



Christian Dorfer, BSc

Wellenspannungen in Hydrogeneratoren

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Annette Mütze

Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen

Dipl.-Ing. Thomas Holzer

Graz, Oktober 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

Wellenspannungen in netzbetriebenen elektrischen Maschinen sind unerwünschte Effekte, welche Lagerströme und in weiterer Folge Lagererosion und somit schwerwiegende Schäden an den Lagerkomponenten der Maschine hervorrufen können. Diese Spannungen können auf unterschiedlichste Weisen hervorgerufen werden. Das Phänomen der Wellenspannungen ist bereits seit den 1920er Jahren bekannt. Der Fokus dieser Forschungsarbeiten liegt im Bereich von Turbogeneratoren. Die vorliegende Arbeit soll die bereits bekannten Mechanismen im Zusammenhang mit Hydrogeneratoren analysieren.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den möglichen Ursachen und Mechanismen für die Entstehung von Wellenspannungen in Hydrogeneratoren bei Netzbetrieb mit Erregermaschine bzw. statischer Erregung. Mittels einer Literaturstudie wird der vorherrschende wissenschaftliche Stand ermittelt und im Anschluss ein geeignetes, einfaches Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wellenspannungen bedingt durch magnetische Unsymmetrien in der Ständerblechsegmentierung vorgestellt. Dieses soll eine Vorausberechnung der zu erwartenden Wellenspannungen aufgrund der Konstruktionsdaten einer Maschine ermöglichen. Die berechneten Wellenspannungen werden dann mit den Messdaten der jeweiligen Generatoren verglichen. Im Anschluss wird eine Bewertung der Generatoren hinsichtlich der zu erwartenden Wellenspannungen abgegeben.

Abstract

Shaft voltages in electric machines present undesirable effects which may cause bearing currents and, as a result, erosion of the bearings. This may lead to major damage and failures in parts of a machine's bearings. These shaft voltages can be caused by several mechanisms. Shaft voltages are a phenomenon which have been widely known and studied since the 1920s. Most literature to date has dealt with shaft voltages in turbo generators. This thesis, however, analyzes the well-known mechanisms in the context of hydro generators.

This work investigates possible sources and mechanisms of shaft voltages in grid connected hydro generators. The excitation of these machines can be either a static excitation system or a directly shaft-connected DC-generator excitation. The current scientific situation is researched and transferred into a proper and simple calculation method for the determination of shaft voltages caused by magnetic imbalance in the stator lamination. The created calculation tool based on this method should calculate a projected value for the shaft voltages using the knowledge of the machine's construction data. The calculated shaft voltages are then compared to the measured shaft voltages of the corresponding generators. Finally, the calculation tool is validated.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Aufbau des Maschinensatzes	2
2.1	Ständer.....	3
2.2	Läufer	3
2.2.1	Vollpolläufer	4
2.2.2	Schenkelpolläufer	4
2.3	Erregereinrichtung.....	5
2.3.1	Statische Erregereinrichtung	6
2.3.2	Bürstenlose Erregereinrichtung	6
2.3.3	Erregung mit Erregermaschine.....	7
2.4	Turbine	8
3	Lagertechnik	9
3.1	Wälzlager	9
3.2	Gleitlager.....	12
3.2.1	Reibungsarten.....	14
3.2.2	Hydrodynamisches Gleitlager	16
3.2.3	Hydrostatisches Gleitlager.....	16
3.3	Zusammenfassung.....	18
4	Ursachen von Wellenspannungen und deren Auswirkungen	19
4.1	Allgemein	19
4.2	Entstehung von Wellenspannungen	19
4.2.1	Unsymmetrie im magnetischen Kreis	19
4.2.2	Elektrostatische Aufladung	22
4.2.3	Magnetische Flüsse in der Läuferwelle	24
4.2.4	Externe Spannungen in Läuferwicklungen.....	25
4.3	Arten von Wellenspannungen	25
4.3.1	Induktive Wellenspannungen	26
4.3.2	Kapazitive Wellenspannungen	26
4.4	Electric Discharge Machining	26

4.5	Beschädigungen.....	27
4.5.1	Beispiel für Wellenspannungen und deren Beschädigungen.....	29
4.6	Maßnahmen zur Abhilfe und Schadensminimierung	31
4.6.1	Dimensionierung und Fertigung	31
4.6.2	Wellenerdung	32
4.6.3	Entmagnetisierung.....	32
4.6.4	Isolation	32
4.6.5	Modernes Abhilfekonzept	32
4.7	Zusammenfassung.....	34
5	Berechnungsansatz und Umsetzung	37
5.1	Analyse der Teilbarkeitsregeln.....	37
5.1.1	Stoßstellen	37
5.1.2	Teilbarkeitsregeln nach Richter.....	39
5.1.3	Teilbarkeitsregeln nach Taegen.....	39
5.2	Berechnung der Wellenspannung nach Jordan.....	40
5.2.1	Bestimmen der magnetischen Größen im Ständerjoch.....	41
5.2.2	Bestimmen der Ständerrückeninduktion im Ständer unter Einbeziehung der Eiseneigenschaften.....	42
5.2.3	Bestimmen der fiktiven Wellenstromkennlinie.....	46
5.2.4	Berechnen der Wellenspannung	48
6	Berechnungsszenarien.....	50
6.1	Berechnungsszenario 1: Wellenspannung mit Segmentierung und Stoßfugen normaler Breite 51	
6.2	Berechnungsszenario 2: Wellenspannung mit Segmentierung und Stoßfugen verringerter Breite durch geänderten Weg der Feldlinien.....	51
6.3	Berechnungsszenario 3: Wellenspannung geteilter Ständerblechpakete ohne Segmentierung 52	
6.4	Berechnungsszenario 4: Wellenspannungsberechnung aus Berechnungsszenario 2 mit berücksichtiger Ständerteilung	52
6.5	Berechnungsszenario 5: Wellenspannungsberechnung aus Berechnungsszenario 1 mit berücksichtiger Ständerteilung	53

7	Ergebnisse und Auswertung	54
7.1	Teilbarkeitsregeln	54
7.1.1	Teilbarkeitsregeln nach Richter	54
7.1.2	Teilbarkeitsregeln nach Taegen	55
7.1.3	Auswertung	56
7.2	Berechnungsszenarien	57
7.2.1	Berechnungsszenario 1	58
7.2.2	Berechnungsszenario 2	59
7.2.3	Berechnungsszenario 3	60
7.2.4	Berechnungsszenario 4	61
7.2.5	Berechnungsszenario 5	63
7.3	Gegenüberstellung der Berechnungsszenarien	65
8	Zusammenfassung	71
9	Ausblick	73
10	Literaturverzeichnis	74
11	Abbildungsverzeichnis	76
12	Tabellenverzeichnis	78
13	Anhang	79
13.1	Berechnungstool Teilbarkeitsregeln	79
13.2	Berechnungstool Wellenspannungen	81
13.3	Funktion zur Interpolation der Magnetisierungskennlinie	87

Formelzeichen

A_j	m^2	Jochfläche
B_e	T	Flussdichte im Eisen
B_j	T	Flussdichte im Joch
B_z	T	Ringflussinduktion Ständerrücken
B_{z0}	T	Ringflussinduktion Ständerrücken bei $I_w=0$
b	m^2	Reibflächenbreite
C_b	F	Lagerkapazität
d	-, m	Verschiebungskonstante, Lager Innendurchmesser
D	m	Lager Außendurchmesser
F	N	Gewichtskraft
F_L	N	Kraftwirkung auf Lagerfläche
f_N	Hz	Netzfrequenz, Grundfrequenz
f_w	Hz	Frequenz der Wellenspannung
g	-	Teiler der Teilbarkeitsregeln
H	m	Fallhöhe
H_e	A/m	Feldstärke im Eisen
I_w	A/m	Wellenstrom
k	-	Geradensteigung
k_s	-	Überlappung
N_1	m	mittlerer Jochradius
n	-, min^{-1}	Drehzahl, Ordnungszahl der magnetischen Spannung
n_q	min^{-1}	spezifische Drehzahl
n_1	-	Drehrichtung
p	-	Polpaarzahl
p_e	N/m^2	Schmiermitteldruck
p_f	N/m^2	Taschendruck
p_p	N/m^2	Pumpendruck
P_1	-	Messpunkt, Stützstelle 1
P_2	-	Messpunkt, Stützstelle 2
Q	m^3/s	Wasserdurchflussmenge
r	m	Radius
S	-	Anzahl Stoßstellen Segmentierung
S_g	-	Gesamt wirksame Stoßstellen
S_S	-	Stoßstellenzahl durch Segmentierung
S_t	-	Stoßstellen bei geteiltem Ständerblechpaket
t	-	größter Teiler von S_g und p
U	V	Spannung
U_{ind}	V	Induzierte Spannung
U_{ref}	V	Referenzspannung
U_w	V	Wellenspannung
v	m/s	Geschwindigkeit

x	rad	Umlaufkoordinate
x_1, x_2	-	x-Koordinate
y_1, y_2	-	y-Koordinate
y_{mw}	-	Mittelwert y-Koordinate
w_{sp}	-	Windungen pro Phase
Δx	-	Differenz zweier x-Koordinaten
ε	m	Stoßfugenbreite
ε_A	m	Stoßfugenbreite Luft
ε_L	m	Stoßfugenbreite Lack
ε_{Lg}	m	Gesamt wirksame Stoßfugenbreite
ε_S	m	Stoßfugenbreite Segmentierung
μ_0	Vs/Am	magnetische Feldkonstante
ξ_{sp}	-	Wicklungsfaktor
ϕ	Vs	Magnetischer Fluss
ϕ_h	Vs	Hauptfluss
ϕ_j	Vs	Jochfluss

1 Einleitung

Bei der Bereitstellung elektrischer Energie stellen Synchrongeneratoren nach wie vor den wichtigsten Bestandteil dar. Sie speisen das Versorgungsnetz mit elektrischer Energie indem mechanische Energie aus einer Rotationsbewegung in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Stabilität der Versorgung mit Strom und Spannung hängt im hohen Maß von der Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Generatoren ab. Ein Ausfall von Generatoren durch Beschädigungen und ungeplante Wartungsarbeiten ist zu vermeiden. Wellenspannungen entstehen aus unvermeidbaren Toleranzen in Fertigung und Montage. Sie verursachen meist Schäden im Bereich der Lagerung von Generatoren und stellen somit eine Gefahr für den sicheren Betrieb eines Generators dar.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entstehung von Wellenspannungen, deren Auswirkungen auf den Betrieb und der Berechnung von Wellenspannungen verursacht durch magnetische Unsymmetrien in Hydrogeneratoren. Zu Beginn der Arbeit beschäftigt sich die Literaturrecherche mit dem Aufbau des Maschinensatzes eines Wasserkraftwerkes. Weiters werden die Ursachen von Wellenspannungen und die Auswirkungen auf den Generator und den Maschinenstrang betrachtet. Um eine möglichst frühe Aussage hinsichtlich der Wellenspannungen magnetischen Ursprungs treffen zu können, wird ein Werkzeug zur Vorausberechnung entwickelt, welches bereits im frühen Planungsstadium von Hydrogeneratoren eine Abschätzung möglicher Probleme durch Wellenspannungen aufzeigen soll. Hierdurch sollen etwaige Vorkehrungen zur Vermeidung von später kostenintensiven und teuren Ausfällen bzw. Wartungsarbeiten getroffen werden können. Diese Vorkehrungen stellen die Verfügbarkeit von Generatoren sicher und gewährleisten die Versorgungssicherheit mit elektrischer Energie. Wellenspannungen sind ein bereits lange bekanntes Phänomen. Erste Forschungen in diesem Zusammenhang haben ihren Ursprung um 1920. Die meisten dieser Arbeiten befassen sich mit Wellenspannungen in Turbogeneratoren. In neueren Forschungen werden vor allem Wellenspannungen in Verbindung mit dem Betrieb an Frequenzumrichtern untersucht. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird das vorhandene Wissen im Kontext mit Hydrogeneratoren bei Netzbetrieb analysiert.

Diese Arbeit beginnt mit einer Literaturrecherche zum Aufbau des Maschinenstranges eines Wasserkraftwerkes und beschäftigt sich im weiteren Verlauf mit den Besonderheiten dieses Aufbaues. Darauffolgend werden die Auslösemechanismen und Charakteristika von Wellenspannungen analysiert, wobei der Fokus auf Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien liegt. Im Anschluss wird eine Methode zur Berechnung dieser Wellenspannungen vorgestellt und damit einige Berechnungsszenarien durchgerechnet. Das Ende dieser Arbeit bildet ein Vergleich der einzelnen Ergebnisse aus den Berechnungsszenarien mit bekannten, gemessenen Wellenspannungen und eine Bewertung der Ergebnisse.

2 Aufbau des Maschinensatzes

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Hydrogeneratoren handelt es sich ausschließlich um elektrisch erregte Synchronmaschinen.

Ein Wasserkraftwerk enthält einen Antriebsstrang bestehend aus Turbine und Generator, welcher der Umwandlung von kinetischer Energie des Wassers in eine rotatorische Bewegung und in weiterer Folge der Erzeugung von elektrischer Energie dient. Beim Bau eines Wasserkraftwerkes gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Positionierung des Maschinensatzes: horizontal und vertikal. Ein beispielhafter Aufbau eines vertikalen Maschinensatzes findet sich in folgender Abbildung.

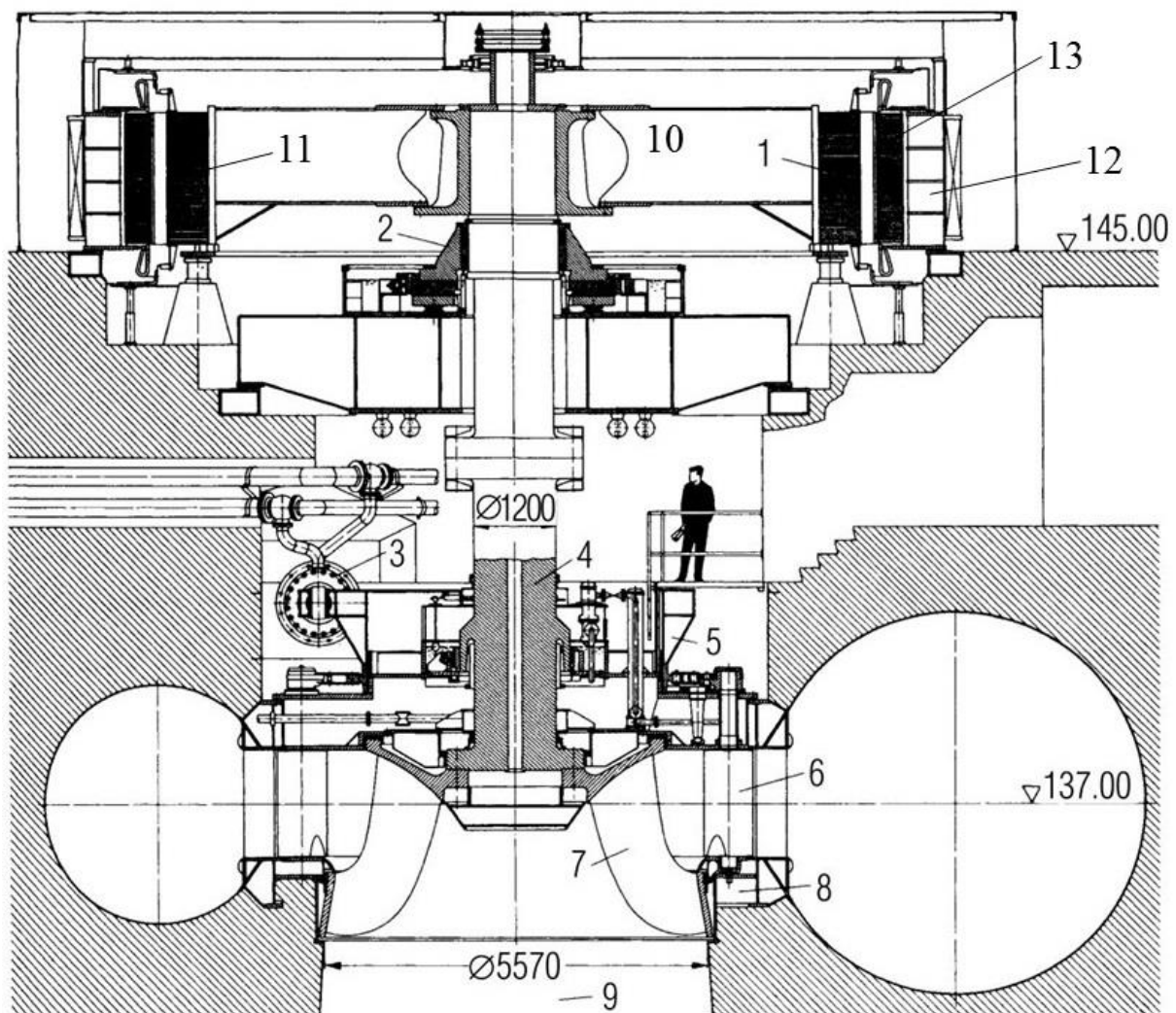


Abbildung 2-1: Vertikaler Maschinensatz mit Francisturbine; 1 Generator; 2 Spurlager; 3 Leitrad-Servomotor; 4 Führungslager; 5 Regelring; 6 Leitschaufeln; 7 Laufrad; 8 Traversring mit Spirale; 9 Saugrohr; 10 Läufer; 11 Läuferwicklung; 12 Ständerblechpaket; 13 Ständerwicklung [2]

Zusätzlich zu den oben dargestellten Komponenten enthält der Maschinensatz noch die nötigen Maschinenteile zur Erregung des Generators. Im Folgenden wird kurz auf die wichtigsten Baugruppen des Maschinensatzes eingegangen.

2.1 Ständer

Der Ständer nimmt die Drehstromwicklung auf. Er enthält das Ständerblechpaket, welches geblecht ausgeführt ist, um Verluste im Eisen zu reduzieren. Die Drehstromwicklung besteht aus gleichmäßig verteilten Leitern, welche in Nuten im Ständerblechpaket liegen und zu räumlich versetzten Wicklungssträngen verschalten werden.

Abbildung 2-2 zeigt eine mögliche Anordnung zur Erzeugung einer dreiphasigen sinusförmigen Spannung. Der Ständer enthält drei gleichmäßig am Umfang verteilte Wicklungsstränge. Diese bestehen aus mehreren verschalteten Einzelleitern. Der Läufer erzeugt ein Gleichfeld. Die Rotation des Läufers verursacht längs des Luftspalts eine sinusförmige Feldverteilung. Ist diese Rotation gleichförmig, so werden in den einzelnen Ständerspulen sinusförmige Spannungen induziert. Diese addieren sich innerhalb eines Wicklungsstranges zu einer resultierenden Spannung. (vgl. [3])

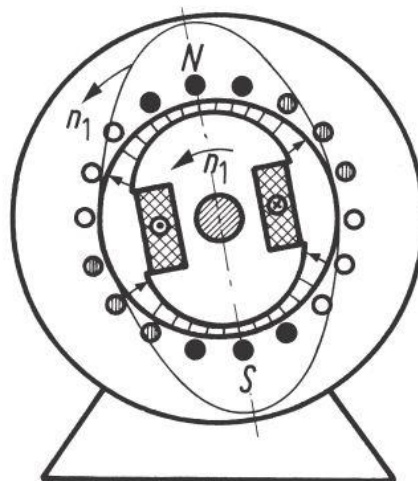


Abbildung 2-2: „Erzeugung einer mehrphasigen sinusförmigen Spannung (gleich gezeichnete Leiter gehören zu einem gemeinsamen Strang).“ [3]

2.2 Läufer

Der Läufer dient, wie bereits erwähnt, der Erzeugung eines Gleichfeldes. Dieses Feld kann durch unterschiedliche Läuferkonzepte realisiert werden, die jeweils konstruktive und anwendungstechnische Unterschiede haben, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird. Vollpolläufer und Schenkelpolläufer erzeugen das zur Funktion nötige magnetische Gleichfeld mittels elektrischem Strom in Spulen. Man spricht von elektrischer Erregung.

