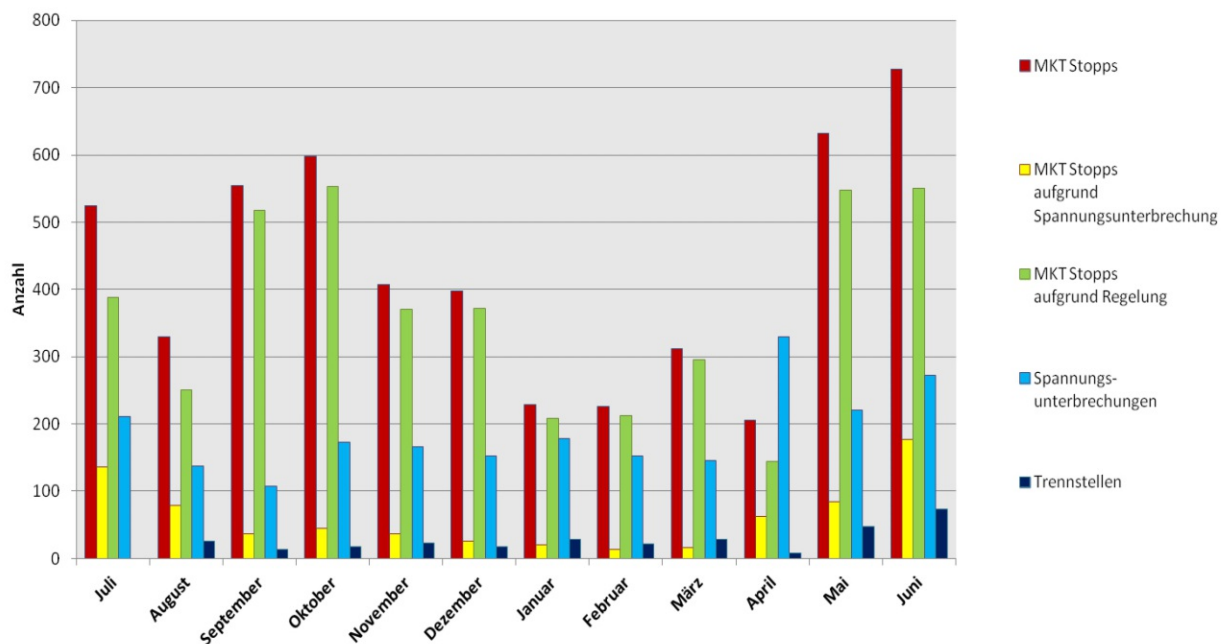


Abbildung 29: Auswertungen der gesamten Ausschalthäufigkeit der MKT, der spannungsbedingten, der regelungsbedingten, der Spannungsunterbrechungen sowie der Trennstellen über Monate

In den Monaten Juli, August und September waren keine Informationen über die Spannungsversorgung verfügbar. Hier wurden die Informationen über den Batteriebetrieb herangezogen. Ein Einschalten des Batteriebetriebes entspricht hier also einer Spannungsunterbrechung. Ebenfalls war im Monat Juli keine Information über die Zuggeschwindigkeit vorhanden und somit konnte keine Aussage über die Anzahl der Trennstellen getroffen werden.

Wie man sieht, sind in den Übergangsmonaten Mai, Juni, September und Oktober viele Start/Stopp-Zyklen verzeichnet. Dafür kann der Teillastbetrieb verantwortlich gemacht werden. Gerade in diesen Monaten schwankt die Außentemperatur häufig. Befinden sich viele Passagiere im Fahrgastraum und nimmt die Sonneneinstrahlung kurzzeitig hohe Werte an, liefert der Klimaregler einen Befehl zum Kühlen. Der Temperaturbedarf kann sich aber in kurzer Zeit wieder ändern und es besteht vielleicht sogar ein Heizbedarf. Dass die Ein- und Ausschaltvorgänge der MKT aufgrund von Versorgungsunterbrechungen im Juli und im Juni höher sind, kann man sich so erklären, dass bei heißen Temperaturen die Klimaanlage häufiger eingeschaltet sein wird als in kälteren Monaten. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage läuft, bei einer Spannungsunterbrechung höher, im Gegensatz zu den Wintermonaten wo die spannungsbedingten Ausschaltungen eher gering sind, da die Betriebszeit der Anlage ebenso kürzer ist. Eine Auflistung über die Ausschalthäufigkeiten der MKT über mehrere Jahre sieht man in Tabelle 2. Die 150.000 Start/Stopp-Zyklen bei einer Lebensdauer von 30 Jahren überschreitet die Anzahl der angenommenen zulässigen Zyklen eines Luftlagers von 100.000 um 50.000.

Tabelle 2: Ausschalthäufigkeit der MKT über mehrere Jahre

Jahre	MKT Stopps gesamt	MKT Stopps aufgrund Spannungs- unterbrechung	MKT Stopps aufgrund der Regelung
1	5.142	732	4.410
5	25.710	3.660	22.050
10	51.420	7.320	44.100
15	77.130	10.980	66.150
20	102.840	14.640	88.200
25	128.550	18.300	110.250
30	154.260	21.960	132.300

Im nächsten Schritt wurde die Dauer der Unterbrechungen der Versorgungsspannung ermittelt. Da man theoretisch die Spannungsunterbrechungen mittels eines externen Energiespeichers verringern könnte (siehe Kapitel 7.1), sind diese sowie die jeweilige Häufigkeit von Bedeutung. Dabei wurden die Zeitstempel der einzelnen Unterbrechungen im Messzeitraum Juli 2015 bis Juni 2016 differenziert und die Häufigkeiten ermittelt. Um die Ergebnisse zu veranschaulichen, wurden die Dauern in Kategorien eingeteilt von unter einer Minute, unter 6 Minuten, unter 15 Minuten, unter 60 Minuten und über 60 Minuten. Da eine Abpufferung über 60 Minuten sehr unrealistisch erscheint, wurden die Ergebnisse über einer Stunde nicht mehr differenziert. Das nachfolgende Diagramm Abbildung 30 zeigt die Verteilung der Dauern der Spannungsunterbrechungen. Um die 65 % der Spannungsunterbrechungen dauern demnach unter eine Minute und um die 90 % unter sechs Minuten.

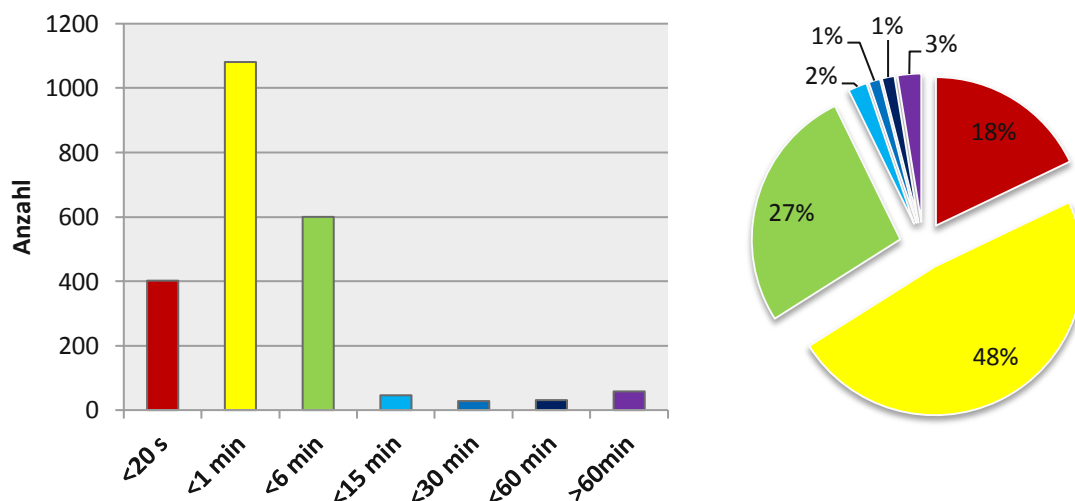


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Dauer der Spannungsunterbrechungen

5.3 VIRTUELLE STRECKENABFOLGEN

Zur Darstellung des Verhaltens von Streckenabfolgen auf anderen Strecken des ICE-Netzes wurden einige virtuelle Streckenabfolgen generiert und mit den Regelungsvorgängen der motorisierten Kühlturbine sowie den Spannungsunterbrechungen per Fahrstrecke aus den Messungen des Tz301 und den Schutzstreckendaten der Deutschen Bahn kombiniert. Für jede Strecke wurden jeweils drei Szenarien erstellt und zwar „Worst Case“, „Average Case“ sowie „Best Case“, die die Häufigkeiten der Ein- und Ausschaltvorgänge der motorisierten Kühlturbine darstellen. Untersucht wurden im ersten Schritt die vielbefahrenen längeren Strecken München bis Dortmund und Köln bis Basel, die in den Messungen des Testzuges enthalten sind. Hier wurde im Gegensatz zu den gemessenen Strecken angenommen, dass der Zug jeweils nur diese Strecken befährt. Weiters wurde eine virtuelle Streckenabfolge generiert, die die restlichen Strecken des ICE-Netzes befährt. Die Verteilung der Befahrung wurde mit der Häufigkeit der Befahrung sowie der Dauer der Strecken laut Deutscher Bahn berechnet. In weiterer Folge wurden spezifische Strecken untersucht, wie die virtuelle Businessline Erfurt bis Berlin mit mittlerer Bedienungsfrequenz und eher kurzer Fahrdauer, die Linie Berlin-Stralsund mit einer sehr geringen Befahrungsdichte und die Langstrecke München bis Hamburg mit hohem Befahrungstakt sowie vielen Schutzstrecken laut den Daten der Deutschen Bahn. Hier wurde angenommen, dass der Zug immer nur eine Strecke fährt. Die Anzahl der Strecken pro Tag wurden abgeglichen mit Fahrplandaten der Deutschen Bahn. Für Worst Case wurde jeweils die maximal mögliche Anzahl, für Average Case eine geringere und für Best Case eine noch geringere Anzahl festgelegt. Da bei der Streckenanalyse des Messzuges ersichtlich wurde, dass der Zug nicht wie maximal möglich ausgelastet ist, sondern oft zwischen Fahrten an Bahnhöfen einige Zeit abgestellt wird, wurde dieses Verhalten bestmöglich für den Average Case abgebildet. Abbildung 31 zeigt die Strecken des Messzuges sowie die untersuchten virtuellen Strecken.

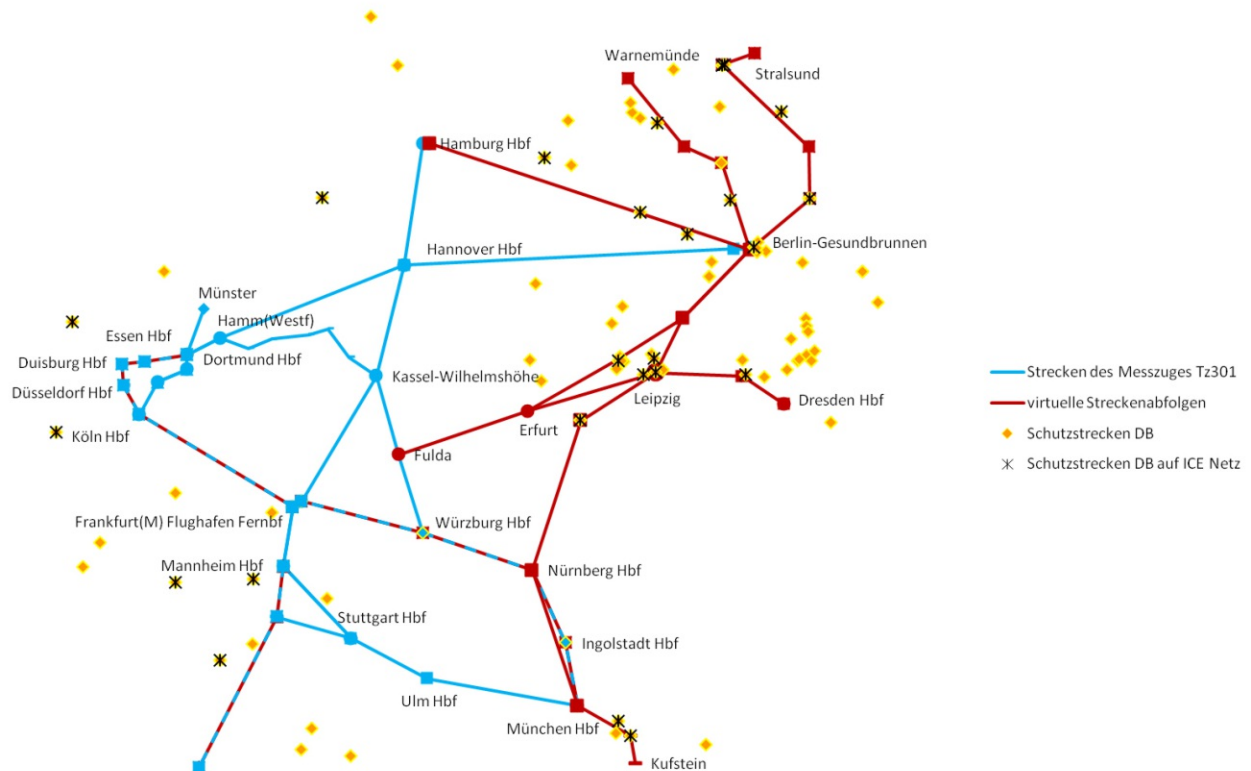


Abbildung 31: Streckennetz des Messzuges sowie der virtuellen Streckenabfolgen

5.3.1 BERECHNUNG DER AUSSCHALTHÄUFIGKEIT DER MKT DER VIRTUELLEN STRECKENABFOLGEN

Die regelungsbedingten Start/Stop-Zyklen wurden von den gemessenen Daten des Messzuges entnommen und reduziert auf die jeweilige Fahrzeit. Laut Messdaten fuhr der Triebzug 301 vom 01.05.2015 bis 30.05.2016, also in 396 Tagen, circa 3890 Stunden. Das ergibt eine Fahrzeit von etwa 9,8 Stunden pro Tag. Für die virtuellen Strecken wurde jeweils die ICE-Direktverbindungs-dauer laut Deutscher Bahn herangezogen und so für alle Szenarien die Fahrdauer pro Tag errechnet. Anteilig zur Fahrdauer des Testzuges wurden dann die gemessenen regelungsbedingten Start-Stop-Vorgänge prozentmäßig für alle Fahrten und Szenarien herangezogen. Beträgt die Fahrzeit pro Tag einer virtuellen Strecke 30 % mehr als die des Testzuges so wurden für die regelungsbedingten Stopps 130 % der Stopps aufgrund der Regelung aus den Messdaten für diese Strecke herangezogen. Aus der Streckenauswertung des Tz301 im Zeitraum Dezember 2015 bis Februar 2016 wurden die Spannungsunterbrechungen, also die Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge der Versorgungsspannung des Zuges zuerst von der Anzahl der gemessenen Schutzstrecken, die mit den der Deutschen Bahn übereinstimmen, reduziert und dann auf die Anzahl der Strecken gemittelt, um einen Richtwert für Spannungsunterbrechungen je Strecke zu

erhalten. Diese wurden dann jeweils auf die Anzahl der Strecken der virtuellen Streckenabfolgen mit dem Faktor 1,1 für Worst Case, 1 für Average Case und 0,9 für Best Case aufgerechnet. Aus der Start- und Stoppanalyse der Turbomaschine ergab sich eine Wahrscheinlichkeit von 30 % dafür, dass die Turbomaschine während einer Spannungsunterbrechung läuft und dadurch ein Ausschaltvorgang eingeleitet wird. Somit wurde für den Worst Case 40 % der Spannungsunterbrechungen mit den aufgerechneten Schutzstrecken aus den Daten der Deutschen Bahn für die Start- und Stoppvorgänge der Turbomaschine aufgrund von Versorgungsunterbrechungen gewählt, was ebenfalls einem Faktor von 1,1 entspricht und für den Best Case 20 %, was dem Faktor 0,9 entspricht. Diese Vorgehensweise ist in untenstehender Tabelle 3 noch einmal angeführt.

Tabelle 3: Vorgehensweise der Berechnung der MKT Stopps der virtuellen Streckenabfolgen

Wert	Bemerkung	Aufgerechneter Faktor für die jeweiligen Szenarien		
		A-Worst Case	B-Average Case	C-Best Case
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken pro Fahrt	Spannungsunterbrechungen aus der Analyse der Ausschalthäufigkeiten der MKT von Dez15-Feb16, Streckenanzahl aus Streckenauswertung von Dez15-Feb16, Schutzstrecken aus der Trennstellenanalyse von Dez15-Feb16	1	1	1
Anzahl der Strecken	aus Fahrplandaten der DB	Maximale Auslastung	mittlere Auslastung	Geringe Auslastung
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken	Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken pro Fahrt aufgerechnet auf die jeweilige Anzahl der Fahrten	1,1	1	0,9
Fahrzeit	Fahrdauer pro Strecke aus Fahrplandaten der DB aufgerechnet auf jeweilige Streckenanzahl	1	1	1
Schutzstrecken	aus Daten der DB	1	1	1
Regelungsbedingte Stopps	Entnommen aus Analyse der Ausschalthäufigkeiten der MKT von Juli15-Juni16 aufgerechnet auf jeweilige Fahrzeit	1	1	1
Spannungsbedingte Stopps	aus Analyse der Ausschalthäufigkeiten der MKT von Juli15-Juni16: relative Häufigkeit von MKT An bei Spannungsunterbrechung (ca. 30 %), diese Häufigkeit aufgerechnet auf jeweilige Anzahl der Spannungsunterbrechungen mit Schutzstrecken	1,1	1	0,9

5.3.2 MÜNCHEN-DORTMUND

Das Szenario, der Zug fährt nur die Strecke München bis Dortmund und retour, ist in diesem Profil abgebildet. Die eher längere mit einer Fahrdauer von ca. sechs Stunden und sehr viel befahrene Strecke weist keine Schutzstrecken auf. Die Ergebnisse der Start/Stopp-Zyklen mit Einbeziehung der verschiedenen Szenarien Worst Case, Average Case und Best Case sind in Tabelle 4 und Abbildung 32 dargestellt.

Tabelle 4: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge München-Dortmund, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case

München-Dortmund	A	B	C
pro Jahr			
Anzahl der Fahrten	1.460	913	365
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken	3.350	1.903	685
Schutzstrecken	-	-	-
MKT Stopps aufgrund Regelung	10.473	6.546	2.618
MKT Stopps aufgrund Spannungsunterbrechungen	1.340	571	137
Gesamte Stopps der MKT	11.813	7.117	2.755

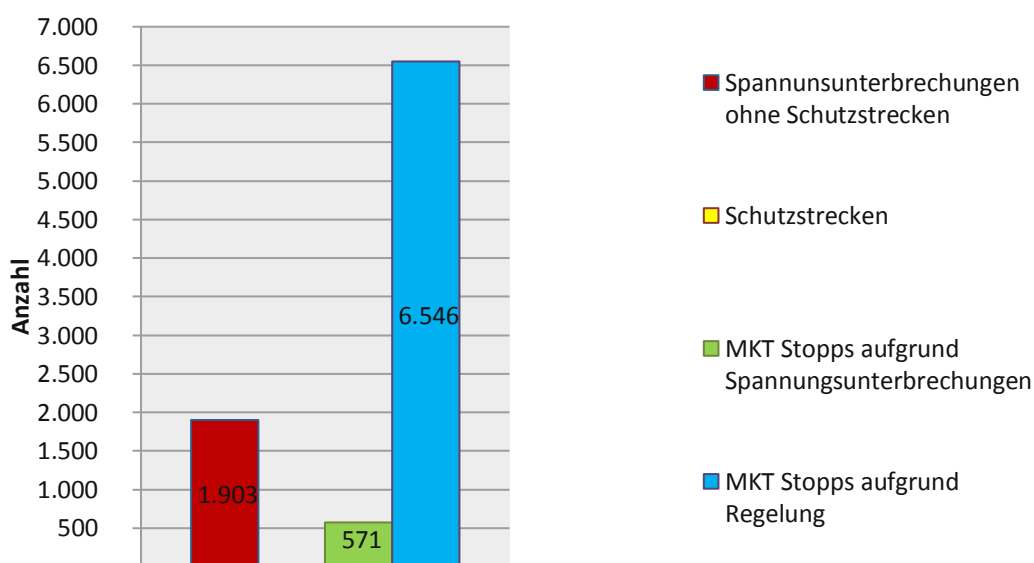


Abbildung 32: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge München-Dortmund

5.3.3 KÖLN-BASEL

Folgendes Streckenprofil deckt die Strecke zwischen Köln und Basel ab. Sie zeigt die Eigenschaften einer Strecke mit einer durchschnittlichen Befahrungsfrequenz, einer mittleren Dauer von etwa vier Stunden und einer Schutzstrecke. Tabelle 5 und Abbildung 33 zeigen die Ergebnisse der Start/Stopp-Zyklen die sich nach oben angeführter Vorgehensweise der Berechnung (siehe Kap.5.3.1) ergeben.

Tabelle 5: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Köln-Basel, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case

Köln-Basel	A	B	C
pro Jahr			
Anzahl der Fahrten	1.095	913	730
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken	2.512	1.903	1.370
Schutzstrecken	1.095	913	730
MKT Stopps aufgrund Regelung	5.207	4.339	3.471
MKT Stopps aufgrund Spannungsunterbrechungen	1.443	845	420
Gesamte Stopps der MKT	6.650	5.184	3.891

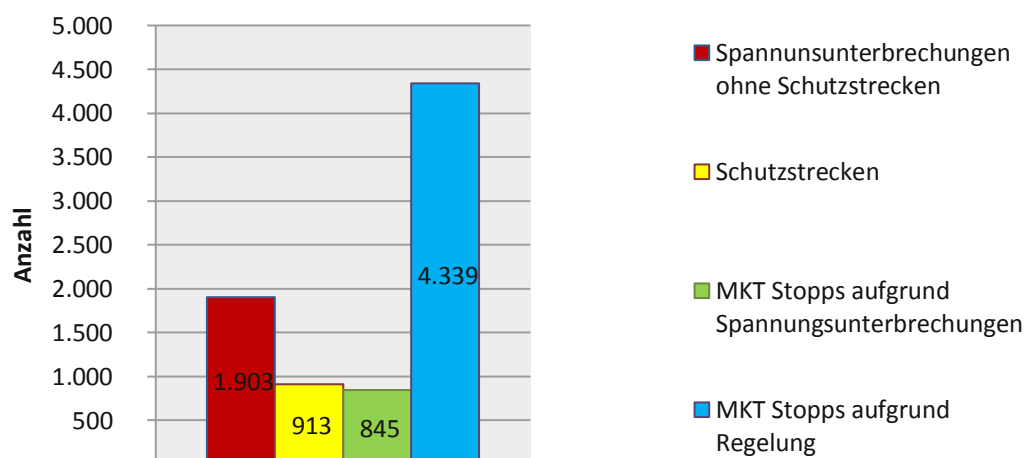


Abbildung 33: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Köln-Basel

5.3.4 VIRTUELLE STRECKENABFOLGE OSTEN

Die Verteilung der Strecken der virtuellen Streckenabfolge im Osten wurde mittels Fahrplandaten der Deutschen Bahn generiert. Mit der Frequentierung der einzelnen Strecken sowie der jeweiligen Fahrdauer wurde das in der folgenden Abbildung 34 dargestellte Fahrprofil erstellt.

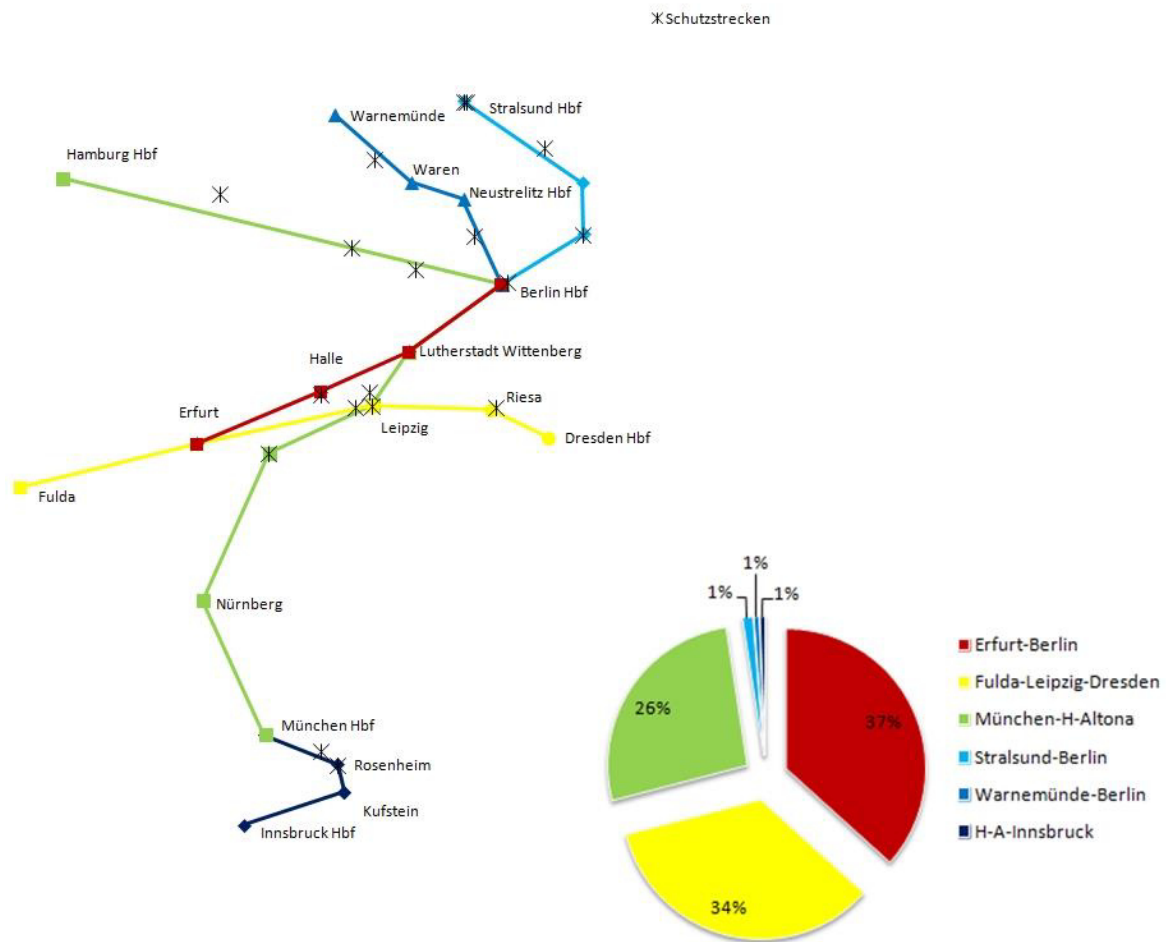


Abbildung 34: virtuelle Streckenabfolge Osten mit Streckenfrequentierung

Mit Einbeziehung der ermittelten Daten des Messzuges sowie Fahrdauer, Streckenanzahl und den Schutzstreckendaten der Deutschen Bahn wurde wie oben beschrieben (Kap. 5.3) die Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge der MKT über ein Jahr abgeschätzt. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse dieser Streckenabfolge und Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse in einem anschaulichen Balkendiagramm.

Tabelle 6: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Osten, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case

virtuelle Streckenabfolge Osten	A	B	C
pro Jahr			
Anzahl der Fahrten	1.456	1.168	877
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken	3.339	2.437	1.646
Schutzstrecken	4.447	3.281	2.074
MKT Stopps aufgrund Regelung	5.785	4.405	2.967
MKT Stopps aufgrund Spannungsunterbrechungen	3.114	1.715	744
Gesamte Stopps der MKT	8.899	6.120	3.711

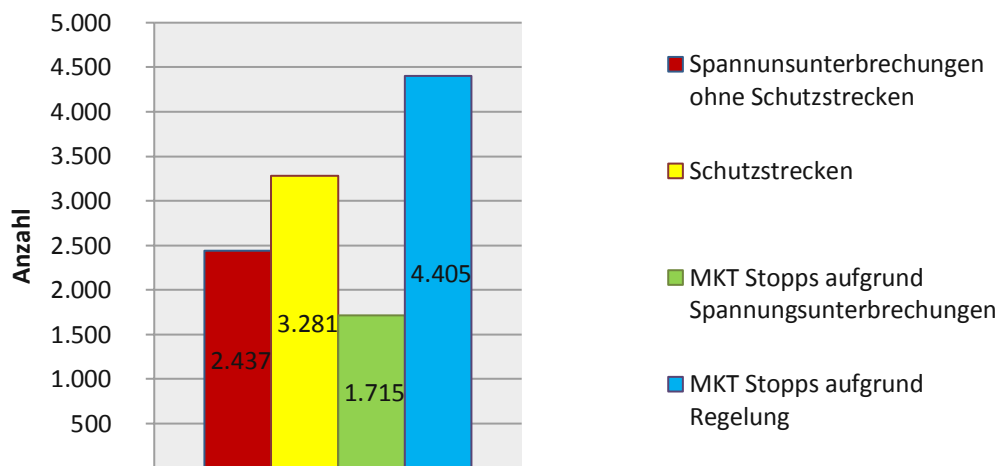


Abbildung 35: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Osten

5.3.5 MÜNCHEN-HAMBURG

Angenommen wird hier, dass der Zug nur eine Strecke fährt und zwar zwischen Hamburg und München. Die verschiedenen Szenarien Worst Case, Average Case und Best Case stellen eine Verteilung von Vollausslastung bis Teilausslastung des Zuges dar. Die Strecke München-Hamburg weist folgende Besonderheiten auf: sie ist in der Fahrdauer mit etwa sechs Stunden sehr lang, was eine geringe Anzahl an Fahrten ergibt und durchfährt viele Schutzstrecken, sieben pro Strecke. Tabelle 7 und Abbildung 36 zeigen die Ergebnisse der MKT-Stopps für dieses Streckenprofil.

Tabelle 7: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für die virtuelle Streckenabfolge München-Hamburg, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case

München-Hamburg	A	B	C
pro Jahr			
Anzahl der Fahrten	1.095	913	730
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken	2.512	1.903	1.370
Schutzstrecken	7.665	6.388	5.110
MKT Stopps aufgrund Regelung	8.191	6.826	5.461
MKT Stopps aufgrund Spannungsunterbrechungen	4.071	2.487	1.296
Gesamte Stopps der MKT	12.262	9.313	6.757

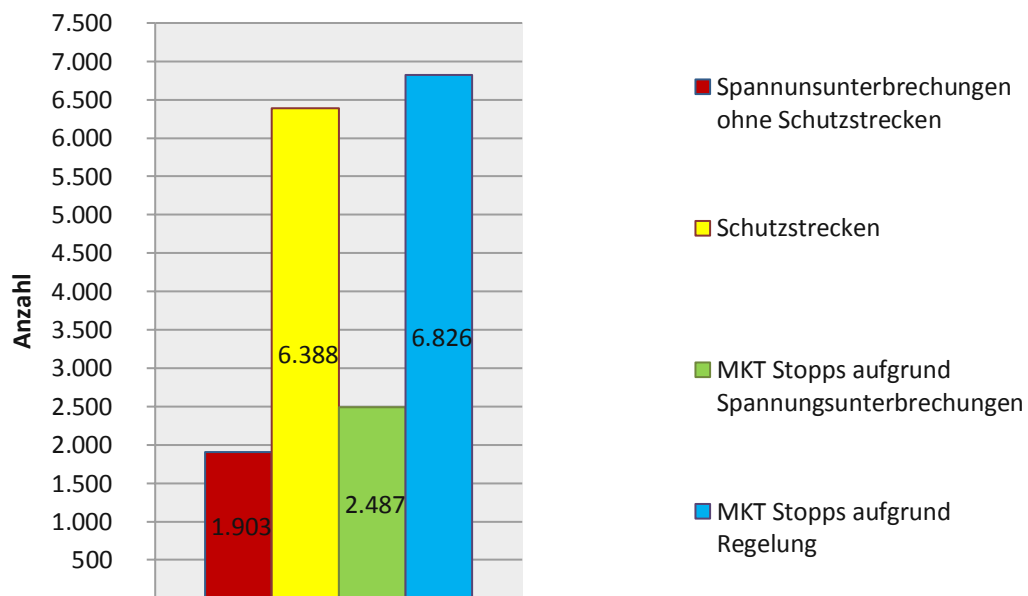


Abbildung 36: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge München-Hamburg

5.3.6 BERLIN-STRALSUND

Nun wurde eine sehr wenig befahrene Strecke untersucht, die Strecke Berlin nach Stralsund und retour. Da es laut Fahrplandaten der Deutschen Bahn nicht sehr viele Verbindungen pro Tag gibt, ist die Anzahl der Strecken gering. Die Fahrdauer einer Verbindung dauert etwa 3 Stunden und es werden 4 Schutzstrecken durchfahren. Die Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT würde nach obigem Berechnungsschema wie in Tabelle 8 und Abbildung 37 ersichtlich aussehen.