2.2.1 Vollpolläufer

Der Vollpolläufer wird vor allem in Generatoren eingesetzt, in denen hohe Drehzahlen nötig sind. Dies ist vor allem im Bereich von thermischen Kraftwerken der Fall. Vollpolläufer werden dort als Turbogeneratoren bezeichnet. Der Einsatzbereich deckt aber sehr wohl auch eine Verwendung in Hydrogeneratoren ab. Als Beispiele können hier Kernkraftwerke und Kohlekraftwerke genannt werden. Die hier benötigten Drehzahlen von bis zu 3000 min^{-1} sind bei Vollpolläufern aufgrund der Fliehkräfte technisch beherrschbar. Vollpolläufer weisen darum einen geringen Durchmesser bei gleichzeitig längerer Ausführung auf. Bedingt durch die hohen Drehzahlen sind sie meist zwei- oder vierpolig ausgeführt. Der Läufer wird hier nicht geblecht, sondern in massiver Bauweise ausgeführt um die mechanische Festigkeit zu erhöhen. Verglichen mit einem geblechten Schenkelpolläufer verschlechtert dies, aufgrund des Gleichfeldes der Erregung, die elektrischen Eigenschaften kaum. Die Herstellungskosten sind aber, begründet durch aufwändige Nutfräsungen, kostenintensiver als Blechstanzen. Abbildung 2-3 zeigt den Eisenschnitt eines 2-poligen Vollpolläufers. Die abgebildeten Nutfräsungen beinhalten die Erregerwicklungen zur Erzeugung eines Gleichfeldes. (vgl. [1])

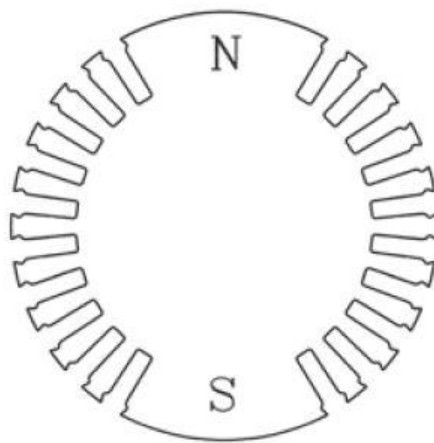


Abbildung 2-3: Beispiel eines zweipoligen Vollpolläufers [1]

2.2.2 Schenkelpolläufer

Der Schenkelpolläufer wird auch Polrad genannt. Hier ist der Pol geblecht ausgeführt und wird am Läuferkörper verschraubt, oder, bei höheren Drehzahlen, mittels Schwalbenschwanz oder Hammerkopfverbindungen befestigt. Im Gegensatz zu den Vollpolläufern beschränkt sich die mögliche Drehzahl auf den Bereich bis 1000 min^{-1} . Für Hydrogeneratoren wird dieser Läuferartyp eingesetzt. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit ausschließlich die Schenkelpolmaschine betrachtet. Die Polzahl dieser Läufer kann sehr stark variieren, abhängig vom Einsatzgebiet bzw. verwendeter Wasserturbine. Pelton-turbinen erreichen Drehzahlen bis 1000 min^{-1} . Dies erfordert bei einer gewünschten Frequenz von 50 Hz einen sechspoligen Läufer. Eine Kaplan-turbine kann auch mit

100 min⁻¹ (beispielsweise) rotieren. Hier würde die Polzahl 60 betragen. Bei diesem Läufer-typ ist, in Kombination mit dem Einsatzgebiet als Hydrogenerator, eine Eigenheit zu berücksichtigen: bei Lastabwürfen ist Wasser langsamer zurückzeregeln als Dampf. Es kommt zu Drehzahlüberhöhungen, welche konstruktionstechnisch berücksichtigt werden müssen. Untenstehend befindet sich eine schematische Darstellung eines Schenkelpolläufers. (vgl. [1])

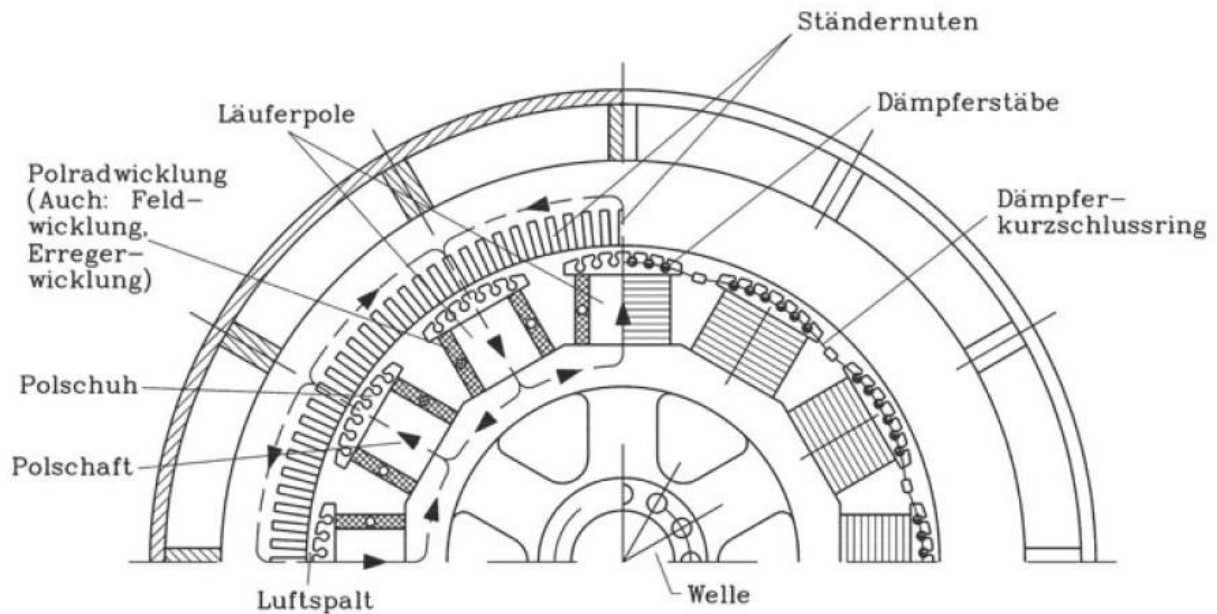


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Schenkelpolläufers [1]

2.3 Erregereinrichtung

Mit Hilfe des Erregersystems soll ein magnetisches Gleichfeld erzeugt werden. Dieses ist für die Induktion einer sinusförmigen Spannung und somit Funktionsweise des Generators von essenzieller Bedeutung. Der Übersichtlichkeit halber wird im Folgenden nur auf die aktuell verwendeten Erregerarten eingegangen. Moderne Erregersysteme basieren fast ausschließlich auf Schaltungen der Leistungselektronik, welche nachstehend vorgestellt werden. (vgl. [3])

2.3.1 Statische Erregereinrichtung

Die statische Erregereinrichtung bezieht ihre Energie nicht aus einer rotierenden Erregermaschine, sondern entnimmt die Leistung über einen Transformator aus einem Eigenbedarfsnetz. Vorteil dieser Lösung ist eine dynamische Regelung des Erregerbedarfs auf anfallende Betriebszustände. (vgl. [3])

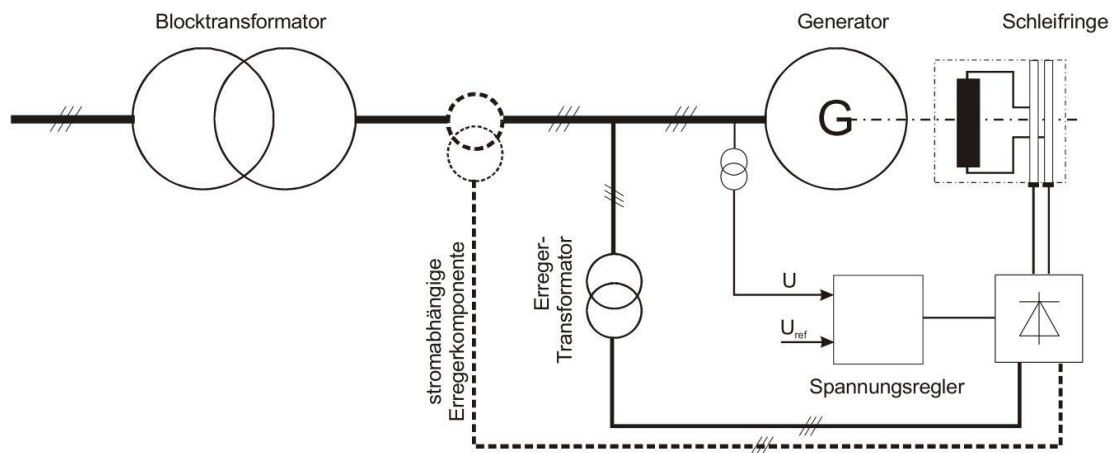


Abbildung 2-5: Statische Erregung [4]

Abbildung 2-5 zeigt den schematischen Aufbau der statischen Erregung. Der Erreger-Transformator speist einen Gleichrichter. Dieser erzeugt aus der eingangsseitigen Wechselspannung eine variable Gleichspannung und führt diese über Schleifringe der Erregerwicklung zu. Die Regelung des Erregerbedarfs erfolgt über einen Spannungsregler.

2.3.2 Bürstenlose Erregereinrichtung

Da bei steigender Maschinengröße auch der Erregerbedarf zunimmt, können die in den beiden vorherigen Techniken nötigen Schleifringe, welche die Erregerleistung auf den Läufer übertragen, an die technischen Grenzen stoßen. Die Schleifringe sind verlustbehaftet und hohe Erregerleistung führt zu voluminösen Bürstenkonstruktionen. Um diese Nachteile zu umgehen, setzt man auf einen rotierenden Diodengleichrichter, welcher von einem Außenpolgenerator gespeist wird. Es sind somit keine Bürsten notwendig. Bezüglich der Regelung gilt die selbe Einschränkung wie bei der Verwendung einer Erregermaschine. Ein weiterer Nachteil stellt jene Tatsache dar, dass der Generator zu Wartungszwecken stillgesetzt werden muss. (vgl. [3])

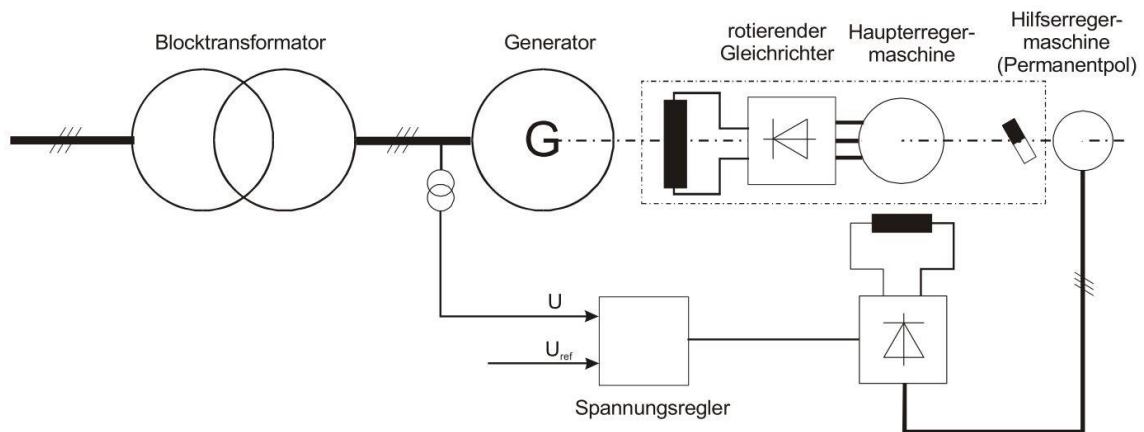


Abbildung 2-6: Bürstenlose Erregung [4]

2.3.3 Erregung mit Erregermaschine

Die Erregung wird unter Zuhilfenahme eines zusätzlich auf der Welle mitlaufenden Generators erzeugt. Bei diesem Generator handelt es sich um einen sogenannten Innenpolläufer – Generator. Die Ständerspannung der Erregermaschine wird gleichgerichtet und liefert somit die Versorgungsspannung für die Erregung des Hauptgenerators. Zusätzlich besteht die Möglichkeit statt der Gleichrichtung einen Umrichter einzusetzen, dieser ermöglicht die Regelung des Erregerbedarfs, wobei zu beachten ist, dass nicht die selbe Regeldynamik, verglichen zur statischen Erregung, erreicht werden kann. (vgl. [3])

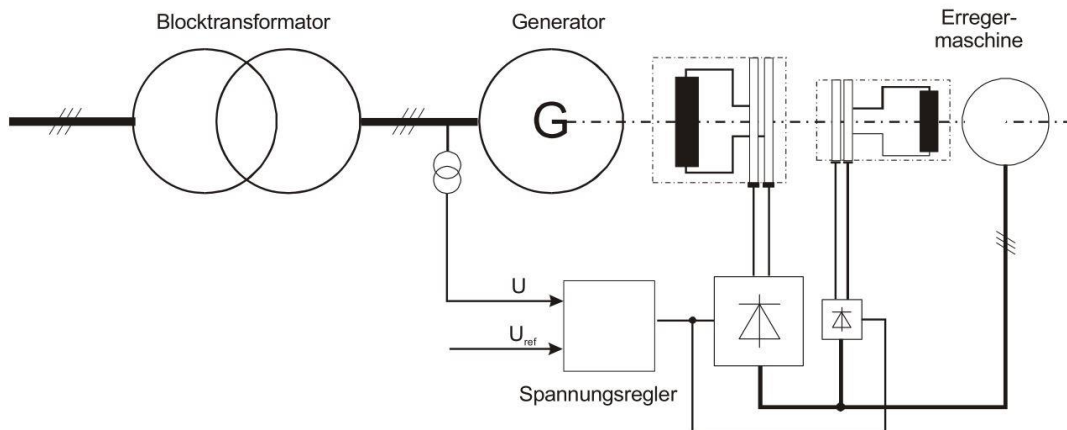


Abbildung 2-7: Erregung mit Erregermaschine [4]

2.4 Turbine

Die letzte Komponente des Maschinenstrangs ist die Turbine. Aufgabe der Turbine ist die Umwandlung der kinetischen Energie des Wassers in eine Rotationsbewegung, welche die Generatorwelle antreibt. Eingesetzt werden fast ausschließlich folgende Typen:

- Pelton turbine
- Francis turbine
- Kaplan turbine

Die Wahl der Turbine hängt von dem gewünschten Anwendungsgebiet und technischen Voraussetzungen des Kraftwerks ab. Folgende Abbildung stellt den jeweiligen Anwendungsbereich dar. (vgl. [23])

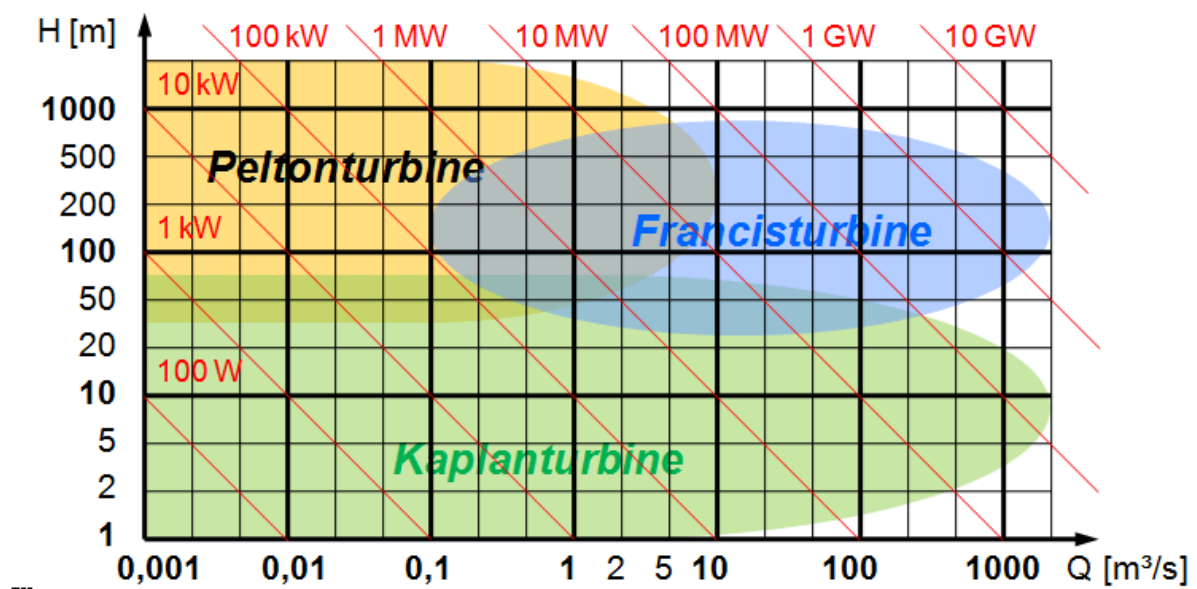


Abbildung 2-6: Anwendungsbereiche der Turbinenarten [23]

Abbildung 2-8 lässt somit die Einsatzbereiche der jeweiligen Turbinentechniken erkennen. Pelton turbine kommen dort zum Einsatz, wo mit großen Fallhöhen H und Drehzahlen n gearbeitet wird. Francis turbine decken den mittleren Bereich von Fallhöhe und Durchflussmenge Q ab, während die Kaplan turbine bei niedrigen Drehzahlen und großen Durchflussmengen eingesetzt wird.

3 Lagertechnik

Die Maschinenelemente des Antriebsstranges müssen für ihre Funktion drehbar zueinander angeordnet sein, benötigen aber eine Führung bzw. Abstützung um an Ort und Stelle zu bleiben. Diese Aufgabe übernehmen hauptsächlich Lager. Im Zuge dieser Arbeit kommt Lagern eine besondere Bedeutung zu. Sie sind von essenzieller Bedeutung für einen ordnungsgemäßen Betrieb und werden von Wellenspannungen besonderen Beanspruchungen ausgesetzt. (vgl. [8])

Im Antriebsstrang kommt es an den Lagerungspunkten zu einer Relativbewegung zwischen Welle und den Führungsstellen. Aus dieser Bewegung folgt stets Reibung und somit Verschleiss. Eine optimale Lagerung soll diese Verluste minimieren und somit für einen sicheren und effizienten Betrieb sorgen. Reibungsverluste werden minimiert, wenn sich Lagerzapfen (Welle) und Lagerkörper nicht berühren. Um dies zu erreichen wird im weiteren Verlauf auf die zwei gängigsten Arten eingegangen. Gleitlager arbeiten mit einem geschlossenen Schmierfilm und Wälzlager über die Anordnung von Wälzkörpern. (vgl. [8])

Abbildung 3-1 zeigt den konzeptionellen Unterschied von Wälz- und Gleitlagern.

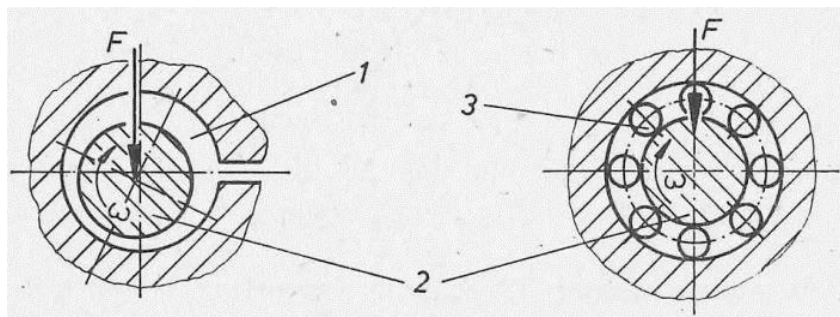


Abbildung 3-1: Berührungsvermeidung bei Gleit- und Wälzlager
1 Schmierfilm, 2 Zapfen/ Welle, 3 Wälzlagerkörper [7]

3.1 Wälzlager

Bei Wälzlagern übernehmen die sogenannten Wälzkörper die Abstützung des Zapfens im Lager. Im Gegensatz zu Gleitlagern herrscht hier Rollreibung vor, welche von Gleitreibungsanteilen überlagert wird. Die auftretenden Rollreibungsverluste entstehen zum einen durch Aufwulstung des elastischen Werkstoffes der Rollbahn vor dem Wälzkörper und zum anderen durch Verformungen des Wälzkörpers. (vgl. [7])

Ein Wälzlager setzt sich im Allgemeinen aus folgenden Komponenten zusammen:

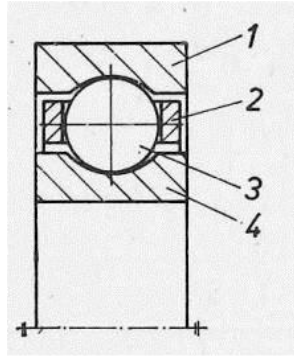


Abbildung 3-2: Radialwälzlager, 1 Außenring, 2 Käfig, 3 Wälzkörper, 4 Innenlager [7]

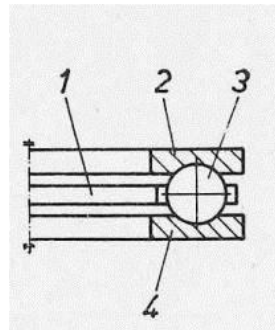


Abbildung 3-3: Axialwälzlager, 1 Käfig, 2 Wellenscheibe, 3 Wälzkörper, 4 Gehäusescheibe [7]

Je nach Wälzlagerbauart kommen unterschiedliche Wälzkörper zum Einsatz. Kugeln haben beispielsweise eine kleine Kontaktfläche und können somit sehr große Hertz'sche Pressungskräfte hervorrufen. Diese Pressungskräfte sind bei Kugeln besonders groß, da dies idealerweise nur in einem einzigen Punkt die Rollbahn berührt. Die ganze Lagerkraft konzentriert sich auf eine kleine Fläche. Bei Verwendung einer Rolle kann dies jedoch reduziert werden, weshalb diese bei Lagern eingesetzt werden, welche hohe Kräfte aufzunehmen haben. Eine Aufstellung der Wälzkörper und deren Verwendung befinden sich in der folgenden Abbildung. (vgl. [7])

Wälzkörper- bezeichnung	Skizze	Wälzlagerbauart
Kugel		Kugellager
Zylinderrolle		Zylinderrollenlager
Kegelrolle		Kegelrollenlager
Tonnenrolle		Pendelrollenlager
Nadel		Nadellager

Abbildung 3-4: Wälzkörperarten [7]

Wälzlager weisen im Vergleich zu Gleitlagern laut [7] und [8] folgende Vorteile auf:

- Aufnahmen meist von radialen und axialen Kräften
- Geringere Anlaufreibung
- Geringere Betriebsreibung und somit Wärmeentwicklung
- Keine Einlaufzeit und kein Einfluss des Wellenwerkstoffes
- Wartungsfreiheit und geringerer Schmiermittelbedarf
- Hohe Tragfähigkeit je Lagerbreite
- Standardisierung und somit geringere Fertigungskosten

Es werden aber laut [6]-[8] auch Nachteile beschrieben:

- Sehr empfindlich bei Stößen und Erschütterungen
- Lagergeräusche
- Teuer bei sehr großen bzw. kleinen Lagern
- Keine geteilten Lager möglich
- Sehr staubenmpfindlich, somit ist Dichtung wichtig
- Größeres Lagerspiel

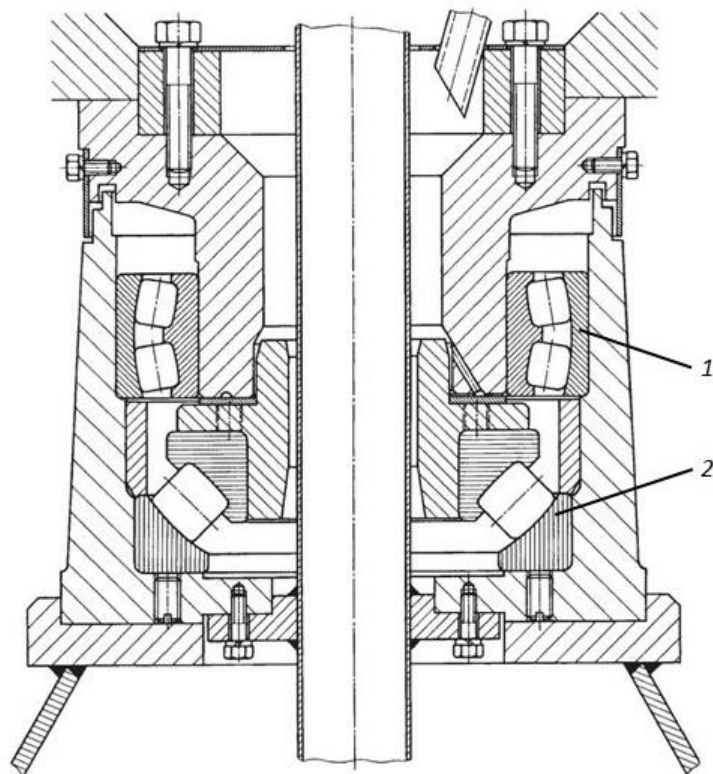


Abbildung 3-5: Anwendungsbeispiel Wälzlager an einer Kranfußlagerung, 1 Radialpendelrollenlager, 2 Axialpendelrollenlager [6]

Abbildung 3-5 stellt ein Anwendungsbeispiel von Wälzlagern dar. Die horizontalen Kräfte werden von einem Radialpendelrollenlager aufgenommen, während ein Axialpendelrollenlager das Gewicht aufnimmt. Im Bereich von Hydrogeneratoren finden Wälzlager meist keine Anwendung, da hier die Baugröße zum limitierenden Faktor wird. Somit spielen Wälzlager im Zuge dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle.

3.2 Gleitlager

Bei Gleitlagern erfolgt die Trennung von Lagerzapfen und Lagerkörper durch eine Gleitfläche an der sich die beiden Elemente bewegen können. An dieser Gleitfläche können verschiedene Formen der Reibung auftreten, welche im kommenden Unterpunkt beschrieben werden. (vgl. [7])

Abbildungen 2-15 und 2-16 zeigen den schematischen Aufbau von radialen bzw. axialen Gleitlagern.

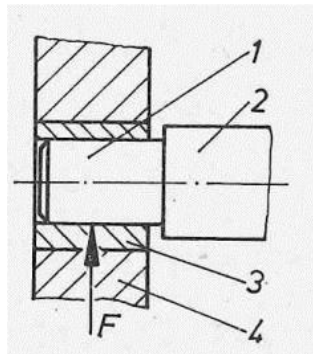


Abbildung 3-6: Schema eines Radialgleitlagers, 1 Zapfen, 2 Welle, 3 Lagerkörper, 4 Gehäuse [7]

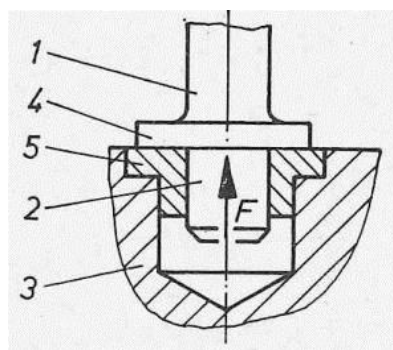


Abbildung 3-7: Schema eines Axialgleitlagers, 1 Welle, 2 Zapfen, 3 Gehäuse, 4 Wellenscheibe, 5 Gehäusescheibe [7]

Gleitlager sind, verglichen mit Wälzlagern, sehr einfach aufgebaut und somit leicht herzustellen. Eingesetzt werden sie vornehmlich bei kleinen bzw. einfachen Anwendungen, beispielsweise in Haushaltsgeräten, oder in der Lagerung von großen Maschinensätzen mit höchsten Anforderungen bezüglich Lebensdauer und Belastbarkeit. Als Beispiele können hierfür Turbinen, Generatoren und Schiffswellenlager genannt werden. Aus diesem Grund sind Gleitlager die hauptsächlich betrachtete

Lagerart im Anwendungsbereich der großen Hydrogeneratoren und somit ausschlaggebend für die Betrachtungen der Auswirkungen von Wellenspannungen in dieser Arbeit. (vgl. [6])

Laut [6] und [8] bestehen die Vorteile von Gleitlagern in:

- Konstruktion erlaubt geteilte Lager und sehr geringe Durchmesser
- Höchste Drehzahlen erreichbar
- Geringe Lagerspiele bei relativ großen Passungstoleranzen
- Schmiermittelschicht wirkt schwingungs- und geräuschkämpfend
- Bei Vollschmierung nahezu unbegrenzte Lebensdauer
- Möglichkeit der Lagerkühlung über Schmiermittel

Die Nachteile von Gleitlagern sind in [6] beschrieben:

- Hoher Schmierstoffverbrauch
- Aufwand an Schmierstoffversorgung und Wartung
- Hohe Oberflächengüte der Gleitflächen notwendig
- Je nach Lagerart zusätzliche Baugruppen zur Schmierung notwendig
- Hohe mögliche Anlaufreibwerte und somit Notlaufeigenschaften wichtig

In den folgenden beiden Abbildungen wird die praktische Anwendung von Gleitlagern dargestellt.

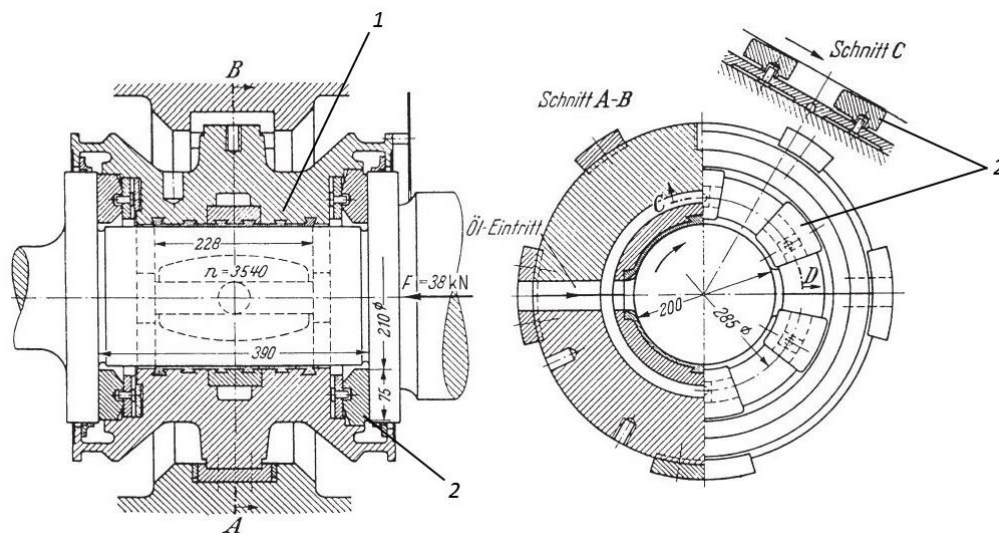


Abbildung 3-8: Kombiniertes Radial-Axial-Lager einer Dampfturbine, 1 Radiallager, 2 Axiallager [6]

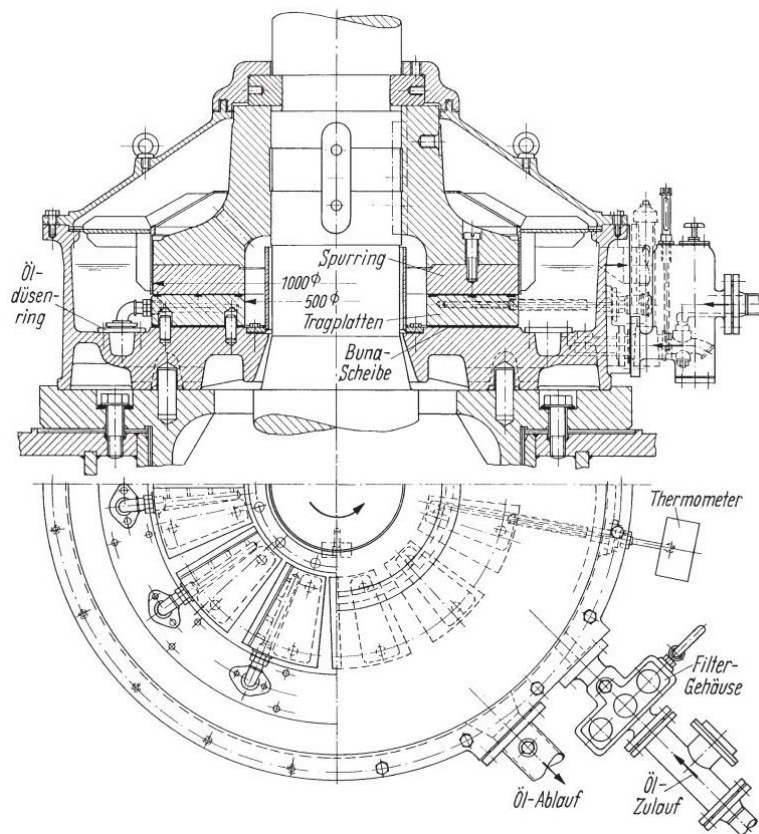


Abbildung 3-9: Axiales Endspurlager für hohe Kräfte einer Wasserturbine [6]

3.2.1 Reibungsarten

Eine wichtige Rolle für das Betriebsverhalten von Gleitlagern spielen die Arten und Zustände der Gleitreibung. Entsprechend den Aggregatzuständen der Reibpartner (fest, flüssig, gasförmig) unterscheidet man zwischen Festkörper-, Flüssigkeits- und Gasreibung. Bei Flüssigkeits- und Gasreibung sind ähnliche Bedingungen vorhanden, deshalb gilt für diese beiden Zustände der Begriff Schwimmreibung. Sind am Reibprozess Festkörper und Flüssigkeits- oder Gasmoleküle beteiligt, so spricht man von Mischreibung. (vgl. [7])

Festkörperreibung:

Als Festkörper gelten sowohl die Körperoberflächen der Reibpartner als auch etwaige an der Oberfläche absorbierte Fremdschichten (Oxide, Sulfide etc.) oder abgelagerte feste Schmierstoffe (Graphit etc.). Somit unterscheidet man, dargestellt in Abbildung 3-10, zwei Arten von Festkörperreibung, nämlich reine Festkörperreibung und die Haftschiebtreibung. (vgl. [7])

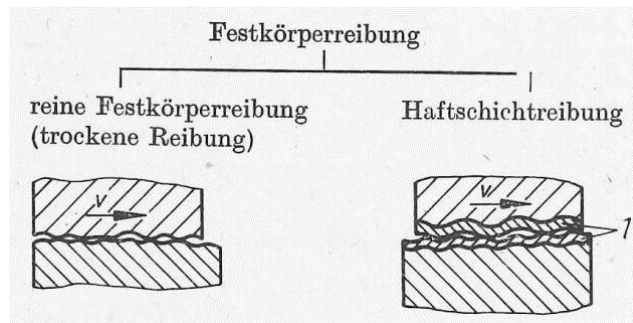


Abbildung 3-10: Festkörperreibung, 1 Haftschichten [7]

Reine Festkörperreibung kommt in der Praxis selten vor, da sich an metallischen Oberflächen immer Fremdstoffe anlagern. [3]

Schwimmreibung:

Dieser Zustand zeichnet sich dadurch aus, dass zwischen den Reibstellen keine direkte Berührung auftritt, da sie durch einen flüssigen oder gasförmigen Schmierfilm getrennt sind. Der Lagerzapfen schwimmt somit im Lagerkörper. Die auftretende Reibung ist nur abhängig vom inneren Reibwert des Schmiermediums. Dieser Zustand ist folglich praktisch verschleißlos. (vgl. [7])

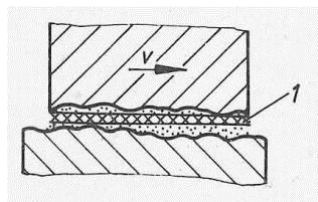


Abbildung 3-11: Schwimmreibung, 1 Schmierfilm [7]

Mischreibung:

Mischreibung liegt dann vor, wenn im Lager zwar eine Schmierschicht vorhanden, diese aber nicht geschlossen ist. Es existieren also noch Berührungspunkte an den Festpunkten der Reibpartner welche Verschleiß unterliegen. Dieser Zustand tritt vor allem im Anlauf- und Auslaufvorgang auf. Aus diesem Grund sind Gleitlager so ausgeführt, dass mindestens ein Reibpartner besonders gute Schmiereigenschaften (Notlaufeigenschaften) besitzt. (vgl. [7])

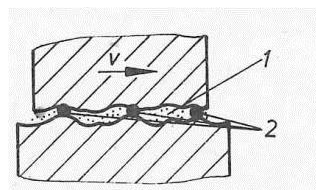


Abbildung 3-12: Mischreibung, 1 Schmierstoff, 2 Berührungsstellen [7]

3.2.2 Hydrodynamisches Gleitlager

Gleitlager unterscheiden sich nicht nur in der Art der auftretenden Reibung, sondern ebenfalls im Aufbau ihres Schmierfilms. Man unterscheidet hier den hydrodynamischen und den hydrostatischen Aufbau. Hydrodynamische Gleitlager erzeugen ihren Schmierfilm durch die Rotationsbewegung. (vgl. [5],[6])

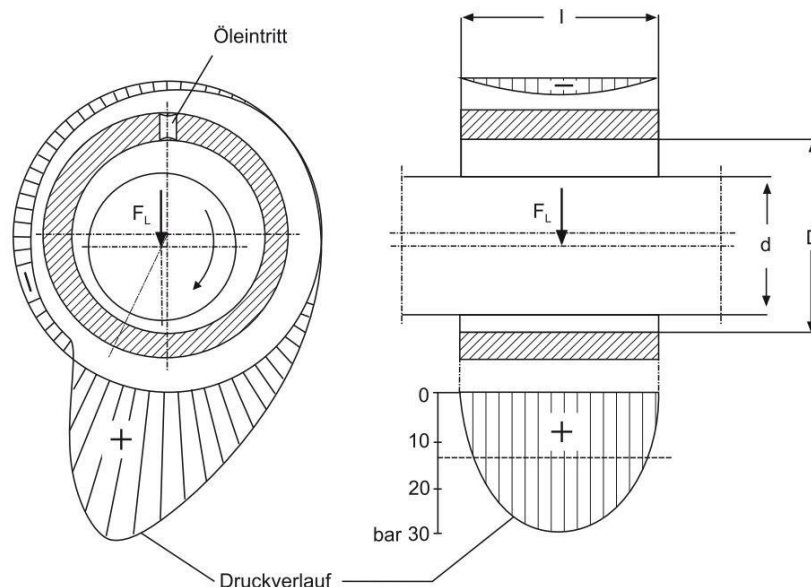


Abbildung 3-13: Zapfenverlagerung und Verlauf des Schmierfilmdrucks [5]

Zum Zeitpunkt des Anlaufes berührt der Lagerzapfen die Lagerschale, es herrscht Festkörperkontakt. In Folge der Haftreibung wälzt sich die Welle die Lagerschale hinauf, bis dies abreißt und die Welle nach unten rutscht. Beim Wälzvorgang entsteht ein keilförmiger Spalt. Aufgrund einer Sogwirkung entsteht ein Unterdruck welcher für die Ausbildung eines Schmierfilms sorgt. Im Anlaufvorgang befindet sich die Welle in einem instabilen Zustand und hat eine exzentrische Abweichung. Diese verringert sich mit steigender Umlaufgeschwindigkeit. Es herrschen somit bei dieser Art von Gleitlager zumindest zwei der vorher genannten Reibungsarten vor, je nach Betriebszustand. (vgl. [5])

3.2.3 Hydrostatisches Gleitlager

Im Fall der hydrostatischen Lagerung wird der im Vorpunkt erwähnte hydrodynamische Effekt zur Erzeugung des tragenden Drucks weitgehend durch das hydrostatische Prinzip ersetzt. Der benötigte Öldruck und die benötigte Ölmenge werden außerhalb der Lagerung erzeugt. Somit sind die Berührungsflächen der aufeinander gleitenden Maschinenteile durch einen dauerhaften Schmierfilm voneinander getrennt. Weiters ist die Höhe des Schmierfilms im Gegensatz zu hydrodynamischen Gleitlagern nahezu unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit. Nachdem die Welle bereits beim Anlauf vom Öldruck angehoben wird und ein durchgehender Schmierfilm vorherrscht, sind diese Lager praktisch verschleißfrei, und es herrscht nur Schwimmreibung vor. (vgl. [5])

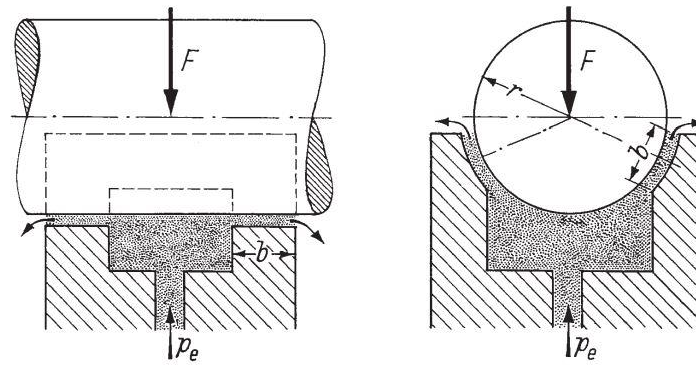


Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau eines hydrostatischen Axiallagers [6]

Nachteilig bei diesem Gleitlagertyp ist der zusätzliche Aufwand an Ölpumpen und der dadurch kompliziertere Aufbau, wie folgende Abbildung zeigt.

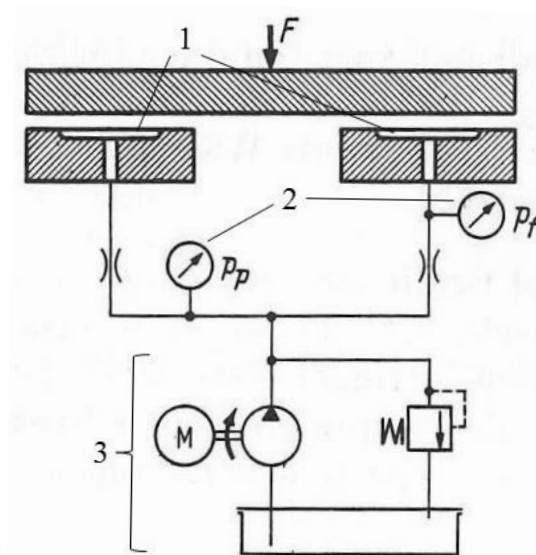


Abbildung 3-15: Schema der Ölversorgung Hydrostatischer Lager, 1 Lagertasche, 2 Öldruckmessgerät, 3 Ölpumpensystem [8]

Das Schema der Ölversorgung von hydrostatischen Gleitlagern veranschaulicht die Komponenten des Systems. Im Ölpumpensystem wird Öl aus einem Reservoir entnommen und unter Druck gesetzt. Dieses Öl wird über ein Rohrsystem den Lagertaschen zugeführt. Zur Überwachung des korrekten Öl drucks werden noch Druckmessgeräte zwischengeschaltet. Das Ölpumpensystem besteht aus einem Öltank, der Pumpe und einer Schutzvorrichtung um etwaigen Überdruck abzubauen.

3.3 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel wurde auf die Arten von Lagern und deren Aufbau näher eingegangen. Im Zuge dieser Arbeit sind vor allem Gleitlager von Bedeutung. Der Grund liegt in den großen auftretenden Belastungen. Eine wichtige Erkenntnis dieses Kapitels ist die Betrachtung des Schmierfilms als Dielektrikum. Der Schmierfilm stellt im Allgemeinen die Schwachstelle bei Wellenspannungsbetrachtungen dar, sei es durch elektrische Faktoren oder durch Alterung.

4 Ursachen von Wellenspannungen und deren Auswirkungen

4.1 Allgemein

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Entstehung von Wellenspannungen und betrachtet ebenso deren Auswirkungen auf den Betrieb und die möglichen Beschädigungen am Maschinenstrang. Ebenso sollen am Ende Beispiele für Fehler aufgeführt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Hydrogeneratoren, also mit Wasserturbinen und elektrisch erregten Synchrongeneratoren. Durch die Besonderheiten dieser Generatoren hinsichtlich ihrer Bauart und ihrem Betrieb treten nicht alle hier vorgestellten möglichen Arten von Wellenspannungen auf. Auf diese Besonderheiten wird in den jeweiligen Entstehungsmechanismen gesondert eingegangen. Alle Verursacher von Wellenspannungen werden aber der Vollständigkeit halber trotzdem aufgeführt.

4.2 Entstehung von Wellenspannungen

Im Wesentlichen existieren laut [9] vier Quellen, welche Wellenspannungen verursachen:

- Unsymmetrien im magnetischen Kreis rotierender elektrischer Maschinen
- Elektrostatische Aufladung der Läuferwelle
- Axiale, magnetische Flüsse in Wellenteilen von rotierenden Maschinen
- Extern eingebrachte, stromrichtergespeiste Spannungen in Läuferwicklungen (Erregereinrichtung)

4.2.1 Unsymmetrie im magnetischen Kreis

Die Entstehung von Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien und deren Auswirkungen sind Hauptbestandteil dieser Arbeit und somit besonders wichtig. Die Beschreibung der magnetischen Unsymmetrie ist bereits in Forschungen aus den 1920er Jahren, als Beispiel sei [14] genannt, zu finden.