Tabelle 8: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Berlin-Stralsund, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case

Berlin-Stralsund	A	B	C
pro Jahr			
Anzahl der Fahrten	1.095	730	365
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken	2.512	1.523	685
Schutzstrecken	4.380	2.920	1.460
MKT Stopps aufgrund Regelung	3.703	2.469	1.234
MKT Stopps aufgrund Spannungsunterbrechungen	2.757	1.333	429
Gesamte Stopps der MKT	6.460	3.801	1.663

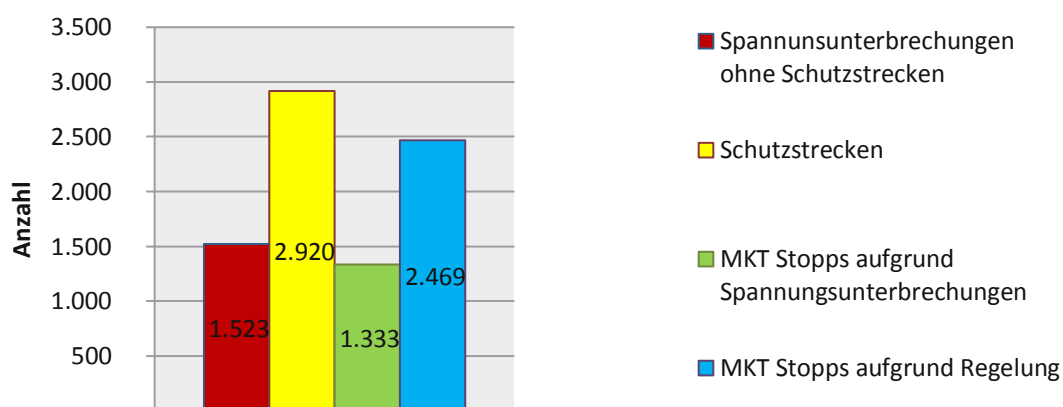


Abbildung 37: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Berlin-Stralsund

5.3.7 ERFURT-BERLIN

Auf der vielbefahrenen Business-Strecke Erfurt-Berlin mit einer kurzen Fahrdauer von etwa zwei Stunden treten zwei Schutzstrecken auf. Die Ergebnisse der Anzahl der MKT-Stopps sind der Tabelle 9 sowie der Abbildung 38 zu entnehmen.

Tabelle 9: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Erfurt-Berlin, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case

Erfurt-Berlin	A	B	C
pro Jahr			
Anzahl der Fahrten	2.555	1.825	1.095
Spannungsunterbrechungen ohne Schutzstrecken	5.862	3.806	2.055
Schutzstrecken	5.110	3.650	2.190
MKT Stopps aufgrund Regelung	6.808	4.863	2.918
MKT Stopps aufgrund Spannungsunterbrechungen	4.389	2.237	849
Gesamte Stopps der MKT	11.196	7.099	3.767

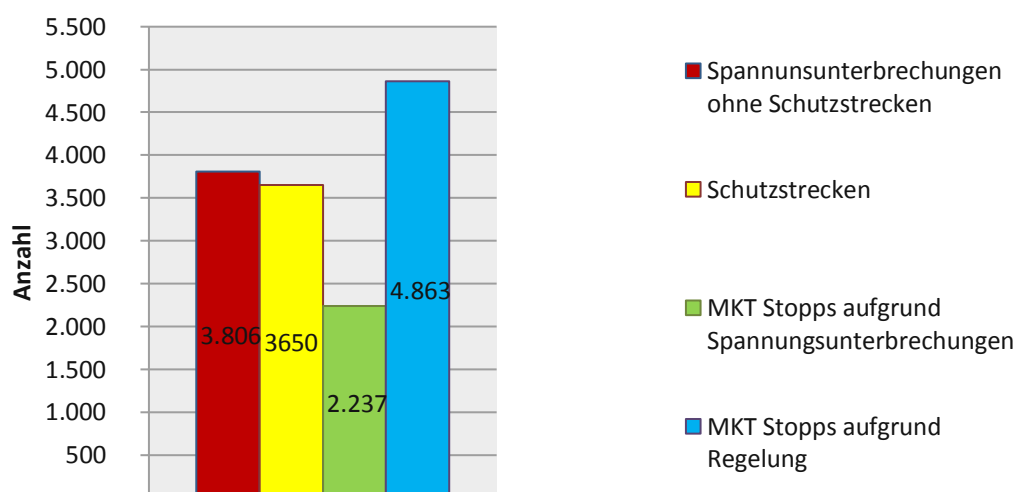


Abbildung 38: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Erfurt-Berlin

5.3.8 ZUSAMMENFASSUNG

Aus der Analyse der Ausschaltvorgänge auf virtuellen Streckenabfolgen ist der Einfluss der unterschiedlichen Strecken erkennbar. Man sieht, dass auf gewissen Strecken die Anzahl der Schutzstrecken sehr wohl ausschlaggebend ist. Abbildung 39 zeigt noch einmal die Ergebnisse zusammengefasst in einem Diagramm für alle Szenarien und eine Lebensdauer von 30 Jahren. Wie ersichtlich, würde die zulässige Anzahl von 100.000 Start/Stop-Zyklen nahezu bei allen Streckenabläufen sowie Szenarien erreicht. Ein Einsatz eines Luftlagers ohne zusätzliche Maßnahmen beziehungsweise ohne zusätzliche Belastungstests des Lagers selbst ist demnach nicht möglich.

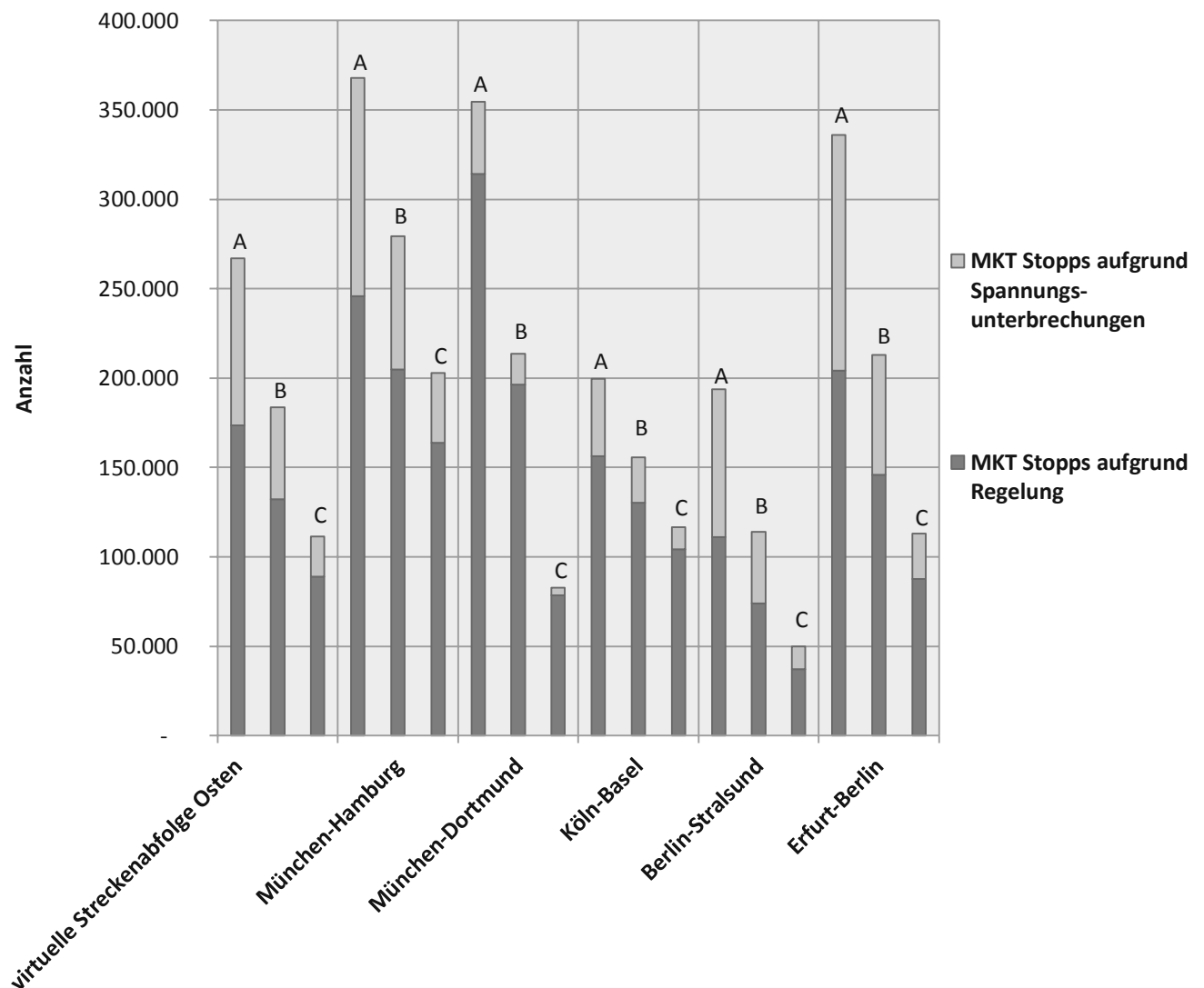


Abbildung 39: MKT Start Stopps der virtuellen Streckenabfolgen über 30 Jahre

6 VIBRATIONSANALYSE DER MOTORISIERTEN KÜHLTURBINE (MKT)

Zur Realisierung eines aerodynamischen Lagers in der motorisierten Kühlturbine des luftgestützten Klimageräts sind die einwirkenden Vibrationen und Stöße von Bedeutung. Da sich das Luftlager selbständig aufrechterhält, könnte der Luftpolster beispielsweise durch impulsartige Einwirkungen zusammenfallen. In der analysierten MKT ist jedoch ein Magnetlager verbaut, das durch die aktive Regelung Vibrationen kompensiert und immer einen ausreichenden Lagerspalt bereitstellt. Daher ist eine unmittelbare Aussage anhand der Ergebnisse der Vibrationsanalyse über den Verschleiß eines Luftlagers in der MKT nicht möglich. Vielmehr geht es darum, verschiedene Einflüsse und Merkmale zu analysieren, vor allem den Einfluss des Schienenfahrzeuges. In Flugzeugen, in denen luftgelagerte Kühlturbinen in Klimageräten seit Jahren erfolgreich verbaut sind, können sehr wohl Turbulenzen auftreten, die zu ruckartigen Bewegungen führen können. Die Schwingungserregung und das Auftreten von stoßartigen Impulsen nimmt man bei Schienenfahrzeugen als wesentlich gravierender an. Demnach sollten hohe Schwingungsausschläge und Einflüsse der magnetgelagerten MKT im Messzug analysiert und anhand verschiedener Merkmale klassifiziert werden. Diese Anregungen möchte man anschließend an diese Arbeit im Labor nachstellen, um die Belastbarkeit einer luftgelagerten Turbine zu ermitteln.

6.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In den meisten Fällen, so wie auch hier, sind Schwingungen unerwünscht. Sie senken die Lebensdauer und verursachen unerwünschten Lärm. Darum ist es wichtig und sogar unumgänglich, den Zusammenhang zwischen Erregungen und dem Schwingungsverhalten von Strukturen zu kennen, um so Schwingungen zu reduzieren oder gar zu vermeiden. Schwingungsmindernde Maßnahmen können bereits in der Entwurfsphase konstruktiv, sowie an der realisierten Struktur zum Beispiel mittels geeigneter Dämpfungsmechanismen realisiert werden.¹

6.1.1 URSACHEN FÜR SCHWINGUNGEN DER MKT

Ein Einfluss der Drehzahl der MKT auf Schwingungen ist zu erwarten. Ebenfalls zu erwarten ist der Einfluss der übrigen drehenden Komponenten in der Anlage, der Zuluftlüfter, die die

¹ Markert, 2013, S.2

Zuluft über den Wärmetauscher und die Hauptheizung in das Zuluftkanalsystem der jeweiligen Wagen fördern und des Kühlluftlüfters, der den Motor kühlt. In Abbildung 40 sind die Komponenten des luftgestützten Klimageräts und deren Lage dargestellt. Hervorgehoben sind hier an der Position 3 der Kühlluftlüfter und an der Position 4 die Zuluftlüfter. Die Zuluftlüfter haben einen Drehzahlbereich von etwa 0-5840 U/min, was etwa 0-97 Hz entspricht und der Kühlluftlüfter läuft mit einer Drehzahl von 3260 U/min, ungefähr 54 Hz.¹

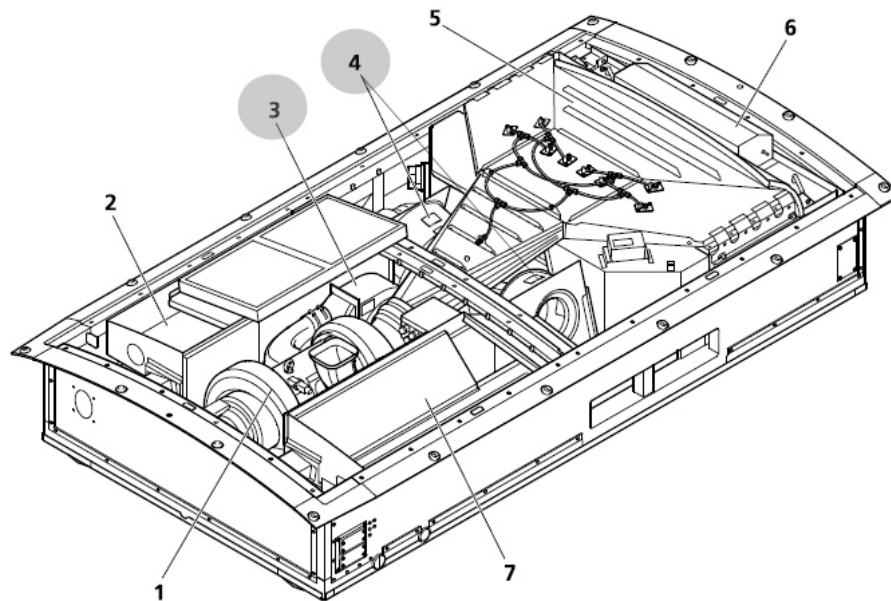


Abbildung 40: Komponenten der HVAC; 1-MKT, 2-Prozesslufterlasskasten, 3-Kühlluftlüfter, 4-Zuluftlüfter, 5-Prozessluftschacht darunter montiert: Wärmetauscher, 6-Hauptheizregister, 7-Prozessluftauslasskasten²

Außerdem sind hier vor allem Einflüsse des Schienenfahrzeugs zu erwarten. Unebenheiten der Fahrbahn beziehungsweise das Überfahren von Weichen werden zu Schwingungsausschlägen führen. Ebenso veränderliche Zuggeschwindigkeiten, wie Bremsen oder Anfahren werden als Einflüsse erwartet. Bei üblichen Schwingungsanalysen von Maschinen werden vor allem die Einflüsse von ungewichtigen und unrunder Rotoren, sowie ungleichförmige Antriebsmomente und -kräfte und Lagerschäden ermittelt. Da die hier durchgeführte Analyse keine übliche Zustandsüberwachung der Maschine darstellt, sondern man eher äußere Einwirkungen sowie die Auswirkung auf das Lager herausfinden möchte, geht man auf diese Einflüsse nicht näher ein. Außerdem übernimmt hier die Magnetlagerung ab einer gewissen Frequenz die Kompensation der Unwucht des Rotors, somit sollten unrunde Rotoren in der Analyse keine Rolle spielen.

¹ Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

² Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

Zusammenfassend werden als Ursachen von Schwingungen und unzulässigen Ausschlägen hier vor allem folgende vermutet:

- Ungleichförmige Drehzahl
- Ungleichförmige Zuggeschwindigkeiten (Anfahren, Bremsen, usw.)
- Drehzahlen der Zuluftlüfter und des Kühlluftlüfters
- Außergewöhnliche Störeinflüsse, die nur schwierig nachvollziehbar sind, wie starke Kurven, Wind, Unebenheiten der Gleise, Stöße aufgrund von Erregungen im Inneren des Fahrzeuges usw.
- Eigenfrequenzen (z.B. der MKT, des Rahmens, des Dämpferblockes, usw.)

6.1.1.1 EIGENFREQUENZ DES DÄMPFERBLOCKS

Die motorisierte Kühlturbine sitzt auf einem sogenannten Dämpferblock. Dieser soll die Schwingungen zwischen Maschine und Gehäuse dämpfen. Dazu sind vier einzelne Dämpferelemente an der MKT angebracht. Folgende Abbildung zeigt das Ersatzsystem mit einem reduzierten Isolierelement.

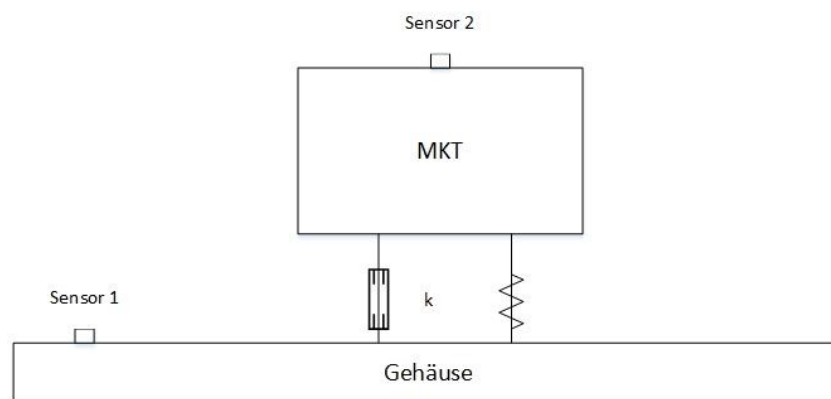


Abbildung 41: Ersatzsystem MKT; Dämpferblock und Gehäuse

Laut Hersteller hat ein Dämpfer folgende Eigenschaften:

Tabelle 10: Eigenschaften Dämpfer¹

Statische Nominalkraft [N]	400
Statische Einfederung [mm]	0,8

Die Masse der verbauten MKT beträgt 79 kg.

Die Eigenfrequenz lässt sich wie folgt berechnen²:

¹ Paulstra industry / Hutchinson

² Kuttner; 2015; S.32

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{dyn}}{m}} \quad (2)$$

Mit der Eigenfrequenz f_o , der dynamischen Federsteife C_{dyn} und der Masse m .

Berechnet man die dynamische Federsteife des Dämpfers, ergibt sich:

$$C_{dyn} = \frac{F_{stat}}{\Delta h} \quad (3)$$

Konkret sind das:

$$C_{dyn} = \frac{400}{0,8 * 10^{-3}} = 500 * 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (4)$$

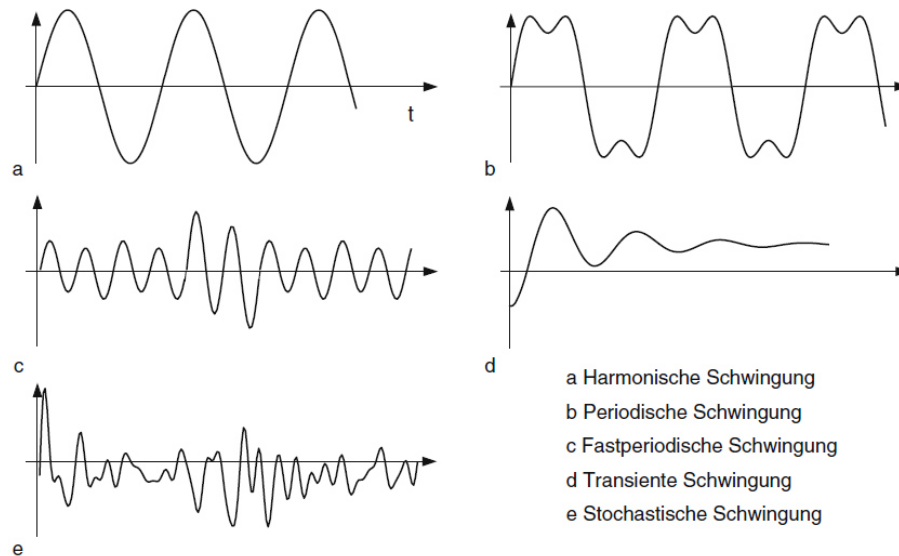
Mit der statischen Nominalkraft F_{stat} und der statischen Einfederung Δh .

Somit ergibt sich für die Eigenfrequenz des Dämpferblocks der MKT mit vier Dämpferelementen:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4 * (500 * 10^3)}{79}} \approx 25 \text{ Hz} \quad (5)$$

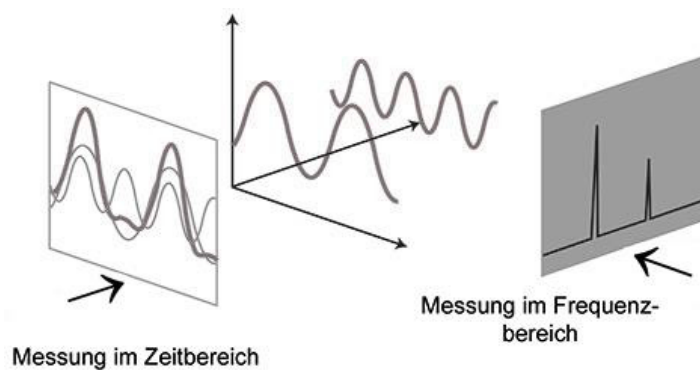
6.1.2 MASCHINENSCHWINGUNGEN

Schwingungen können je nach Merkmal der zeitlichen Veränderung als harmonisch, periodisch, fast periodisch, transient oder stochastisch bezeichnet werden, wie in Abbildung 42 ersichtlich. Harmonische und periodische Schwingungen sind vorhersehbar, die Schwingungen wiederholen sich regelmäßig. Überlagerungen von einzelnen harmonischen Schwingungen unterschiedlicher Frequenz mit nicht harmonischen Kreisfrequenzen ergeben eine fast periodische Funktion. Eine transiente Erregung wirkt kurzzeitig auf ein System ein und verschwindet dann. Als stochastische Schwingungen versteht man zeitlich nicht vorhersagbare Schwingungsphänomene.

Abbildung 42: Arten von Schwingungen¹

6.1.3 METHODEN ZUR SIGNALANALYSE

Schwingungen lassen sich auf zwei Arten beschreiben: als Funktion der Zeit und als Funktion der Frequenz. Im Falle von harmonischen und periodischen Schwingungen haben beide Darstellungen denselben Informationsgehalt. Die erste Beschreibung gibt eine direkte Antwort auf die Frage wann und die zweite wie oft gewisse Schwingungen auftreten.² Die nachfolgende Abbildung stellt eine Darstellung eines Signals im Zeitbereich dar, sowie die zugehörige im Frequenzbereich.

Abbildung 43: Darstellung eines Signals im Zeit- und Frequenzbereich³

¹ Freymann, 2011, S.4

² Kolerus, 2014, S.38

³ <http://www.datatec.de/Infos/Spektrumanalyse-EMV-Spektrum-Analysatoren.htm>

Für die Schwingungsanalyse werden üblicherweise der Schwingweg, die Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) oder die Schwingbeschleunigung gemessen. Die Messgrößen lassen sich durch Integration beziehungsweise Differentiation ineinander überführen, wie unten angeführt. Die Beschleunigungsmessung betont die Komponenten hoher Frequenzen, die Wegmessung die niedrigerer Frequenzen.¹ Hat man freie Wahl hinsichtlich des Messprinzips, ist es sinnvoll eine Methode zu wählen, die die erwarteten Frequenzen so gut wie möglich abbildet. In Abbildung 44 sind diese Unterschiede der Messmethoden dargestellt.

- Schwingweg oder Auslenkung $x(t)$
- Schwinggeschwindigkeit oder Schnelle $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$
- Schwingungsbeschleunigung $a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$

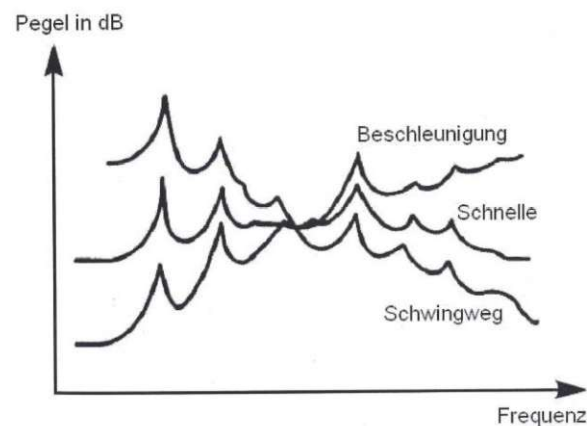


Abbildung 44: Vergleich des Schwingweges, der Schwinggeschwindigkeit und der Schwingbeschleunigung im Frequenzbereich²

Die Differentiation im Zeitbereich entspricht im Frequenzbereich einer Multiplikation der Fouriertransformierten mit $j\omega$, folglich bei einer 2-fachen Ableitung mit $-\omega^2$.³

$$\frac{d}{dt}f(t) \rightsquigarrow j\omega * F(\omega) \quad (6)$$

Die Integration ergibt sich aus der Umkehrung der Differentiation als eine Division durch $j\omega$ mit Konstantanteil. Bei der Berechnung des Schwingweges kommt es zu einer Division durch $-\omega^2$. Mathematisch gesehen findet durch die Integration also eine Umbewertung der Amplituden im Frequenzbereich statt. Durch Integration werden Amplituden hochfrequenter Signalanteile folglich geringer bewertet, Amplituden niederfrequenter

¹ Kolerus, 2014, S.70

² Kolerus, 2014, S.69

³ Rudolph; 2004; S.508

Signale werden angehoben. Bei sehr niederfrequenten Signalen kommt es zu einer Division nahe 0, dadurch ergeben sich hier sehr große Auslenkungen, die fehlerbehaftet sind.

6.1.3.1 ANALYSE IM ZEITBEREICH

Im Zeitbereich werden die Amplituden über der Zeit dargestellt. Möchte man Ausschläge eines gewissen Zeitpunktes ermitteln, ist die Analyse im Zeitbereich wohl geeignet. Über Systemeigenschaften lassen sich aber nur schwierig Aussagen treffen, da beispielsweise eine Zuteilung der Ausschläge auf verschiedene Komponenten einer Anlage nicht möglich ist. Es werden die Schwingungen kombiniert und je Zeiteinheit ausgelesen, somit kann eine Ursache nur in seltenen Fällen ausfindig gemacht werden. Ebenfalls ist nicht klar, ob Ausschläge von einer Überlagerung unterschiedlicher Ereignisse herrühren oder eine bestimmte Ursache haben, es sei denn, es sind die Zeitpunkte der Einflüsse bekannt.

Dargestellt werden üblicherweise der Spitzenwert oder der Effektivwert.

Der Effektivwert eines Messsignals wird auch als RMS-Wert (Root Mean Square) oder als quadratischer Mittelwert bezeichnet und berechnet sich wie folgt:

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t)^2 dt} \quad (7)$$

6.1.3.2 ANALYSE IM FREQUENZBEREICH

Beschreibt man das Signal als Kombination harmonischer Funktionen, spricht man von einer Beschreibung im Frequenzbereich. Die Schwingung wird hinsichtlich der Frequenz in Einzelkomponenten zerlegt. Die Zerlegung kann über analoge oder digitale Filter oder mittels Fourier-Transformation erfolgen.¹ Einflüsse von verschiedenen Maschinenkomponenten sind im Zeitbereich nur sehr schwierig zu identifizieren. Anders im Frequenzbereich, Drehfrequenzen, Zahneingriffsfrequenzen, Schaufelpassierfrequenzen etc. treten hier hervor und können so einfacher identifiziert werden², wie in Abbildung 45 ersichtlich. Dazu sind Kenntnisse über die Kinematik der Maschine von Bedeutung.

¹ Kolerus, 2014, S.37

² Kolerus, 2014, S.39

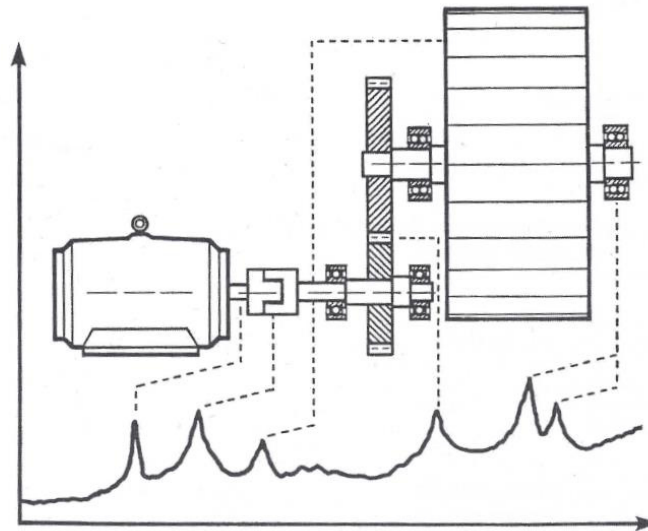


Abbildung 45: Identifikation von Schwingungsquellen mittels Frequenzanalyse¹

Filter können als Netzwerke verstanden werden, die nur Signale eines bestimmten Frequenzbereichs passieren lassen und alle anderen Anteile ausblenden. Bei der Fourieranalyse, benannt nach dem französischen Physiker und Mathematiker Jean Baptiste Fourier (1768-1830)², verwendet man als Aufbaufunktionen Sinus- und Cosinusfunktionen. Hier wird die Ausgangsfunktion als Überlagerung der Systemreaktionen auf die gewichtete Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen der Eingangsfunktion ausgedrückt.

6.1.3.2.1 DIE FOURIER-REIHE

Periodische Funktionen können durch eine Überlagerung von Sinus- und Cosinusfunktionen wie folgt dargestellt werden³:

$$\begin{aligned}
 x(t) = & \frac{A_0}{2} + (A_1 \cos \omega^* t + B_1 \sin \omega^* t) \\
 & + (A_2 \cos 2\omega^* t + B_2 \sin 2\omega^* t) \\
 & + \dots + (A_m \cos m\omega^* t + B_m \sin m\omega^* t) + \dots
 \end{aligned} \tag{8}$$

oder in Kurzschreibweise:

¹ Kolerus, 2014, S.142

² Weber; 2012; S.1

³ Freymann; 2011; S.10ff

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} (A_m \cos m\omega^* t + B_m \sin m\omega^* t) \quad (9)$$

Die periodische Schwingung hat die Periodendauer T . Die jeweiligen Teilschwingungen weisen eine Kreisfrequenz auf, die ein ganzes Vielfaches der Grundkreisfrequenz $\omega^* = \frac{2\pi}{T}$ ist.