Wird eine rotierende Welle, beispielsweise die Läuferwelle, von einem zeitlich veränderlichen, magnetischen Fluss umschlungen, so wird entlang der Welle eine Spannung induziert, welche zwischen den Enden der Welle gemessen werden kann. Wird diese Spannung an beiden Enden kurzgeschlossen können Ströme von mehreren hunder Ampere fließen und an den Übergangsstellen große Schäden verursachen. Eine graphische Darstellung der Gegebenheiten ist in Abbildung 4-1 dargestellt. (vgl. [9],[14])

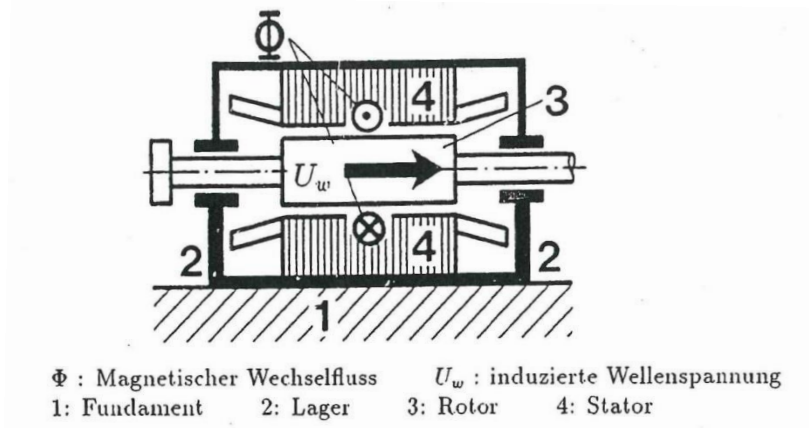


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung magnetischer Unsymmetrien [9]

Zur Erklärung der Ursachen für die Entstehung von Wellenspannungen wird der Fluss in der Maschine in einen links und einen rechts umlaufenden Fluss aufgeteilt. Magnetische Unsymmetrien treten laut [6] dann auf, wenn die beiden umlaufenden Flüsse nicht gleich groß sind. Eine mögliche Ursache für nicht gleich große Flüsse ist die Aufteilung des Eisens in der Maschine in Segmente, an deren Übergangsstellen kleine Luftspalte entstehen. (vgl. [9],[14])

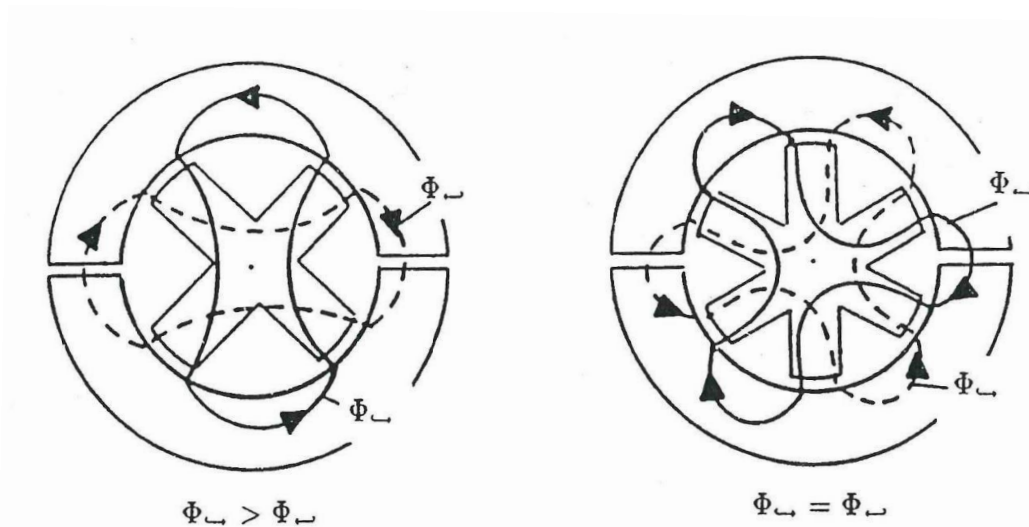


Abbildung 4-2: Flussaufteilung in zwei Flussanteile einer 4- bzw. 6-poligen Maschine mit 2 Segmenten [9]

Die Verläufe der aufgeteilten Flüsse sind in Abbildung 4-2 für zwei unterschiedliche Maschinen dargestellt. Im Fall der linken 4-poligen Maschine lässt sich erkennen, dass die beiden umlaufenden Flüsse durch die Luftspalte nicht gleich groß sind. Dreht sich der Läufer um 90° wirkt die Unsymmetrie für die andere umlaufende Welle. Es entsteht ein zeitlich veränderlicher Fluss, welcher eine Wellenspannung hervorruft. Betrachtet man nun die 6-polige Maschine rechts, so fällt auf, dass die beiden umlaufenden Flüsse zu jeder Zeit gleich groß sind. Es wird keine Wellenspannung induziert. [9]

Eine weitere Quelle für magnetische Unsymmetrien ist ein über den Umfang nicht konstant bleibender Luftspalt. Dies bezeichnet man als Läuferexzentrizität und kann laut [9] verursacht werden durch:

- Fertigungstoleranzen
- Läuferdurchbiegung
- Ständerverformung (Ellipsität)

Abbildung 4-3 stellt die Auswirkungen einer Läuferexzentrizität anschaulich dar:

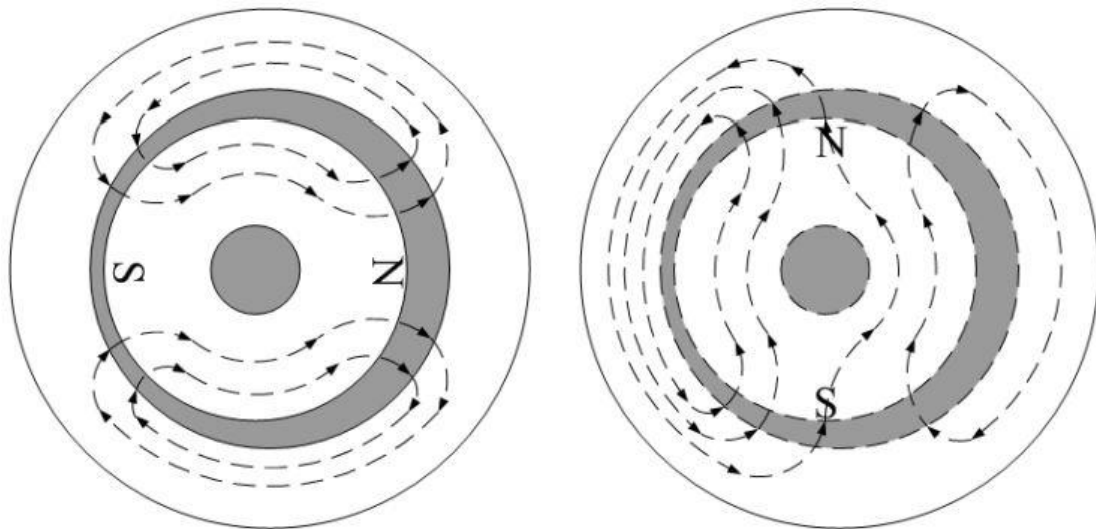


Abbildung 4-3: Darstellung der Flussverläufe bei exzentrischer Läuferlagerung [13]

Bei exzentrischem Läufer teilen sich die Feldlinien nicht gleichmäßig auf, gut zu erkennen in Abbildung 4-3 rechts. Somit besteht wieder eine magnetische Unsymmetrie und es kommt zu einer längs der Welle induzierten Spannung. [9]

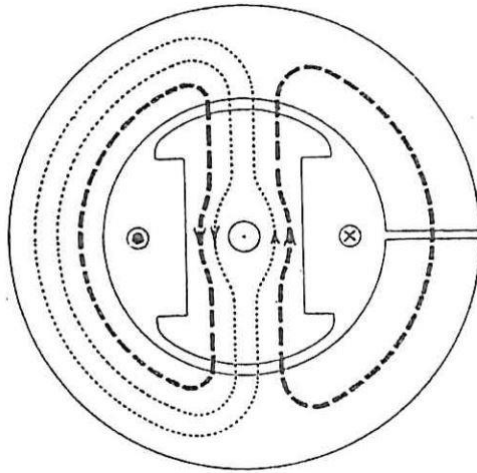


Abbildung 4-4: Analogie zwischen Läuferexzentrizität und einer einzelnen Stoßfuge [15]

Um einen Zusammenhang zwischen magnetischen Unsymmetrien begründet durch Exzentrizitäten herstellen zu können, ist es im Wesentlichen möglich eine zusätzliche Stoßstelle im Eisenkreis anzunehmen. Diese bildet die Läuferexzentrizität ab und befindet sich geometrisch am Ort des größten Luftspaltes. (vgl. [15])

4.2.2 Elektrostatiche Aufladung

Wellenspannungen aufgrund von elektrostatischer Aufladung kommen, in nennenswerter Höhe, ausschließlich bei Maschinensätzen in kalorischen Kraftwerken vor und sind folglich für diese Arbeit nicht von Bedeutung, wird der Vollständigkeit halber aber als Wellenspannungsquelle aufgeführt.

Im Gegensatz zu Wellenspannungen aus magnetischen Unsymmetrien handelt es sich hier um ein Gleichspannungspotential. Grundsätzlich entsteht elektrostatische Aufladung durch Reibungsvorgänge zwischen zwei unterschiedlichen Materialien und anschließender Trennung der gegenpolig geladenen Teile. Die isolierte Läuferwelle wird durch Reibung des Dampfes an den Turbinenblättern auf ein höheres Potential gehoben als die geerdeten Gehäusekomponenten. (vgl. [9])

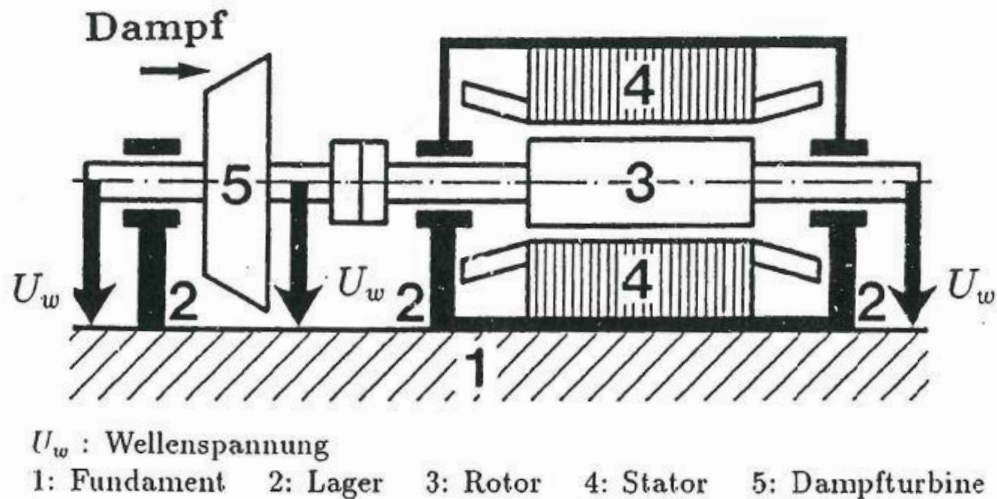


Abbildung 4-5: Wellenspannung Aufgrund elektrostatischer Aufladung [9]

Die Entstehung dieser elektrostatischen Aufladung und deren physikalische Ursachen sind in [9] detailliert beschrieben:

„Gemäss *Helmholtz Theorie* sind auf der Oberfläche von Flüssigkeiten Dipol – Moleküle vorhanden, wodurch die Oberfläche aufgeladen wird und gerade unterhalb der Oberflächen Ladungen der Gegenpolarität vorhanden sind. Wasser ist stark dipolar, wobei jedoch im Normalfall seine gute Leitfähigkeit eine elektrostatische Aufladung verhindert. In dampf- und nebelartigem Zustand kann jedoch eine erhebliche Ladungstrennung auftreten, wobei kleinste Tröpfchen negativ, solche mit Durchmesser > 0.01 Micron positiv und bedeutend grössere Tröpfchen gar nicht geladen sind. Diese Wassertröpfchen können als Ladungsträger zwischen Turbine und –gehäuse fungieren, wobei es möglich ist, dass die Turbine negativ oder positiv aufgeladen wird. Gemäss *Cochn´scher Regel* wechseln beim Reiben von zwei ungeladenen Substanzen Elektronen von der Substanz mit der höheren Dielektrizitätszahl ϵ_1 zur Substanz mit der niedrigeren Dielektrizitätszahl ϵ_2 über. Falls mindestens eine Substanz isolierend ist, wird beim Trennen der Substanzen die Erste positiv und die Zweite gegengleich negativ aufgeladen. Die Dielektrizitätszahlen von Turbinenschaufeln, trockenem Dampf und destilliertem Wasser betragen 3, 1 und 81. Folglich wird die Turbine im Hochdruckteil positiv und im Niederdruckteil (Nassdampf) sehr stark negativ aufgeladen.“

Wellenspannungen verursacht durch elektrostatische Aufladung, sind bei Hydrogeneratoren äußerst unwahrscheinlich. Die Turbine, und in Folge auch die gesamte Läuferwelle, ist in dauerhaften Wasserkontakt und wird durch Wasser mit dem Erdpotential verbunden. Dadurch kann es antriebsseitig zu keiner Aufladung der Welle kommen.

4.2.3 Magnetische Flüsse in der Läuferwelle

Herrscht in einer rotierenden Welle einer elektrischen Maschine ein magnetischer Fluss vor und können sich diese Flusslinien schließen, beispielsweise über die Wellenlager, so wird eine unipolare Spannung induziert. Diese Spannungen entstehen dann, wenn magnetische Flusslinien in ein bewegtes Maschinenteil übergehen und sich das Teil mit einer konstanten Bewegungsrichtung, relativ zur Richtung des Flusses, bewegt. [9]

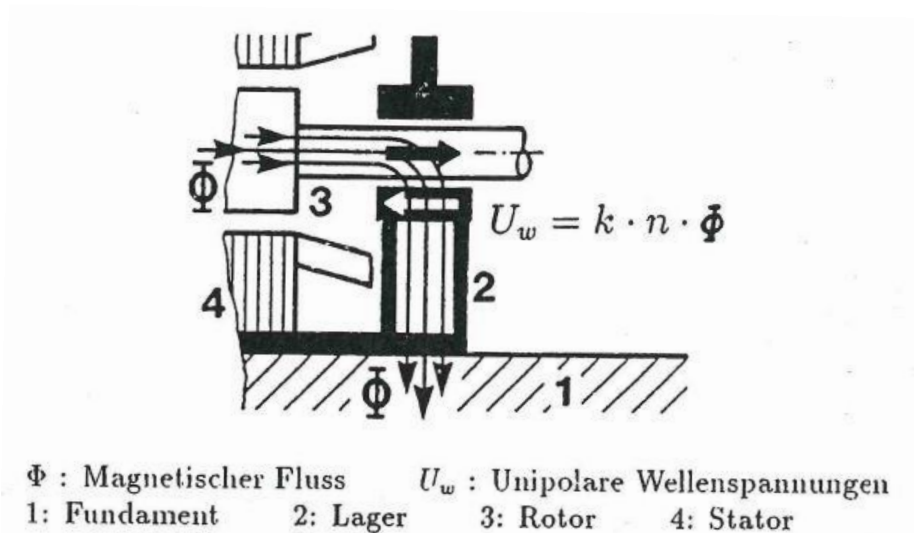


Abbildung 4-6: Induzierte Spannung aufgrund magnetischer Flüsse in der Läuferwelle [9]

Abbildung 4-6 zeigt die Gegebenheiten bei der Induktion von Spannungen Aufgrund magnetischer Flüsse in der Maschinenwelle. Zur einfacheren Vorstellung der Vorgänge und Spannungsentstehung kann man sich einen Generator vorstellen, bei dem der stillstehende Ständer ersetzt wird durch die Lagerschilde oder Dichtungen. (vgl. [11])

Mögliche Quellen für magnetische Flüsse in der Welle sind laut [9]:

- Restmagnetismus aufgrund von Stosskurschlüssen, Schweissarbeiten, etc.
- Windungsschlüsse
- Unsymmetrische Zuleitungen
- Schlecht ausgelegter magnetischer Kreis

Die induzierte unipolare Spannung ist proportional zur Drehzahl und nimmt mit ihr zu. Somit können bereits kleine magnetische Flüsse in der Läuferwelle bei hochtourigen Maschinen, wie Turbogeneratoren, eine hohe Spannung verursachen, wie in [9] beschrieben. Bei den in Hydrogeneratoren üblichen geringeren Drehzahlen tritt dieser Effekt weniger stark in Erscheinung.

4.2.4 Externe Spannungen in Läuferwicklungen

Im Gesamtsystem des Synchrongenerators besteht bei statischer Erregereinrichtung eine kapazitive Kopplung zwischen Läufer, Ständergehäuse und der Erregung. Somit haben Störungen beziehungsweise Schwankungen der Versorgung im Erregerkreis Auswirkungen auf die Wellenspannung. Diese kommen beispielsweise vom Stromrichter bei statischer Erregung, dargestellt in Abbildung 4-7.

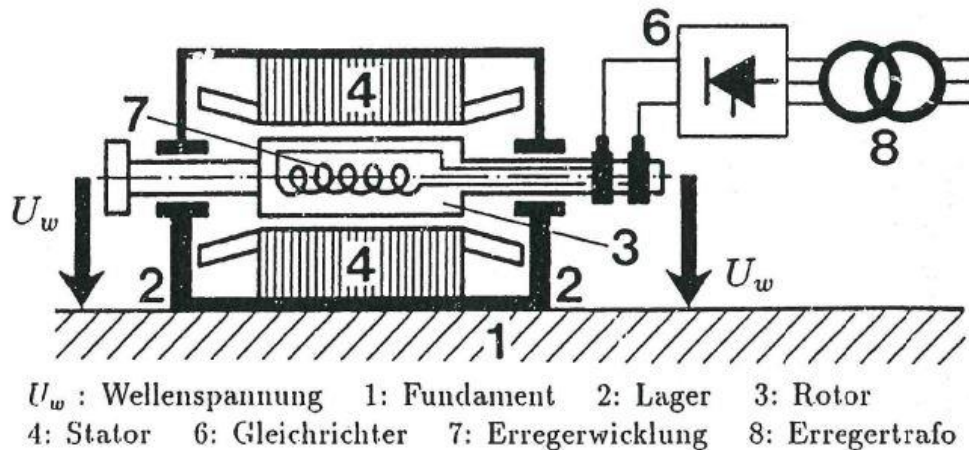


Abbildung 4-7: Generator mit statischer Erregung [9]

Bei der Speisung der Erregerwicklung mittels Gleichrichter kommt es, im Gegensatz zu anderen Varianten, zu einer periodischen, unsymmetrischen Belastung des Sternpunktes auf der Drehstromseite des Gleichrichters. Dies führt zu einer zeitlichen Schwankung des Mittelpunktes der Erregerwicklung. Bei den üblicherweise verwendeten sechspulsigen Gleichrichter hat diese sogenannte Mittelspannung die dreifache Grundfrequenz. (vgl. [9])

Durch die Schaltvorgänge der Thyristoren im Gleichrichter kommt es zu steilen Spannungsflanken. Diese können die Erregerwicklung zum elektrischen Schwingen anregen. Diese hochfrequenten Schwingungen werden ebenfalls kapazitiv auf die Welle eingekoppelt und können dort Spannungsspitzen hervorrufen. (vgl. [9])

4.3 Arten von Wellenspannungen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Entstehungsmechanismen von Wellenspannungen, deren Art des Auftretens und Übertragungsmechanismen behandelt. Unterscheidet man Wellenspannungen nun bezüglich ihres Schadensmechanismus, so kann man diese laut [9] in zwei Gruppen aufteilen:

- Induktive Wellenspannungen
- Kapazitive Wellenspannungen

4.3.1 Induktive Wellenspannungen

Diese Gruppe umfasst die Wellenspannungen verursacht durch magnetische Ursachen wie in Kapitel 4.2.1 „Unsymmetrie im magnetischen Kreis“ und Kapitel 4.2.3 „Magnetische Flüsse in der Läuferwelle“ beschrieben. Beiden Wellenspannungsursachen ist gemeinsam, dass sie induktiv auf die Läuferwelle und somit auch auf die Lager übertragen werden. Induktive Wellenspannungen haben die Eigenschaft, dass bereits bei wenigen Volt sehr große Kurzschlussströme fließen können, welche in kürzester Zeit große Schäden verursachen. (vgl. [9])

4.3.2 Kapazitive Wellenspannungen

Zur Gruppe der kapazitiven Wellenspannungen gehören die Ursachen aus Kapitel 4.2.2 „Elektrostatische Aufladung“ und Kapitel 4.2.4 „Externe Spannungen in Läuferwicklungen“. In beiden Fällen tritt eine Potentialdifferenz zwischen Läuferwelle und Erdpotential auf. Kapazitive Wellenspannungen weisen nur eine geringe Nachladung auf, beziehungsweise ist die kapazitive Übertragungsstrecke bei stromrichter gespeisten Läuferwicklungen nur gering belastbar. Somit können, im Gegensatz zu induktiven Wellenspannungen, nur geringe Dauerströme fließen. Vielmehr kommt es zu kurzen Entladungen mit Funken, welche im Laufe der Betriebszeit zu Schäden an der Maschine führen und wird meist als „electric discharge machining“ (EDM) bezeichnet. Das Verhalten dieser Entladungen kann mit bekannten Mechanismen aus der Hochspannungstechnik erklärt werden und wird im folgenden Punkt behandelt. (vgl. [9])

4.4 Electric Discharge Machining

Bei „electric discharge machining“ (EDM) handelt es sich um kapazitive Spannungen und Ströme, welche aufgrund der Kapazitäten des Lagers entstehen können. Hauptverursacher dieser Kapazität ist die sogenannte Lagerkapazität C_b . Diese ist abhängig vom Schmierfilm, welcher auch als Dielektrikum betrachtet werden kann. (vgl. [24],[17],[18])

Die Eigenschaften von Lagern und deren Schmierfilm unter Beeinflussung von elektrischen Strömen sind Gegenstände vieler Forschungsarbeiten. Viele dieser Arbeiten befassen sich zusätzlich mit den Auswirkungen von frequenzrichterbetriebenen Maschinen, da hier verstärkt mit EDM gerechnet werden muss. (vgl. [17],[18])

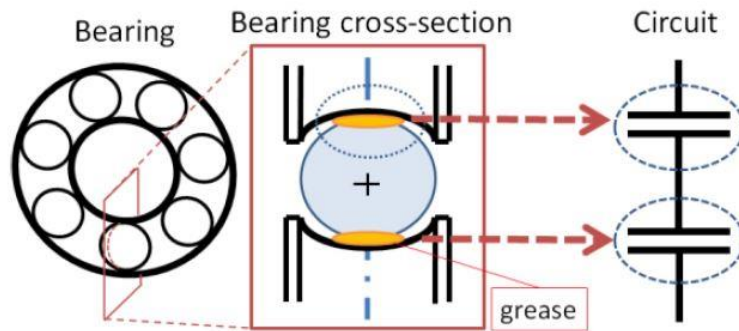


Abbildung 4-8: Zusammenhang zwischen Schmierfilm und Lagerkapazität C_b [17]

Abbildung 4-8 zeigt die Lagerkapazität eines Wälzlagers. Gut zu erkennen ist, dass jeder Übergang zwischen den Rollbahnen und Wälzkörpern näherungsweise eine Kapazität darstellt. Diese Darstellung ähnelt einem Zylinderkondensator. Gleitlager unterscheiden sich nur unwesentlich. Hier entfallen die innere Rollbahn und die Wälzkörper. Der weitere Aufbau ähnelt ebenfalls einem Zylinderkondensator. Laut [25] unterscheiden sich die Lagerkapazitäten von Wälzlager und Gleitlagern durchaus stark. Bei Maschinen mit Wellendurchmessern bis 150 mm ist die Lagerkapazität C_b von Gleitlagern um den Faktor 16–353 größer als jene von Wälzlager. Der Grund dafür ist in den unterschiedlichen wirksamen Lagerflächen zu finden. Wälzlager haben, aufgrund der Hertz'sche Pressung eine viel kleinere Fläche, diese geht direkt in die Lagerkapazität C_b ein. (vgl. [25])

Kapazitive Wellenspannungen führen nun zu einer Aufladung der Lagerkapazität und früher oder später zu einem Durchschlag, in dem sich die gespeicherte Energie entlädt. Diese Entladungen werden als EDM bezeichnet und verursachen, je nach ihrer Intensität, erhöhten Verschleiß im Lager und verkürzen deren Lebensdauer. Die Höhe der Durchschlagsspannung wird bestimmt von der Lagerkapazität, diese ist [18] und [24] zufolge unter anderem abhängig von:

- Lagertyp
- Lagerbelastung
- Drehzahl
- Temperatur
- Zusammensetzung der Schmiermittels
- Alterung des Schmiermittels

4.5 Beschädigungen

Wellenspannungen und die daraus resultierenden möglichen Stromflüsse führen zu Beschädigungen verursacht durch Lichtbögen und elektrische Entladungen. Lichtbögen zerstören sowohl die Wellenoberfläche als auch die Lagerschalen. Zusätzlich altert das Schmiermittel und somit auch das Lager in kürzester Zeit. Dies führt in weiterer Folge zu verstärktem Wartungsaufwand, Maschinenausfällen und zu hohen Kosten. Weiters kann nicht nur die Maschinenlagerung betroffen

sein. Es kann auch zu Schäden im Umfeld des Maschinensatzes kommen, je nachdem, wo der durch die Wellenspannungen verursachte Strom fließen kann. Als Beispiel seien hier Nebenantriebe wie Wasser- oder Ölpumpen und Stellantriebe genannt. (vgl. [12])

Sowohl [11] als auch [12] berichten von folgenden Erscheinungen und Beschädigungsbildern:

- **Frosting:** Dies ist der mit Abstand am verbreitetste Schadenstyp. Betroffen sind vor allem Lagerschalen, Lagerzapfen, Wellen, Wellendichtringe, etc. Es ist mit freiem Auge sehr schwer erkennbar. Es zeigt sich ein seidiger Glanz an den Oberflächen. Bei genauerer Betrachtung im Mikroskop können kleinste runde Krater erkannt werden. Frosting kann ganze Bereiche von Lagern/ Wellen betreffen. Verursacht wird dies durch EDM.
- **Spark Tracks:** Sie ähneln auf dem ersten Blick Kratzern, verursacht durch Fremdpartikel im Schmiermittel, an der jeweiligen Oberfläche. Eine mikroskopische Untersuchung zeigt jedoch scharfe Kanten am Rand des Kratzers und gleichbleibende Tiefe und kann somit kein Kratzer im herkömmlichen Sinn sein. Es handelt sich um Materialabtragungen aufgrund von oberflächlichen Lichtbögen.
- **Pitting:** Pitting ähnelt der Erscheinung von Frosting, ist jedoch mit freiem Auge erkennbar. Aufgrund der Größe der Kerben ist eine viel größere Energie als beim Frosting nötig um diese hervorzurufen. Sie treten eher unregelmäßig auf.
- **Welding:** Das Auftreten von Welding beschränkt sich auf Bereiche, an denen sehr hohe Ströme (mehrere hundert Ampere) fließen können, beispielsweise an den Übergängen bei geteilten Ständergehäusen, Lagerlaufflächen und Wellendichtringen. Die massiven Schäden sind leicht erkennbar und führen in kürzester Zeit zur Zerstörung der entsprechenden Bauteile. Grundlage dieser Beschädigungen sind meist induktive Wellenspannungen.

4.5.1 Beispiel für Wellenspannungen und deren Beschädigungen

Zur Veranschaulichung von Wellenspannungen sind untenstehend ein Oszillograph eines Spannungsverlaufes und deren Frequenzanalyse abgebildet.

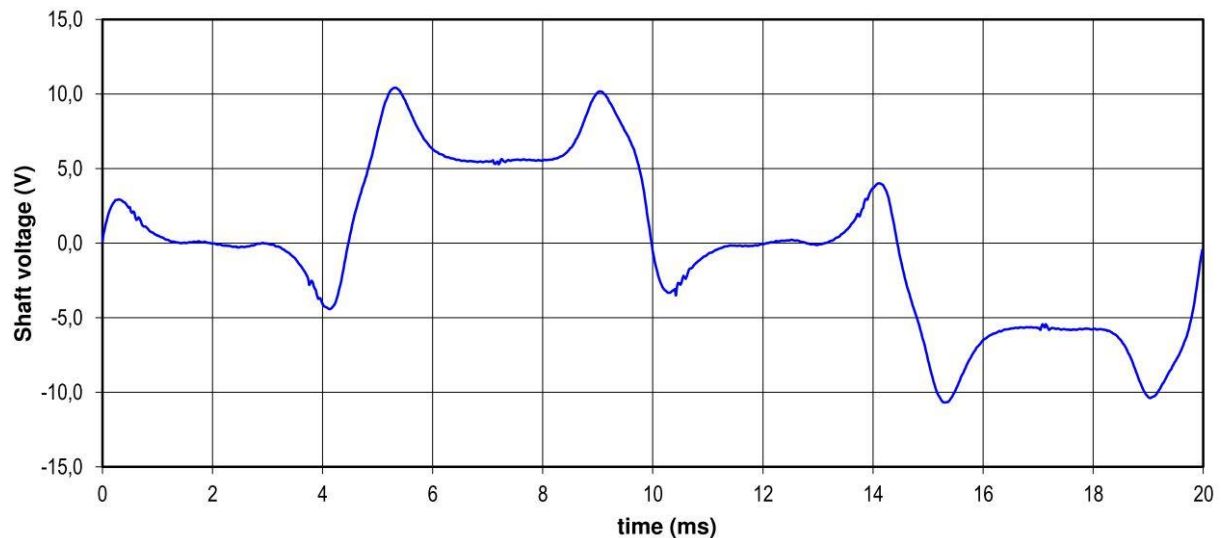


Abbildung 4-9: Beispielhafter Verlauf der Wellenspannung (Quelle: Andritz Hydro)

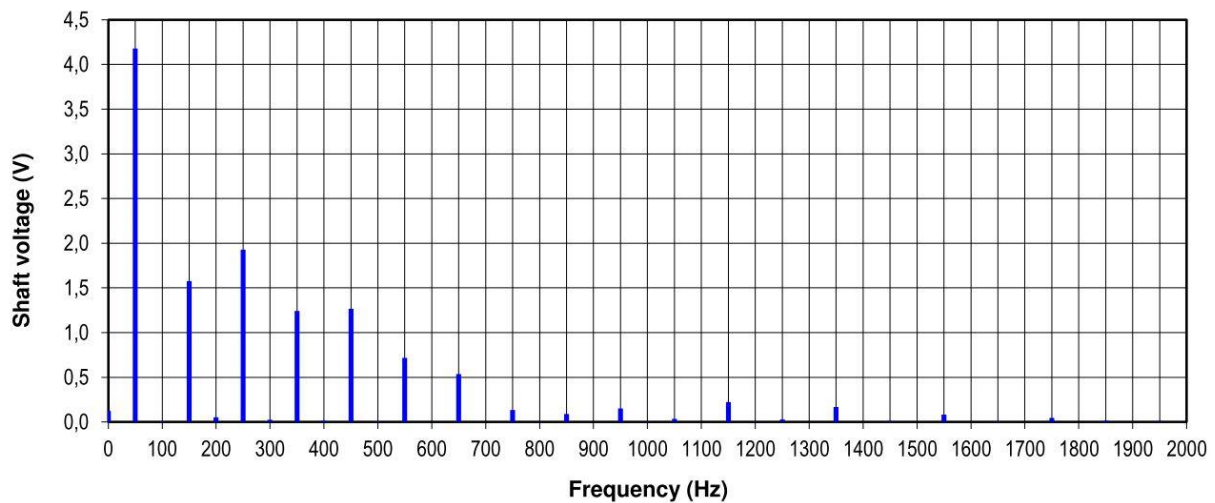


Abbildung 4-10: Frequenzspektrum der Wellenspannung (Quelle: Andritz Hydro)

Folgende Abbildungen zeigen Schadensbilder von Lagerschalen und Wellen von großen Hydrogeneratoren verursacht durch Wellenspannungen. Verursacht wurde der Stromfluss, der zur Zerstörung des Lagers führte, durch eine Überbrückung der Lagerisolation nach Wartungsarbeiten.



Abbildung 4-11: Defekte Lagerschale verursacht durch Wellenstromfluss (Quelle: Andritz Hydro)



Abbildung 4-12: Detailansicht der zerstörten Lagerschalenoberfläche (Quelle: Andritz Hydro)



Abbildung 4-13: Beschädigte Läuferwelle verursacht durch Wellenstromfluss (Quelle: Andritz Hydro)

4.6 Maßnahmen zur Abhilfe und Schadensminimierung

Heutzutage können Wellenspannungen bereits durch konstruktive Massnahmen minimiert werden. Eine vollständige Vermeidung ist jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund sind laut [1] folgende Abhilfemaßnahmen üblich:

- Wellenstrang mittels Erdungsbürsten erden: Querspannungen werden kurzgeschlossen
- Lager, Zuleitungen und Maschinenkomponenten isolieren: Stromkreise für Längsspannungen unterbrechen, beziehungsweise vermeiden
- Magnetisierte Teile entmagnetisieren: Reduktion der Quelle von unipolaren Spannungen

4.6.1 Dimensionierung und Fertigung

Die effektivste Methode zur Vermeidung von Wellenspannungen ist die Vermeidung jeglicher Unsymmetrien im magnetischen Kreis. Ein Teil dieser Strategie ist eine genaue Auslegung und Dimensionierung des Generators, um etwaige Unsymmetrien bereits bei der Konstruktion zu vermeiden. Des Weiteren können Wellenspannungen magnetischen Ursprungs vermieden werden, indem auf kleinste Toleranzen bei Fertigung und Montage geachtet wird. Abweichungen in der Montage können zu Läuferexzentrizitäten bzw. ungleichmäßigen Luftspalten und in weiterer Folge zu unsymmetrien im Magnetkreis führen.

4.6.2 Wellenerdung

Um elektrostatische Aufladungen zu vermeiden, wird die Läuferwelle meist über eine Bürste mit Erde verbunden. Diese Methode weist jedoch eine Vielzahl von Schwächen auf. Beispielsweise seien hier Verschmutzung, Verschleiß und begrenzte Umdrehungsgeschwindigkeit zu nennen. Ein Ausfall der Bürsten kann leicht eintreten und unbemerkt bleiben. Montiert werden die Bürsten meist an der Antriebsseite. Das andere Lager auf der Erregerseite des Generators wird dann isoliert ausgeführt. (vgl. [9])

4.6.3 Entmagnetisierung

Die einfachste Möglichkeit ist das Vergrößern der Abstände zwischen den Wellenteilen, Lagern und Gehäusen um eventuelle Lagerflüsse zu minimieren. In Sonderfällen ist eine Entmagnetisierung von Teilen nötig, dies ist aber meist mit großem Aufwand und Kosten verbunden. (vgl. [9])

4.6.4 Isolation

Um die Maschine vor Wellenspannungen, verursacht von Unsymmetrien im magnetischen Kreis, zu schützen, ist es notwendig, sämtliche potentielle Kurzschlusschleifen durch hochohmige Isolationsschichten zu verhindern. Diese Methode beeinflusst nicht das Auftreten von Wellenspannungen sondern soll nur die Auswirkungen der Wellenspannung verringern bzw. einen schadhaften Stromfluss unterbinden. Meist ist bereits eine Seite der Läuferwelle durch Erdungsbürsten mit dem Maschinengehäuse beziehungsweise Erdpotential verbunden. Aus diesem Grund kommen sämtliche Ölleitungen, Zuleitungen und Hilfsaggregate auf der anderen Generatorseite als mögliche Kurzschlussstellen in Frage und sind durch Isolatoren zu isolieren. Diese Methode ist bereits bewährt, ist aber sehr aufwendig, und ein unbeabsichtigtes Überbrücken der Isolationsschicht nach Wartungsarbeiten oder durch Verschmutzung kann eintreten. (vgl. [9])

4.6.5 Modernes Abhilfekonzept

Vor allem das Konzept der antriebsseitigen Erdungsbürsten kann im laufenden Betrieb oftmals zu Problemen führen. Um diese zu vermeiden wurde das folgende Abhilfekonzept zur Vermeidung von kapazitiven Wellenspannungen im Rahmen einer Dissertation in [9] erarbeitet, welches im Folgenden als Beispiel neuer Konzepte vorgestellt wird. Dieses Konzept ist für Turbogeneratoren entwickelt worden, kann aber ebenso im Bereich von Hydrogeneratoren Verwendung finden.

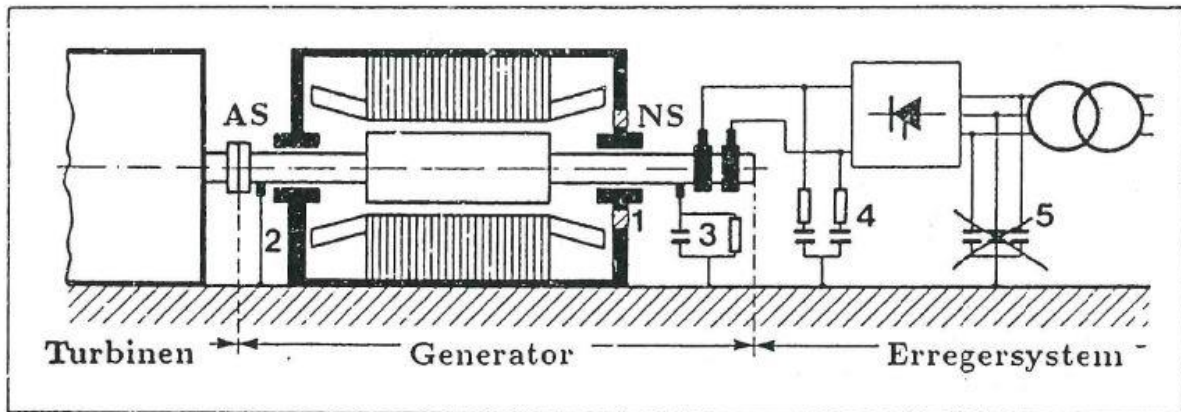


Abbildung 4-14: Abhilfekonzept nach Ammann [9]

- 1: Die bewährte, aber aufwendige Isolierung aller Lager, Hilfsantriebe etc. wird nichtantriebsseitig beibehalten, da sie wirkungsvoll und zuverlässig große Ströme längs der Generatorwelle verhindern.
- 2: Erdungsbürsten antriebsseitig können beibehalten werden, falls erwünscht.
- 3: Nichtantriebsseitig kommt mittels Bürsten ein Passives RC – Glied zwischen Welle und Erde zum Einsatz, der Widerstand R beträgt ca. 500Ω . Der Grund hierfür ist:
 - Er ist groß genug, um niederfrequente Ströme induzierter Spannungen auf wenige mA zu begrenzen
 - Er ist klein genug, um bei schlechter / nicht vorhandener antriebsseitiger Erdung den Aufbau elektrostatischer Spannungen zu verhindern.
- 4: Filter am Ausgang des Gleichrichters der statischen Erregereinrichtung (Beispielsweise $2 \mu\text{F} / 1 \Omega$). Dieser reduziert die Wellenspannungen des Erregersystems.
- 5: Zusätzliche Kapazitäten auf der Drehstromseite des Erregertransformators und eventuell vorhandenen Sternpunktes. Erdverbindungen müssen dabei entfernt werden.

Das Konzept weist folgende Vorteile auf:

- RC – Erdungsbürsten sind leichter zugänglich und haben geringeren Wartungsaufwand
- Zuverlässige und dauerhafte Reduktion aller Wellenspannungen auf unkritische Werte RC – Erdung kompatibel mit bestehenden Abhilfemaßnahmen
- Einfache Nachrüstung bestehender Anlagen
- Einsetzbar bei allen Anlagentypen und –größen, unabhängig von statischer Erregung
- Möglichkeit des Monitorings

4.7 Zusammenfassung

Nachfolgend befinden sich zwei Tabellen, die die Wellenspannungsquellen, die auftretenden Wellenspannungen und deren Vermeidung beziehungsweise Abhilfemaßnahmen darstellen.

Source	Transmission	Damage
I. <u>Magnetic Unsymmetries</u> , e.g. due to - joints in the stator laminations - rotor eccentricity - rotor or stator sagging produce variable magnetic flux.	A variable magnetic ring flux is linked with the rotor shaft-bedplate - bearing circuit and induces a shaft voltage.	The induced voltage will cause large currents and corresponding damage in any low-resistance loop.
II. <u>Axial Shaft Flux</u> , e.g. due to - residual magnetization - rotor eccentricity - saturation - asymmetrical rotor winding.	The rotating flux induces unipolar voltages in bearings and parts of the shaft.	The induced voltages will cause large currents and corresponding damage in bearings and shaft seals.
III. <u>Electrostatic charge</u> , e.g. due to steam brushing turbine blades.	The capacitance of the shaft versus ground is charged and the shaft is raised to a potential according to the internal insulation.	The voltage between the shaft and bearings (ground) will stress the oil film. In case of breakdown, electric discharge will occur and pitting will damage the surfaces of bearings and seals.
IV. <u>External Voltages on Rotor Windings</u> , e.g. due to - static excitation equipment - voltage source and/or rotor winding insulation asymmetries - active rotor winding protection.	External voltages raise the shaft to a potential according to the insulation capacitances and resistances of the source, the winding, and the shaft versus ground.	
<p>I. <p>III. </p> <p>1 bedplate 2 bearings 3 rotor shaft 4 stator 5 steam turbine 6 converter 7 rotor winding 8 transformer V_s shaft voltage Φ magnetic flux k constant n speed</p> </p>		

Tabelle 1: Zusammenfassung der Wellenspannungsquellen [19]

Type of shaft voltage	Possible measures at the source	Possible measures at the transmission system	Possible measures at the point of appearance
Magnetic Asymmetries	<u>Design</u> : Avoid all kinds of asymmetries <u>Assembly</u> : Avoid eccentricity	<u>None</u>	Prevent large currents by inserting insulating layers in all possible short circuit loops of the induced voltage
Axial Shaft Flux	Demagnetization of magnetized parts	Insert thick layers of material with low permeability in all possible flux paths	<u>None</u>
Electrostatic Charge	<u>None</u>	<u>None</u>	Ground the shaft with a resistance of less than $1k\Omega$.
Static Excitation System	Keep the common mode voltage and the voltage rises as small as possible. Keep the transformer to ground capacitances as small as possible.	Prevent all asymmetries in the excitation circuit. Symmetrical filters on the DC side of the rectifier are helpful.	Additional shaft to ground capacitance of $10\mu F$

Tabelle 2: Zusammenfassung der Abhilfemaßnahmen von Wellenspannungen [19]

5 Berechnungsansatz und Umsetzung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einem möglichen Berechnungsansatz von Wellenspannungen verursacht durch etwaige magnetische Unsymmetrien in Hydrogeneratoren. Die Entstehungsursache dieser Wellenspannungen wurde bereits im Detail in Kapitel 4.2.1 „Unsymmetrie im magnetischen Kreis“ behandelt. Beginnend wird eine Untersuchung des Vorhandenseins von Wellenspannungen mittels Analyse von Maschinenparameter bezüglich der Teilbarkeitsregeln durchgeführt. Anschließend wird ein Verfahren zur Abschätzung etwaiger Wellenspannungen vorgestellt. Dieses soll durch Kenntnis der grundlegenden Parameter eines Hydrogenerators einen Rückschluss auf zu erwartende Wellenspannungen und somit ein mögliches Gefährdungspotential frühzeitig aufzeigen.

Die Umsetzung der Berechnungen entsteht mittels eines Berechnungstools und -funktionen, welche mit Hilfe der Software MATLAB R2016a erstellt werden. Ausschnitte der Umsetzung werden in den jeweiligen Unterpunkten vorgestellt und beschrieben.