Die Koeffizienten $A_0, A_1, B_1, A_2, B_2, \dots$ nennt man Fourierkoeffizienten, $\frac{A_0}{2}$ stellt den arithmetischen Mittelwert dar, den Gleichanteil.

Die Fourierkoeffizienten werden wie folgt aus der Funktion $x(t)$ bestimmt:

$$A_0 = \frac{2}{T^*} \int_0^{T^*} x(t) dt \quad (10)$$

$$A_m = \frac{2}{T^*} \int_0^{T^*} x(t) \cos m\omega^* t dt \quad (11)$$

$$B_m = \frac{2}{T^*} \int_0^{T^*} x(t) \sin m\omega^* t dt \quad (12)$$

Der Fourierreihenansatz kann mithilfe der Additionstheoreme wie folgt umgeformt werden:

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} c_m \cos(m\omega^* t + \varphi_m) \quad (13)$$

mit

$$c_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2} \quad (14)$$

und

$$\tan \varphi_m = -\frac{B_m}{A_m} \quad (15)$$

Die komplexe Schreibweise erhält man unter Verwendung der Eulerschen Formel¹:

$$e^{jm\omega^* t} = \cos m\omega^* t + j \sin m\omega^* t \quad (16)$$

Und den auf ihr beruhenden Beziehungen:

¹ Hoffmann; 2014; S.105

$$\cos m\omega^*t = \frac{1}{2}(e^{jm\omega^*t} + e^{-jm\omega^*t}) \quad (17)$$

$$\sin m\omega^*t = \frac{1}{2j}(e^{jm\omega^*t} - e^{-jm\omega^*t}) \quad (18)$$

Wendet man diese auf die Fourier-Reihendarstellung (13) an, ergibt sich:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{c_m}{2} (e^{j(m\omega^*t + \varphi_m)} + e^{-j(m\omega^*t + \varphi_m)}) \\ &= \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{c_m}{2} * e^{j\varphi_m} * e^{jm\omega^*t} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{c_m}{2} * e^{-j\varphi_m} * e^{-jm\omega^*t} \end{aligned} \quad (19)$$

mit

$$\underline{X}_0 = \frac{A_0}{2}; \quad \underline{X}_m = \frac{c_m}{2} * e^{j\varphi_m}; \quad \underline{X}_{-m} = \frac{c_m}{2} * e^{-j\varphi_m} \quad (m > 0) \quad (20)$$

erhält man die zusammengefasste komplexe Darstellung:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \underline{X}_m e^{jm\omega^*t} \quad (21)$$

6.1.3.2.2 DIE FOURIER-TRANSFORMATION

Nicht periodische Zeitfunktionen haben keine endliche Periodendauer T und sind somit nicht durch die Fourier-Reihe zu beschreiben. Um solche Funktionen mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich zu übermitteln, nutzt man die Hilfsvorstellung einer unendlich langen Periodendauer. Somit strebt die Zahl der harmonischen Teilschwingungen gegen unendlich und der Abstand zwischen zwei wird zu $d\omega$. Die Summation wird wie folgt durch eine Integration ersetzt.¹

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (22)$$

Die sogenannte kontinuierliche komplexe Spektralfunktion $X(j\omega)$ berechnet sich mit dem Fourier-Integral:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (23)$$

¹ Kuttner; 2015; S.27ff

Die Division durch 2π kommt von der Integration über $d\omega = 2\pi df$ ¹

6.1.3.2.3 DIRSKRETE FOURIER TRANSFORMATION (DFT)

In der Praxis liegen die Zeitfunktionen nach der Abtastung in zeitdiskreter Form vor, also in Form von Abtastwerten. Da die Fourier-Transformation in der oben angeführten Form nur für kontinuierliche Zeitsignale angewendet werden kann, kommt hier die Diskrete Fourier-Transformation (DFT) beziehungsweise die Fast Fourier-Transformation (FFT) zum Einsatz.² Theoretisch müsste bei der Fourier-Transformation ein unendlicher Zeitraum, beziehungsweise Frequenzbereich betrachtet werden. Aus praktischen Gründen verwendet man für die DFT beziehungsweise FFT nur eine bestimmte Zeitperiode, um Messungen durchzuführen.

Es liegt also das Messsignal im Zeitbereich in Form eines abgetasteten Signales an diskreten Stützstellen vor. Der Zeitausschnitt dieses Messsignals hat die Länge T mit N Abtastwerten und einem Abtastintervall Δt .

Die Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich lautet wie folgt:

$$\underline{X}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (24)$$

Der Zählindex n in der Frequenzdarstellung läuft wie der Index k von 0 bis $N - 1$. Nach der Transformation liegen N diskrete Frequenzwerte (Linien) mit den komplexen Werten $\underline{X}(n)$ vor. Der Abstand zwischen zwei Linien, die Frequenzauflösung, beträgt $\Delta f = \frac{1}{T}$. Zwischen den Linien enthält das Spektrum keine Informationen, es wird aber in der Darstellung häufig interpoliert und zwischen den Stützstellen eine Linie angezeigt.³ Die Berechnung erfordert N^2 komplexe Operationen, also einen erheblichen Rechenaufwand, der selbst für moderne Prozessoren lange Rechenzeit bedeutet.

6.1.3.2.4 FAST FOURIER-TRANSFORMATION (FFT)

Für die digitale Frequenzanalyse hat sich die schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier-Transformation, FFT) durchgesetzt. Sie arbeitet mit besonders effizienten Algorithmen, die 1965 von Cooley und Tuckey entwickelt wurden.⁴ Bei gleichem Ergebnis kann die Anzahl der Rechenoperationen auf etwa $N \log_2 N$ reduziert werden und zwar durch die Nutzung einer

¹ Kuttner; 2015; S.28

² Kuttner; 2015; S.23

³ Kuttner; 2015; S.288

⁴ Cooley; 1965

Linienzahl von 2^N und das Zurückgreifen auf berechnete Zwischenergebnisse.^{1,2} Im Normalfall ist der FFT-Algorithmus in einer Softwarelösung implementiert, für die eine Reihe von Einstellungen und Parameter ausgewählt werden müssen. Die richtigen Einstellungen hängen vom Messproblem ab und sind für ein aussagekräftiges Frequenzspektrum von großer Bedeutung.³

6.1.3.2.5 FFT-PARAMETER

Wichtige Parameter sind der Frequenzlinienabstand und die zeitliche Auflösung. Dabei ist zu beachten, dass bei einer hohen Frequenzauflösung die Zeitauflösung leidet und umgekehrt.⁴ Die Parameter der FFT hängen durch die blockweise Transformation voneinander ab. Im Zeitbereich ergibt sich die Blocklänge T , mit den Abtastwerten N und dem Abtastintervall Δt zu⁵:

$$T = N * \Delta t \quad (25)$$

Die Abtastfrequenz f_s ergibt sich mit wiederum N Linien und dem Linienabstand Δf zu:

$$f_s = N * \Delta f \quad (26)$$

Das Shannonsche Abtasttheorem besagt, dass die Hörsfrequenz im Spektrum kleiner sein muss als die halbe Abtastfrequenz, auch Nyquistfrequenz genannt, um keine Informationen zu verlieren⁶. Bei gegebener Abtastfrequenz f_s dürfen also im Spektrum nur Frequenzen f im Bereich von $0 \leq f < \frac{f_s}{2}$ enthalten sein. Anderenfalls wird durch unzureichende Abtastung eine andere Frequenz im Frequenzspektrum vorgetäuscht. Diesen Effekt nennt man Aliasing.

$$f_{max} < \frac{f_s}{2} = \frac{N}{2} * \Delta f \quad (27)$$

Laut Grundgesetz der Nachrichtentechnik sind die Zeitdauer eines Signals und die Bandbreite des Spektrums zueinander umgekehrt proportional.⁷

$$T = \frac{1}{\Delta f} \quad (28)$$

¹ Kuttner; 2015; S.288

² Hoffmann; 2014; S.129f

³ Kuttner; 2015; S.288

⁴ Zeller; 2009; S.325ff

⁵ Kuttner; 2015; S.290

⁶ Hoffmann; 2014; S.53

⁷ Kuttner; 2015; S.290

Ein schmaler Impuls besitzt also ein breites Spektrum und umgekehrt. Die rechteckige Beschneidung des Spektrums führt immer zu einem zeitunbegrenzten Signal, da ein bandbegrenzttes Spektrum immer zu einer zeitunbegrenzten Funktion gehört. Ein zeitbegrenzttes Signal führt immer zu einem frequenzunbegrenztem Spektrum. Ein zeitbegrenzttes Signal, das zugleich frequenzbandbegrenzt ist, gibt es also nicht.

Oft werden die Linienzahl N und die Höchsthfrequenz f_{max} gewählt, um daraus die Frequenzauflösung f und die Blocklänge T zu berechnen. In Abbildung 46 sind noch einmal die Zusammenhänge der Parameter der FFT dargestellt.

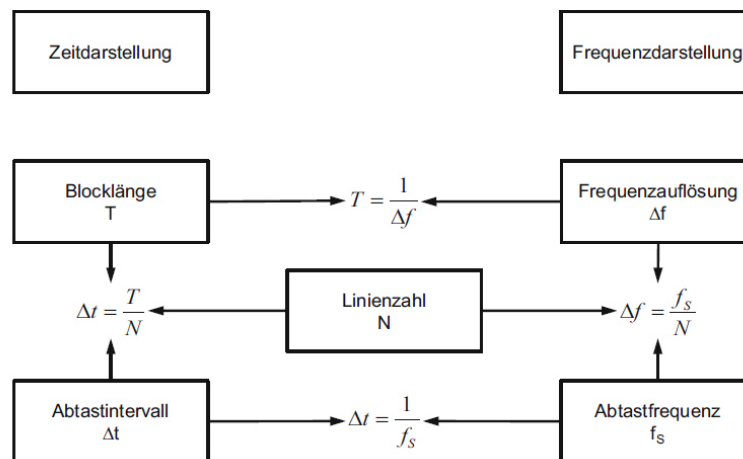


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen FFT-Parameter¹

Bei vielen FFT-Analysatoren wird nur ein Teil der Linien dargestellt. In diesem Fall wird in den oben angeführten Gleichungen die Abtastfrequenz f_s durch die Höchsthfrequenz f_{max} ersetzt.

6.1.3.2.6 LEAKAGE-EFFEKT

Die Forderung der DFT nach der periodischen Fortsetzung eines Signals im Zeitbereich bedeutet, dass ein betrachteter Zeitausschnitt eines Signals mit der Länge T periodisch an beiden Intervallgrenzen des Zeitfensters fortgesetzt werden kann. In der Praxis kommt es aber vor, dass das Originalsignal an den Intervallgrenzen nicht periodisch fortgesetzt wird. In diesem Fall kann es zum sogenannten Leakage-Effekt kommen, es können Sprünge und Knicke an den Blockgrenzen auftreten (siehe Abbildung 47).

¹ Kuttner; 2015; S.291

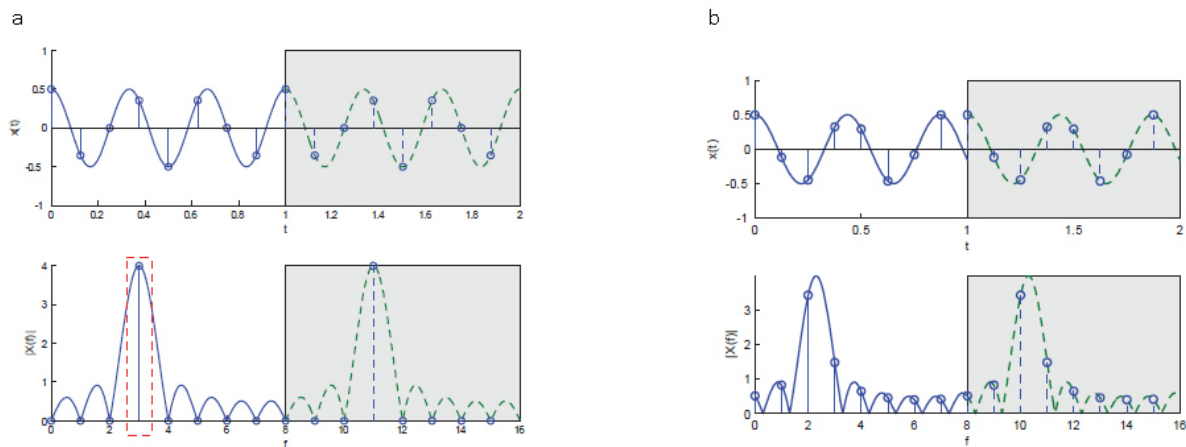


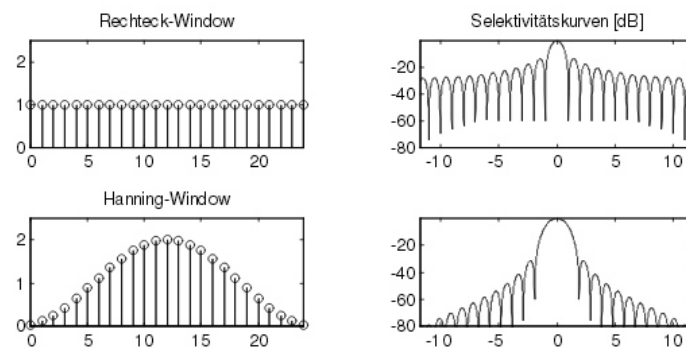
Abbildung 47: DFT eines periodischen Signals mit $T=1$, $f_s=8$, $N=8$ oben jeweils im Zeitbereich, unten im Frequenzbereich
a- mit der Frequenz 3Hz, es liegen genau drei Perioden im Zeitfenster – kein Leakage-Effekt; **b-** mit der der Frequenz 2,3Hz, die Perioden liegen nicht genau im Zeitfenster – Leakage-Effekt¹

Um diese Unstetigkeiten zu vermeiden, bedient man sich sogenannter Fensterfunktionen. Durch sie kann eine Periodizität im Zeitbereich erzeugt werden, indem das Signal an den Rändern des Zeitfensters abgeblendet wird (siehe Abbildung 49). Das Anwenden einer Fensterfunktion kann man sich als Multiplikation des Signals im Zeitbereich mit einer solchen Fensterfunktion vorstellen. Das Aufteilen in Blöcke kann ebenso als Anwenden von Fensterfunktionen angesehen werden. In dem Fall ist es eine Rechteckfunktion und das Signal wird mit dem Wert 1 multipliziert. Wichtige Fensterfunktionen zur Verringerung der Unstetigkeiten sind²:

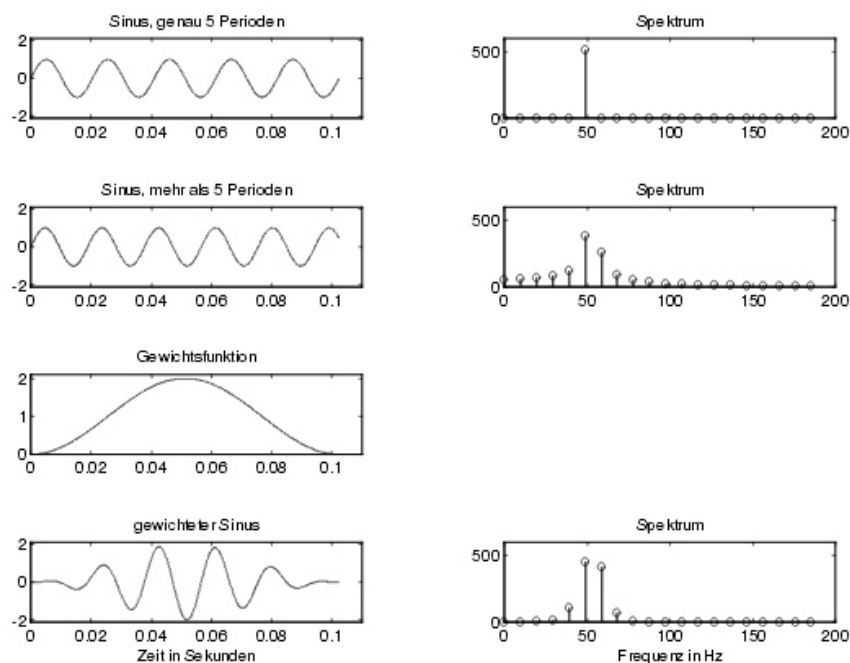
- Das Hanning-Fenster – geeignet für genaue Frequenzbestimmung, sehr häufig angewendet (siehe Abbildung 48)
- Flat-Top-Fenster – geeignet für genaue Amplitudenbestimmung
- Exponential- und Rechteckfenster (siehe Abbildung 48)

¹ <https://ti.tuwien.ac.at/cps/teaching/courses/dspv/Datensätze/DFT-FFT.pdf>

² Schirmer; 2006; S.92

Abbildung 48: FFT-Fenster im Zeitbereich und Frequenzbereich¹

Da man mit der Anwendung von Fensterfunktionen das Signal an den Rändern ausblendet, ist bei der Auswahl der Fensterfunktion stets auf den Kompromiss zwischen Dynamik, Bandbreite und Pegelfehler zu achten.

Abbildung 49: Leakage Effekt und seine Verminderung durch Anwenden einer Fensterfunktion, links: Zeitbereich, rechts: Frequenzbereich²

Durch das Anwenden von Fensterfunktionen wird in jedem Block das Zeitsignal an den Blockgrenzen abblendet, was zur Ausblendung von Signalteilen führt, die nicht berücksichtigt werden. Um dies zu verhindern, beginnt man mit dem jeweiligen Fenster schon vor Ende des vorangegangenen. Diese Überlappung wird in % angegeben. Es hat sich eine übliche

¹ Meyer; 2014; S.189² Meyer; 2014; S.189

Überlappung von 66,7 % ergeben, da eine höhere im Normalfall keine Verbesserung mehr zur Folge hat. Eine Überlappung von 66,7 % bedeutet, dass sich die Fenster zu 66,7 % überschneiden und nach 33,3 % der abgelaufenen Zeit das nächste Fenster beginnt.¹

6.1.3.2.7 MITTELUNG

Aus rein periodischen Signalen kann das Linienspektrum durch DFT im mathematischen Sinne exakt ermittelt werden, sofern die Abtastbedingung von $f_{max} < \frac{f_s}{2}$ erfüllt ist. In der Messpraxis kommen rein periodische Signale aber selten vor, meistens sind sie mit einem Rauschen überlagert beziehungsweise liegen in vielen Fällen stochastische Signale vor. Wird aus einem stochastischen Signal nun eine Blocklänge T herausgegriffen und mittels DFT analysiert, so liefert dies zunächst eine Schätzung für das Spektrum des Signals. Mehr Messwerte, zum Beispiel bei einer Erhöhung der Blocklänge T , führen nicht automatisch zu einer besseren Schätzung. Dies führt auch zu mehr Spektrallinien N , einer Verringerung des Linienabstandes Δf und somit zur Erhöhung der Frequenzauflösung. Die Schätzung wird aber besser, wird über mehrere Blöcke T gemittelt. Für die Mittelung gibt es mehrere Möglichkeiten.

- Lineare Mittelung – jedes Spektrum wird gleich gewichtet
- Exponentielle Mittelung – die jüngsten Spektren werden am stärksten gewichtet
- Spitzenwert-Mittelung – Mittelung über den Spektren mit den höchsten Amplituden
- Zeitbereichsmittelung – Ausmitteln von positiven und negativen Amplituden

Die Auswahl der Mittelung sowie die Mittelungszeit hängen vom Messproblem ab. Um eine aussagekräftige Mittelung zu bekommen, ist die Mittelungszeit jeweils von der Frequenzauflösung abhängig zu wählen. Die notwendige Mittelungszeit steigt bei höherer Frequenzauflösung.²

6.1.3.3 ZEIT-FREQUENZ-ANALYSE

Die Analyse im Frequenzbereich hat den Nachteil, dass keine Information über den Zeitpunkt eines bestimmten Ereignisses enthalten ist. Diese geht bei der Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich verloren. Bei stationären Signalen ist die Zeit auch nicht von Bedeutung, ist das Signal jedoch instationär, wie in den meisten Fällen, ist eine Aussage über den Zeitpunkt sehr wohl ausschlaggebend. Darum bedient man sich Zeit-Frequenz-Analysen, womit Spektrogramme erzeugt werden, die die Amplituden sowohl über der Frequenz als auch über der Zeit darstellen.

¹ Kuttner; 2015; S.310

² Kuttner; 2015; S.305ff

6.1.4 SCHWINGUNGS-AUFNEHMER

In den meisten Fällen werden zur Schwingungsanalyse Beschleunigungsaufnehmer mit piezoelektrischem Prinzip eingesetzt. Da auch für die vorhergesehene Messung in der luftgestützten Klimagerät piezoelektrische Beschleunigungssensoren verwendet wurden, wird hier nur auf diese eingegangen.

6.1.4.1 PIEZOELEKTRISCHE BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer sind zur Maschinenüberwachungen aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften am besten geeignet.

Für die Messung werden piezoelektrische Materialien genutzt, die unter Einfluss von mechanischer Belastung elektrische Oberflächenladungen ausbilden, die der Kraft proportional sind. Diese Ladung wird über Elektroden abgegriffen. Man erhält am Ausgang eine elektrische Spannung, die ebenfalls proportional zur Kraft ist. Der Effekt tritt sowohl bei Kompression als auch bei Scherung auf.¹

Nachfolgend sind besondere Eigenschaften piezoelektrischer Beschleunigungssensoren angeführt²:

- Aktives Aufnehmerprinzip
- Keine bewegten Teile, also verschleißfrei
- Kleine Bauweise
- Robustheit
- Leichte Montierbarkeit
- Sehr großer Dynamikbereich
- Großer Frequenzbereich
- Langzeitstabilität

6.1.4.1.1 KOMPRESSIONSTYP

Bei einer Bewegung des Gehäuses in Achsrichtung wird die seismische Masse, die über ein Spannelement gegen eine piezoelektrisch reagierende Scheibe gepresst wird, beschleunigt und erfährt eine Trägheitskraft, die den Anpressdruck ändert. Dadurch entsteht eine elektrische Ladungsverschiebung, die über einen Ladungsverstärker in eine Spannung

¹ Kolerus; 2014; S.73

² Kolerus; 2014; S.73

umgewandelt wird, die der Beschleunigung proportional ist.¹ Dieser Typ wird vor allem für Schockmessungen verwendet, wo sehr hohe Beschleunigungsamplituden erwartet werden.²

6.1.4.1.2 SCHERUNGS-AUFNEHMER

Diese Art von Aufnehmer kann in sehr kleinen Baugrößen hergestellt werden und so auch an leichten Strukturen oder in engen Platzverhältnissen angewendet werden. Für Signal- und Systemanalysen, so wie auch in dieser Arbeit, ist dieser Typ am gebräuchlichsten. Er weist eine sehr geringe Empfindlichkeit auf Störgrößen aus der Umgebung auf. Im Falle des Delta Shear® sind drei piezoelektrische Elemente symmetrisch um die Achse der Basis angeordnet (siehe Abbildung 50). Eine mechanische Schwingung in Richtung der Achse, die zur Signalgewinnung verwendet wird, ruft eine Scherspannung am Piezoelement hervor. Durch einen triaxialen Beschleunigungsaufnehmer, bei dem im Wesentlichen drei Sensoren kombiniert werden, können die Schwingungen in die drei Koordinatenachsen bewertet werden.

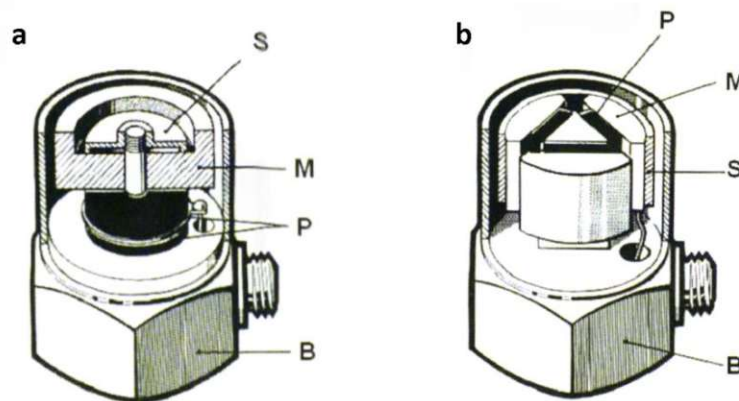


Abbildung 50: Beschleunigungsaufnehmer a-Kompressionstyp, b-Delta Shear®; B-Basis, P-piezoelektrisches Element, M-seismische Masse, S-Spannelement

Bei externen Ladungsverstärkern sind lange Verbindungskabel problematisch, da sie Ladungsverluste verursachen und damit die Empfindlichkeit beeinträchtigt wird. Zusätzlich können schwingende Leitungen selbst Ladungen induzieren, was ebenfalls zur Verfälschung des Messsignals führt. Aus diesem Grund müssen verlustarme Spezialkabel eingesetzt werden. Mit Sensoren mit integriertem Ladungsverstärker (IEPE, Integrated Electronic Piezo Electric) wird dieses Problem umgangen. Mit Ihnen können große Entfernungen zum Messgerät realisiert und einfache Verbindungskabel verwendet werden. Sie haben aufgrund der integrierten Elektronik einen kleineren Temperatureinsatzbereich und eine eingeschränkte Dynamik. Außerdem benötigen sie zur Versorgung des Verstärkers einen

¹ Gasch; 2006; S.266

² Kolerus; 2014; S.75

Konstantstrom von mindestens 4mA.¹ Für die Vibrationsanalyse in der Klimagerät wurde ein IEPE-Sensor eingesetzt.

6.2 ANALYSE DER VIBRATIONEN DER MKT

Für eine Beurteilung der übertragenen Schwingungen auf die motorisierte Kühlturbine und später auf das aerodynamische Luftlager, wurde eine Vibrationsanalyse durchgeführt. Gemessen wurden die Vibrationen im Klimagerät des bereits angesprochenen Messzuges im Trafowagen des 1. Halbzuges (Wagen 403-1 / TW2).

6.2.1 AUFNAHME

Zur Vibrationsanalyse wurden zwei Piezo-Beschleunigungsaufnehmer mit integriertem Ladungsverstärker mit jeweils drei Achssensoren im Klimagerät installiert. Einer wurde am Gehäuse des Geräts, der zweite direkt auf der motorisierten Kühlturbine angebracht, wie in Abbildung 52 ersichtlich. Die X-Richtung der Sensoren zeigt in Fahrtrichtung des Zuges, die Y-Richtung ist horizontal und normal zur Zugfahrtrichtung und die Z-Richtung ist die Vertikale (siehe Abbildung 51).

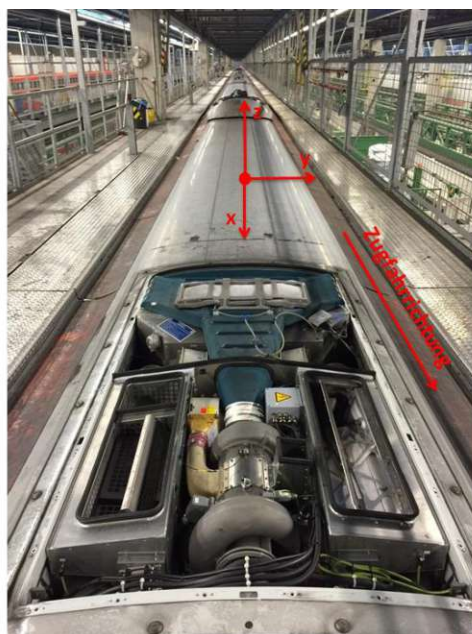


Abbildung 51: eingebautes Klimagerät mit offenem Deckel, Richtungen der Sensoren²

¹ Zeller; 2009; S.320

² Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

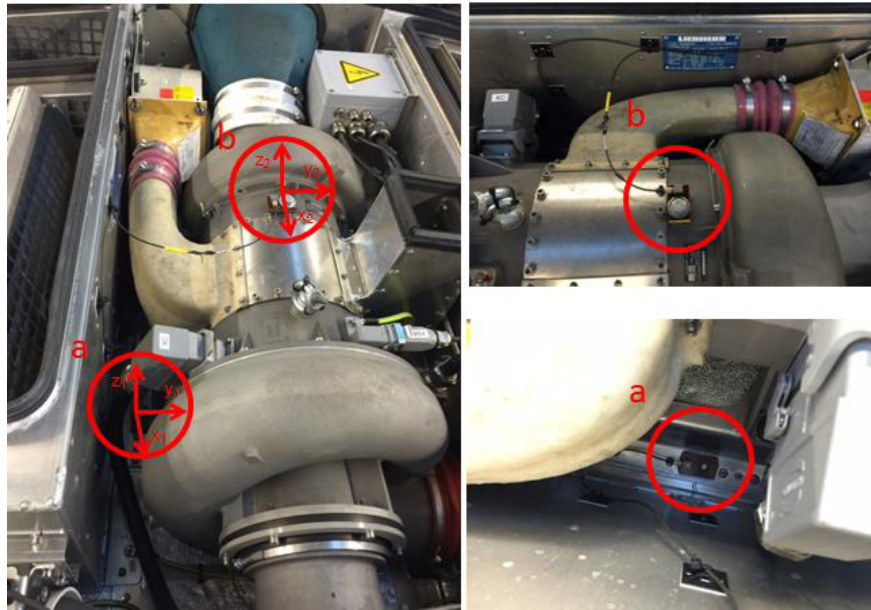


Abbildung 52: Position der Sensoren, a-am Gehäuse, b-an der MKT¹

Für die Vibrationsaufnahme wurde eine Abtastrate von 32.768 Hz festgelegt. Im Rekorder-Setup wurde ein Hochpassfilter von 0,7 Hz festgelegt, um Rauschen zu minimieren.

6.2.2 DATENFLUSS

Die sechs Signale der Achssensoren (2 x 3 Kabel) werden von einem 6-Kanal-Messverstärker mit Rekorder (Brüel & Kjær LAN-XI 51.2 kHz Type 3050) erfasst und in diesem auf einer lokalen SD-Karte aufgezeichnet. Über einen Ethernet Switch gelangen sie zu einem lokalen Rechner (Raspberry Pi), welcher eine Voranalyse, wie sie im nachfolgenden Kapitel 6.2.3 beschrieben wird, vornimmt. Auf diesem Rechner kann man über ein UMTS-Modem per Fernzugriff oder aber auch lokal am Gerät zugreifen und die Vibrationsanalyse starten, stoppen und die Vorschaubilder der voranalysierten Daten besichtigen. Ebenso können sie nun auf den lokal installierten Speicher (SSD 1 TB) übertragen werden. Dies ist wegen der großen Datenmengen erforderlich. Abbildung 53 zeigt den Datenfluss schematisch.