5.1 Analyse der Teilbarkeitsregeln

Der Zusammenhang von Wellenspannungen, verursacht durch magnetische Unsymmetrien, mit dem mechanischen Aufbau des Ständers ist seit langem bekannt. Erste Untersuchungen zu diesem Thema stammen aus den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts (vgl. [14]). Als Ergebnis dieser Forschungen konnte festgestellt werden, dass bei ungünstigen Kombinationen aus Ständeraufbau und Anzahl der Pole sehr hohe Wellenspannungen entstehen können. Im Umkehrschluss lassen sich Wellenspannungen magnetischen Ursprungs minimieren, sofern die Teilbarkeitsregeln eingehalten werden. Eine vollständige Vermeidung lässt sich jedoch nicht erreichen. (vgl. [14])

Die Anwendung der Teilbarkeitsregeln lässt eine Abschätzung der zu erwartenden Wellenspannung zu und wird im Zuge dieser Arbeit als Kriterium bezüglich der Anwendbarkeit des später vorgestellten Berechnungsverfahrens herangezogen.

Nachfolgend werden zwei Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Teilbarkeitsregeln vorgestellt. Beide führen zu denselben Ergebnissen, unterscheiden sich jedoch minimal in ihrer Aussagekraft.

5.1.1 Stoßstellen

Die Anzahl der Stoßstellen ist von fundamentaler Bedeutung für die Anwendung der Teilbarkeitsregeln. Eine Stoßstelle bezeichnet den Übergang zwischen zwei einzelnen Blechsegmenten eines Ständers. Der Ständer kann, begründet durch seine Größe, nicht aus einem kreisrunden Blech gefertigt werden. Somit ist eine Aufteilung in Blechsegmente nötig. Zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften, und Vermeidung einer durchgängigen Stoßstelle längs des Ständers, werden die Bleche versetzt angeordnet. Die sogenannte Überlappung gibt den Grad der versetzten Anordnung wieder.

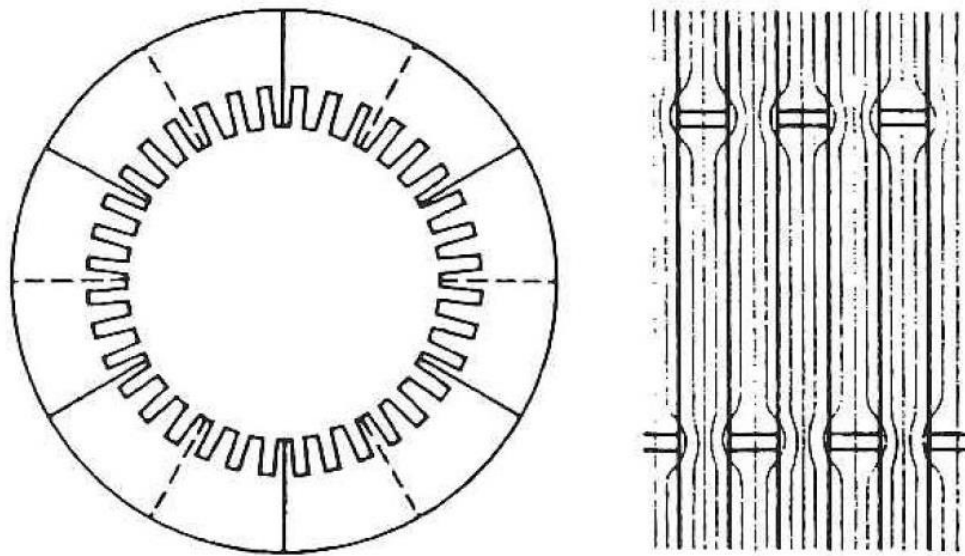


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Ständerbleche – Überlappung und deren Auswirkung auf den Feldlinienverlauf [20]

Abbildung 5-1 zeigt einen Ständer mit $\frac{1}{2}$ Überlappung. Aufgebaut ist dieser Ständer aus sechs Blechsegmenten. Darüber ist ein weiteres Segment angeordnet, welches die Stoßstelle der beiden darunterliegenden Blechsegmente genau mittig abdeckt. Abbildung 5-1 rechts zeigt den Grund für die Verwendung von überlappten Ständerblechen. Bei Überlappung könne die magnetischen Feldlinein über das benachbarte Blech ausweichen und müssen nicht über den magnetisch ungünstigeren Luftspalt. Ohne Überlappung würde im Ständer ein druchgängiger Spalt entstehen. Die Feldlinien könnten nicht ausweichen und es resultiert ein unerwünschter, erhöhter magnetischer Widerstand.

Bei Verwendung von überlappten Segmenten muss diese Anordnung in die Berechnung der Stoßstellen mit einbezogen werden. So verdoppelt sich die Anzahl der Stoßstellen unter Verwendung der $\frac{1}{2}$ Überlappung. (vgl. [21],[22])

Die Anzahl der Stoßstellen S_g berechnet sich somit wie folgt:

$$S_g = \frac{S}{k_s} \quad (1)$$

Hierbei entspricht S der Anzahl der Stoßstellen durch die Ständerblechpaketsegmentierung und k_s dem Faktor der Überlappung. Sehr große Maschinen besitzen aus logistischen Gründen oftmals geteilte Ständerblechpakete, somit wird der gesamte Ständer zum Transport in mehrere Teile geteilt. Im Allgemeinen befinden sich diese Trennstellen an Punkten, an denen konstruktionsbedingt eine Stoßstelle zu finden ist. Somit ändert sich die Summe der Stoßstellen durch eine zusätzliche Ständerteilung nicht.

5.1.2 Teilbarkeitsregeln nach Richter

Die Berechnung der Teilbarkeitsregeln nach Richter bestimmt das Auftreten einer Wellenspannung durch Berechnung des gemeinsamen Teilers aus Stoßstellen und Polpaarzahl. Durch Untersuchung des Teilungsverhältnisses und der Stoßstellen kann auf etwaige Wellenspannungen, sowie auf deren Frequenzverhalten geschlossen werden. (vgl. [15])

$$t = ggT(S_g, p) \quad (2)$$

Wellenspannungen sind nach Richter (vgl. [15]) vorhanden, wenn folgende Bedingung zutrifft:

$$\frac{S_g}{t} = \text{ungerade} \quad (3)$$

Liefert die obige Bedingung einen geraden Wert, so ist mit keinen nennenswerten Wellenspannungen magnetischen Ursprungs zu rechnen. Die Frequenz einer möglichen auftretenden Wellenspannung entspricht dem S_g/t – fachen der Grundfrequenz.

Des Weiteren werden in dieser Arbeit noch die Auswirkungen der Überlappung auf das Ergebnis der Teilbarkeitsregeln untersucht. Daraus ergeben sich folgende Berechnungsansätze:

- Berücksichtigung aller Stoßstellen inklusive Überlappung
- Vernachlässigung der Überlappung
- Vernachlässigung aller Stoßstellen, ausgenommen Fugen durch geteilte Ständerblechpakete

5.1.3 Teilbarkeitsregeln nach Taegen

Ein weiterer Ansatz zur Anwendung der Teilbarkeitsregel findet sich in [22]. Demnach ist ein Auftreten von Wellenspannungen an folgende Teilbarkeitsregel gebunden:

$$\frac{n \cdot p}{S_g} = g \quad (4)$$

mit $g = 1, 2, 3, \dots$

Ist diese Bedingung erfüllt, so ist mit einem Auftreten einer Wellenspannung zu rechnen. Der Faktor n bezeichnet die Ordnungszahl der Harmonischen für die magnetische Spannung. Laut Taegen [22] Üblicherweise treten nur ungerade Harmonische auf, da meist nur Drehfelder mit ungeraden Ordnungszahlen v auftreten:

$$n = 1, 3, 5 \quad \text{für } v = 1, 3, 5 \dots$$

Geradzahlige Harmonische sind nur als Folge geradzahliger Oberfelder v denkbar. Diese können durch unsymmetrische Pole verursacht werden. (vgl. [22])

Tritt eine Wellenspannung nach den Bedingungen aus Gleichung (4) auf, so errechnet sich deren Frequenz zu:

$$f_W = n \cdot f_N \quad (5)$$

Diese Methode unterscheidet sich hinsichtlich ihres Ergebnisses nur unwesentlich von der Methode von Richter aus Kapitel 5.1.2. Der Vorteil liegt hier darin, dass mehrere Odnungszahlen, und somit die Frequenzen, mehrerer etwaiger Wellenspannungen ermittelt werden.

Ähnlich zu den Versuchen des Verhaltens der Teilbarkeitsregeln im vorigen Kapitel, werden im Zuge dieser Arbeit zwei Szenarien untersucht:

- Stoßstellen unter Berücksichtigung der Überlappung
- Stoßstellen ohne Überlappung

5.2 Berechnung der Wellenspannung nach Jordan

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Berechnung der Wellenspannung und aller dazu relevanten Parametern. Als Grundlage der folgenden Untersuchungen dient die Forschungsarbeit „Die Ermittlung von Wellenspannung und Lagerstrom in elektrischen Maschinen unter Berücksichtigung der magnetischen Spannung im Eisen“ von W. Freise und H. Jordan, nachzulesen unter [21].

Die Berechnung gliedert sich in folgende Schritte:

- Bestimmung der magnetischen Größen im Ständerjoch
- Bestimmen der Rückeninduktion im Ständer unter Einbeziehung der Eiseigenschaften
- Bestimmen der fiktiven Wellenstromkennlinie
- Berechnen der Wellenspannung

Die Berechnung erfolgt in dieser Arbeit testweise für alle Maschinen von denen Daten zur Verfügung gestellt wurden. Laut Freise und Jordan (vgl. [21]) ist die vorgestellte Methodik nur zulässig, sofern die Teilbarkeitsregeln nicht erfüllt sind und es somit Wellenspannungen, verursacht durch magnetische Unsymmetrien, geben kann. Diese Bedingungen werden im weiteren Verlauf in der Auswertung der Ergebnisse wieder aufgegriffen.

5.2.1 Bestimmen der magnetischen Größen im Ständerjoch

Für die Bestimmung von Wellenspannungen, verursacht durch magnetische Unsymmetrien, ist die Kenntnis der grundlegenden magnetischen Parameter des Generators notwendig. Die zu berechnenden Kenngrößen sind:

- Hauptfluss
- Jochfluss
- Jochflussdichte

Bei dem vorgestellten Berechnungsverfahren soll es sich um eine abschätzende Methode zur Vorausberechnung der Wellenspannung im Entwurfstadium handeln. Somit kann zur Berechnung des Hauptflusses die vereinfachte Variante unter Verwendung der induzierten Spannung verwendet werden. Diese entspricht, im Fall eines Betriebs im Nennpunkt, der Nennspannung des Generators. Die induzierte Spannung U_{ind} ist laut Vereinfachungen aus [20] gegeben durch:

$$U_{\text{ind}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_N w_{\text{sp}} \xi_{\text{sp}} \hat{\phi}_h \quad (6)$$

Somit kann der gesuchte Hauptfluss errechnet werden durch:

$$\hat{\phi}_h = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{ind}}}{2\pi f_N w_{\text{sp}} \xi_{\text{sp}}} \quad (7)$$

Der Hauptfluss der Maschine teilt sich im Allgemeinen im Ständer in zwei Komponenten auf, einer linksumlaufernden und einer rechtsumlaufernden. (vgl. [14])

Abbildung 5-2 veranschaulicht die Aufteilung des Hauptflusses in zwei gegenläufige Jochflüsse.

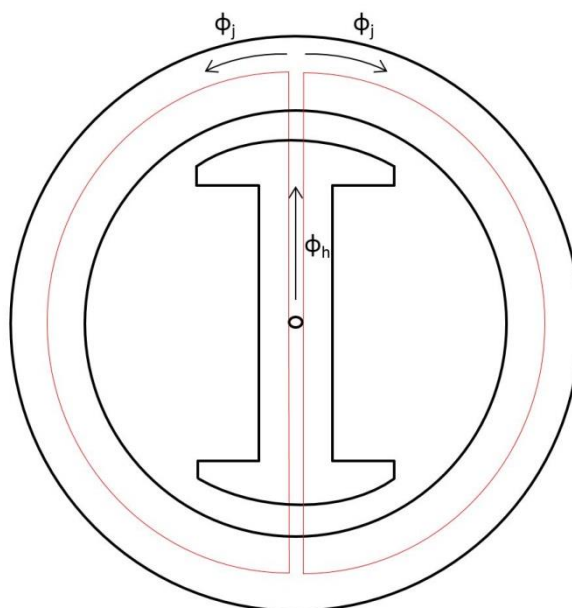


Abbildung 5-2: Aufteilung des Hauptflusses in zwei gegenläufige Jochflüsse

Durch die Aufteilung des Hauptflusses errechnet sich der Jochfluss zu:

$$\hat{\phi}_j = \frac{\hat{\phi}_h}{2} \quad (8)$$

Über den Jochfluss kann die Flussdichte im Ständerjoch bestimmt werden durch den allgemeinen Zusammenhang von Fluss Φ , Flussdichte B und Fläche A :

$$\vec{\phi}_j = \int \vec{B}_j d\vec{A}_j \quad (9)$$

Im Fall des Ständerjochs handelt es sich um eine gerade, nicht gekrümmte, Fläche. Somit kann das Integral zu einem Skalarprodukt vereinfacht werden:

$$\phi_j = B_j A_j \quad (10)$$

Die gesuchte Jochflussdichte errechnet sich zu:

$$\hat{B}_j = \frac{\hat{\phi}_j}{A_j} \quad (11)$$

5.2.2 Bestimmen der Ständerrückeninduktion im Ständer unter Einbeziehung der Eiseneigenschaften

Um quantitative Aussagen über die Wellenspannungen treffen zu können, darf der Einfluss der magnetischen Spannungen im Eisen keinesfalls vernachlässigt werden. Treten magnetische Unsymmetrien auf, entsteht im Ständerrücken ein Ringfluss B_z , welcher auch berücksichtigt werden muss. Unter Einbeziehung der magnetischen Spannung im Eisen bei vorhandenen Stoßfugen bestimmter Breite ergibt die Anwendung des Durchflutungssatzes folgende Gleichung: (vgl. [21])

$$\sqrt{2} \cdot I_w = N_1 \int_0^{2\pi} H_e dx + \frac{S_g \cdot \varepsilon}{\mu_0} (\hat{B}_j - \hat{B}_z) \quad [21] \quad (12)$$

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Bestimmung von H_e , der Feldstärke im Eisen. Sie spiegelt die Ergänzung zu anderen Berechnungsverfahren von Wellenspannungen die Eiseneigenschaften wieder. Der erste Schritt ist die Berechnung der Flussdichte im Eisen: (vgl. [21])

$$\hat{B}_e(x) = \hat{B}_j \cdot \cos(x) - \hat{B}_z \quad [21] \quad (13)$$

Zur Berechnung des fiktiven Wellenstromes in (12) und der Flussdichte im Eisen in (13) ist laut [21] von einem frei gewählten Wert für die Ringflussdichte \hat{B}_z auszugehen. Als praktikabel hat sich ein Wert zwischen 0.1T und 0.6T erwiesen. Die Variable x gibt die entsprechende Umlaufkoordinate im Ständer wieder, schematisch dargestellt in folgender Abbildung:

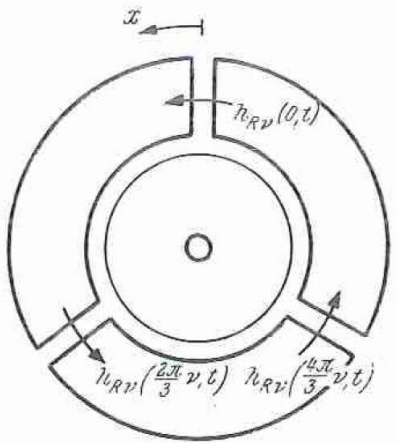


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Umlaufkoordinate x [21]

Durch Kenntnis der magnetischen Flussdichte und der Magnetisierungskennlinie des verwendeten Eisenwerkstoffes kann jeder errechneten Flussdichte eine entsprechende Feldstärke zugeordnet werden.

Die Kennlinie der magnetischen Feldstärke H_e im Eisen, bestimmt aus der Flussdichte B_e , ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Kennlinie ist Teil der Berechnung des fiktiven Wellenstroms und in weiterer Folge der Wellenspannung. (vgl. [21])

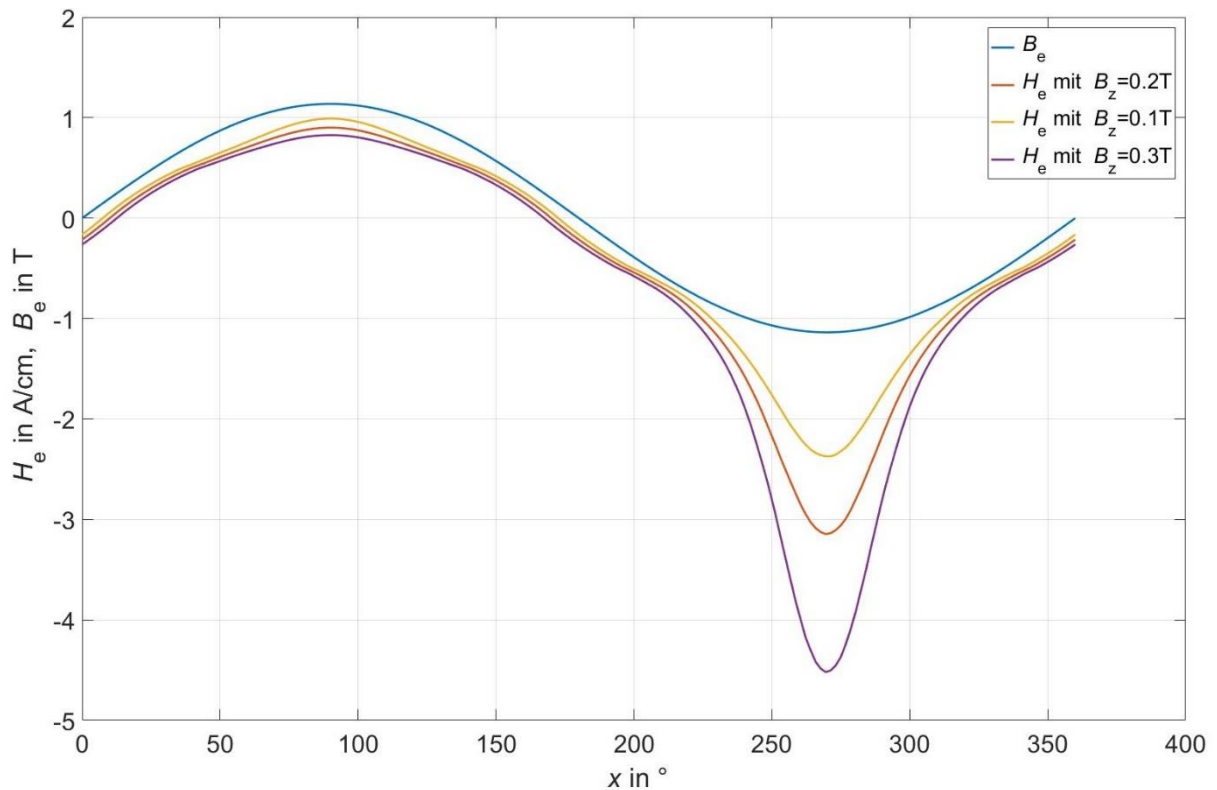


Abbildung 5-4: Kennlinie von H_e bei einer Rückeninduktionen von 0.1, 0.2 und 0.3Tesla

Sehr gut erkennbar ist in Abbildung 5-4 die Nichtlinearität des Eisens, resultierend aus der Magnetisierungskennlinie. Hierdurch verhalten sich die beiden Halbwellen unterschiedlich, da die Subtraktion von \hat{B}_z in Formel (13) den positiven Anteil reduziert und die Flussdichte in der negativen Halbwelle erhöht. Die geringen Abweichungen von einer Sinusform von H_e (gut erkennbar bei der positiven Halbwelle in Abbildung 3-4) lassen sich durch die notwendige Interpolation der B-H-Kennlinie des Eisenwerkstoffes aus einzelnen Messpunkten erklären. Eine Interpolation stellt nur eine Annäherung dar und führt somit zu Abweichungen. Weitere Informationen hinsichtlich der Interpolation der Magnetisierungskennlinie finden sich im nachfolgenden Punkt.

5.2.2.1 Bestimmung der Magnetisierungskennlinie

Hersteller von Elektroböden zur Herstellung von Ständersegmenten liefern zu ihren Produkten garantierte Kennwerte bei bestimmten Messpunkten. Es ist für die Berechnung allerdings notwendig, jeder beliebigen Flussdichte auch eine entsprechende Feldstärke zuordnen zu können. Um die Messpunkte zu einer Kennlinie zu verbinden ist eine Interpolation notwendig. Hierbei wird eine Kurve den bekannten Messpunkten angenähert. Diese Annäherung kann durch verschiedene Möglichkeiten erfolgen:

- Lineare Interpolation: hierbei werden die beiden nebeneinanderliegenden Messpunkte durch eine Gerade miteinander verbunden
- Interpolation mittels Spline-Funktion: die bekannten Messpunkte (Stützstellen) werden stückweise durch Polynome angenähert
- Kubische Interpolation: Annäherung erfolgt abschnittsweise durch eine kubische Funktion, einem Polynom dritten Grades

Die Arten der Interpolation unterscheiden sich hinsichtlich ihres Berechnungsaufwandes und der erzielbaren Genauigkeit. Abbildung 5-5 und 5-6 veranschaulichen die Unterschiede dieser Interpolationsverfahren.

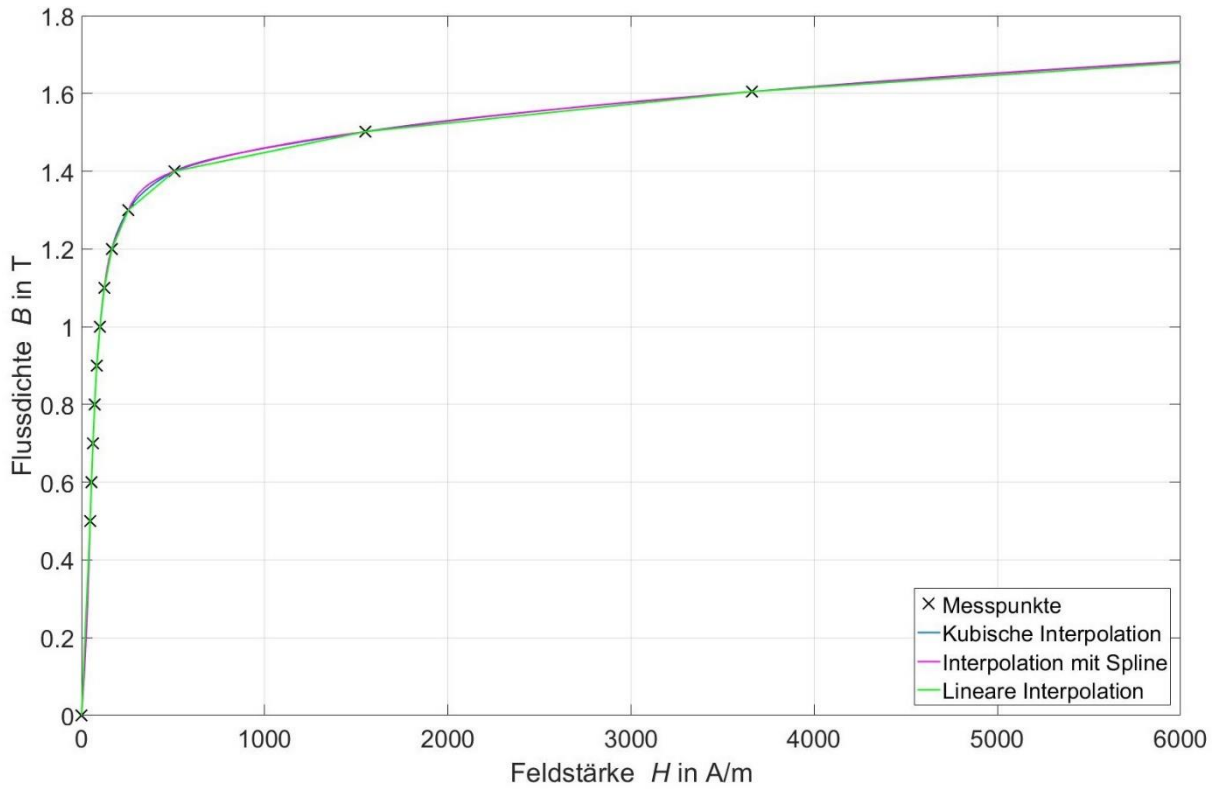


Abbildung 5-5: Interpolierte Magnetisierungskennlinie

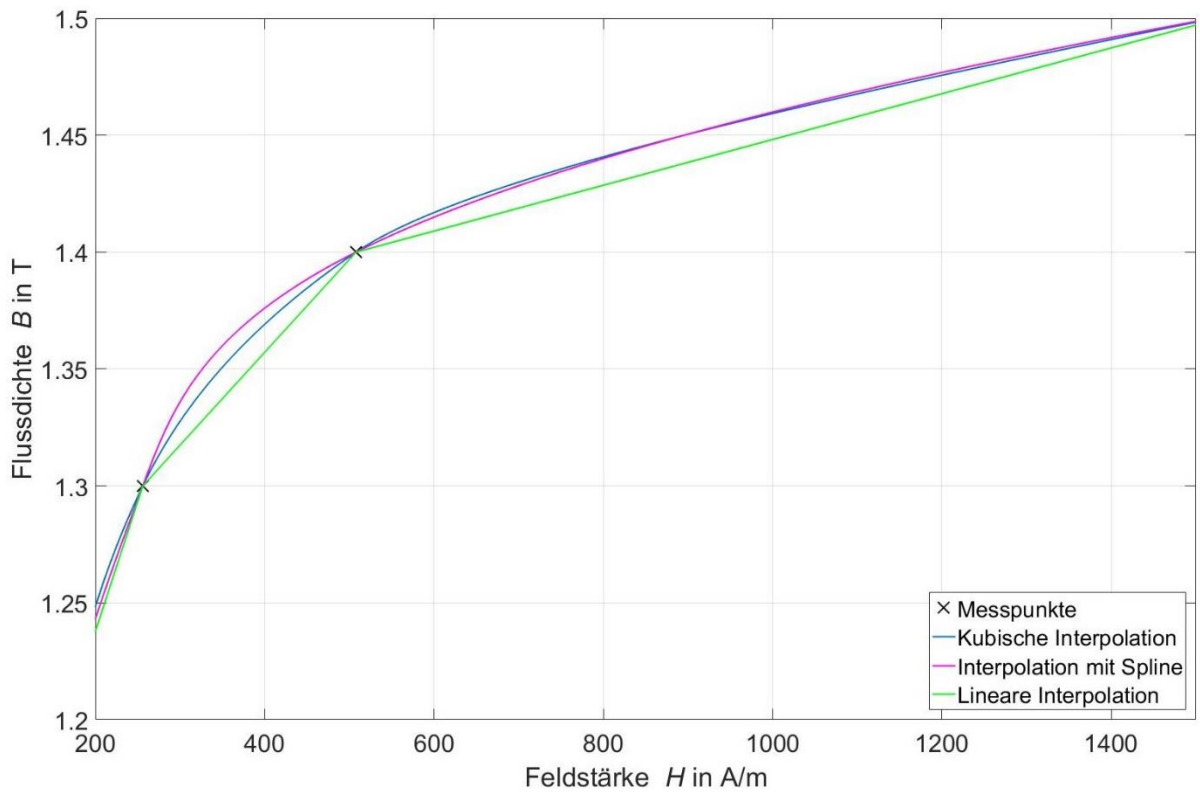


Abbildung 5-6: Zoom zur Verdeutlichung der Unterschiede der verschiedenen Interpolationsverfahren

Abbildung 5-6 stellt einen Ausschnitt aus der Magnetisierungskennlinie dar. Hier sind die Unterschiede der einzelnen Interpolationsverfahren gut ersichtlich. Als beste Interpolationsmethode hat sich die kubische Interpolation herausgestellt.

5.2.3 Bestimmen der fiktiven Wellenstromkennlinie

Das Berechnen der Wellenspannung erfordert [21] zufolge eine vorherige Bestimmung des fiktiven Wellenstromes und dessen Kennlinie. Der Wellenstrom bestimmt sich aus der Anwendung des Durchflutungssatzes und ist in Formel (12) beziehungsweise (14) dargestellt.

$$\sqrt{2} \cdot I_w = N_1 \int_0^{2\pi} H_e dx + \frac{S_g \cdot \varepsilon}{\mu_0} (\hat{B}_j - \hat{B}_z) \quad (14)$$

Nachdem auch H_e bereits berechnet wurde muss nun das Integral über den Verlauf von H_e berechnet werden. Die Bestimmung des Integrals erfolgt näherungsweise durch eine Annäherung des Kurvenverlaufs zwischen zwei Stützstellen durch eine Gerade. Zulässig ist diese Vereinfachung, wenn der Abstand zwischen den Stützpunkten sehr klein gehalten wird. Die sogenannte Schrittweite ist abhängig von der Anzahl der vorgegebenen Stützpunkte der Funktion. In den Berechnungsversuchen hat sich eine Stützpunktanzahl von 200 als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit ergeben.

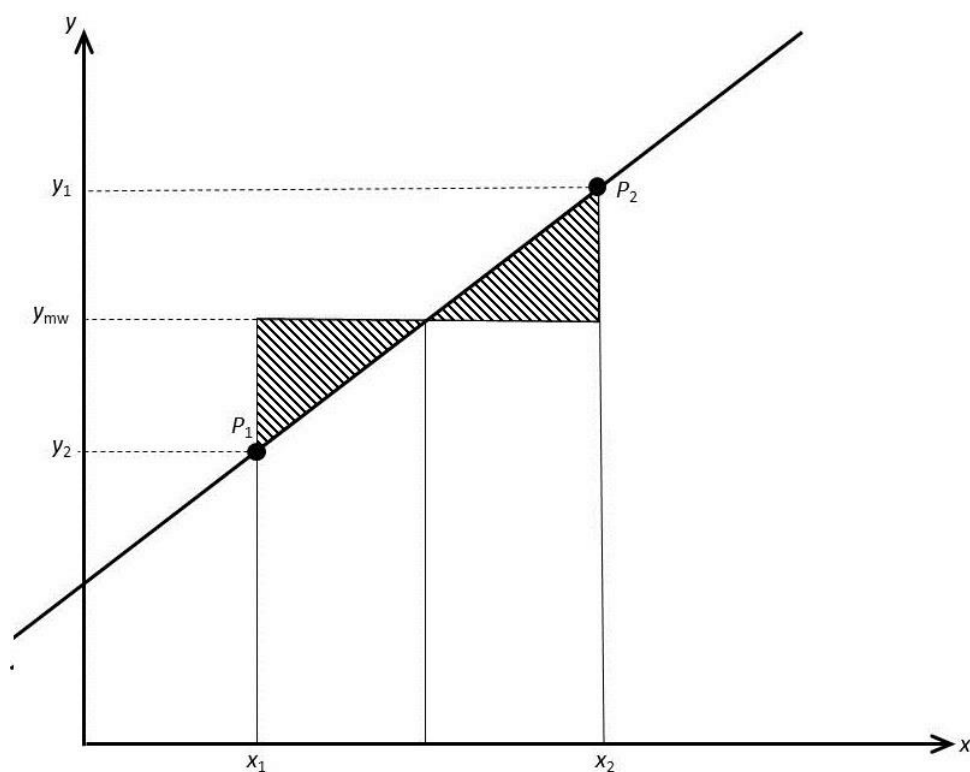


Abbildung 5-7: Näherung zur Integralberechnung

Abbildung 5-7 zeigt die vereinfachte Berechnung des Integrals als Teil der Formel (14). Hierbei sind P_1 und P_2 die durch eine Gerade verbundenen Stützpunkte. y_{mw} entspricht dem Mittelwert der y – Koordinaten. Diese Annäherungen lassen eine Berechnung des Integrals zu:

$$\int_0^n y dx = \sum_{i=0}^n y_{mwi} \cdot \Delta x_i \quad (15)$$

mit

$$y_{mw} = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad \text{und} \quad \Delta x = x_2 - x_1 \quad (16)$$

Einsetzen der hieraus berechneten magnetischen Feldstärke im Eisen H_e in die Gleichung (14) ergibt den fiktiven Wellenstrom I_w . Zur Berechnung der Wellenspannung im folgenden Kapitel ist die Kenntnis des Verlaufs des Wellenstromes in Abhängigkeit der Rückeninduktion \hat{B}_z notwendig. Hierfür wird die Rückeninduktion, wie bereits in Kapitel 5.2.2 „Bestimmen der Rückeninduktion im Ständer unter Einbeziehung der Eiseigenschaften“ erwähnt, zwischen 0.1 T und 0.6 T variiert und der resultierende Strom auf die y – Achse aufgetragen. Abbildung 5-8 zeigt eine mögliche Kennlinie zur Veranschaulichung.

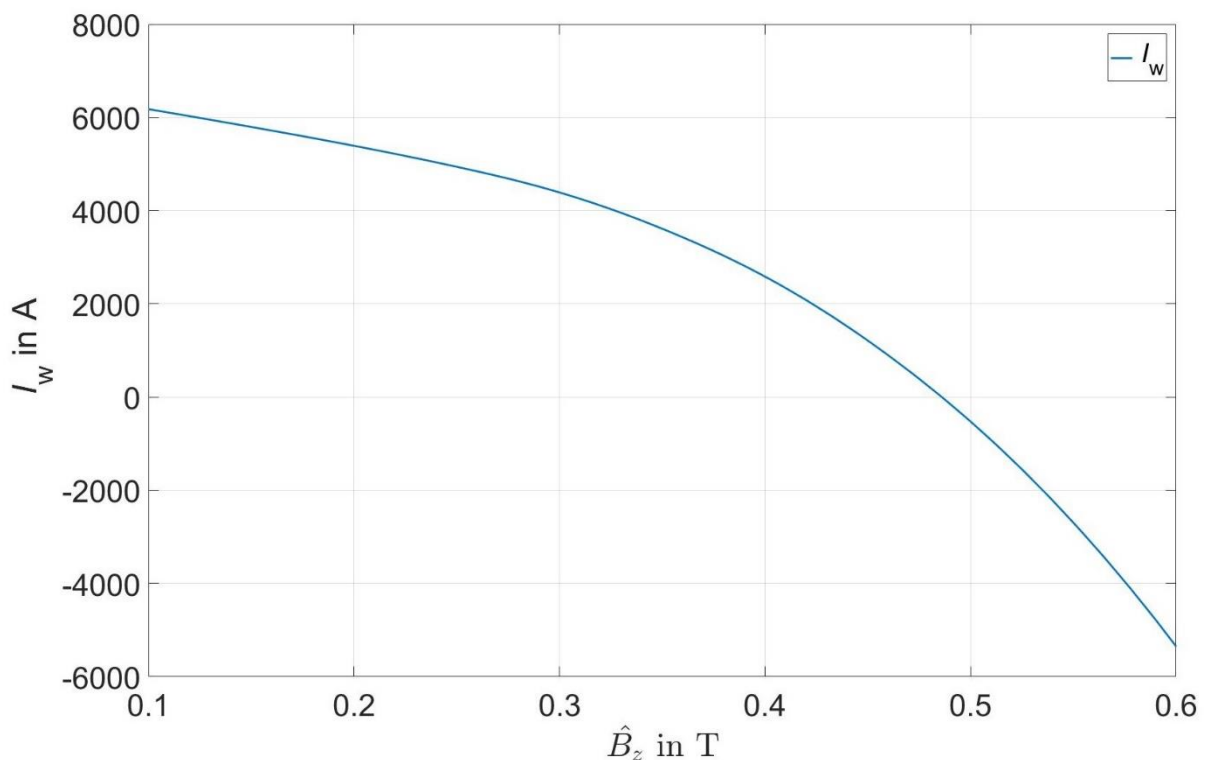


Abbildung 5-8: Beispiel des fiktiven Wellenstromes über der Rückeninduktivität

5.2.4 Berechnen der Wellenspannung

Im letzten Schritt des Berechnungsansatzes berechnet man aus der Kennlinie des fiktiven Wellenstromes die Wellenspannung U_w . Man errechnet sie wie folgt: (vgl. [21])

$$U_w = \frac{\omega_{el}}{\sqrt{2}} A_j \hat{B}_{z0} \quad [21] \quad (17)$$

In Formel (17) ist der Scheitelwert \hat{B}_{z0} enthalten. Diesen kann man aus der im vorigen Kapitel erwähnten Kennlinie des fiktiven Wellenstroms (Abbildung 5-7) auslesen und ist wie folgt definiert:

$$\hat{B}_{z0} = \hat{B}_z(I_w = 0) \quad (18)$$

\hat{B}_{z0} entspricht somit dem Nulldurchgang der in Abbildung 5-8 dargestellten Kennlinie. Um diese Flussdichte im Ständerrücken mit möglichst wenigen Funktionen in MATLAB rechnerisch zu ermitteln, werden in der Funktion für den Kurvenverlauf folgende Punkte gesucht:

- der letzte Punkt, an dem I_w positiv ist (I_{w1})
- der erste Punkt, an dem I_w negativ ist (I_{w2})

Dadurch ist der Bereich des Nulldurchganges eingeschränkt. Durch möglichst kleine Wahl der Abstände der Funktionsstützpunkte kann der Bereich um den Nulpunkt minimiert werden.

Aufgrund des kleinen Bereiches, in dem die Flussdichte \hat{B}_{z0} liegen muss, kann die Funktion in diesem Bereich durch eine Gerade mit folgender, allgemeiner Form angenähert werden:

$$y = k \cdot x + d \quad (19)$$

Dies entspricht, angewandt auf den fiktiven Wellenstrom:

$$I_w = k \cdot \hat{B}_z + d \quad (20)$$

Durch Anwenden der Bedingung aus Gleichung (18) erhält man folgende vereinfachte Form:

$$0 = k \cdot \hat{B}_{z0} + d \quad (21)$$

Daraus folgt:

$$\hat{B}_{z0} = -\frac{d}{k} \quad (22)$$

Die Steigung der Geraden sowie deren Verschiebungskonstante errechnet man aus den entsprechenden x/y – Koordinaten des letzten positiven und ersten negativen Stützpunktes des fiktiven Wellenstroms:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{I_{w2} - I_{w1}}{\hat{B}_{z2} - \hat{B}_{z1}} \quad (23)$$

$$d = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} = \frac{\hat{B}_{z2} I_{w1} - \hat{B}_{z1} I_{w2}}{\hat{B}_{z2} - \hat{B}_{z1}} \quad (24)$$

Abbildung 5-9 zeigt einen Ausschnitt der Kennlinie des fiktiven Wellenstroms aus Abbildung 5-8.

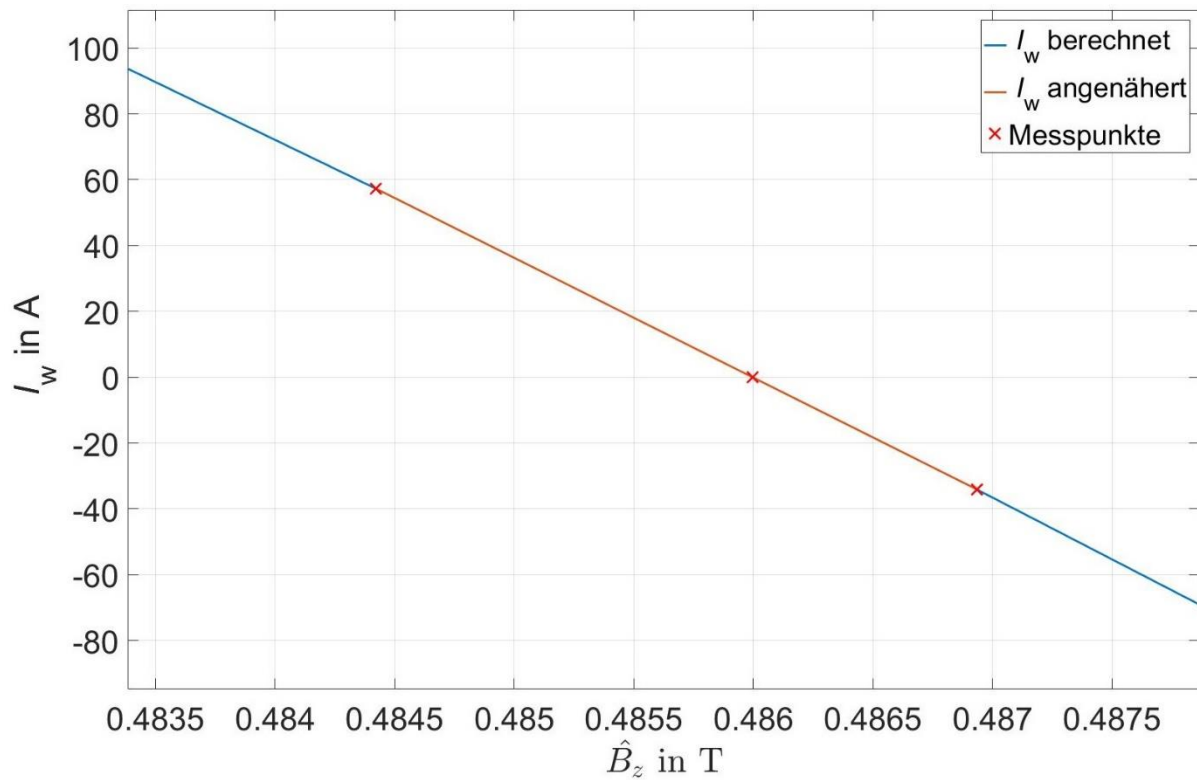


Abbildung 5-9: Interpolierte Gerade zur Bestimmung von \hat{B}_{z0}

Gut zu erkennen ist die äußerst geringe Abweichung zwischen der interpolierten Gerade und dem tatsächlichen Verlauf des fiktiven Wellenstromes. Nachmessungen im Graphen ergaben Abweichungen von unter einem Prozent und spielen somit für eine Abschätzung keine Rolle.

6 Berechnungsszenarien

Dieses Kapitel definiert Berechnungsszenarien sowie deren mögliche Auswirkungen auf die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens. Die Definition dieser Berechnungsszenarien dient dazu, sämtliche Faktoren für Wellenspannungen aus magnetischen Unsymmetrien bedingt durch die Ständerblechsegmentierung zu verdeutlichen und deren Auswirkungen auf die vorgestellte Berechnungsmethode festzustellen. Die einzelnen Berechnungsszenarien sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Szenario Nr.	Definition
1	Standardberechnungsverfahren; Einbeziehung Segmentierung; Stoßfugenbreite aus Maschinendaten; geteiltes Ständerblechpaket nicht berücksichtigt
2	Standardberechnungsverfahren; Einbeziehung Segmentierung; geänderte Stoßfugenbreite über Lackzweig; geteiltes Ständerblechpaket nicht berücksichtigt
3	Segmentierung nicht berücksichtigt; Ermittlung Auswirkung geteilter Ständerblechpakete mit angepasster Stoßfugenbreite
4	Erweiterung von Szenario 2 um Einfluss geteilter Ständerblechpakete und deren Stoßfugenbreite
5	Erweiterung von Szenario 1 um Einfluss geteilter Ständerblechpakete und deren Stoßfugenbreite

Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Berechnungsszenarien

Die einzelnen Berechnungsszenarien sollen die Anwendbarkeit der Berechnungsmethode durch Vergleich mit bekannten Wellenspannungsmessergebnissen verdeutlichen. Mit Hilfe der einzelnen Szenarien ist ebenfalls ein Schluss auf Modifikationen zur Verbesserung der Anwendbarkeit der vorgestellten Berechnungsmethode möglich und wird Kapitel „Ausblick“ thematisiert.