¹ Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG

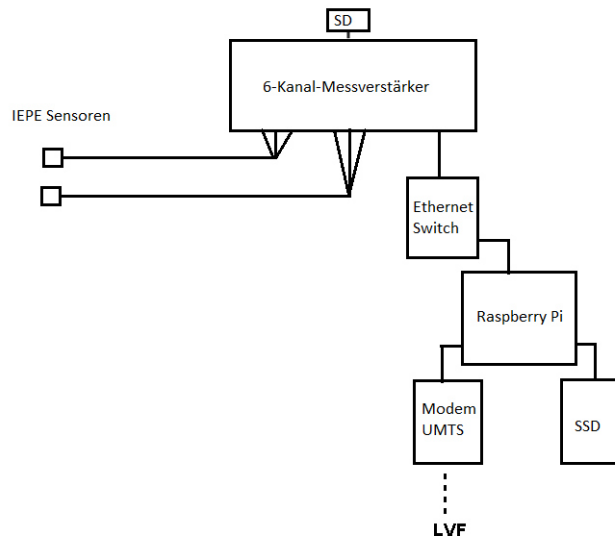


Abbildung 53: Datenfluss der Vibrationsanalyse

6.2.3 VORANALYSE

Der lokale Rekorder wurde installiert, um die aufgezeichneten Vibrationsdaten vorzuselektieren. Mittels Fernsteuerung kann die Aufzeichnung begonnen und gestoppt werden. Aus den aufgezeichneten Daten werden jeweils 177 Sekunden Datensätze erstellt, das ergibt sich aus der Abtastrate der Aufnahme, der Kanalanzahl und der Speicherkapazität, die mit 100MB pro Datensatz festgelegt wurde. Danach können die Daten auf den SSD-Speicher transferiert werden. Dort werden die Datensätze automatisch mit einem Vorschaubild (siehe Abbildung 54) hinterlegt, das folgende Daten, jeweils über der Zeit aufgetragen, enthält:

- Gemittelter Beschleunigungs-RMS der drei Achsrichtungen beider Sensoren
- Zuggeschwindigkeit
- Drehzahl der MKT
- Drehzahl der Zuluftlüfter
- Signal des Kühlluftlüfters
- Signal der Spannungsversorgung der Nebenverbraucher

Dank diesem Vorschaubild kann eine Vorselektion der Daten vorgenommen werden, da mit 100 MB Dateien mit jeweils 177 Sekunden aufgenommener Vibrationen und einer Messdauer von mehreren Tagen die Menge der Daten schnell unüberschaubar wäre. Es wurden Datensätze ausgewählt, die verschiedene Merkmale aufwiesen und so eine Klassifikation vorgenommen. Datensätze mit unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten, Bremsen, Anfahren, langsame Geschwindigkeiten und sehr hohe Geschwindigkeiten, unterschiedliche Drehzahlen sowie Datensätze, bei denen der Zug durch Trennstellen gefahren ist, wurden ausgewählt. Auch unterschiedliche Merkmale der Zuluftlüfter und des

Kühlluftlüfters wurden untersucht. Ein Vergleich mit den GPS-Daten machte es möglich, Datensätze ausfindig zu machen, bei denen der Zug in große Bahnhöfe einfährt und deshalb vermutlich über viele Weichen fährt. Abbildung 54 zeigt ein Beispiel eines solchen Vorschaubildes. Die vertikale Achse deckt jeweils den Maximalbereich der jeweiligen Komponente, die horizontale Achse zeigt den Zeitbereich von 177 Sekunden.

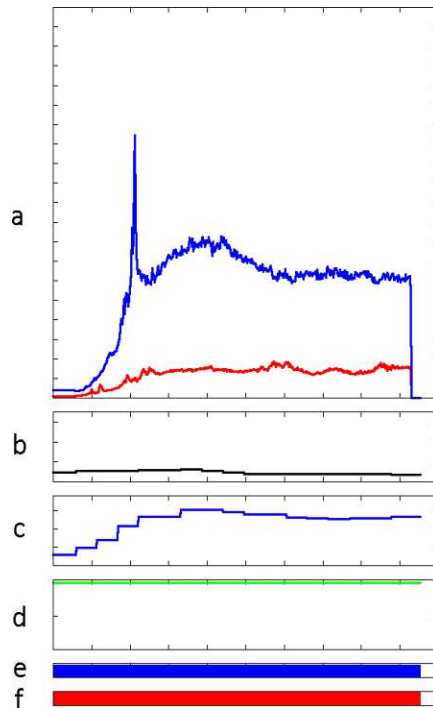


Abbildung 54: Beispiel Vorschaubild der Vibrationsmessung,
a-der gemittelte Beschleunigungs-RMS der drei Achsrichtungen beider Sensoren, b-Zuggeschwindigkeit, c-Drehzahl der
MKT, d-Drehzahl der Zuluftlüfter, e-Motorkühlflüfter, f- Spannungsversorgung der Nebenverbraucher, horizontal ist
jeweils die Zeit dargestellt

6.2.4 DATENAUSWAHL

Wie bereits erwähnt, ist diese Analyse der Schwingungen vor allem eine Voranalyse für weiterführende Tests einer luftgelagerten MKT. Daher wurde eine Klassifikation der angenommen Ursachen für Schwingungen und Stöße vorgenommen und so die Datenauswahl getroffen. Folgende Kriterien wurden beachtet:

- Unterschiedliche Drehzahlen der MKT
- Unterschiedliche Zuggeschwindigkeiten (Anfahren, Bremsen, hohe Geschwindigkeiten, geringe Geschwindigkeiten)
- Zusammenhang zwischen verschiedenen Drehzahlen der MKT und Zuggeschwindigkeiten

- Einfluss der Drehzahlen der Zuluftlüfter und des Kühlluftlüfters sowie der Spannungsversorgung der Nebenverbraucher
- Trennstellen (Spannungsunterbrechung während der Fahrt, siehe Kapitel 5.1.1.1)

6.2.5 DETAILANALYSE

Es wurden Aufnahmen vom Messzeitraum von Juni bis August 2016 entnommen. Die Detailanalyse erfolgte mit dem Analysetool Pulse Reflex von Brüel & Kjær. Es wurden je nach Einfluss verschiedene Frequenzbereiche untersucht. Für Einflüsse vom Zug beispielsweise, die man bei niedrigeren Frequenzen erwartet, wurden kleinere Frequenzbereiche untersucht als bei einem erwarteten Einfluss der Drehzahl. Für eine umfassende Analyse wurden jeweils eine Analyse im Zeitbereich vorgenommen, eine im Frequenzbereich und ein Frequenzspektrum über der Zeit dargestellt. Die Abbildung 55 zeigt das Blockschaltbild der Analyseketten.

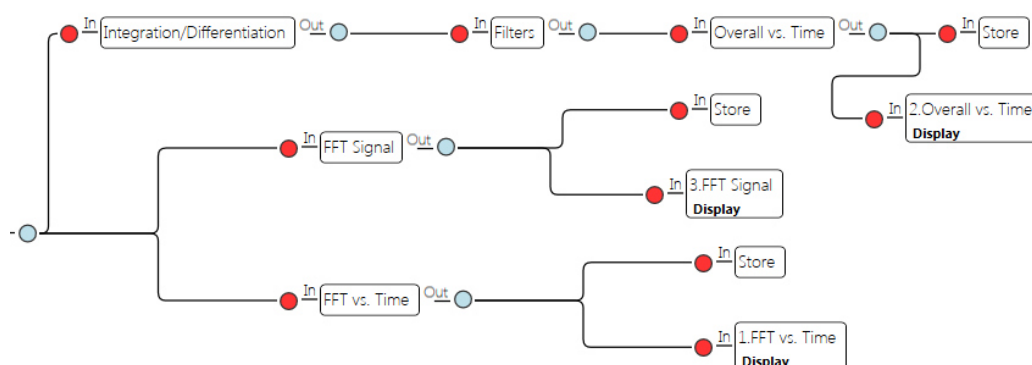


Abbildung 55: Process Chain der Vibrationsanalyse

Zu sehen ist hier die Auswahl eines Integrators, der die Auslenkungen durch zweimalige Integration berechnet. Anschließend wird das Signal gefiltert und in einem Diagramm dargestellt. Ebenso wurden die Analysewerkzeuge FFT und FFT vs. Time ausgewählt. Ersteres stellt die Amplituden über der Frequenz dar, letzteres die Amplituden über Frequenz und Zeit. Diese Spektren werden ebenfalls in Diagrammen dargestellt.

6.2.5.1 EINSTELLUNGEN

Für die Analyse im Zeitbereich wurden die tatsächlichen Spitzenwerte über der Zeit darstellt. Für das Frequenzspektrum, das in den meisten Fällen die Schwinggeschwindigkeit über der Frequenz zeigt, wurde eine Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt. Für die Frequenzanalyse über der Zeit, bei der meistens die Ausschläge über Frequenz und Zeit

veranschaulicht werden, wurde eine FFT über der Zeit erzeugt. Die Frequenzspektren stellen jeweils die RMS-Werte dar. Es wurde jeweils als Fensterfunktion ein Hanning-Fenster mit 66,7% Überlappung verwendet. Die Mittelung erfolgte linear jeweils über den ganzen Messbereich, Da hier vor allem die auftretenden Frequenzen von Bedeutung sind und nicht etwa die Änderung der Amplituden über der Zeit, wie sie bei einer exponentiellen Mittelung hervortreten würde.

Die Geschwindigkeit als Amplitude des Frequenzspektrums wurde gewählt, weil sich auf diese Weise in der linearen Darstellung ein breiter Frequenzbereich gut veranschaulichen lässt. Da Beschleunigungen gemessen werden, werden Geschwindigkeit und Auslenkung über numerische Integration berechnet. Bei der Beschleunigungsmessung sind hochfrequente Signale betont. Da die Beschleunigung mit dem Quadrat der jeweiligen Frequenz gewichtet wird, ergeben sich durch die Integration in der Auslenkungsdarstellung dominierende, niederfrequente Anteile und kaum hochfrequente. Daher ist die Darstellung der Geschwindigkeit oder auch Schnelle genannt, ein gutes Mittelmaß. Zu beachten sind die sehr niedrigen Frequenzen bei der Auslenkungsdarstellung. Da hier eine Division durch einen Wert nahe 0 passiert, steigen die Werte sehr schnell an und sind nicht realitätsgetreu (siehe Kapitel 6.1.3). Laut Literatur sollte bei Anwendung von IEPE-Sensoren ein Hochpassfilter im Bereich von 5 Hz bis 10 Hz gewählt werden.¹ Abbildung 56 zeigt das FFT-Spektrum eines Datensatzes mit mittlerer Zuggeschwindigkeit mit unterschiedlichen verwendeten Hochpassfiltern. Das Spektrum, dass ohne Filter ausgewertet wurde (in Rot) zeigt einen Ausschlag der Amplituden ins Unendliche. Mit 5 Hz, 6 Hz und 7 Hz (in Blau, Grün, Gelb) werden die Ausschläge zwar vermindert, sind aber deutlich noch verfälscht. Der 8 Hz Filter zeigt Amplituden im niederen Frequenzbereich die im Größenbereich der Amplituden nachfolgender Frequenzbereiche liegen. Mit 8 Hz ist daher eine ausreichend gute Begrenzung gegeben. Die groben Ausschläge werden abgeschnitten, die Signale aber nicht vollständig ausgeblendet. Deshalb wurde bei der Auslenungsbetrachtung über der Zeit ein Hochpassfilter von 8 Hz eingesetzt.

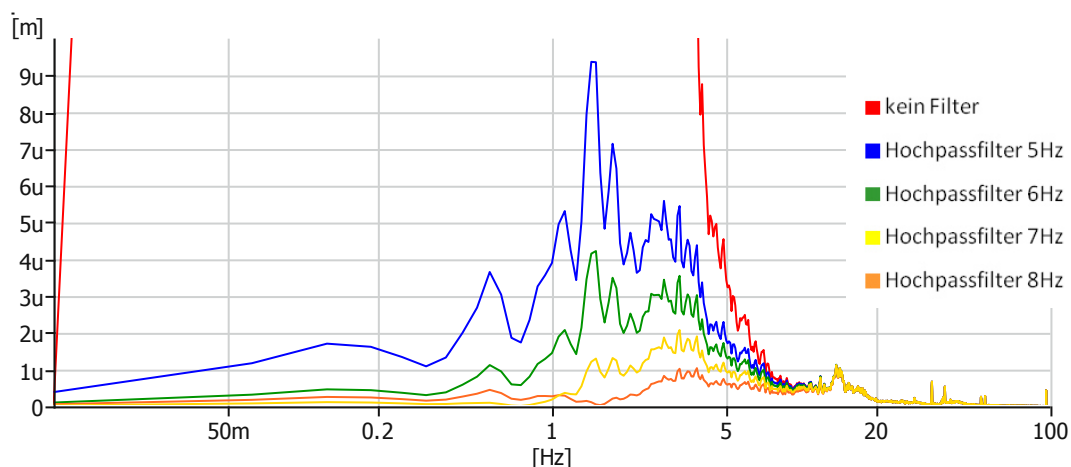


Abbildung 56: FFT-Spektrum mit verschiedener Filterauswahl; Auslenkungen ($u:=\mu\text{m}$)

¹ Hofmann; 2013; S.113

Für die FFT-Analysen wurden nach einigen Versuchen jeweils 1.600 FFT-Linien gewählt, was für eine maximale Frequenz von 100 Hz eine Frequenzauflösung von 0,0625Hz und für die maximale Frequenz von 500Hz eine Auflösung von 0,3125Hz ergibt. Diese Auflösungen stellen einen guten Kompromiss zwischen Zeit- und Frequenzauflösung dar. Somit ist aus der Frequenzanalyse über der Zeit sowohl die zeitliche Komponente als auch die spektrale ausreichend auslesbar. Durch die unterschiedliche Auflösung der Analysen können die Amplituden unterschiedlicher Frequenzbetrachtungen nicht unmittelbar miteinander verglichen werden.

6.2.6 ERGEBNISSE

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Vibrationsanalyse aufgezeigt. Aufgrund der großen Datenmengen der aufgenommenen Vibrationen ist zu jeder Einflussklasse jeweils nur ein Beispiel angeführt.

6.2.6.1 ERLÄUTERUNG ZU DEN DIAGRAMMEN

Zu jedem Datensatz wurde ein Diagramm mit den Metadaten erstellt, welche auch auf den Vorschaubildern zu sehen sind. Die Zuggeschwindigkeit und die Drehzahl der MKT sind einheitengetreu dargestellt, die Drehzahl der Zuluftlüfter und des Kühlluftlüfters und die Spannungsversorgung des Wechselrichters der Nebenverbraucher jeweils nur als Signal. Die Daten sind aus den Logfiles des Messzuges entnommen, die ja nur alle 10 Sekunden einen neuen Wert enthalten. Daraus ergeben sich die Stufen, welche in den Diagrammen, die die Eigenschaften der Datensätze enthalten, ersichtlich sind. In den FFT-Diagrammen sind jeweils in Rot (1) die Signale des Sensors am Gehäuse und in Blau (2) die Signale des Sensors an der MKT dargestellt. Die X-Richtung zeigt jeweils in Zugfahrtrichtung, die Y-Richtung ist normal dazu und horizontal, die Z-Richtung ist die Vertikale (siehe Kapitel 6.2.1). Die horizontale Achse der FFT-Spektren zeigt jeweils die Frequenz, die Vertikale die Amplitude. Die Amplituden werden in den folgenden Diagrammen meist als Schwinggeschwindigkeit und linear dargestellt, die Frequenzachse je nach Betrachtungsbereich linear oder logarithmisch. Bei der FFT über der Zeit wird horizontal die Frequenz dargestellt, vertikal die Zeit und die Amplitude über ein Farbspektrum. Hierbei wird die Zeit linear, die Frequenz meistens linear sowie die Amplitude als Abstufung des Farbspektrums logarithmisch dargestellt. Zur FFT über der Zeit werden für die meisten Beispiele jeweils nur die Diagramme von einer Achsrichtung dargestellt, da diese Darstellung rein der Anschauung genügt und sich diese zwischen den Achsrichtungen meist nur gering in der Amplitude ändern. In den meisten Fällen wurden hier die farblich dargestellten Amplituden als Auslenkungen dargestellt, bei sehr hohen Frequenzbereichen aber als

Beschleunigung. Die Bezeichnungen der Datensätze beinhalten das Datum und den Anfangszeitpunkt der jeweiligen Aufzeichnung.

6.2.6.2 EINFLUSS DER DREHZAHL DER MKT

Zur Untersuchung des Einflusses der Drehzahl wurde ein Datensatz mit den Eigenschaften aus folgendem Diagramm gewählt. Die Drehzahl der MKT ist sehr hoch etwa 25.000 U/min, was einer Frequenz von etwa 415 Hz entspricht, während der Zug selbst sich nicht bewegt. Zuluftlüfter und Kühlluftlüfter sind in Betrieb, ebenso ist die Spannungsversorgung der Nebenverbraucher vorhanden (siehe Abbildung 57). Für die Frequenzanalyse wurde hier ein Frequenzbereich von 8Hz bis 500Hz gewählt und die Geschwindigkeit als Amplitude (siehe Abbildung 58). Für die Frequenzanalyse über der Zeit sind die Auslenkungen über Zeit und Frequenz farblich abgestuft dargestellt (siehe Abbildung 59).

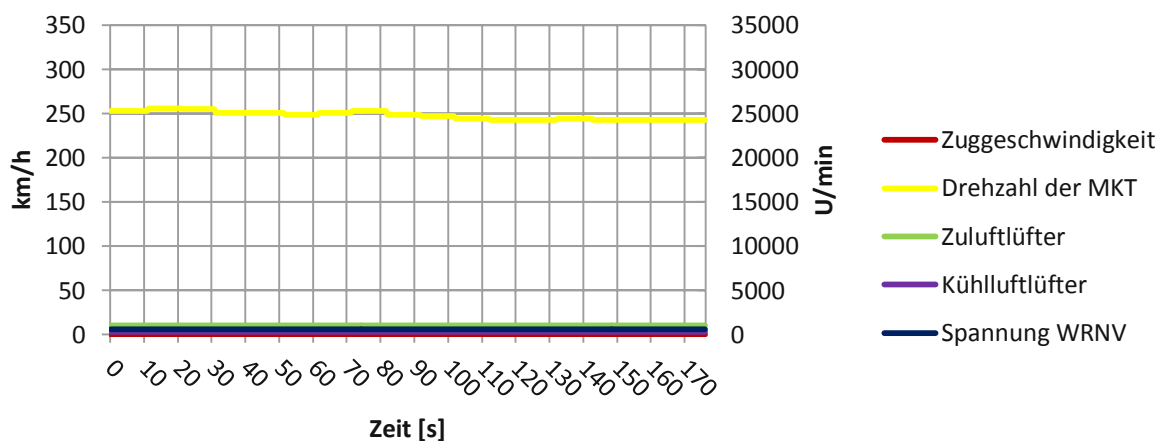


Abbildung 57: Eigenschaften zu Datensatz 20160606-142958

Aus den unten dargestellten Spektren (Abbildung 58) sind die Nenndrehfrequenzen des Kühlluftlüfters von etwa 54 Hz sowie die des Zuluftlüfters mit etwa 97 Hz ersichtlich. Die Drehzahl, die sich, wie oben im Diagramm ersichtlich, um etwa 25.000 U/min bewegt, das etwa 420 Hz entspricht, ist ebenfalls wenn auch sehr schwach ersichtlich. Wie zu erwarten, scheint sie mehr in den Richtungen Y und Z an der MKT auf. Die höheren Y und Z Amplituden lassen sich dadurch erklären, dass X in Richtung der Rotationsachse der Welle zeigt und so von der Drehzahl der MKT weniger beeinflusst wird. Dass die Amplituden des Sensors an der MKT höher sind, liegt vermutlich daran, dass der Dämpferblock diese Vibrationen abfängt und nicht an das Gehäuse weitergibt. Der Kühlluftlüfter hat eine Auswirkung auf das Gehäuse, dieser liegt dem Sensor aber auch am nächsten. Die Schwingungen, die um etwa 28Hz ersichtlich sind, könnten ein Effekt der Eigenfrequenz des Dämpferblockes sein, da sie

sowohl am Gehäuse als auch auf der MKT auftreten. Dies würde mit der errechneten Eigenfrequenz in Kapitel 6.1.1.1 nahezu übereinstimmen. Bei dem auseinandergezogenen Hügel um 44 Hz könnte es sich um eine Resonanzfrequenz der MKT handeln, da dieser eher breitbandige Frequenzbereich nur auf der MKT auftritt. In den FFT-Spektren über der Zeit (Abbildung 59) wird die Annahme des Einflusses der Lüfter verstärkt. Die Amplitude sowie Frequenz ändern sich nicht über der Zeit bei etwa 54 Hz und bei 97 Hz. Die variable Drehzahl der MKT im Bereich um 420 Hz ist ebenso gut ersichtlich in diesen Spektren.

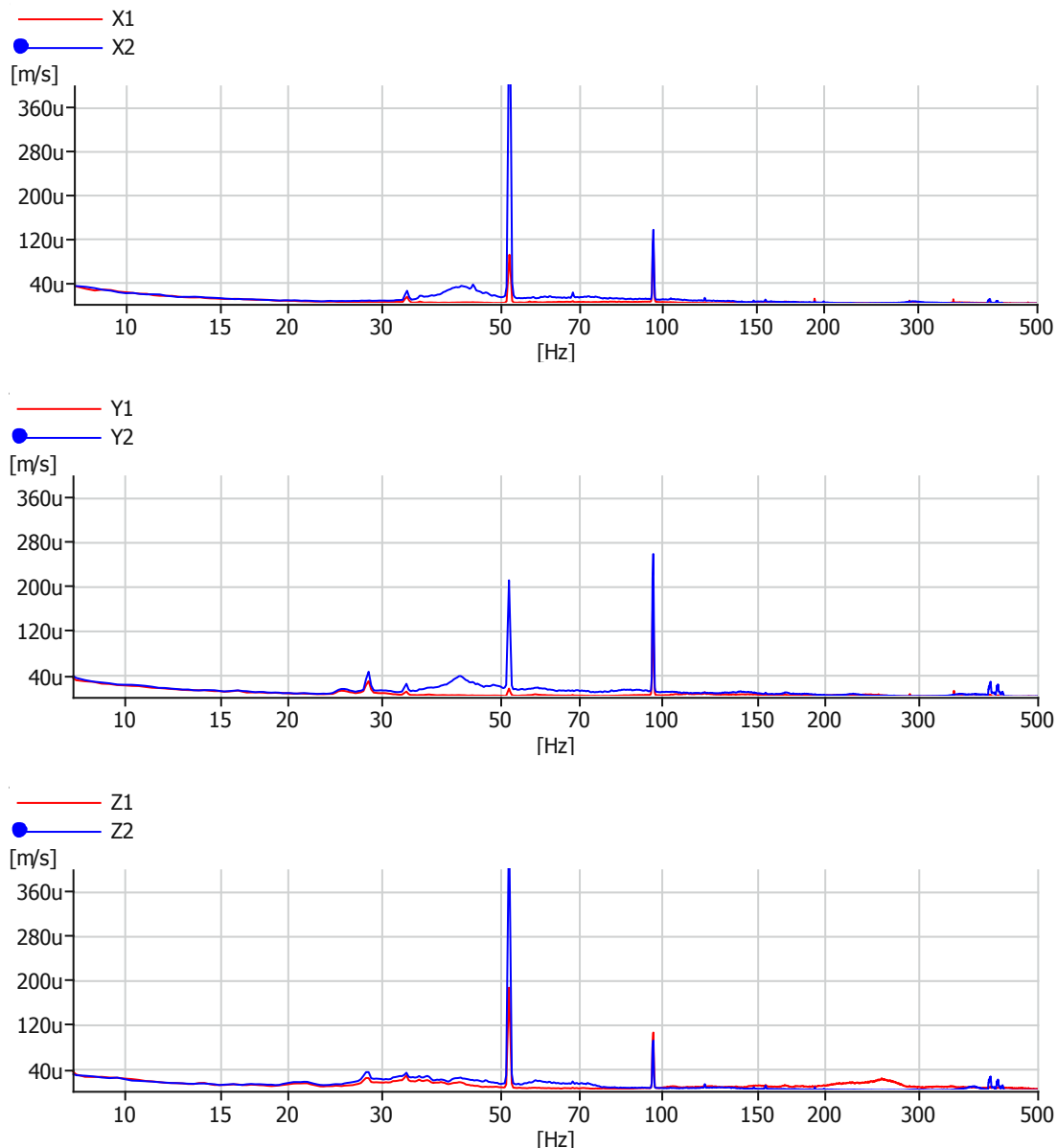


Abbildung 58: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160606-142958; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-, Y- und Z-Richtung ($u = \mu\text{m}$)

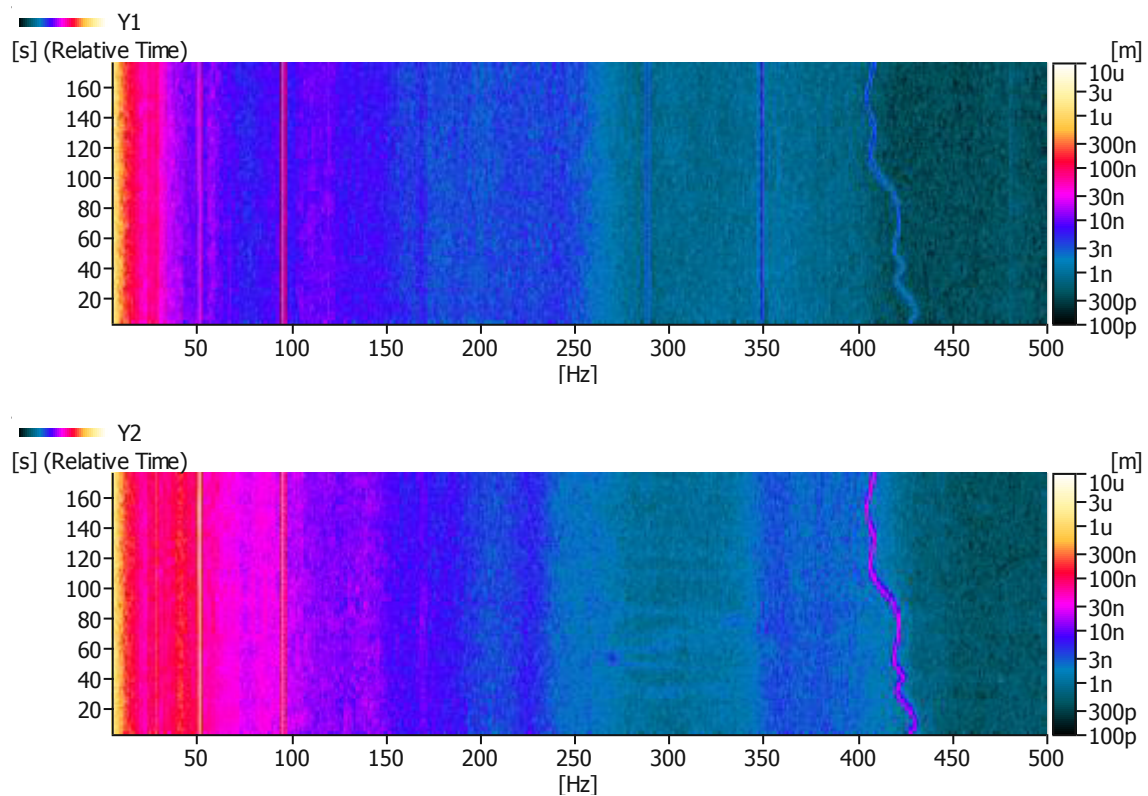


Abbildung 59: FFT vs. Time der Y-Richtung zu Datensatz 20160606-142958; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an der MKT (Y2) (u:= μm , n:=nm)

Die Auslenkungen sind in allen 3 Achsrichtungen der jeweils 2 Sensoren eher gering, wie in den nachfolgenden Diagrammen ersichtlich (Abbildung 60). Dies war durch die kaum niederfrequenten Anteile im Frequenzspektrum zu erwarten. Da der Zug sich nicht bewegt, wirken offensichtlich keine äußeren Einflüsse ein.

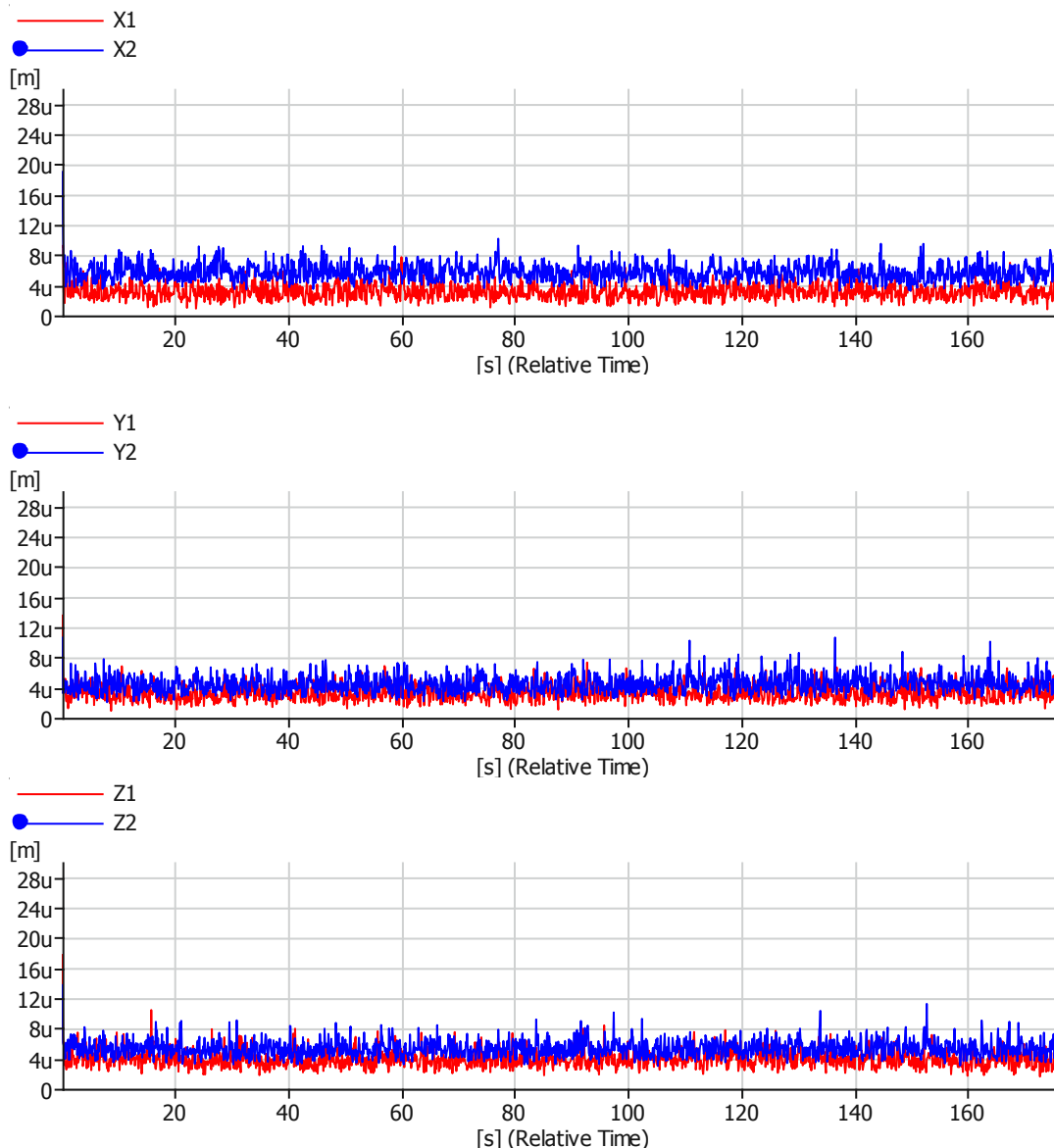


Abbildung 60: Auslenkung über der Zeit zu Datensatz 20160606-142958; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung(μm)

6.2.6.3 EINFLUSS DER ZUGGESCHWINDIGKEIT

Zur Untersuchung der Einwirkung der Zuggeschwindigkeit wurde unter anderem folgender Datensatz gewählt. Die Geschwindigkeit des Zuges nimmt ab, der Zug bremst. Die Turbine steht still. Folglich befindet sich auch der Kühlluftlüfter im Stillstand und hier ebenfalls die Zuluftlüfter (Abbildung 61).

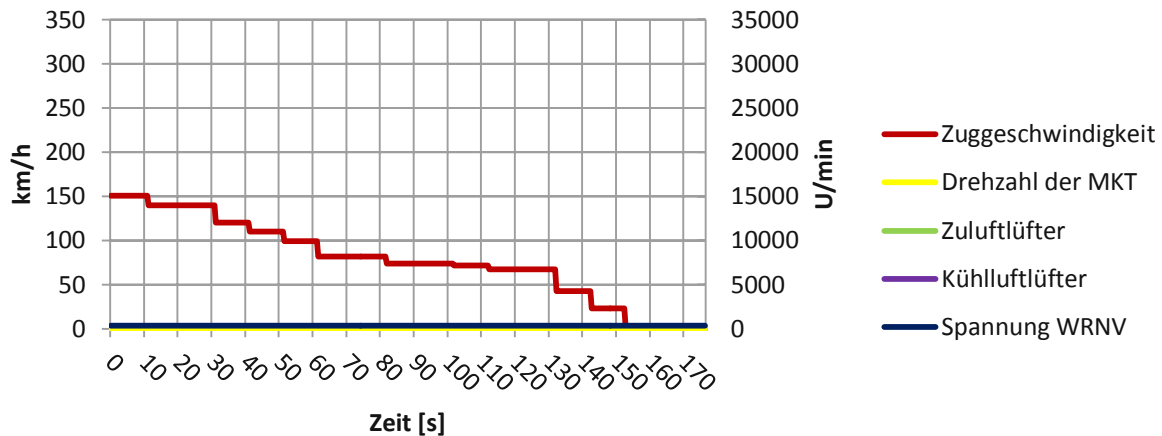


Abbildung 61: Eigenschaften zu Datensatz 20160703-140838

Wie aus den nachfolgenden Frequenzspektren (Abbildung 62) ersichtlich, sind hier die Schwingungen in den niederen Frequenzbereichen deutlich höher und zwar am Gehäuse sowie an der Turbine. Da hier wieder eine hügelartige Amplitude bei etwa 44 Hz an der MKT auftritt, könnte die Annahme, dass es sich hier um eine Strukturresonanz der MKT handelt, richtig sein. Diese ist hier weniger ausgeprägt als oben, vermutlich durch den Stillstand der Turbine. Die Annahmen, dass es sich bei dem großen Peak bei etwa 30 Hz um die Eigenfrequenz des Dämpferblockes handelt, wird hier nicht bestärkt, da hier in der FFT über der Zeit (Abbildung 63) eine nahezu gleichmäßige Linie auftritt. Vermutlich wird es sich um einen anderen Einfluss innerhalb des Zuges handeln, wie etwa andere Nebenverbraucher, die diese Frequenz aufweisen. Die durchgezogenen horizontalen Bänder in der FFT über der Zeit, die immer wieder auftauchen und über einen großen Frequenzbereich reichen, könnten Stöße sein, Unebenheiten der Fahrbahn oder eine impulsartige Erregung im Inneren des Zuges. Diese Bänder und das Rauschen im niederen Frequenzbereich verschwinden im letzten Teil des Datensatzes, wenn der Zug zum Stehen kommt. Die fehlenden Spitzen bei 54 Hz und 97 Hz bestätigen die Annahme vom vorigen Beispiel, dass es sich hier um die Kühl- und Zuluftlüfter handelt. In diesem Beispiel, wie in Abbildung 61 ersichtlich, stehen die Lüfter still.

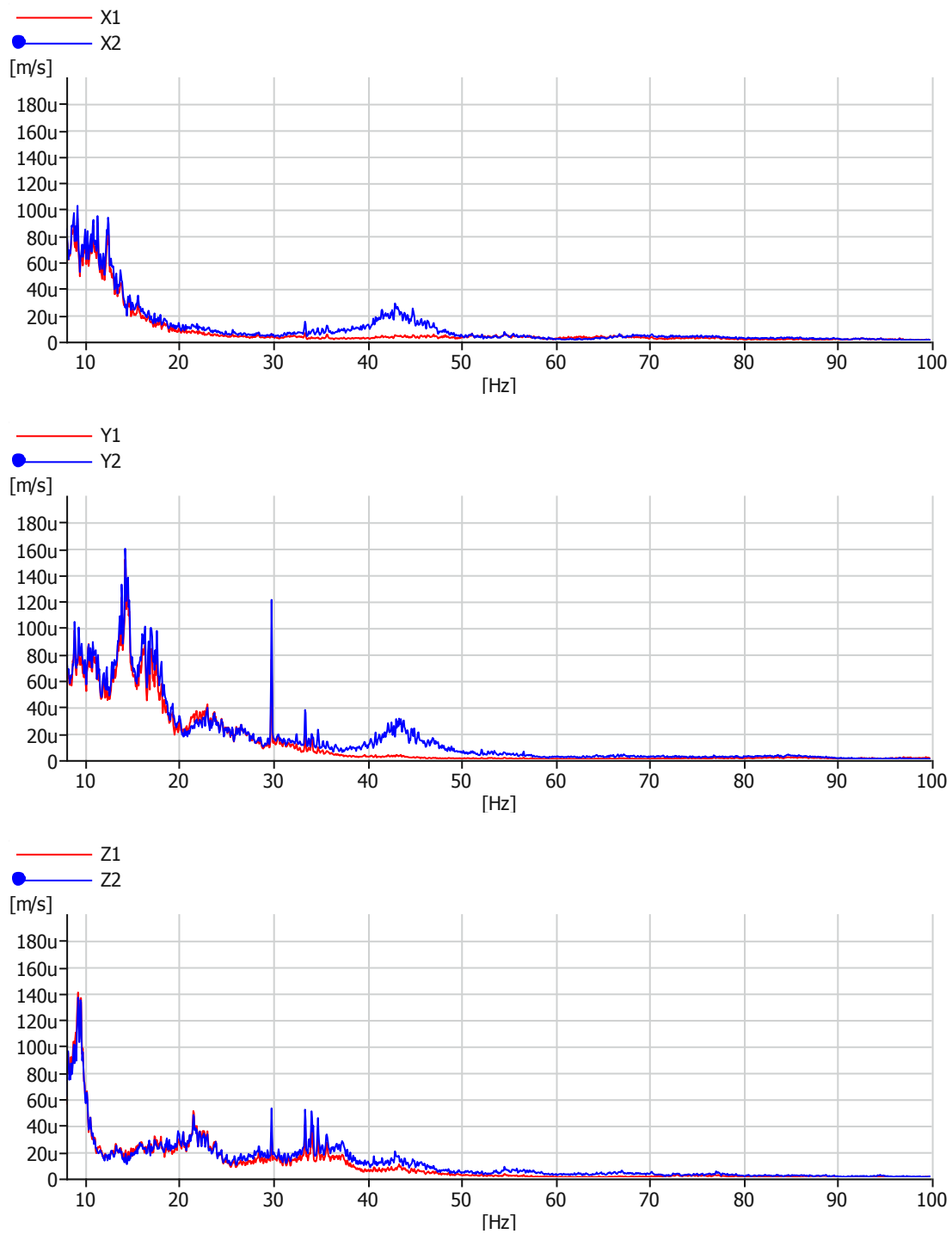


Abbildung 62: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160703-140838; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-, Y- und Z-Richtung (μ := μ m)

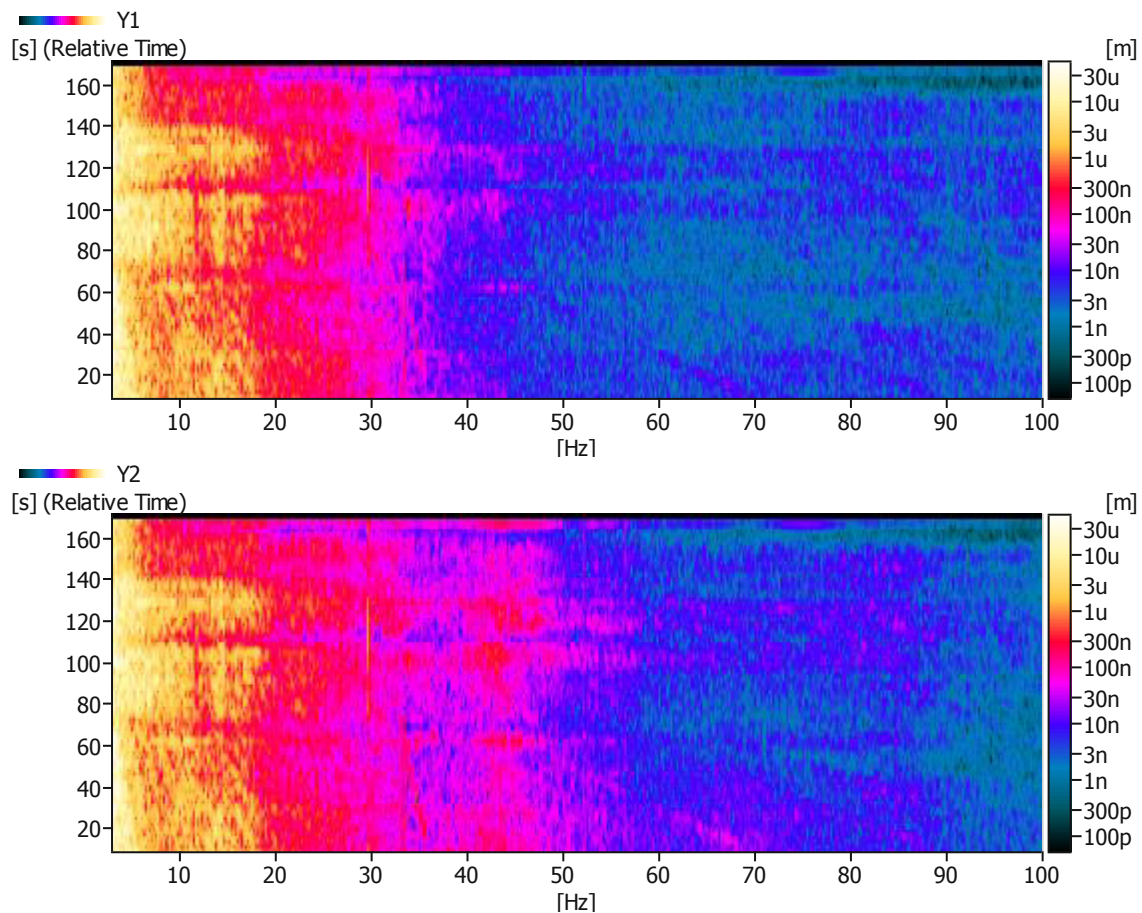


Abbildung 63: FFT vs. time der Y-Richtung zu Datensatz 20160703-140838; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an der MKT (Y2) (u:= μm , n:=nm, p:=pm)

Die Auslenkungen über der Zeit sind in diesem Datensatz um ein Vielfaches größer, als bei dem obigen Beispiel des stehenden Zuges, wie in Abbildung 64 zu sehen. Vor allem in den Richtungen Y und Z, da hier Schienen und Weichen das Signal beeinflussen. Vergleicht man die Zeit mit der FFT über der Zeit, kann man sehen, dass die hohen Ausschläge mit den angenommenen Stößen ungefähr übereinstimmen. Wie man in Abbildung 61 sieht, bremst der Zug und kommt gegen Ende des Datensatzes zum Stehen. In den Diagrammen der Auslenkungen über der Zeit kann man beobachten, dass im Endbereich, ab etwa 155 Sekunden, kaum mehr Auslenkungen auftreten.

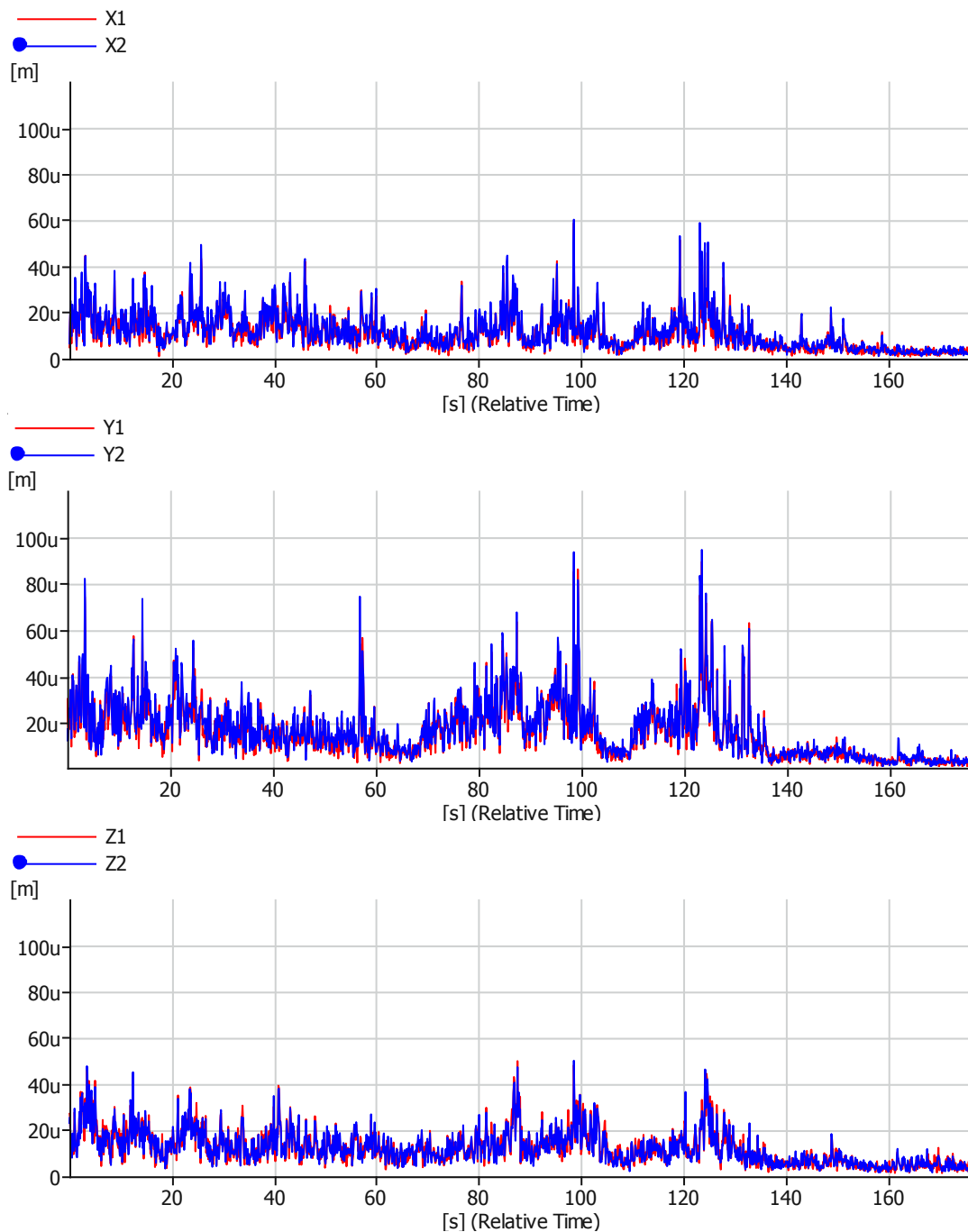


Abbildung 64: Auslenkung über der Zeit zu Datensatz 20160703-140838; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (μm)

6.2.6.4 EINFLUSS EINER TRENNSTELLE

Das folgende Beispiel beinhaltet das Durchfahren einer Schutzstrecke. Sie befindet sich bei Basel (CH) und trennt das Deutsche vom Schweizer Bahnstromnetz. Die Spannungsversorgung wird unterbrochen, demzufolge nimmt die Drehzahl der Turbomachine ab und fällt auf 0 U/min (siehe Abbildung 65). Wie bereits erwähnt, ergeben sich die Stufen im Diagramm durch das Auslesen der Messwerte im Zehnsekundentakt. Die

Drehzahl der Zuluftlüfter, die eine Notstromversorgung besitzen, da eine Zuführung von Frischluft immer gewährleistet sein muss, fällt auf ein niedrigeres Niveau. Die Zuggeschwindigkeit ist eher gering, aber ausreichend um die Trennstelle nur mit kinetischer Energie durchfahren zu können. Der Kühlluftlüfter weist zwar ein Signal auf, wird aber bei einer Spannungsunterbrechung keine Versorgung haben.

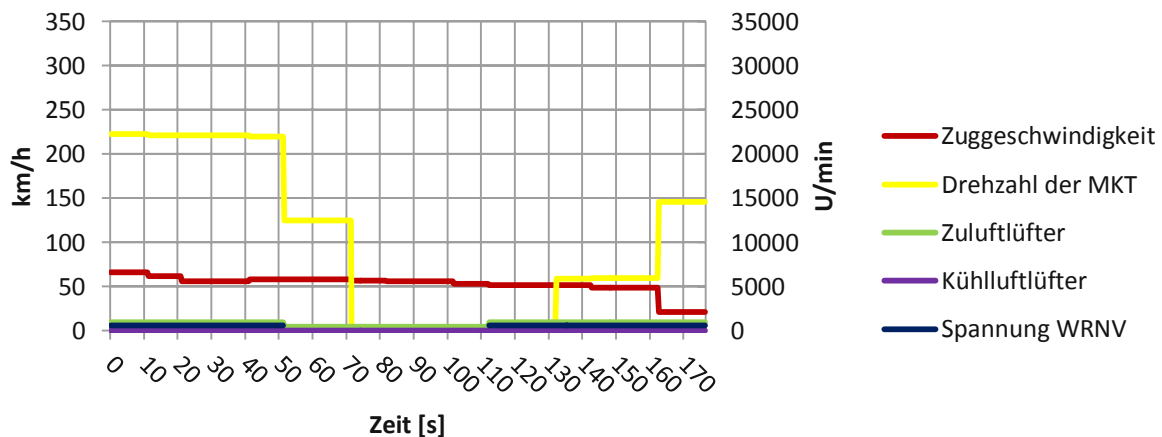


Abbildung 65: Eigenschaften zu Datensatz 20160608-111623

In den FFT-Spektren (Abbildung 66) ist der Abfall der Drehzahl der Zuluftlüfter und des Kühlluftlüfters gut erkennbar. Im niederen Frequenzbereich, der in dieser Darstellung erst bei 20Hz beginnt, zeigt sich der Einfluss des Zuges, sowie bei etwa 350 Hz der Einfluss der Drehzahl, der in der Frequenz abnimmt und wieder zunimmt. Während der Trennstelle ist die Amplitude bei etwa 30 Hz verschwindend gering, wie in den FFT-Spektren über der Zeit (Abbildung 67) ersichtlich. Somit ist es gut möglich, dass es sich hierbei um einen Verbraucher handelt, der ebenfalls nicht mit Spannung versorgt wird. Andererseits deutet die Verstärkung bei horizontal verlaufenden Erregungen, wie sie wahrscheinlich Stöße auslösen, genau hier auf eine Eigenfrequenz hin.

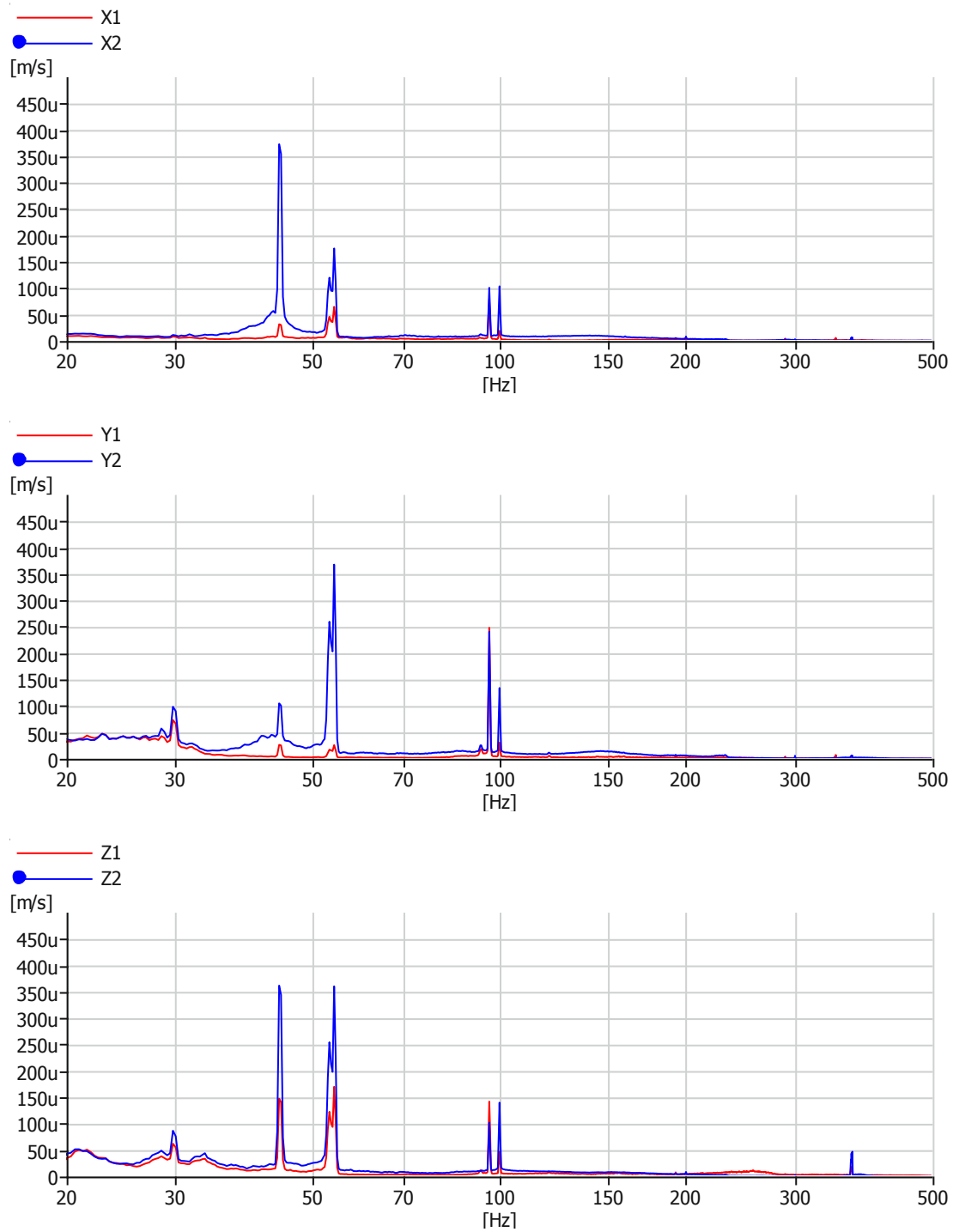


Abbildung 66: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160608-111623; ; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (μm)

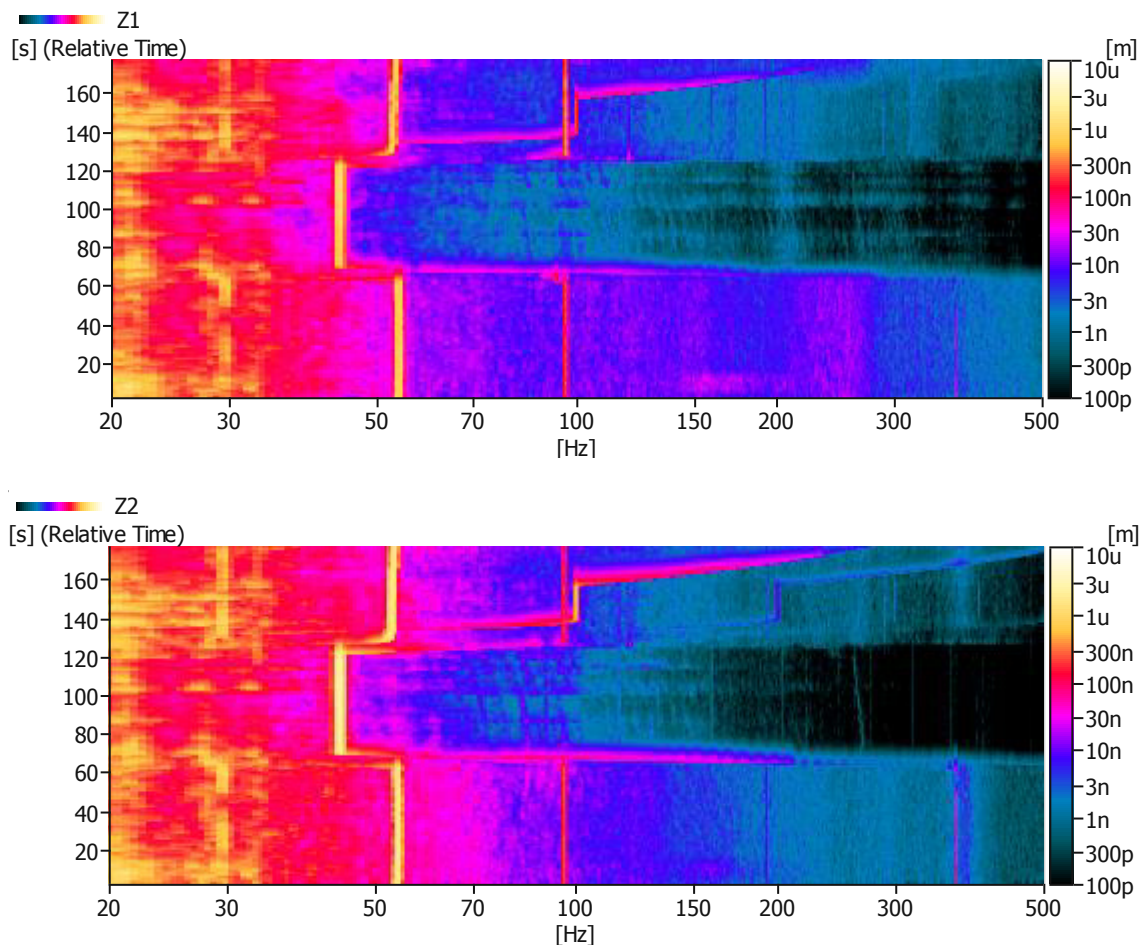


Abbildung 67: FFT vs. time der Z-Richtung zu Datensatz 20160608-111623; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Z1) und an der MKT (Z2) (u:= μm , n:=nm, p:=pm)

Die Auslenkungen, in Abbildung 68 ersichtlich, sind eher gering, vermutlich weil der Zug eine geringe Fahrgeschwindigkeit aufweist. Interessant sind die größeren Auslenkungen an der MKT im Bereich der Trennstelle. Diese kommen vermutlich aufgrund des abrupten Ausschaltens der Geräte zustande. Trotzdem sind die Ausschläge gering, sodass man davon ausgehen kann, dass keine Gefährdung für ein Luftlager durch eine Trennstelle aufgrund unzulässiger Schwingungen und Ausschläge besteht. Hier wird noch einmal angemerkt, dass die Messung an einer magnetgelagerten Turbine durchgeführt wurde und diese aktiv ausgewuchtet wird.

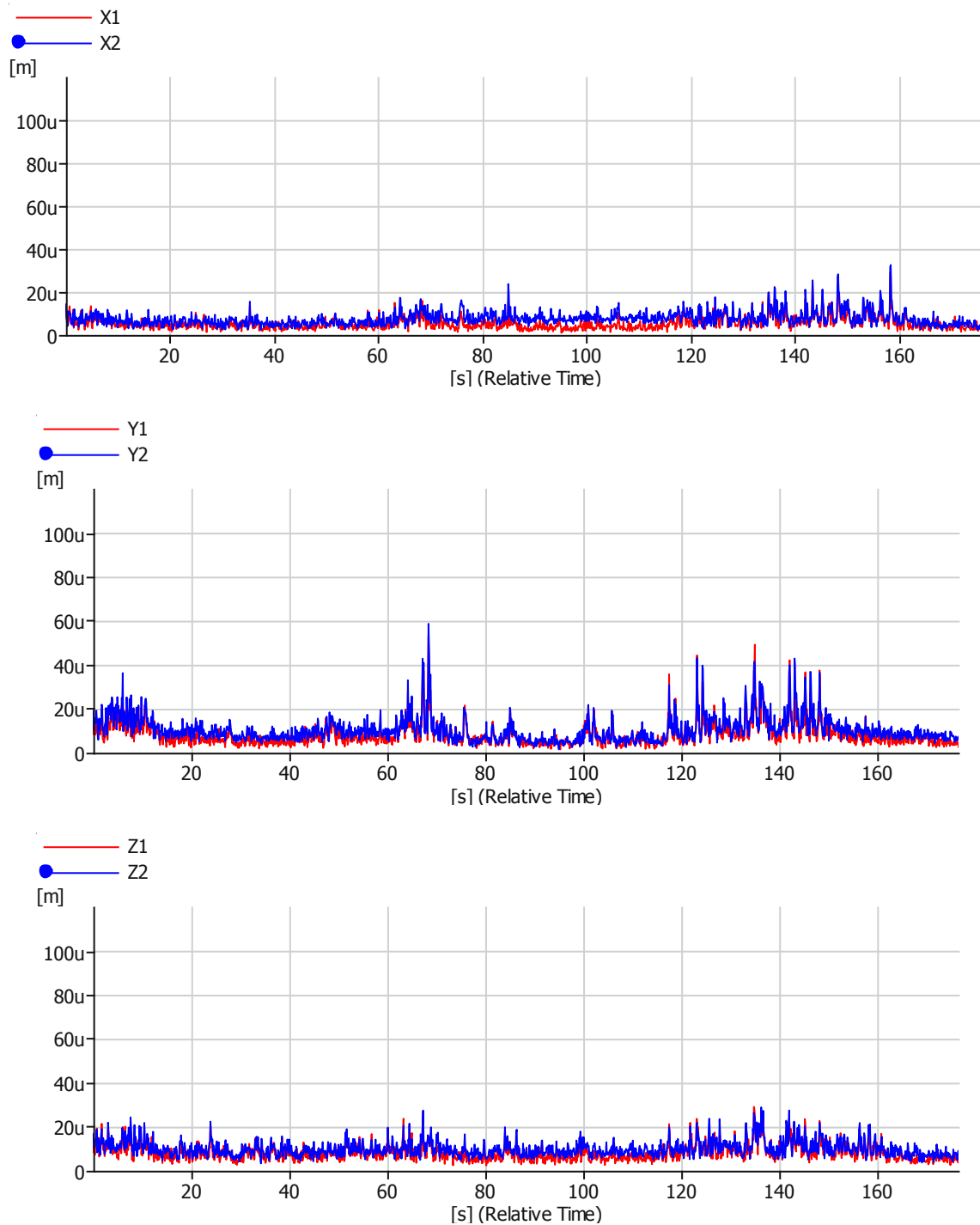


Abbildung 68: Auslenkungen über der Zeit zu Datensatz 20160608-111623; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung ($u=\mu\text{m}$)

6.2.6.5 VARIABLE DREHZAHL DER MKT UND ÜBERFAHREN VON WEICHEN

Es wurde ein Datensatz gewählt, in dem während des Aufzeichnungszeitraums die Drehzahl kontinuierlich zunimmt. Die Geschwindigkeit des Zuges ist eher gering. Zuluftlüfter und Kühlluftlüfter sind eingeschaltet und die Spannungsversorgung der Nebenverbraucher ist vorhanden (siehe Abbildung 69). Für die Analyse wurde hier ein Frequenzbereich von 20 Hz bis 2,5 kHz gewählt, da hier vor allem die Drehzahl mit ihren Harmonischen interessiert. Der Zug befand sich nach Untersuchung der GPS-Daten kurz vor Basel (CH), also kurz vor einem großen Hauptbahnhof, in den laut Internetrecherche (Google Maps) viele Gleise führen und somit viele Weichen überfahren werden.

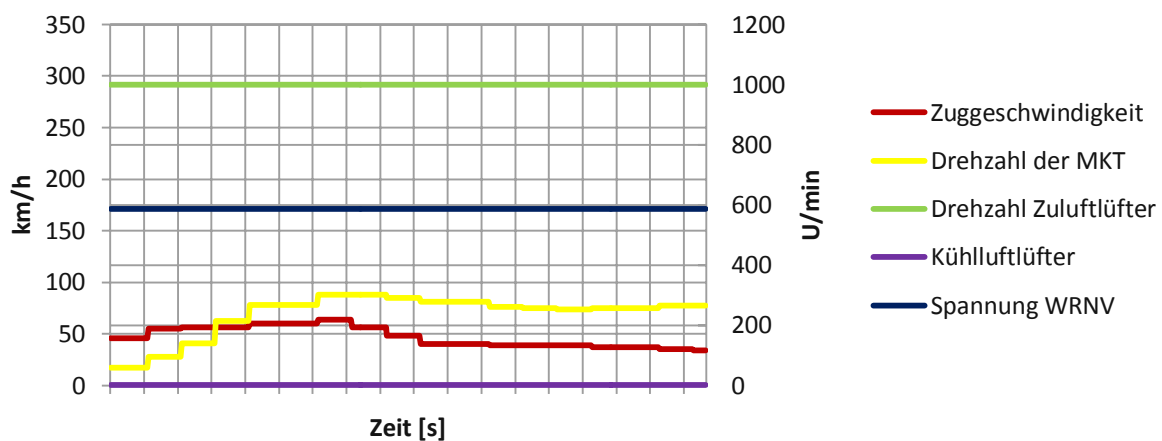


Abbildung 69: Eigenschaften zu Datensatz 20160606-184353

Aufgrund des großen Frequenzbereichs wurden für die Amplituden der FFT-Spektren (Abbildung 70) die Beschleunigungen dargestellt. Die Drehzahl der MKT reicht laut Abbildung 69 von etwa 5.000 bis 30.000 U/min, also etwa 80 bis 500 Hz. Bewegungen in diesem weitgestreuten Bereich sind im Spektrum erkennbar. Durch die breite Streuung der Drehzahl sind die Amplituden im FFT-Spektrum aber nicht zuordenbar. Im FFT-Spektrum über der Zeit (Abbildung 71) zeigt sich hingegen deutlich die variable Drehzahl mit ihren Harmonischen. Die Drehzahl selbst weist eine geringe Amplitude auf. Das liegt daran, dass in der Beschleunigungsdarstellung die höher frequenten Anteile mehr gewichtet werden und die aktive Magnetlagerung die Welle auswuchtet. Im Bereich von 2 kHz ist vermutlich eine Strukturresonanz zu sehen. Was hier als sehr große Amplituden erscheint, sind Beschleunigungen sehr hoher Frequenzen, sie werden in der Auslenkungsbetrachtung aber verschwindend gering.

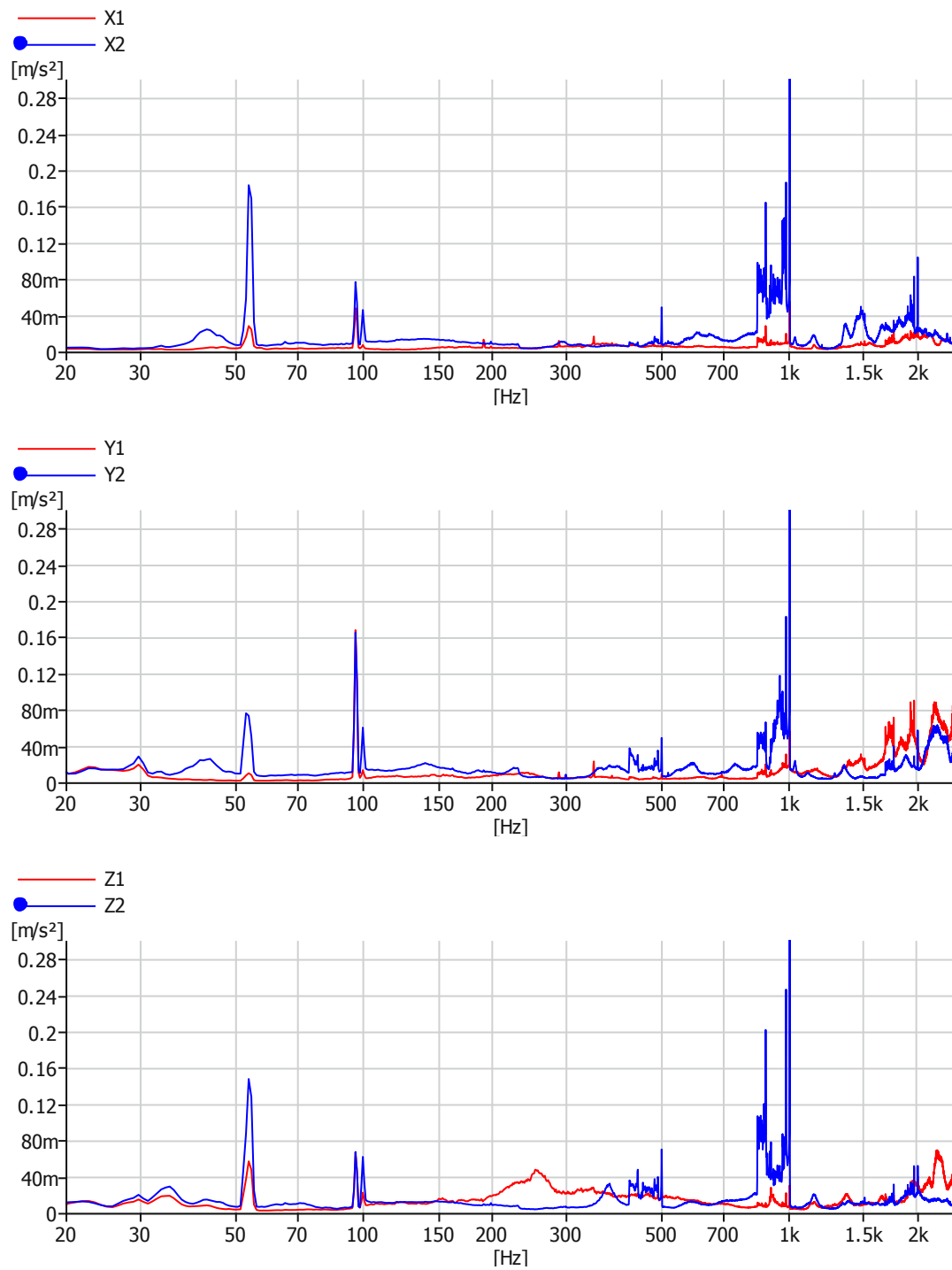


Abbildung 70: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160606-184353; Schwingbeschleunigung gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-, Y- und Z-Richtung (m:=mm)

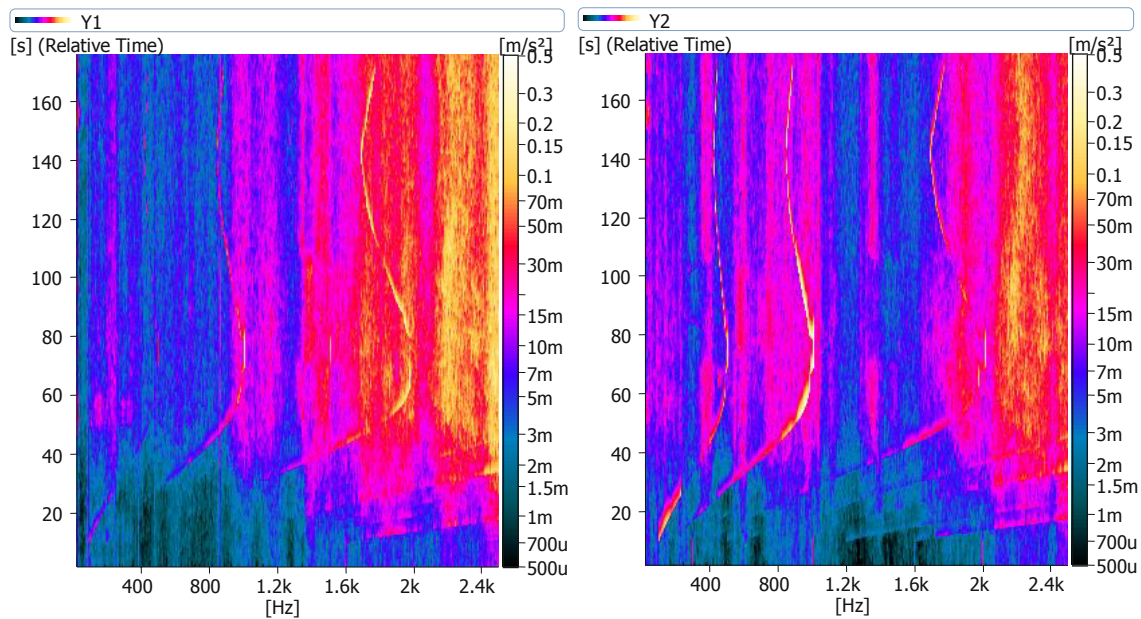


Abbildung 71: FFT vs. time der Y-Richtung zu Datensatz 20160606-184353; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Schwingbeschleunigungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an der MKT (Y2) (u:= μm , m:=mm, u:= μm)

Die Auslenkungen, in Abbildung 72 ersichtlich, sind relativ hoch. Es wird angenommen, dass der Zug in diesem Fall in den großen Hauptbahnhof in Basel (CH) einfährt und hier viele Weichen überfahren werden. Dass die großen Auslenkungen von der variablen Drehzahl der MKT herrühren, ist eher unwahrscheinlich, da in der FFT-Darstellung über der Zeit die Drehzahl keine großen Amplituden aufweist. Erst die Harmonischen im höheren Frequenzbereich treten hervor. Diese werden aber durch den hohen Frequenzbereich nach der Integration zum Schwingweg nur mehr geringe Amplituden aufweisen (siehe Kapitel 6.1.3).

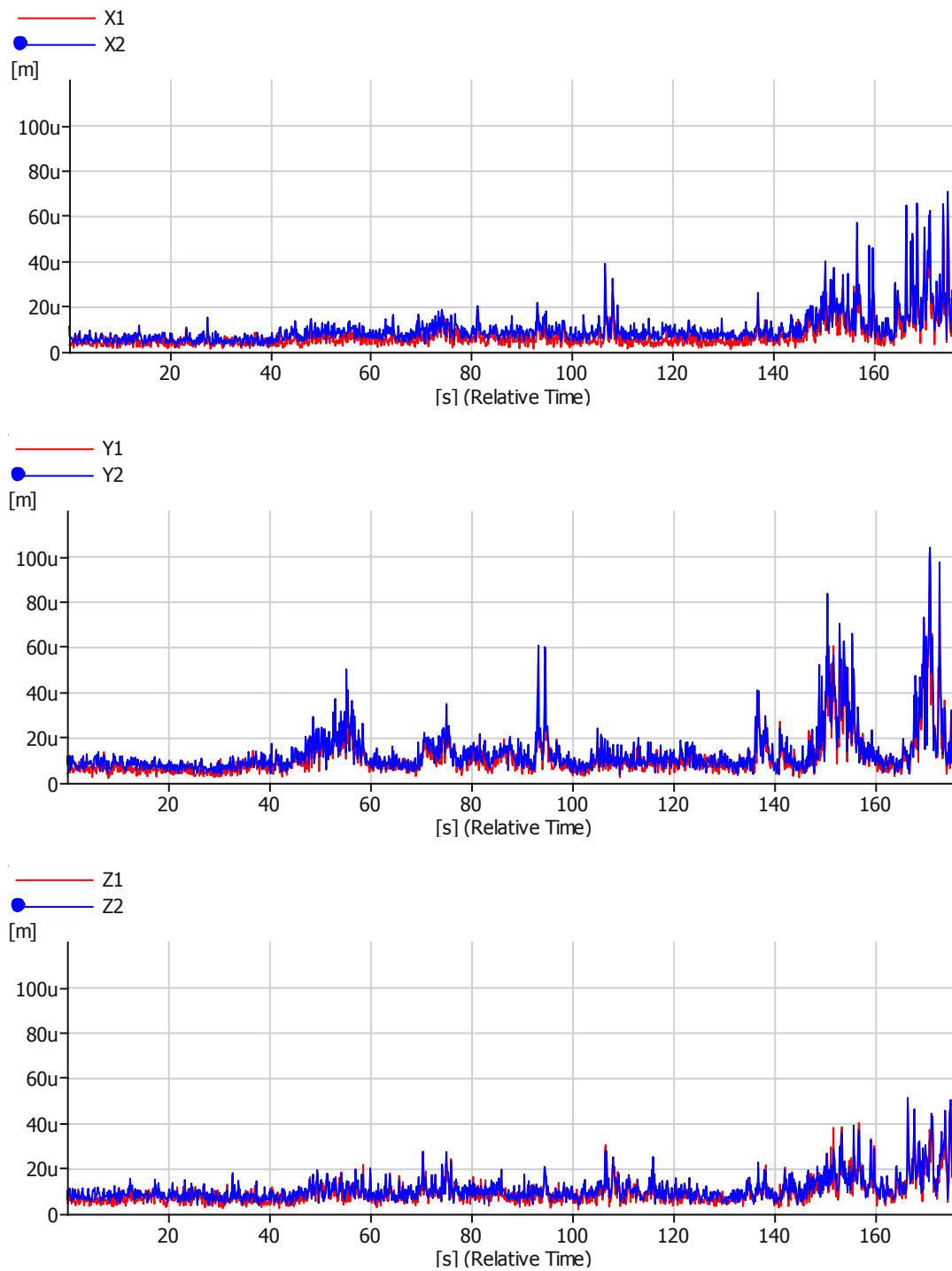


Abbildung 72: Auslenkungen über der Zeit zu Datensatz 20160606-184353; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (μm)

6.2.6.6 ANFAHREN DER TURBOMASCHINE

Folgender Datensatz zeigt ein Beispiel, bei dem die Turbomaschine sowie die Zuluftlüfter und der Kühlluftlüfter gegen Ende der Aufzeichnung starten. Die Zuggeschwindigkeit ist relativ hoch (siehe Abbildung 73). Die GPS-Daten zeigen eine unauffällige Strecke. Ob Unebenheiten, starker Wind oder Erregungen vom Inneren des Zuges aufgetreten sind, kann nicht oder nur sehr schwierig bestimmt werden.

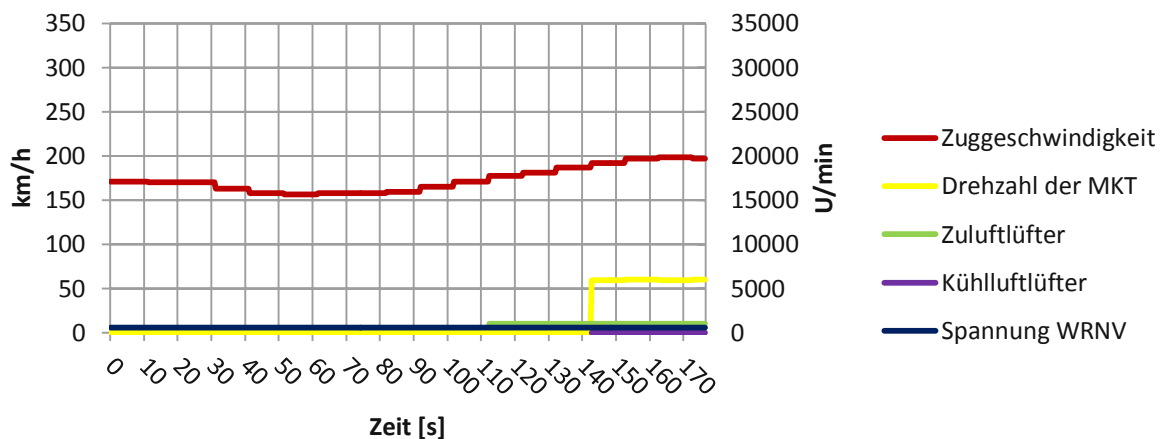


Abbildung 73: Eigenschaften zu Datensatz 20160703-141736

Der Einfluss im niederen Frequenzbereich ist hier deutlich erhöht, wie in den FFT-Spektren ersichtlich (Abbildung 74). Hier könnte auch die Drehzahl der MKT eine Rolle spielen. Beim Starten der MKT muss der Rotor erst seine Position finden und es kommt zu ruckartigen Bewegungen, was zu niederfrequenten Ausschlägen führen kann. Ebenso könnte das Anfahren der Lüfter kurzzeitige stoßartige Bewegungen auslösen. Die relativ hohe Geschwindigkeit des Zuges, wird, wie in den vorigen Beispielen schon zu sehen war, Einfluss haben. In den niederen Frequenzen ist eine genaue Zuteilung der Spektren durch die Verschmierung nicht möglich. Man sieht aber in der FFT über der Zeit (Abbildung 75 und Abbildung 76) das Anfahren der Zulüfter bei etwa 120 Sekunden und das der Turbomaschine und des Kühllüfters bei etwa 140 Sekunden. Das verschmierte Band um 44Hz deutet wiederum auf eine Strukturresonanz der MKT hin. Man sieht in den Bereichen um 80 und 100Hz, dass die Zugbewegung in direkter Abhängigkeit von der Geschwindigkeit Einfluss nimmt.

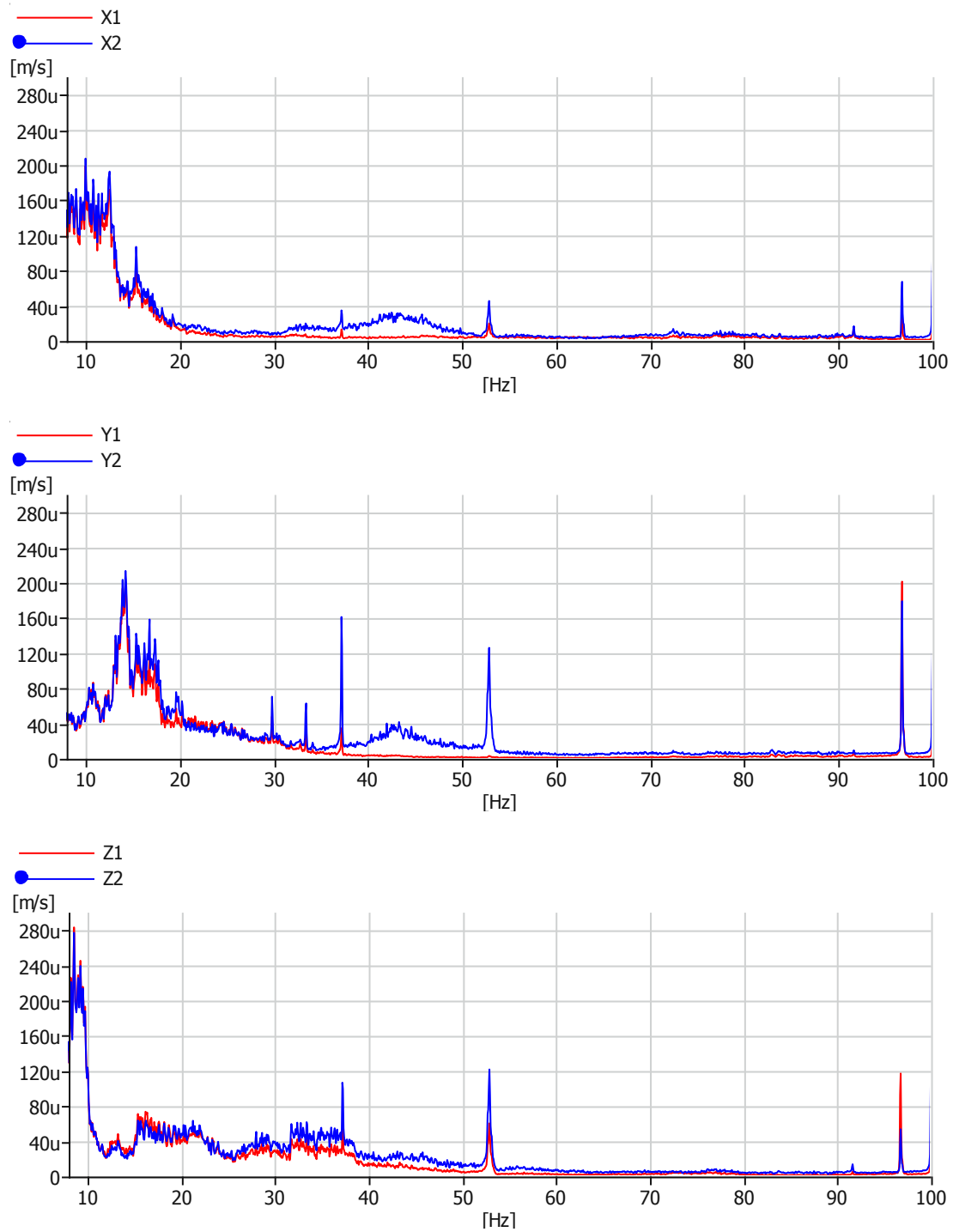


Abbildung 74: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160703-141736; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (μ := μ m)

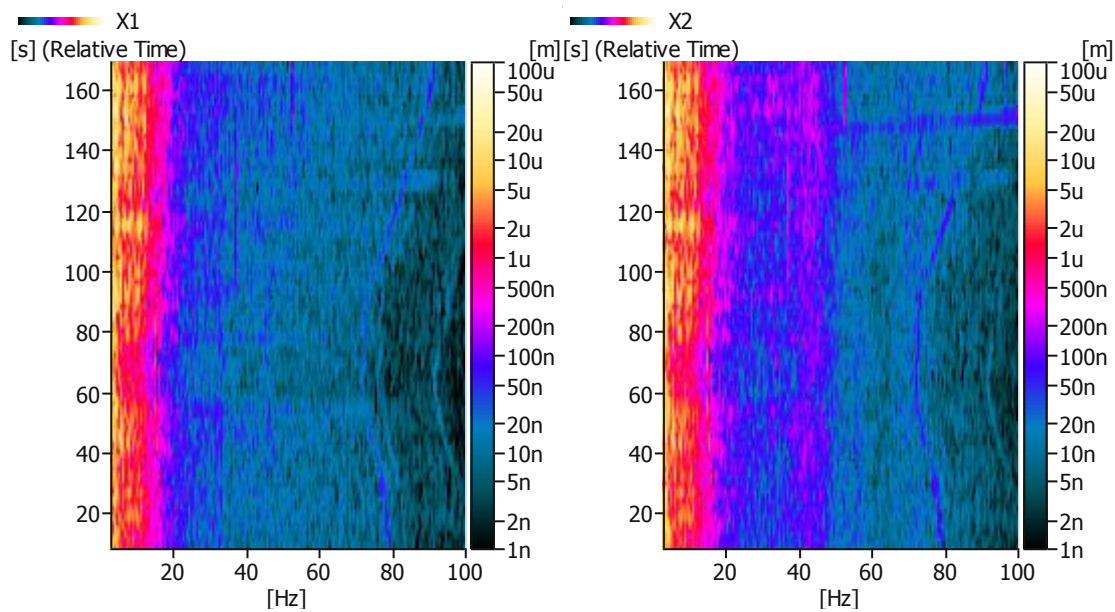


Abbildung 75: FFT vs. time der X-Richtung zu Datensatz 20160703-141736; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (X1) und an an der MKT (X2) (u:= μm , n:=nm)

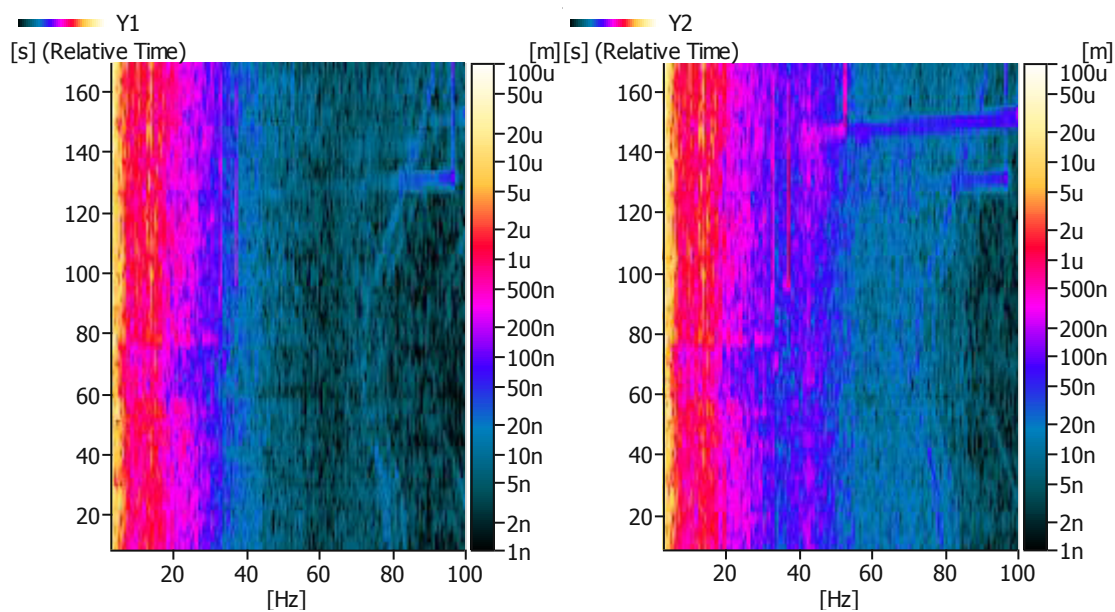


Abbildung 76: FFT vs. time der Y-Richtung zu Datensatz 20160703-141736; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an an der MKT (Y2) (u:= μm , n:=nm)

Die Auslenkungen sind relativ hoch, wie in Abbildung 77 ersichtlich. Wie man bereits in den Spektren sehen kann, sind vor allem niederfrequente Erregungen vorhanden. Dieser Datensatz war von den analysierten derjenige mit den höchsten Auslenkungen.

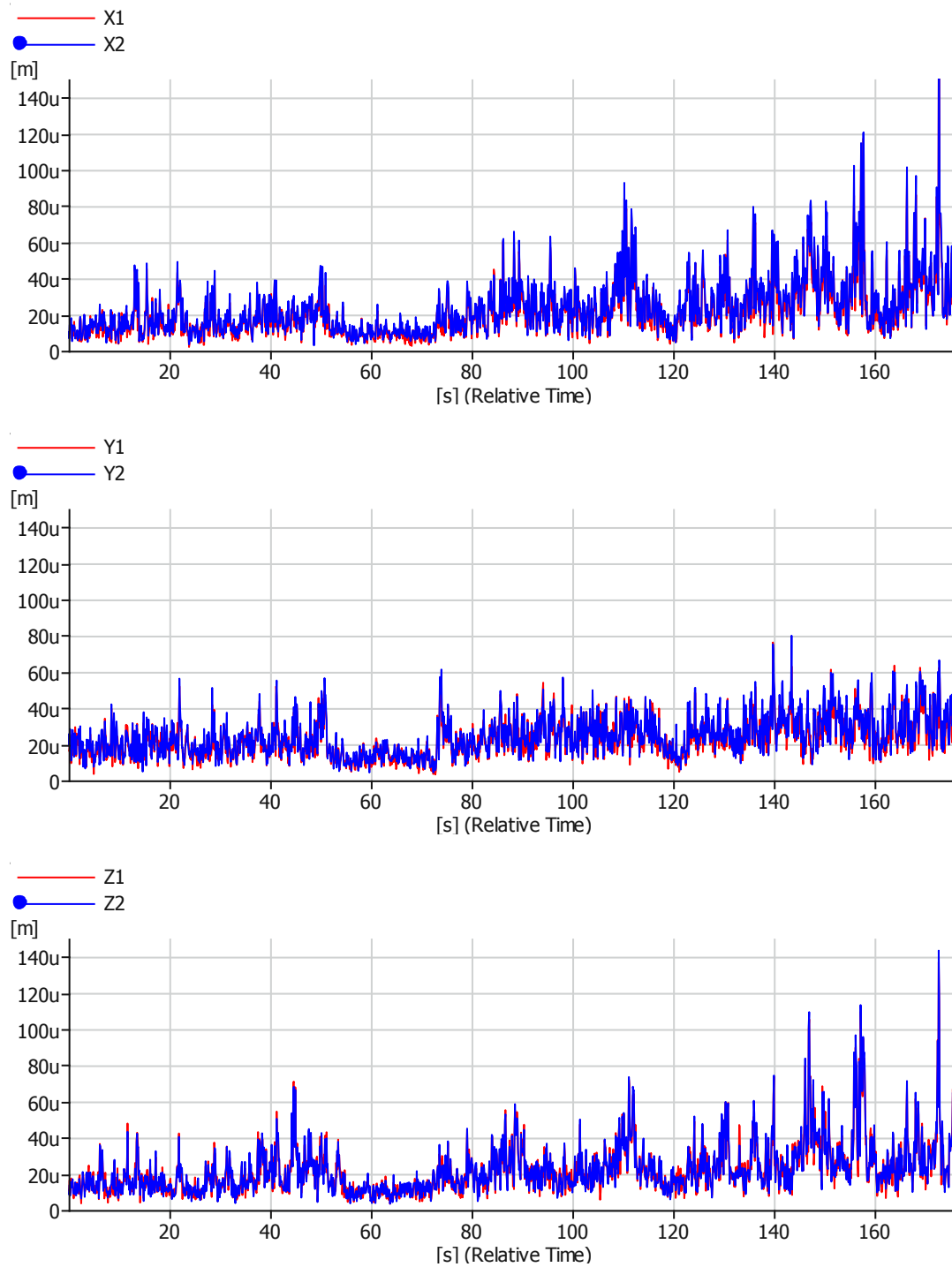


Abbildung 77: Auslenkungen über der Zeit zu Datensatz 20160703-141736; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung ($u:=\mu\text{m}$)

6.2.6.7 VERGLEICH DREHZAHL DER MKT UND GESCHWINDIGKEIT DES ZUGES

Im folgenden Spektrum (Abbildung 78) sind vier verschiedene Datensätze vereint. Ein Datensatz weist weder Drehzahl der MKT noch Zuggeschwindigkeit auf (in Rot dargestellt), einer eher konstante mittlere Drehzahl der MKT bei Stillstand des Zuges (in Blau dargestellt), einer nahezu konstante Geschwindigkeit des Zuges bei stillstehender Turbine (in Grün dargestellt) und der vierte nahezu konstante Drehzahl sowie Geschwindigkeit (in Orange dargestellt). Dargestellt ist jeweils der RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit des gemessenen Wertes des Sensors an der MKT in Achsrichtung Y.

Im Spektrum ist gut ersichtlich, dass die Unterschiede vor allem im niederen Frequenzbereich auftreten und hier vor allem der Zug Einfluss nimmt. Bei stillstehendem Zug ist der Einfluss gering, sowohl bei stillstehender als auch bei drehender Turbine. Wie bereits in den bisherigen Diagrammen ersichtlich war, hat vor allem die Bewegung des Zuges Einfluss auf die Schwingungen. Die Eigenfrequenz des Dämpferblockes ist für alle vier Fälle um die 30 Hz zu sehen. Dass dies sogar im Falle einer ausgeschalteten MKT und bei stillstehendem Zug zutrifft, wurde nicht vermutet. Vermutlich kommen hier, wie vorhin erwähnt, auch noch andere Einflüsse zu tragen, wie andere Nebenverbraucher außerhalb des Klimageräts. Das hügelige Frequenzband um etwa 44 Hz tritt vor allem bei Zugbewegung aber auch bei sich drehender MKT auf. Dies könnte durchaus auf eine Strukturresonanz der MKT hindeuten, die durch äußere Einflüsse erregt und dadurch in der Amplitude erhöht wird.

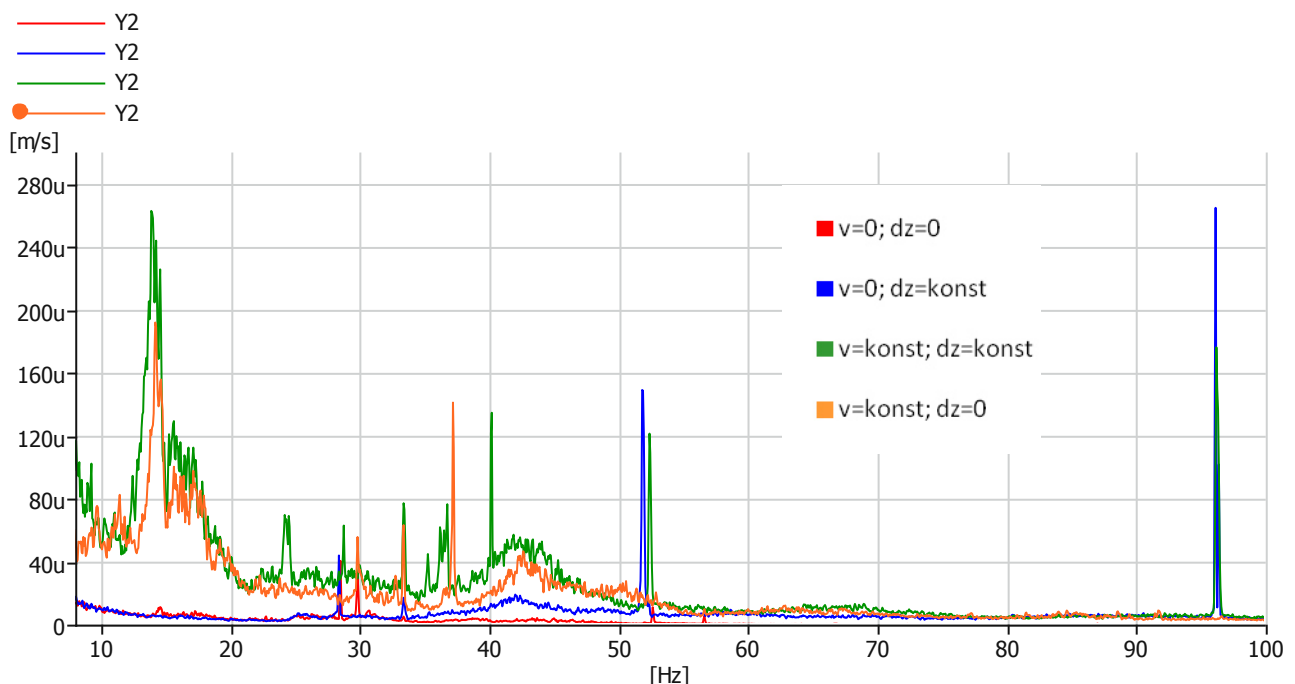


Abbildung 78: FFT-Spektren von Datensätze verschiedener Eigenschaften; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT in Y-Richtung (v -Geschwindigkeit des Zuges, dz -Drehzahl der MKT, $u=\mu\text{m}$)

6.2.6.8 VERGLEICH MIT GRENZKURVE

Liebherr-Aerospace Toulouse SAS führte einen Vibrationstest mit einer luftgestützten Kühlturbine durch. Die Durchmesser dieser im Test verwendeten Luftlager betrugen 62 mm. Die Kühlturbine rotierte mit 30.000 U/min während des Tests. Abbildung 79 zeigt die Ergebnisse des Belastungstests. Wie daraus ersichtlich sind in der Referenzkurve die sogenannte spektrale Leistungsdichte, oder kurz PSD, dargestellt in g^2/Hz . Der Grund für diese Darstellung ist die Unabhängigkeit der Parametereinstellungen der FFT. Das Leistungsdichtespektrum ergibt sich aus Division der Leistung durch die effektive Bandbreite beziehungsweise durch den Abstand der Frequenzlinien unter Berücksichtigung der Überschneidung durch die Fensterfunktion.

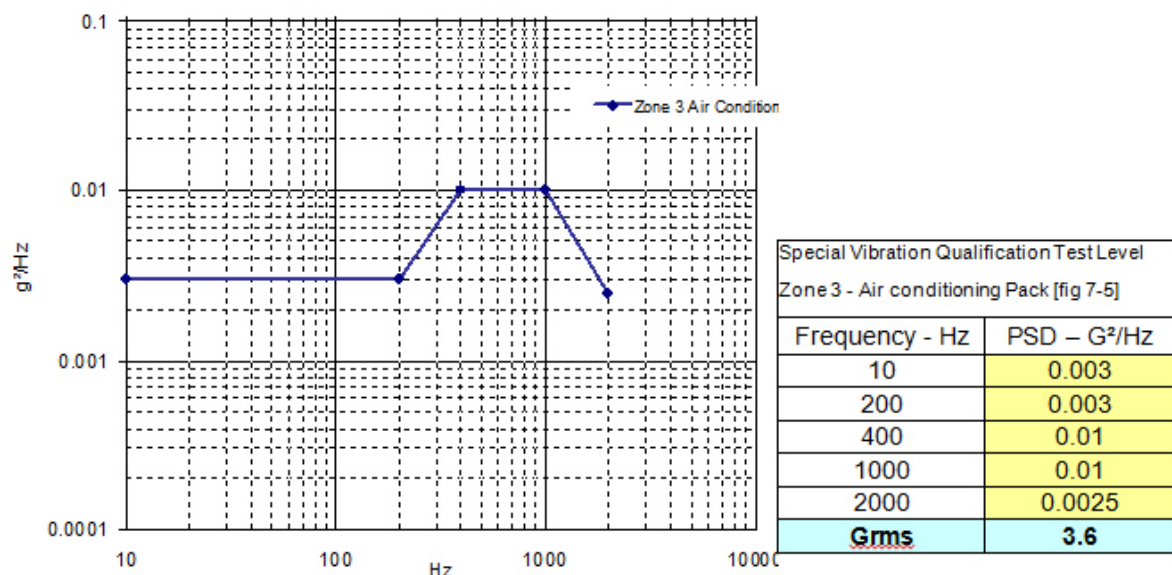


Abbildung 79: Grenzkurve des Luftlagers aus Vibrationstest ermittelt¹

Es wurden einige Datensätze des Vibrationstests des Messzuges analysiert und mit der Grenzkurve verglichen. Die Daten wurden aufgrund der hohen Beschleunigungsamplituden in den Vorschaubildern ausgewählt. Wie in Abbildung 80 ersichtlich, sind die Werte stets unterhalb der Grenzkurve. Berechnet wurden hier jeweils die Spitzenwerte, der höchste Wert zu jeder Frequenz, aus denen dann die Leistungsdichte erzeugt wurde. Mit dieser Grenzkurve ist noch keine endgültige Aussage der Machbarkeit der Luftlagerung möglich. Da die luftgelagerte motorisierte Kühlturbine Drehzahlen bis zu 74.000 U/min erreicht, sind noch weitere Tests mit höheren Drehzahlen sowie den äußeren Einflüssen des Zuges notwendig.

¹ Liebherr-Aerospace Toulouse SAS

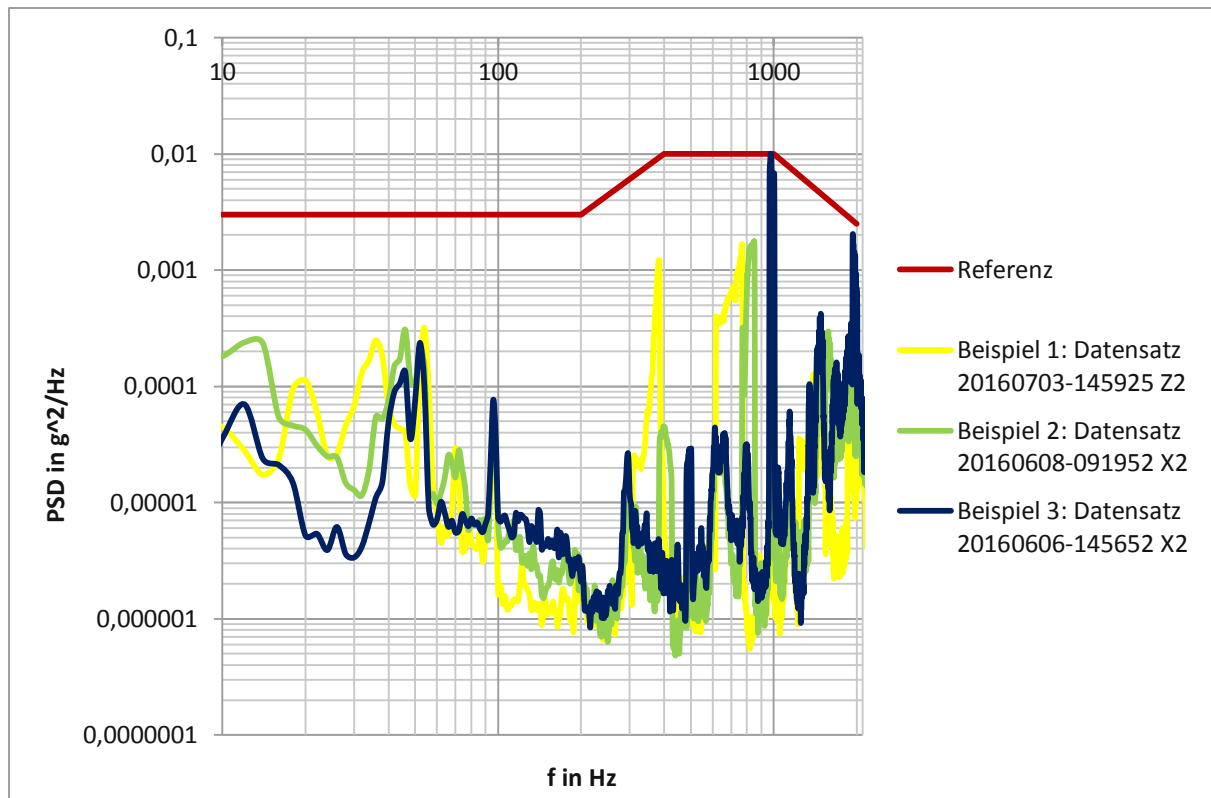


Abbildung 80: Grenzkurve des Luftlagers und PSD verschiedener Datensätze

6.2.7 ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für die gemessenen Auslenkungen vor allem der Zug verantwortlich ist. Unregelmäßigkeiten der Fahrstrecke sowie unterschiedliche Geschwindigkeiten werden hier eine große Rolle spielen. Der Einfluss der Drehzahlen des Kühl- und der Zuluftlüfter sowie der MKT konnten identifiziert werden. Eine genaue Aussage über die Auswirkung auf den Verschleiß eines Luftlagers kann nicht getroffen werden, da bei dieser Messung die Unwucht des Rotors von der aktiven Magnetlagerung kompensiert wurde. Im Vordergrund dieser Analyse stand die Ermittlung der äußeren Einflüsse auf die Maschine. Die Ergebnisse sind Ausgangspunkte für weitere Tests der luftgelagerten Kühlturbine. Liebherr-Aerospace Toulouse wird diese Analyse und Erkenntnisse nutzen um eine luftgelagerte MKT unter Laborbedingungen den gemessenen Erregungen zu unterziehen und somit umfassend zu testen. Für eine genauere Aussage, welche Schwingungen vom Zug auf die MKT abgegeben werden, wäre eine andere Position der Sensoren geeigneter. Dabei sollte ein Sensor direkt an der Gehäuseseite des Dämpferblockes sein und der andere auf der Turbinenseite des Dämpfers. In diesem Messaufbau befindet sich der verbaute Sensor an der MKT auf der gegenüberliegenden Seite des Dämpferblockes. Eine andere Positionierung der Aufnehmer war aus Platz- und Zugänglichkeitsgründen nicht möglich.

Geht man davon aus, dass für große Auslenkungen vor allem niederfrequente Schwingungen ausschlaggebend sind und man tiefere Frequenzbereiche als 8 Hz ermitteln möchte, ist die Messmethode mit einem IEPE-Sensor nicht die geeignetste. Da Beschleunigungen gemessen werden und die Auslenkungen mit zweimaliger Integration, was eine Division durch das Quadrat der jeweiligen Frequenz bedeutet, berechnet werden, ergeben sich große fehlerbehaftete Auslenkungen im niederfrequenten Bereich. Darum wären Messungen mittels Schwingwegaufnehmer, wobei hier die hohe Empfindlichkeit problematisch ist, oder statischer MEMS-Sensoren besser geeignet. Sensoren der MEMS-Bauweise (mikro-elektromechanische Systeme) beruhen auf dem kapazitiven Messprinzip und sind fähig statische Beschleunigungen zu messen.¹ Mit ihnen sind tiefere zulässige untere Grenzfrequenzen erreichbar. Für eine Schwingungsmessung im Schienenwesen ist laut Norm ein Frequenzbereich ab 4 Hz ausreichend, da Frequenzanteile unter 4 Hz nur in vernachlässigbarer Größe auftreten.² Laut Liebherr-Aerospace Toulouse beginnt eine Grenzkurve für die zulässigen Vibrationen eines Luftlagers bei 10 Hz. Somit ist das hier verwendete Messsystem ausreichend genau.

¹ Hofmann; 2013; S.106ff

² DIN 45672-1:2009-12

7 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Eine naheliegende Möglichkeit, um die Betriebssicherheit eines Luftlagers in der MKT in Schienenfahrzeugen zu gewährleisten, wäre das Lager nach Ablauf der Verschleißfestigkeit auszutauschen. Bei Annahme einer maximalen Anzahl an zulässigen Start/Stopp-Vorgängen von 100.000, wäre am Beispiel der virtuellen Streckenabfolge München-Hamburg im mittleren Fall (etwa 9.000 Start/Stopp pro Jahr) ein Tausch nach etwa 10 Jahren notwendig. Im Folgenden werden Handlungsempfehlungen für Maßnahmen aufgezeigt, die die Anzahl der Start/Stopp Vorgänge der Kühlturbine beziehungsweise die Anzahl der Lagerkontakte minimieren, um den Verschleiß einer Luftlagerung zu vermindern.

7.1 EXTERNE ENERGIEVERSORGUNG

Eine mögliche Maßnahme, die hohe Anzahl an Festkörperreibungskontakten zwischen Welle und Lagerschale zu verringern, könnte ein externer Energiespeicher sein. Hiermit könnten die hier genannten Trennstellen abgepuffert werden, also Strecken bei denen der Zug während der Fahrt nicht mit Strom versorgt wird. Eine solche Abpufferung sollte im Stande sein, sehr viel Energie in kurzer Zeit für die jeweilige Spannungsunterbrechung bereitzustellen.

Nach Versuchen am Funktionsmuster der luftgestützten Klimaanlage, dessen Komponenten denen im ICE 3 eingebauten entsprechen, benötigt man für die angenommene Minstdrehzahl für einen stabilen Luftpolster von etwa 15.000 U/min etwa 2,5 kW elektrische Leistung. Fügt man die Luftlagerverluste, die bei 15.000 U/min mit 500 W angenommen werden, hinzu, kommt man zu einem Ergebnis von 3 kW. Die Analyse der Dauer der Spannungsunterbrechungen hat einen Anteil der Unterbrechungen unter sechs Minuten von über 92 % ergeben, der Anteil der Unterbrechungen unter einer Minute liegt bei etwa 63 % (siehe Kapitel 5.2.3). Daher sollte eine etwaige externe Energieversorgung in der Lage sein, in kurzer Zeit mindestens 3 kW Energie für mindestens eine beziehungsweise sechs Minuten bereitzustellen, um ein Absinken der Welle und somit Festkörperreibung zu verhindern. Überträgt man die Häufigkeitsverteilung der Spannungsunterbrechungsdauer direkt auf die spannungsbedingten Ausschaltungen der MKT, so könnten mit einer solchen Speicherung zumindest 60 % beziehungsweise 90 %, der spannungsbedingten Start/Stopp-Zyklen verhindert werden.

Doppelschichtkondensatoren, auch Supercaps, Ultracaps oder Superkondensatoren genannt¹, könnten eine geeignete Maßnahme darstellen. Diese speichern Energie durch elektrochemische Vorgänge an der Fest-Flüssig-Grenzfläche zwischen einem elektronisch

¹ Tschöke, 2015, S.68

und einem ionisch leitenden Material.¹ Sie weisen genau dann Einsatzpotential auf, wenn große Leistungen über einen kurzen Zeitraum gespeichert oder zur Verfügung gestellt werden sollen und eine hohe Zyklenzahl gefordert ist.² In Abbildung 81 ist ein Vergleich der Leistung und des Zeitbereichs verschiedener Energiespeicher dargestellt. Wie daraus ersichtlich würden Superkondensatoren genau in den Einsatzbereich fallen, der für eine kurzfristige Abpufferung spannungsloser Trennstellen zutrifft.

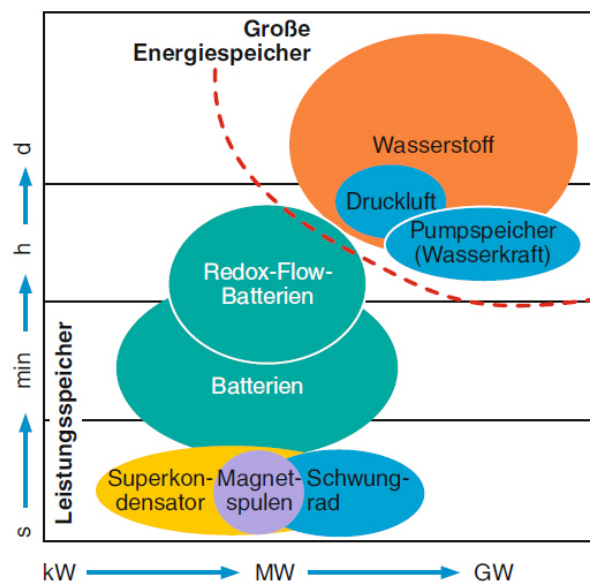


Abbildung 81: Leistung und Zeitbereich verschiedener Speichertechnologien³

Ist der Speicher entladen, so könnte er durch die freigesetzte Energie beim Bremsen oder durch das Unterwerk wieder aufgeladen werden. Nachteilig an diesen sogenannten Supercaps sind die noch sehr hohen Investitionskosten.⁴ Superkondensatoren werden bereits als Pufferspeicher in Straßenbahnen, Zügen, Hybridbussen oder Hybridantrieben in Baumaschinen verwendet.⁵ In nachfolgender Tabelle sind einige charakteristische Eigenschaften von Superkondensatoren zusammengefasst.

¹ Kurzweil, 2015, S.23

² Tschöke, 2015, S.68

³ Kurzweil, 2015, S.3

⁴ Tschöke, 2015, S.68

⁵ Tschöke, 2015, S.75

Tabelle 11 : charakteristische Eigenschaften von Superkondensatoren ^{1,2}

Betriebstemperatur	°C	-40 - +60
Energiedichte	Wh/kg	0,1 - 5
Leistungsdichte	kW/kg	0,1 - 10
Zyklenanzahl		100.00 - 500.000
Energieeffizienz	%	85 - 98
Selbstentladung	%/Monat	~15
Typische Zugriffszeit		Millisekunden
Typische Ladezeit	s	5 - 60

7.2 AEROSTATISCHES NOTLAGER

Eine Möglichkeit, den Großteil der spannungsbedingten und auch der regelungsbedingten Unterschreitungen der minimalen Drehzahl zu vermeiden, wäre eine Zuführung von Druckluft von außen in das Lager. Eine Abzweigung direkt vom Verdichter wäre nur mit einer zusätzlichen Filterung möglich, um Verunreinigungen zu vermeiden.³ Außerdem ist der Druck von ungefähr 1 bar nach dem Verdichter für eine aerostatische Lagerung wohl zu gering.

Der vorläufige Demonstrator der motorisierten Kühlturbine der luftgestützten Klimaanlage mit Luftlagerung hat folgende Abmaße:

Tabelle 12: Eigenschaften des Demonstrators der MKT mit Luftlager

Luftlager Durchmesser Turbinenseite [mm]	40
Luftlager Durchmesser Verdichterseite [mm]	50
Luftlager Breite [mm]	41
Masse des Rotors [kg]	9

¹ Erben, 2008, S.8

² Kurzweil, 2015, S.2

³ Bartz, 1993, S.8

Die spezifische Lagerbelastung oder der mittlere Lagerdruck errechnet sich zu¹:

$$\bar{p} = \frac{F_n}{d * b} \quad (29)$$

Mit der statischen Lagerkraft F_n und der projizierten Lagerfläche $d * b$, mit dem Lagerdurchmesser d und der Lagerbreite b .

Somit ergibt sich die spezifische Lagerkraft auf der Turbinenseite zu:

$$\bar{p} = \frac{9 * 9,81}{0,04 * 0,041} \approx 0,5 \text{ bar} \quad (30)$$

Mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Im Stillstand müssen mindestens 0,5 bar aufgebracht werden, um den Rotor anzuheben. Da hier keine Spaltverluste mit eingerechnet sind, und diese im Falle eines Luftlagers relativ hoch und kompliziert zu berechnen sind, wird hier auf übliche Speisedrücke von aerostatischen Lagern² sowie auf firmeninterne Erkenntnisse verwiesen. Laut Liebherr-Aerospace Toulouse erreicht man bei mittlerer Drehzahl einen Lagerdruck von 2,5 bar. Übliche Speisedrücke reichen bis maximal 10 bar und betragen je nach Anwendung oft 5, 6 oder 7 bar.³ Somit wird hier von einem mindestens notwendigen Speisedruck von 5 bar ausgegangen. Das bedeutet, zur Aufrechterhaltung des Lagerspaltes bei Unterschreitung der minimalen Drehzahl muss eine Druckluft mit 5 bar zur Verfügung stehen.

Die Idee ist ein zusätzliches Verdichterrad auf der Welle zu implementieren, das während des Betriebs der MKT Druckluft erzeugt, die in einem Ausgleichsbehälter gespeichert wird. Wird die minimale Drehzahl für den Luftpolsteraufbau des Luftlagers unterschritten, wird aus dem Ausgleichsbehälter Luft in ein zusätzliches aerostatisches Lager geblasen und so der Luftpolster aufrecht erhalten. Dazu wären mindestens drei Ventile nötig. Eine schematische Darstellung des Systems ist in Abbildung 82 angeführt. Das Magnetventil V_1 wird über den Druck im Ausgleichsbehälter gesteuert. Wird dieser zu groß, schaltet das Ventil druckfrei und die Druckluft wird an die Umgebung abgegeben. Das Regelventil V_2 , gesteuert über die Drehzahl der Welle, öffnet, wenn die kritische Drehzahl von 15.000 U/min unterschritten wird und bläst Druckluft in die aerostatischen Radiallager. Zuvor wird die Druckluft durch das Druckregelventil V_3 auf den notwendigen Speisedruck für das Lager geregelt.

¹ Künne, 2008, S.81

² Bartz, 1993, S.144

³ Bartz, 1993, S.18, S.29

Es wird angenommen, dass das aerodynamische Axiallager den Start/Stopp-Zyklen standhält, da im niedrigen Drehzahlbereich, beziehungsweise bei Stillstand nur geringe Axialbelastungen vorhanden sind. Daher wird hier nur ein zusätzliches aerostatisches Radiallager in Betracht gezogen.

Nachteilig ist hier nicht nur der Aufwand für die zusätzlichen Komponenten, sondern auch die Verschleißanfälligkeit der Ventile.

Mit dieser Methode könnte ein Großteil der Festkörperreibungskontakte in den Lagern verhindert werden. Die tatsächlichen Einschalt- und Ausschaltvorgänge, bei Abstellen des Zuges beispielsweise könnten so nicht abgepuffert werden und die Welle würde in die Lagerschale fallen, unter der Annahme, dass bei längerem Stillstand des Zuges der Druckbehälter druckfrei geschaltet wird.

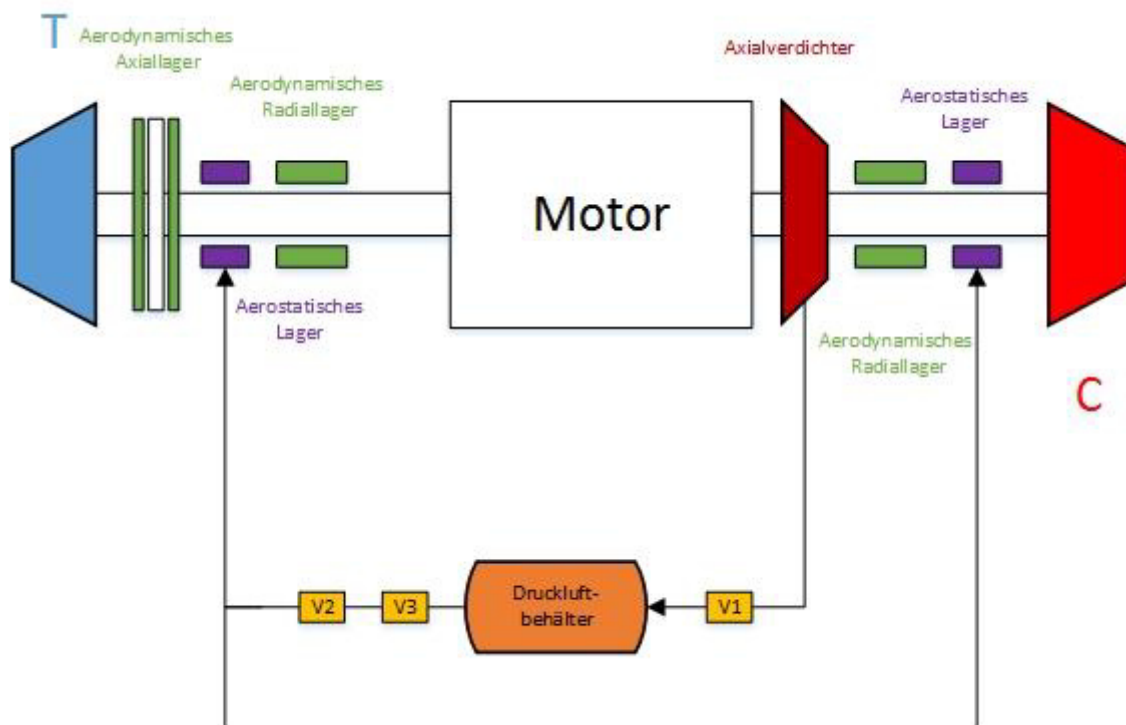


Abbildung 82: Schemaskizze der MKT mit einer aerostatischen Notlagerung; T-Turbine, C-Kompressor

7.3 REDUKTION DES MASSENDURCHFLUSSES

Eine Maßnahme für weniger regelungsbedingte Unterschreitungen der Drehzahl, die zur Festkörperreibung im Lager führen, könnte eine teilweise Verringerung des Massendurchflusses der Turbine sein. Die Idee dabei ist, bei gleichbleibender Drehzahl eine geringere Leistung zu erzeugen. Was wirtschaftlich nicht lukrativ klingt, könnte hier sehr wohl Nutzen bringen. Dadurch würde die minimale Drehzahl für den Erhalt des Luftpólsters der Luftlagerung erhalten bleiben. Dazu wäre eine sogenannte variable Turbinen-Geometrie (variable nozzle turbine - VNT) notwendig, bei der verstellbare Leitschaufeln im Einströmbereich der Turbine eingesetzt werden. Durch das Verstellen der Schaufeln, die vor dem Leitrad angebracht sind, ist ein variabler Massendurchfluss möglich.¹ Laut Liebherr-Aerospace Toulouse wird eine Mindestdrehzahl von 15.000 U/min angenommen um den Luftpólster im aerodynamischen Lager aufrecht zu erhalten beziehungsweise zu erzeugen. Unterschreitet die Turbomachine die minimal zulässige Drehzahl von 15.000 U/min im Betrieb, da eine geringere Kälteleistung benötigt wird, soll der Massendurchfluss gedrosselt werden. Das Ergebnis wäre ein höheres Druckverhältnis bei gleichbleibender Drehzahl. Die Turbine wird ausgeschaltet wenn die minimale Drehzahl von 3000 U/min unterschritten wird. Zu beachten ist hier die Pumpgrenze. Die Pumpgrenze teilt das Verdichterkennfeld in einen stabilen und einen instabilen Bereich. Der instabile Bereich wird bei Betriebspunkten des Verdichters mit verminderter Durchsatzmenge oder mit erhöhtem Enddruck erreicht. Bei Überschreitung dieser Pumpgrenze kann es zur Rückströmung und Vibrationen beziehungsweise Druckstößen kommen. Man hat bei der Reduktion des Durchsatzes nur begrenzten Spielraum. Abbildung 84 zeigt das Verdichterkennfeld mit eingezeichneter Verringerung des Durchsatzes bei gleichbleibender Drehzahl und dem selben Wirkungsgrad.

Problematisch ist hier die erhöhte Komplexität durch den benötigten elektrischen Antrieb zur Öffnung und Schließung des Einlasses. Keine fixen Turbinenschaufeln bedeuten höhere Verluste aufgrund des Spalts zwischen den fixen und rotierenden Teilen. Dies führt zu Leckagen und zu einer geringeren Effizienz der Turbine.

¹ Pucher; 2012; S.167

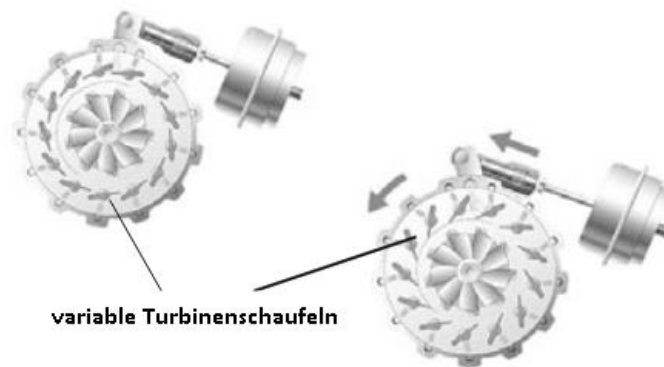


Abbildung 83: Verstellmechanismus einer Variable Turbinengeometrie (VNT)¹

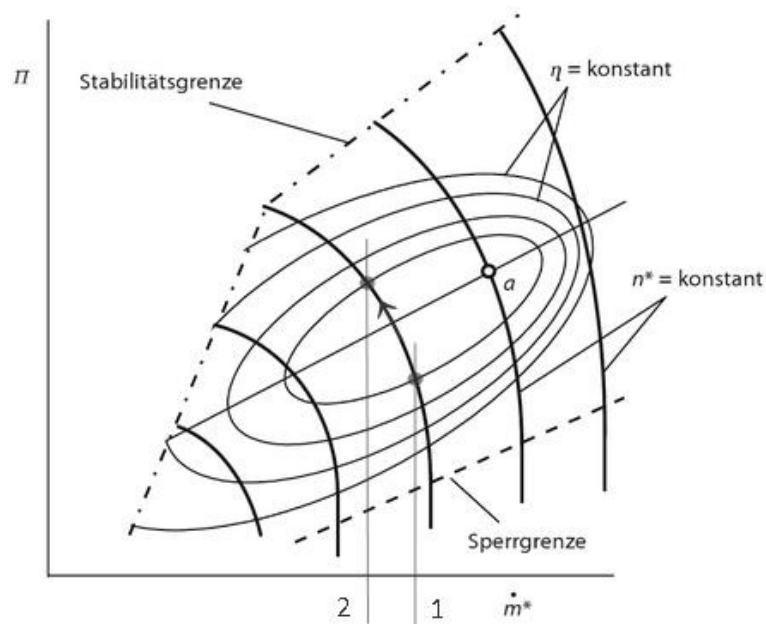


Abbildung 84: Verdichtercharakteristik mit Druckverhältnis Π , relativen reduzierten Massenstrom $\dot{m}^*$, Kennlinien konstanten Verdichterwirkungsgrades η , aerodynamischen Drehzahl n^* ²

¹ Wallentowitz ; 2010; S.40

² Lechner; 2010; S.362

7.4 LUFTLAGERBESCHICHTUNG

Um den Verschleiß während der Start- und Stoppphasen zu reduzieren wäre eine andere Gleitschicht möglich. Eine geeignete Gleitschicht muss eine hohe Härte und einen niedrigen Reibungskoeffizienten aufweisen. So kann sie zu einer Reduzierung von Reibung und Verschleiß führen. Im Folgenden werden einige Beschichtungsmöglichkeiten aufgeführt, die laut Literatur für diese Anwendung geeignet sind.

Eingesetzte Festschmierstoffe sind MoS₂-Schichten, Graphit, PTFE, kohlenstoffhaltige Schichten und für Hochtemperaturanwendungen auch hexagonales Bornitrid. Amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoff-Schichten werden wegen ihren diamantähnlichen Eigenschaften kurz mit DLC (diamond like carbon) bezeichnet. Je nach Legierungszugabe können unterschiedliche Eigenschaften erreicht werden. Durch Verwendung von nichtmetallischen Elementen etwa wie Si, B, F, O, N kann man sehr niedrige Reibkoeffizienten erreichen.¹

PTFE hat laut Literatur die geringste Gleitreibung aller Feststoffe.² Das aktuelle Luftlager bei Liebherr-Aerospace Toulouse weist eine Schutzschicht an der Deckfolie aus PTFE auf. Vermutlich könnte man die Verschleißigenschaften verbessern in dem man auch auf die Welle eine Gleitschicht aufträgt.

Möglich sind auch PTFE-haltige Metallschichten. PTFE-haltige Nickel-Phosphor-Schichten beispielsweise erhöhen die Verschleißfestigkeit von Bauteilen und weisen eine gute Trockenschmierung sowie niedrige Reibung auf.³

¹ Kerspe; 2000; S.296

² Christen; 2010; S.117

³ Kerspe; 2000; S.26

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aus wirtschaftlichen Gründen möchte Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG die aktive magnetische Lagerung einer motorisierten Kühlturbine einer luftgestützten Klimaanlage für Schienenfahrzeuge durch eine aerodynamische ersetzen. Die aerodynamische Lagerung, die innerhalb des Liebherr-Konzerns entwickelt wurde, wird seit Jahren erfolgreich in Kühlturbinen in Flugzeugen eingesetzt. Diese Arbeit hatte das Ziel, Schädigungspotentiale anzuführen, die bei einer Luftlagerung der Kühlturbine in Schienenfahrzeugen auftreten. Zum einen wurden die häufigen Ein- und Ausschaltvorgänge der Turbine, sei es aufgrund der Regelung oder aufgrund von Spannungsunterbrechungen, untersucht. Die Schaltvorgänge stellen deshalb Gefahrenpotentiale dar, da das aerodynamische Luftlager ohne äußere Hilfsmittel den Luftpolster zur Lagerung selbst aufbaut. Für eine stabile Lagerung benötigt es daher eine ausreichende Drehgeschwindigkeit des Rotors. Wird eine gewisse Drehzahl unterschritten, kommt es zur Festkörperreibung zwischen Welle und Stator, da durch den unzureichenden Druck im Lagerspalt der Luftpolster verschwindet und der Rotor in die Lagerschale absinkt. Jeder Fall einer solchen Festkörperreibung trägt zur Verkürzung der Lebensdauer des Lagers bei. Das bis jetzt verbaute aktive Magnetlager hingegen hält stets einen ausreichenden Lagerspalt mittels Regelung aufrecht. Dazu wird es im Falle einer Versorgungsspannungsunterbrechung mittels Batterie versorgt. Weiters wurden die Vibrationen und Stöße, die über ein Schienenfahrzeug übertragen werden, untersucht, da im Gegensatz zur magnetischen Lagerung diese Ausschläge beim Luftlager nicht aktiv durch Sensoren und Regler kompensiert werden. Dazu wurden zwei Beschleunigungssensoren in der luftgestützten Klimaanlage eines ICE 3 Hochgeschwindigkeitszuges der Deutschen Bahn angebracht. Bei dieser Vibrationsanalyse ging es darum, verschiedene Merkmale des Zuges und der Klimaanlage schwingungstechnisch zu analysieren, um für nachfolgende Labortests eine Basisanalyse bereitzustellen. Interessiert war man an den tatsächlich auftretenden Einflüssen von außen auf das Klimagerät. Es wurden verschiedene Einflüsse untersucht, wie unterschiedliche Geschwindigkeiten des Zuges, verschiedene Einflüsse der Anlage, wie die Drehzahl der Turbomaschine usw..

Heutige Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge haben eine Lebensdauer von 30 Jahren. Somit sollte das Luftlager ebenfalls eine Einsatzbetriebssicherheit von 30 Jahren aufweisen. Für die Anwendung in der Luftfahrt wurden Langzeittests durchgeführt, bei denen 100.000 Start-Stopp Zyklen des Luftlagers erfolgreich getestet wurden. Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit eines Luftlagers geht man also von einer maximal zulässigen Anzahl von 100.000 Start/Stopp-Zyklen aus. Da man in Flugzeugklimaanlagen niemals über 100.000 Ausschaltungen kommen wird, wurden mehr Start/Stopps nicht überprüft. Die Analyse der Schaltvorgänge der Klimaanlage ergab eine Erreichung dieser 100.000 Start/Stopps schon vor dem Ablauf von 30 Jahren. Ein Einsatz eines Luftlagers ohne weitere Maßnahmen beziehungsweise ohne weitere Tests des Luftlagers ist somit nicht möglich.

Für den Einsatz des Luftlagers in Schienenfahrzeugen wäre ein Langzeittest sinnvoll, der die Anzahl an tatsächlich maximal zulässigen Start/Stopps des Lagers testet. Womöglich sind es 200.000 vielleicht sogar 300.000 Start/Stopps, die das Lager nur mit Abnützungserscheinungen aushält. Geht man von einer Lebensdauer von 100.000 Start/Stopp-Zyklen der Lagerung aus, so muss das Lager innerhalb der 30-jährigen Lebensdauer von Schienenfahrzeugklimageräten gegenfalls mehrmals ausgetauscht werden oder es müssen Gegenmaßnahmen getroffen werden um die Anzahl dieser Ausschaltvorgänge zu minimieren, beziehungsweise deren Auswirkungen zu mindern.

Eine Möglichkeit wäre eine externe Energieversorgung für die Fälle, bei denen die Anlage nicht mit Strom versorgt wird und deshalb der Rotor in die Lagerschale absinkt. Eine solche Energieversorgung, die in kürzester Zeit viel Energie zur Verfügung stellen sollte, wird wohl in der Investition sehr teuer sein.

Eine externe Versorgung mit Druckluft des Lagers bei einer zu geringen Drehzahl, einer teilweisen aerostatischen Lagerung also, könnte ebenfalls eine Methode zur Verringerung der lebensdauerlimitierenden Faktoren sein. Zusätzliche Komponenten erhöhen aber die Investitionskosten und die Ventile stellen Verschleißteile dar.

Die variable Turbinengeometrie um den Durchsatz bei gleichbleibender Drehzahl zu minimieren, wäre eine Möglichkeit eine Vielzahl von Unterschreitungen der minimalen Drehzahl zu Erhaltung des Luftpolsters zu verhindern und würde somit den Verschleiß des Luftlagers vermindern. Der dadurch erhöhte Leistungsaufwand bei Niedriglastbetrieb muss der Verminderung des Verschleißes gegenübergestellt werden um die Wirtschaftlichkeit dieser Möglichkeit zu überprüfen.

Da die Vibrationsmessung an einer magnetisch gelagerten Anlage durchgeführt wurde, konnte eine direkte Aussage über den Verschleiß einer möglicherweise eingesetzten Luftlagerung nicht getroffen werden. Es wurde jedoch der Einfluss unterschiedlicher Merkmale untersucht, und die Erregungen ermittelt. Diese möchte man unter Laborbedingungen nachstellen und so die Betriebssicherheit eines Luftlagers ermitteln. Aus den Analysen ging hervor, dass vor allem die Bewegung des Zuges Einfluss auf die Schwingungserregung hat und zwar im niederen Frequenzbereich. Sehr niedrige Frequenzen (<8 Hz) zu messen stellte sich als Problem dar, da die Beschleunigungen gemessen wurden und hier hochfrequente Anteile betont werden und die Auslenkungen mittels zweimaliger Integration berechnet wurden. Da die Beschleunigungen mit dem Quadrat der jeweiligen Frequenz gewichtet sind, kommt es bei den Auslenkungen im unteren Frequenzbereich zu einer Division durch einen Wert nahe 0. Dies führt zu sehr hohen Ausschlägen, die nicht der Realität entsprechen. Um niedrigere Frequenzbereiche zureichender zu untersuchen bedarf es einer anderen Messmethode. Dafür könnte ein Schwingwegaufnehmer beziehungsweise ein MEMS-Sensor in Betracht gezogen werden. Laut Liebherr-Toulouse SAS ist die Analyse über einer Frequenz von 10 Hz aber ausreichend. Auch die Position der Bewegungssensoren ist nicht ideal. Um genauere Aussagen über die übertragenen Schwingungen vom Zug auf die Lagerung treffen zu können, müssten die Sensoren jeweils direkt vor und direkt nach dem

Dämpferblock der Kühlturbine angebracht sein. Eine solche Anbringung war hier aus Gründen der Zugänglichkeit aber nicht möglich.

Mit den durchgeführten Vibrationsanalysen und Erkenntnissen möchte Liebherr-Aerospace Toulouse in Zukunft Tests mit einem Shaker durchführen, der die ermittelten Erregungen auf eine luftgelagerte Klimaanlage aufbringen soll. So wird man Aussagen über die Machbarkeit einer Luftlagerung der motorisierten Kühlturbine der luftgestützten Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen treffen können.

Eine umfassende wirtschaftliche Analyse des Einsatzes des Luftlagers in der motorisierten Kühlturbine der Anlage wird in einer nachfolgenden Arbeit durchgeführt. Diese Arbeit wird ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Firma Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG Korneuburg abgefasst. Dort wird eine Vergleichsstudie von Luftlager und Magnetlager im Detail behandelt und der Faktor Kosten in den Mittelpunkt gestellt. Mit Rücksicht auf die Ergebnisse dieser Arbeit sollte eine Aussage über einen sinnvollen und wirtschaftlichen Betrieb des Luftlagers in der weiterführenden Arbeit getroffen werden können.

9 LITERATUR

- AGRAWAL G.L.: Foil air/gas bearing technology – an overview. The American Society of Mechanical Engineers, (1997). 97-GT-347.
- BARTZ, W. J. et al: Luftlagerungen und Magnetlager : Grundlagen und Anwendungen ; mit 17 Tabellen. Ehningen bei Böblingen.(2014).
- BARTZ, W. J. et al: Luftlagerungen : Grundlagen und Anwendungen. Ehningen bei Böblingen. (1993).
- BERLITZ, T.; Tielkes, T.: Klimatisierung von Schienenfahrzeugen – Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit, in: ZEVrail : Glasers Annalen ; Zeitschrift Für Das Gesamte System Bahn.137.10.(2013).
- BIESENACK, H.; George, G.; Hofmann, G.; Schmieder A.: Energieversorgung Elektrischer Bahnen: Mit 96 Tabellen. Wiesbaden (2006).
- BÖHME, H.; Recyclinggerechte Konstruktion von Reisezugwagen: mit 34 Tabellen. Renningen. Malmsheim.(2000).
- CHRISTEN, D. Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg. (2010).
- COOLEY, J.W., Tukey, J.W.: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Math. comput 19(90), 297–301 (1965).
- DB SYSTEMTECHNIK; DB AG; Goethe-Gymnasium Regensburg: Das System Bahn: Der ICE.(2013).
- DETERS, L.; Grote, K.; Feldhusen, J.: Gleitlagerungen; in: Dubbel : Taschenbuch Für Den Maschinenbau. (2014). G96-G110
- DIN EN 13129:2013-12: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs - Behaglichkeitsparameter und Typprüfung
- DIN EN 50367:2013-02: Bahnanwendungen - Zusammenwirken der Systeme - Technische Kriterien für das Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung für einen freien Zugang
- DIN EN 50388:2006-03: Bahnanwendungen - Bahnenergieversorgung und Fahrzeuge - Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität
- DIN 45672-1:2009-12: Schwingungsmessung in der Umgebung von Schienenverkehrswegen - Teil 1: Messverfahren

- ERBEN, S.: Wirtschaftlicher, Energetischer und ökologischer Vergleich von Technologien zur Speicherung elektrischer Energie. Technische Universität Wien. Dipl. Arbeit.(2008).
- FENDRICH, L.; Fengler, W.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin, Heidelberg (2013).
- FILIPOVIĆ, Z.: Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung. Berlin, Heidelberg (2015).
- FREYMAN, R.: Strukturdynamik: Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch. Berlin, Heidelberg.(2011).
- GASCH, R.; Nordmann, R.; Pfützner, H.: Rotordynamik. Berlin, Heidelberg (2006).
- HOFFMANN, R.; Wolff, M.: Intelligente Signalverarbeitung 1: Signalanalyse. Berlin, Heidelberg. (2014).
- HOFMANN, S.: Numerische Integration von Beschleunigungssignalen; IMW-Institutsmitteilung Nr. 38 (2013).
- IORDANOFF, I.; Said, B. B.; Mezianne, A.; Berthier, Y.: Effect of internal friction in the dynamic behavior of aerodynamic foil bearings. Tribology International, 41(5), (2008).S. 387-395.
- JANICKI, J.; Reinhard,H.; Rüffer, M.: Schienenfahrzeugtechnik (3., überarb. und erw. Aufl. ed.). Berlin: Bahn-Fachverl. (2013).
- JANICKI, J.; Reinhard,H.; Rüffer, M.: Schienenfahrzeugtechnik. Heidelberg: Eisenbahn-Fachverl. (2008).
- JÄNSCH, E.: Handbuch das System Bahn .Hamburg.(2016).
- KERSPE, J.,H.: Aufgaben und Verfahren in der Oberflächenbehandlung: Neue Entwicklungen in der Oberflächentechnik. Renningen.(2000).
- KHONSARI, M.; Booser, E.: Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication.(2008).
- KNOPP, A.; Luftlagerbeschichtung, Patent, DE 102011115249 A1. Veröff.: 28. März 2013(2011).
- KOLERUS, J.; Wassermann, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen : Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker ; mit 7 Tabelle. Renningen. (2014).
- KRAWANJA, A.; Aigner, R.: Die nächste Generation luftgestützter Klimasysteme, in: ZEVrail: Glasers Annalen ; Zeitschrift Für Das Gesamte System Bahn.138 .03.(2014).
- KÜNNE, B.: Köhler/Rögnitz Maschinenteile 2. Wiesbaden (2008).
- KURZWEIL, P.; Dietlmeier, O.: Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen. Wiesbaden.(2015).

- KUTTNER, T.: Praxiswissen Schwingungsmesstechnik. Wiesbaden.(2015).
- LECHNER, C.: Stationäre Gasturbinen. Berlin, Heidelberg. (2010).
- MARKERT, R.: Strukturdynamik. Aachen (2013).
- MEYER, M.: Signalverarbeitung: Analoge und Digitale Signale, Systeme und Filter. Wiesbaden. (2014).
- NIEMANN, G.; Winter, H.; Höhn, B.: Maschinenelemente: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Berlin, Heidelberg (2005).
- PUCHER, H.; Zinner, K.: Aufladung von Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Berechnungen, Ausführungen. Berlin.(2012).
- RISSE, S.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines doppelsphärischen Luftlagers aus Glaskeramik. Technische Universität Ilmenau .Diss.(2001).
- RODDECK,W.: Einführung in Die Mechatronik.Wiesbaden (2012).
- RUDOLPH, D.: Die Fourier-Transformation und ihre Anwendungen – Teil 3. In: WissenHeute (2004), Jg. 57 9/2004, S. 502 ff
- SCHIRMER, W.: Technischer Lärmschutz (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg. (2006).
- SCHWEITZER, G.; Traxler, A.; Bleuler, H.: Magnetlager; Grundlagen, Eigenschaften und Anwendungen berührungsfreier, elektromagnetsicher Lager. Berlin .Heidelberg.(1993).
- STEIMEL, A.: Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung: Grundlagen Der Praxis ; [mit Interaktivem EBook]. München (2014).
- STEINHILPER, W.; Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen Von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben. Berlin, Heidelberg.(2012).
- TSCHÖKE, H.: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen. Wiesbaden.(2015).
- UIC-KODEX, Nr. 553, Lüftung, Heizung und Klimatisierung der Reisezugwagen.(2003).
- WALLENTOWITZ, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges. Wiesbaden. (2010).
- WEBER, H.; Ulrich, H.: Laplace-, Fourier- Und Z-Transformation: Grundlagen und Anwendungen für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Wiesbaden. (2012).
- WITTEL, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. Wiesbaden (2015).

WOLPENSINGER, T., 2011. Kontrollsystem und Kontrollverfahren für Stromversorgungstrennstellen. Patentschrift DE102010002694 A1. Veröff.: 15.Sept. 2011.(2010).

ZELLER, P.: Handbuch Fahrzeugakustik. Wiesbaden. (2009).

10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Unternehmensstruktur der Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG ...7	7
Abbildung 2: luftgestütztes Kompaktklimagerät auf Transportrahmen ohne Deckel8	8
Abbildung 3: modellhafte Gegenüberstellung der Leistungsaufnahme konventioneller R134a und luftgestützter Klimaanlage über der Außentemperaturverteilung in Mitteleuropa9	9
Abbildung 4: Schematische Darstellung der luftgestützten Klimaanlage10	10
Abbildung 5: Luftführung im luftgestützten Kompaktklimagerät (1-Prozessluftereinlasskasten, 2-Motorisierte Kühlturbine, 3-Zuluftlüfter, 4-Wärmetauscher, 5-Hauptheizregister, 6-Prozessluftauslasskasten)11	11
Abbildung 6: Motorisierte Kühlturbine (1-Verdichtereintritt, 2-Turboverdichter, 3-Motorgehäuse, 4-Kühlluftzuführung, 5-Turbinenauslass zum Wärmetauscher, 6-Turbine, 7-Kühlluftabführung, 8-Verdichteraustritt)12	12
Abbildung 7: Wagenübersicht ICE 3 Baureihe 403, 1. Serie13	13
Abbildung 8: Einteilung der Lagerarten.....15	15
Abbildung 9: Funktionsprinzip einer aktiven Magnetlagerung17	17
Abbildung 10: Beispiel einer vollständigen aktiven Magnetlagerung einer Welle18	18
Abbildung 11: Blockdiagramm der MKT mit Magnetlagerung, T-Turbine, M-Motor, C-Kompressor19	19
Abbildung 12: Magnetlagerung der MKT (S2M), a-Radiallager, b-Axiallager.....19	19
Abbildung 13: Lage der Wellenmitte im Stillstand und bei steigender Drehzahl n22	22
Abbildung 14: Stribeck-Kurve (schematisch), f Reibungszahl, η Schmierstoffviskosität, ω Winkelgeschwindigkeit der Welle, p spezifische Lagerbelastung, $(\eta\omega/p)$ bezogener Reibungsdruck, $(\eta\omega/p)_{tr}$ bezogener Reibungsdruck beim Übergang von Misch- zur Flüssigkeitsreibung22	22
Abbildung 15: Verhalten der Lager im Bereich der Flüssigkeitsreibung23	23
Abbildung 16: Aerodynamisches Radialfolienlager, 1-Folienlager, 2-Lagergehäuse, 3-Lagerring, 4-Welle, 5-Wellfolie, 6-Deckfolie, 7-Gleitschicht, 8-Luftspalt26	26
Abbildung 17: Axialfolienlager und schematische Darstellung des Luftspalts, 1-Folienlager, 3-Lagerring, 4-Welle, 5-Wellfolie, 6-Deckfolie, 7-Gleitschicht, 8-Luftspalt, 9-Luftstrom27	27
Abbildung 18: Luftlager bei Liebherr-Aerospace, a-Radiallager, b-Axiallager27	27
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Luftlager in der MKT29	29
Abbildung 20: Fahrdrabtspannungen in Europa32	32
Abbildung 21: Das System Elektrische Bahn.....33	33
Abbildung 22: Prinzipschaltbild der Bahnenergieversorgung mit Sonderfrequenz 16,7Hz.....34	34
Abbildung 23: Varianten der Schutzstreckenausführung, a- $D < L$, b- $D > L$36	36
Abbildung 24: Vorgeschlagene Regelkurve und Begrenzungen für die Innentemperatur; 1-Mittelwert der Außentemperatur in °C, 2-Sollwert der Innentemperatur in °C, 3-vorgeschlagene Kurve, 4-obere Grenze, 5-untere Grenze38	38
Abbildung 25: Streckenauswertung des Messzuges Dez15-Feb16.....40	40
Abbildung 26: ICE Netz 2016 der DB42	42

Abbildung 27: Strecken des Messzuges mit gemessenen Trennstellen und Schutzstrecken laut DB	43
Abbildung 28: Häufigkeit der max. Dauer der gemessenen Versorgungsunterbrechungen ...	44
Abbildung 29: Auswertungen der gesamten Ausschalthäufigkeit der MKT, der spannungsbedingten, der regelungsbedingten, der Spannungsunterbrechungen sowie der Trennstellen über Monate	46
Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Dauer der Spannungsunterbrechungen	47
Abbildung 31: Streckennetz des Messzuges sowie der virtuellen Streckenabfolgen	49
Abbildung 32: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge München-Dortmund	51
Abbildung 33: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Köln-Basel	52
Abbildung 34: virtuelle Streckenabfolge Osten mit Streckenfrequentierung	53
Abbildung 35: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Osten	54
Abbildung 36: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge München-Hamburg	55
Abbildung 37: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Berlin-Stralsund	56
Abbildung 38: Verteilung der Häufigkeiten der Ausschaltvorgänge sowie Anzahl der Spannungsunterbrechungen und Schutzstrecken für Fall B für die virtuelle Streckenabfolge Erfurt-Berlin	57
Abbildung 39: MKT Start Stopps der virtuellen Streckenabfolgen über 30 Jahre	58
Abbildung 40: Komponenten der HVAC; 1-MKT, 2-Prozesslufteinlasskasten, 3-Kühlluftlüfter, 4-Zuluftlüfter, 5-Prozessluftschacht darunter montiert: Wärmetauscher, 6-Hauptheizregister, 7-Prozessluftauslasskasten	60
Abbildung 41: Ersatzsystem MKT; Dämpferblock und Gehäuse	61
Abbildung 42: Arten von Schwingungen	63
Abbildung 43: Darstellung eines Signals im Zeit- und Frequenzbereich	63
Abbildung 44: Vergleich des Schwingweges, der Schwinggeschwindigkeit und der Schwingbeschleunigung im Frequenzbereich	64
Abbildung 45: Identifikation von Schwingungsquellen mittels Frequenzanalyse	66
Abbildung 46: Zusammenhang zwischen FFT-Parameter	71
Abbildung 47: DFT eines periodischen Signals mit $T=1$, $f_s=8$, $N=8$ oben jeweils im Zeitbereich, unten im Frequenzbereich a- mit der Frequenz 3Hz, es liegen genau drei Perioden im Zeitfenster – kein Leakage-Effekt; b-mit der der Frequenz 2,3Hz, die Perioden liegen nicht genau im Zeitfenster – Leakage-Effekt	72

Abbildung 48: FFT-Fenster im Zeitbereich und Frequenzbereich.....	73
Abbildung 49: Leakage Effekt und seine Verminderung durch Anwenden einer Fensterfunktion, links: Zeitbereich, rechts: Frequenzbereich	73
Abbildung 50: Beschleunigungsaufnehmer a-Kompressionstyp, b-Delta Shear®; B-Basis, P- piezoelektrisches Element, M-seismische Masse, S-Spannelement.....	76
Abbildung 51: eingebautes Klimagerät mit offenem Deckel, Richtungen der Sensoren	77
Abbildung 52: Position der Sensoren, a-am Gehäuse, b-an der MKT	78
Abbildung 53: Datenfluss der Vibrationsanalyse	79
Abbildung 54: Beispiel Vorschaubild der Vibrationsmessung, a-der gemittelte Beschleunigungs-RMS der drei Achsrichtungen beider Sensoren, b-Zuggeschwindigkeit, c- Drehzahl der MKT, d-Drehzahl der Zuluftlüfter, e-Motorkühlhüfters, f- Spannungsversorgung der Nebenverbraucher, horizontal ist jeweils die Zeit dargestellt	80
Abbildung 55: Process Chain der Vibrationsanalyse	81
Abbildung 56: FFT-Spektrum mit verschiedener Filterauswahl; Auslenkungen ($u:=\mu\text{m}$)	82
Abbildung 57: Eigenschaften zu Datensatz 20160606-142958	84
Abbildung 58: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160606-142958; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung ($u:=\mu\text{m}$)	85
Abbildung 59: FFT vs. Time der Y-Richtung zu Datensatz 20160606-142958; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an der MKT (Y2) ($u:=\mu\text{m}$, $n:=\text{nm}$)	86
Abbildung 60: Auslenkung über der Zeit zu Datensatz 20160606-142958; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung($u:=\mu\text{m}$).....	87
Abbildung 61: Eigenschaften zu Datensatz 20160703-140838	88
Abbildung 62: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160703-140838; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung ($u:=\mu\text{m}$)	89
Abbildung 63: FFT vs. time der Y-Richtung zu Datensatz 20160703-140838; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an der MKT (Y2) ($u:=\mu\text{m}$, $n:=\text{nm}$, $p:=\text{pm}$).....	90
Abbildung 64: Auslenkung über der Zeit zu Datensatz 20160703-140838; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung ($u:=\mu\text{m}$).....	91
Abbildung 65: Eigenschaften zu Datensatz 20160608-111623	92
Abbildung 66: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160608-111623; ; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung ($u:=\mu\text{m}$)	93
Abbildung 67: FFT vs. time der Z-Richtung zu Datensatz 20160608-111623; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Z1) und an der MKT (Z2) ($u:=\mu\text{m}$, $n:=\text{nm}$, $p:=\text{pm}$).....	94
Abbildung 68: Auslenkungen über der Zeit zu Datensatz 20160608-111623; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung ($u:=\mu\text{m}$).....	95
Abbildung 69: Eigenschaften zu Datensatz 20160606-184353	96

Abbildung 70: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160606-184353; Schwingbeschleunigung gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (m:=mm)	97
Abbildung 71: FFT vs. time der Y-Richtung zu Datensatz 20160606-184353; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Schwingbeschleunigungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an an der MKT (Y2) (u:= μ m, m:=mm, u:= μ m).....	98
Abbildung 72: Auslenkungen über der Zeit zu Datensatz 20160606-184353; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (u:= μ m).....	99
Abbildung 73: Eigenschaften zu Datensatz 20160703-141736	100
Abbildung 74: FFT-Spektrum zu Datensatz 20160703-141736; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (u:= μ m)	101
Abbildung 75: FFT vs. time der X-Richtung zu Datensatz 20160703-141736; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (X1) und an an der MKT (X2) (u:= μ m, n:=nm)	102
Abbildung 76: FFT vs. time der Y-Richtung zu Datensatz 20160703-141736; Vertikale Achse links: Zeit, Vertikale Achse rechts Farbspektrum der Auslenkungen, horizontale Achse: Frequenz, gemessen am Gehäuse (Y1) und an an der MKT (Y2) (u:= μ m, n:=nm).....	102
Abbildung 77: Auslenkungen über der Zeit zu Datensatz 20160703-141736; gemessen an der MKT (Blau) und am Gehäuse (Rot) für jeweils X-,Y- und Z-Richtung (u:= μ m).....	103
Abbildung 78: FFT-Spektren von Datensätze verschiedener Eigenschaften; Schwinggeschwindigkeit gemessen an der MKT in Y-Richtung (v-Geschwindigkeit des Zuges, dz-Drehzahl der MKT, u:= μ m)	104
Abbildung 79: Grenzkurve des Luftlagers aus Vibrationstest ermittelt	105
Abbildung 80: Grenzkurve des Luftlagers und PSD verschiedener Datensätze	106
Abbildung 81: Leistung und Zeitbereich verschiedener Speichertechnologien	109
Abbildung 82: Schemaskizze der MKT mit einer aerostatischen Notlagerung; T-Turbine, C-Kompressor	112
Abbildung 83: Verstellmechanismus einer Variable Turbinengeometrie (VNT)	114
Abbildung 84: Verdichter kennfeld mit Druckverhältnis Π , relativen reduzierten Massenstrom $\dot{m}^*$, Kennlinien konstanten Verdichterwirkungsgrades η , aerodynamischen Drehzahl n^* ...	114

11 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Auswertungen der gesamten Ausschalthäufigkeit der MKT, der spannungsbedingten, der regelungsbedingten, der Spannungsunterbrechungen sowie der Trennstellen über Monate, * Daten der Versorgungsspannung nicht vorhanden – Daten des Batteriebetriebs wurde herangezogen, **keine Information verfügbar	45
Tabelle 2: Ausschalthäufigkeit der MKT über mehrere Jahre	47
Tabelle 3: Vorgehensweise der Berechnung der MKT Stopps der virtuellen Streckenabfolgen	50
Tabelle 4: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge München-Dortmund, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case.....	51
Tabelle 5: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Köln-Basel, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case.....	52
Tabelle 6: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Osten, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case	54
Tabelle 7: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für die virtuelle Streckenabfolge München-Hamburg, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case	55
Tabelle 8: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Berlin-Stralsund, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case	56
Tabelle 9: Häufigkeit der Ausschaltvorgänge der MKT für virtuelle Streckenabfolge Erfurt-Berlin, A-Worst Case, B-Average Case, C-Best Case.....	57
Tabelle 10: Eigenschaften Dämpfer	61
Tabelle 11 : charakteristische Eigenschaften von Superkondensatoren '	110
Tabelle 12: Eigenschaften des Demonstrators der MKT mit Luftlager	110

12 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AC	Wechselstrom
AMB	Aktives Magnetlager (Active Magnetic Bearing)
BR	Baureihe
C	Kompressor
DB	Deutsche Bahn
DC	Gleichstrom
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DLC	diamond like carbon
EW	Endwagen
FFT	Fast Fourier-Transformation
GPS	Global Positioning System
HVAC	Heating, Ventilation, Air Condition
ICE	Intercity Express
IEPE	Integrated Electronics Piezo Electric
KKG	Kompaktklimagerät
M	Motor
MBC	Magnetlager-Controller (Magnetic Bearing Controller)
MC	Motor Controller
MEMS	Microelectromechanical systems
MKT	Motorisierte Kühlturbine
MVB	multifunktionaler Fahrzeugbus (Multifunction Vehicle Bus)
MW	Mittelwagen
PSD	Spektrale Leistungsdichte (Power spectral density)
PTFE	Polytetrafluorethylen
RMS	Quadratischer Mittelwert (Root Mean Square)
SW	Stromrichterwagen
T	Turbine
TW	Trafowagen
Tz	Triebzug
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VCS	Kaltdampf Klimaanlage (Vapor Cycle System)
VNT	variable Turbinen Geometrie (variable nozzle turbine)
WRNV	Wechselrichter Nebenverbraucher