Auf Details zu den jeweiligen Berechnungsszenarien aus Tabelle 3 wird in den untenstehenden Kapiteln eingegangen.

6.1 Berechnungsszenario 1: Wellenspannung mit Segmentierung und Stoßfugen normaler Breite

Diese erste Szenario unterliegt keinen besonderen Einschränkungen. Die Berechnung der durch magnetische Unsymmetrien verursachten Wellenspannung erfolgt nach den bereits vorgestellten Gesichtspunkten aus den grundlegenden Daten von Hydrogeneratoren. Zu diesen gehören Daten hinsichtlich der geometrischen Abmessungen und grundlegender elektrischer Größen. Ausschlaggebend sind hier Informationen hinsichtlich der Stoßfugenbreite, welche laut Maschinendaten 0.3 mm beträgt.

Die Besonderheit dieses Szenarios ist ein Fehlen etwaiger Einflüsse eines geteilten Ständerblechpaketes, somit haben alle Stoßstellen entlang des Umfangs dieselbe Breite.

6.2 Berechnungsszenario 2: Wellenspannung mit Segmentierung und Stoßfugen verringerter Breite durch geänderten Weg der Feldlinien

In diesem Szenario werden, wie bereits in Berechnungsszenario 1, mögliche Auswirkungen eines geteilten Ständerblechpaketes nicht berücksichtigt. Es fließen in die Anzahl der Stoßstellen nur die jeweiligen Segmente und die Überlappung ein. Vordergrundig in Berechnungsszenario 2 ist die Idee eines alternativen Weges der magnetischen Feldlinien im Bereich der überlappten Stoßstellen.

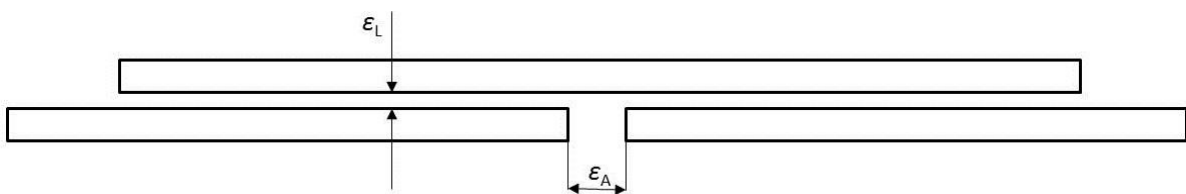


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung überlappter Ständerblechsegmente

Abbildung 6-1 zeigt den Überlappungsbereich zweier Ständerblechsegmente. Berechnungsszenario 1 geht davon aus, dass sich die magnetischen Feldlinien über den Luftspalt der Breite ε_A schließen. Im vorliegenden Berechnungsszenario 2 wird nun ein alternativer Weg berücksichtigt. Die Feldlinien führen über den Abstand ε_L zum benachbarten Ständerblech und nach der eigentlichen Stoßstelle wieder über ε_L zurück zum ursprünglich folgenden Blechsegment. Der Grund für diese Annahme liegt darin, dass die jeweiligen Blechschichten nur durch jeweils zwei Lackschichten zu jeweils $5 \mu\text{m}$ getrennt sind. ε_L beträgt somit $10 \mu\text{m}$. Daraus folgt eine gesamt wirksame Stoßfugenbreite ε_{Lg} von:

$$\varepsilon_{Lg} = 2 \cdot \varepsilon_L = 2 \cdot 10 \mu\text{m} = 20 \mu\text{m} \quad (25)$$

Vergleicht man diese Stoßfugenbreite mit ε_A von 0.3 mm (entspricht $300 \mu\text{m}$), so ist ein signifikanter Unterschied feststellbar. Diese Auswirkungen sollen mit Berechnungsszenario 2 untersucht werden.

6.3 Berechnungsszenario 3: Wellenspannung geteilter

Ständerblechpakete ohne Segmentierung

Alle bis hierhin durchgeführten Szenarien klammern Auswirkungen verursacht durch geteilte Ständerblechpakete aus. Diese werden getrennt im vorliegenden Berechnungsszenario 3 behandelt. Geteilte Ständerblechpakete haben vor allem logistische Gründe hinsichtlich Transport an den Aufstellungsort.

Berechnungsszenario 3 soll nur die Ständerblechtrennstellen S_t berücksichtigen. Somit beträgt die Anzahl der wirksamen Stoßfugen S_g :

$$S_g = S_t \quad (26)$$

Aufgrund der Tatsache, dass eine Trennstelle des gesamten Ständerblechs anderen Fertigungstoleranzen, verglichen zu einer Schichtung ohne Trennung unterliegt, muss mit einer geänderten Stoßfugenbreite gerechnet werden. Dies ist im Allgemeinen größer und befindet sich im Bereich von etwa 1 mm.

6.4 Berechnungsszenario 4: Wellenspannungsberechnung aus

Berechnungsszenario 2 mit berücksichtigter Ständerteilung

Nachfolgend wird in Berechnungsszenario 4 versucht, die bereits gewonnenen Erkenntnisse aus dem alternativen Zweig der Feldlinien (Berechnungsszenario 2) und einer möglichen Teilung des Ständerblechpaketes miteinander zu verknüpfen. Dies ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Der Grund liegt in der Tatsache, dass eine etwaige Ständerteilung im Allgemeinen in einer bestehenden Stoßstelle durchgeführt wird und sich die Stoßfugenbreite unterscheidet. Beides erfordert eine Anpassung des Berechnungsverfahrens welches in den Kapitel 5.2 vorgestellt wurde.

Zwar unterscheidet sich die Gesamtanzahl der wirksamen Stoßstellen nicht, es muss jedoch ein Weg gefunden werden, die jeweilige Anzahl der Stoßstellen und ihre unterschiedlichen Stoßfugenbreiten zu berücksichtigen. Die Stoßstellen, verursacht durch ein geteiltes Ständerblechpaket, können aus der Maschinenkonstruktion entnommen werden. Mit diesem Wissen kann man auf die durch Segmentierung wirksamen Stoßstellen S_s schließen:

$$S_s = S_g - S_t = \frac{S}{k_s} - S_t \quad (27)$$

Eine weitere Anpassung ist im Bereich der Gleichung für den fiktiven Wellenstrom notwendig:

$$\sqrt{2} \cdot I_w = N_1 \int_0^{2\pi} H_e dx + \frac{S_g \cdot \varepsilon}{\mu_0} (\hat{B}_j - \hat{B}_z) \quad (28)$$

Die Gleichung lässt keine Unterscheidung hinsichtlich Anzahl der Stoßstellen und Stoßfugenbreite zu. Durch Modifikation der Gleichung (28) kann dieses Problem behoben werden, es ergibt sich die neue Form der Gleichung des fiktiven Wellenstromes:

$$\sqrt{2} \cdot I_w = N_1 \int_0^{2\pi} H_e dx + \left(\frac{S_t \cdot \varepsilon_t}{\mu_0} + \frac{S_s \cdot \varepsilon_s}{\mu_0} \right) (\hat{B}_j - \hat{B}_z) \quad (29)$$

Die weitere Berechnung der Wellenspannung ändert sich nicht und kann, wie bereits vorgestellt, erfolgen, um die gesuchte Wellenspannung zu erhalten.

6.5 Berechnungsszenario 5: Wellenspannungsberechnung aus Berechnungsszenario 1 mit berücksichtigter Ständerteilung

Berechnungsszenario 5 unterscheidet sich nur unwesentlich zum vorangegangenen Berechnungsszenario 4. Die einzige Abweichung liegt in den unterschiedlichen Ansätzen hinsichtlich der Stoßfugenbreite. Hier wird Berechnungsszenario 1, an Stelle von Berechnungsszenario 2, mit der Möglichkeit einer vorhandenen Ständerteilung verbunden. Somit liegt der Unterschied der Szenarios lediglich in der Variation der wirksamen Stoßfugenbreite durch die Ständersegmentierung ε_s . Die Abmessungen der Stoßfugenbreite ändern sich von 20 μm auf 300 μm .

7 Ergebnisse und Auswertung

Folgendes Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen der in Kapitel 5 vorgestellten Berechnungsmethoden. Anzumerken ist, dass sich diese Berechnungen auf den Bereich von Wellenspannungen verursacht durch magnetische Unsymmetrien durch Stoßfugen im Ständerblechpaket in Hydrogeneratoren beschränken. Die benötigten Maschinenparameter bezüglich Abmessungen und elektrischer Auslegung wurden von der Firma Andritz Hydro für 12 ausgewählte Maschinen zur Verfügung gestellt. Die Auswahl erfolgte unter den Gesichtspunkten einer größtmöglichen Abdeckung aller Generatorleistungsklassen. Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse und deren Verifizierung wurden Messprotokolle von Wellenspannungsmessungen herangezogen.

Die Ergebnisse und Auswertungen unterteilen sich in folgende Unterpunkte:

- Teilbarkeitsregeln
- Vergleich der einzelnen Berechnungsszenarios mit den Messergebnissen
- Gegenüberstellung aller Berechnungsszenarios

Bezüglich der gemessenen Wellenspannungen ist anzumerken, dass Werte unter 1V, aufgrund von Messtoleranzen verursacht durch die Abgreifbürsten, zu vernachlässigen sind und als nicht vorhanden angesehen werden können.

7.1 Teilbarkeitsregeln

7.1.1 Teilbarkeitsregeln nach Richter

Die Berechnung der Erfüllung der Teilbarkeitsregeln nach Richter liefert eine einfache Aussage:

„Wellenspannung verursacht durch magnetische Unsymmetrien tritt auf/tritt nicht auf.“

Die Ergebnisse der Berechnungen nach Richter sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Bedingung	Maschinen-Nummer											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Stoßstellen und Überlappung	nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja
nur Stoßstellen	nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	nein	xx
nur geteiltes Ständerpaket	-	ja	-	-	ja	-	-	-	-	ja	ja	-

Tabelle 4: Ergebnisse der Teilbarkeitsregeln nach Richter

Die grau hinterlegten Felder in Tabelle 4 weisen auf Maschinen ohne geteilten Ständerblechpaket hin, bei diesen Maschinen ist der letzte Berechnungsversuch somit nicht durchführbar. Eine Besonderheit ist im Ergebnis der Maschine 12 zu finden: hier ist eine Berechnung der Stoßstellen ohne Überlappung

aufgrund der Zusammensetzung des Ständers aus einer nicht ganzzahligen Anzahl an Blechsegmenten nicht möglich. Erst durch Überlappung kommt eine ganzzahlige Stoßstellenzahl zustande.

Tabelle 4 zeigt sehr deutlich, dass sich im Allgemeinen die Aussage der Teilbarkeit von Richter nicht durch die Art der Überlappung ändert. Eine Beeinflussung der Wellenspannung ist in Berechnungsszenario 3, der alleinigen Berücksichtigung der Ständerblechpaketeilung, möglich, dieser ist aber fernab der Realität und dient hier nur der Veranschaulichung.

7.1.2 Teilbarkeitsregeln nach Taegen

Die Untersuchung der Teilbarkeitsregeln nach Taegen präzisiert die Aussagen nach Richter. Es ergänzt die Aussage bezüglich der Wellenspannungen um die Information der möglichen wirksamen Harmonischen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgelistet.

Maschine	Wellenspannung	Harmonische
1	nein	12, 24, 36,...
2	ja	9, 18, 27,...
3	ja	9, 18, 27,...
4	ja	9, 18, 27,...
5	nein	4, 8, 12,...
6	nein	36,...
7	ja	27,...
8	ja	5, 10, 15,...
9	ja	5, 10, 15,...
10	nein	4, 8, 12,...
11	nein	12, 24, 36,...
12	ja	11, 22, 36,...

Tabelle 5: Teilbarkeitsregeln nach Taegen unter Berücksichtigung der Überlappung

Maschine	Wellenspannung	Harmonische
1	nein	6, 12, 18,...
2	ja	3, 6, 9,...
3	ja	3, 6, 9,...
4	ja	3, 6, 9,...
5	nein	2, 4, 6,...
6	nein	12, 24,...
7	ja	9, 18,...
8	ja	5, 10, 15,...
9	ja	5, 10, 15,...
10	nein	2, 4, 6,...
11	nein	6, 12, 18,...
12	xx	xx

Tabelle 6: Teilbarkeitsregeln nach Taegen ohne Überlappung

Die grau hinterlegten Felder in den beiden Tabellen weisen wiederum auf Maschinen hin, welche nicht über ein geteiltes Ständerblechpaket verfügen. Maschine 12 in Tabelle 6 enthält wiederum keine Ergebnisse aufgrund der besonderen Konstruktion des Ständers. Die Ergebnisse der Betrachtung der Oberwellen beziehungsweise der Frequenzen stellen nur einen Ausschnitt dar und machen erkennbar, dass alle ganzzahligen Vielfachen der jeweiligen Grundfrequenz ebenfalls auftreten. Wie bereits bekannt ist, verursachen gerade Oberwellen keine Wellenspannungen. Ungerade Vielfache führen zu Wellenspannungen. (siehe Kapitel 5.1 „Analyse der Teilbarkeitsregeln“)

Beide Berechnungszenarien zeigen wiederum im Allgemeinen dieselben Ergebnisse hinsichtlich des Vorhandenseins von Wellenspannungen magnetischen Ursprungs. Betrachtet man jedoch die auftretenden Vielfachen der Grundfrequenz, so fällt ein Unterschied auf. Die Ordnungszahlen in Tabelle 6 sind kleiner. Begründet liegt dies in der geringeren Anzahl der gesamt wirksamen Stoßstellen für diese Auswertung. Schwingungen geringerer Frequenzen bedeuten im Allgemeinen eine höhere Amplitude. Somit wirkt sich ein Weglassen der Überlappung negativ auf die berechnete Höhe der Wellenspannung aus. Die berechneten Wellenspannungen werden größer. Sinn der Überlappung ist es, die negativen Auswirkungen eines segmentierten Ständers, wie beispielsweise einen höheren wirksamen Luftspalt und somit einen höheren magnetischen Widerstand, zu verringern. (vgl [20])

7.1.3 Auswertung

Die bekannten Ergebnisse aus den Berechnungen der Teilbarkeitsregeln der beiden vorgestellten Methoden können nun mit den zur Verfügung gestellten Messergebnissen verglichen werden. Eine Gegenüberstellung findet sich in folgender Tabelle:

Maschine	gemessen	Teilbarkeitsregel	
	Wellenspannung	Richter	Taegen
Nr.	V	-	-
1	0,04	nein	12, 24, 36,...
2	12,65	ja	9, 18, 27,...
3	2,43	ja	9,18, 27,...
4	3,09	ja	9, 18, 27,...
5	5,27	nein	4, 8, 12,...
6	0,19	nein	36,...
7	0,20	ja	27,...
8	15,97	ja	5, 10, 15,...
9	9,14	ja	5, 10, 15,...
10	4,94	nein	4, 8, 12,...
11	5,01	nein	12, 24, 36,...
12	0,71	ja	11, 22, 36,...

Tabelle 7: Gegenüberstellung der gemessenen Wellenspannung mit den Teilbarkeitsregeln

Betrachtet man die Ergebnisse in Tabelle 7, so bietet sich ein zwiespältiges Bild. Die gemessenen Wellenspannungen scheinen nicht immer den Teilbarkeitsregeln zu unterliegen. Diese Abweichungen sind aber durchaus möglich.

Zum einen kann man die Abweichung dadurch erklären, dass zwar eine Wellenspannung existieren muss, diese aber ein hohes Vielfaches der Grundfrequenz hat, und somit eine kleine Amplitude aufweist. Als Beispiel kann hier Maschine Nr. 7 genannt werden, die hier wirksame 27. Oberwelle hat nur mehr einen sehr kleinen Scheitelwert.

Eine besondere Rolle nehmen die Maschinen Nr. 5, 10 und 11 ein. Sie sollten laut den Teilbarkeitsregeln keine Wellenspannung aufweisen, haben aber durchaus Wellenspannungen im Bereich von 5V. Erklären lässt sich dies dadurch, dass die Teilbarkeitsregeln nur den Bereich jener Wellenspannungen abdecken, welche durch magnetische Unsymmetrien durch Segmentierung des Ständerblechpakets verursacht werden. Wie aber aus Kapitel 4 „Wellenspannungen“ bekannt ist, existieren noch weitere Auslöser von Wellenspannungen.

Die zur Verfügung gestellten Messwerte stammen aus Messungen am gesamten Maschinenstrang, somit kann die gemessene Wellenspannung nicht auf die alleinige Ursache durch magnetische Unsymmetrien eingegrenzt werden. Die zu vergleichenden Spannungen können somit auch durch andere Auslöser begründet sein. Eine eindeutige Zuweisung ist leider nicht möglich.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Einhaltung der Teilbarkeitsregeln keine eindeutige Aussage bezüglich real auftretende Wellenspannungen im Allgemeinen zulässt. Sind sie nicht erfüllt, beinhaltet die gemessene Wellenspannung einen Anteil verursacht durch magnetische Unsymmetrien. Sind sie erfüllt, existiert keine Wellenspannung aus magnetischem Ungleichgewicht durch Segmentierung des Ständerblechpakets (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6). Dies bedeutet aber keinesfalls, dass es in Wirklichkeit keine Wellenspannung geben kann.

7.2 Berechnungsszenarien

In den nachfolgenden Unterpunkten wird auf die jeweils durchgeführten Berechnungsszenarien eingegangen und die jeweiligen Ergebnisse mit den zur Verfügung gestellten Messwerten aus durchgeführten Wellenspannungsmessungen verglichen. Anzumerken ist, dass die Berechnungsszenarien mit allen Maschinen durchgeführt wurden, auch wenn die eigentliche Anwendung der Berechnungsmethode nur zulässig ist, sofern die Teilbarkeitsregeln, berechnet in Kapitel 7.1 „Teilbarkeitsregeln“, verletzt werden.

7.2.1 Berechnungsszenario 1

Im ersten Berechnungsszenario wird die Wellenspannung, verursacht durch Unsymmetrien im Ständerblechpaket, unter Berücksichtigung der Datenblattwerte der ausgewählten Hydrogeneratoren berechnet. In diesem Szenario wird eine etwaige Teilung des Ständerblechpaketes, und die damit teilweise veränderte Stoßfugenbreite, nicht einbezogen. Die Ergebnisse aus dem ersten Berechnungsszenario sind in Abbildung 7-1 dargestellt:

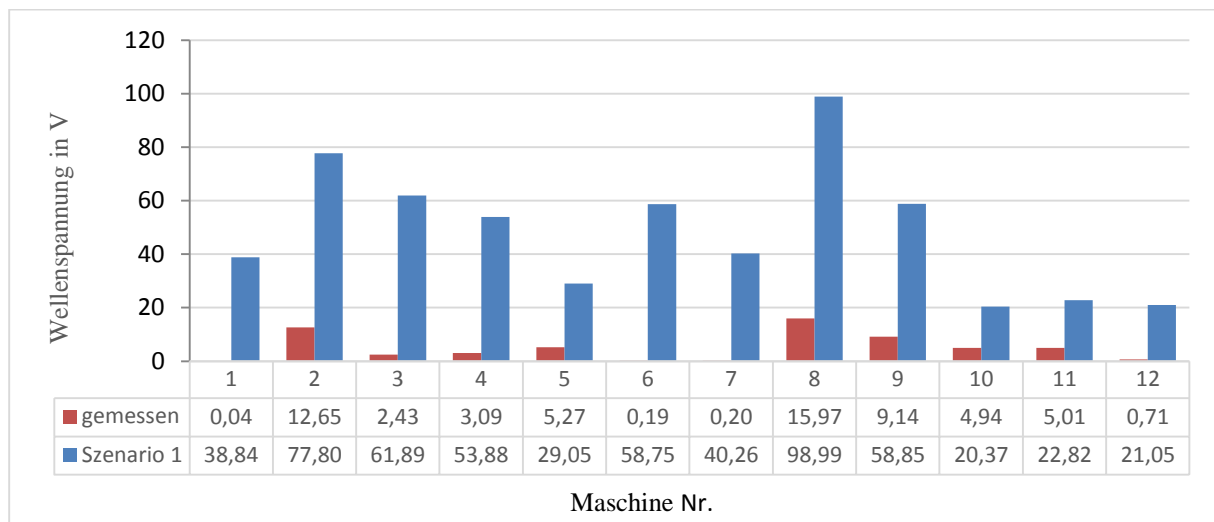


Abbildung 7-1: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Szenario 1

Berechnete Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien in segmentierten Ständerblechpaketen sind in Abbildung 7-1 als blaue Balken dargestellt. In rot sind die Wellenspannungen aus Messungen an Hydrogeneratoren zu sehen. Die grundsätzliche Aufgabe der Berechnungsmethode wird erfüllt: Sie liefert, wie gefordert, eine erste maximale Abschätzung der Wellenspannung unter Berücksichtigung der Segmentierung, der Überlappung und einer Stoßfugenbreite ε von 0.3 mm. Somit können alle Ergebnisse als Worst – Case Szenario angesehen werden. Die Berechnung ergibt in jedem Fall eine zu hohe Wellenspannung, welche im laufenden Betrieb niemals erreicht wird. Allen berechneten Spannungen in Abbildung 7-1 ist gemein, dass sie erheblich von der gemessenen Spannung abweichen. Dieser Fall dient als Basis für weitere Optimierungsansätze in den folgenden Szenarien um die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Wellenspannungen zu minimieren.

Die für dieses Berechnungsszenario erforderlichen Berechnungen wurden für alle zur Verfügung gestellten Maschinen teilweise durchgeführt. Zu beachten ist hierbei, dass das vorgestellte Berechnungsverfahren Ergebnisse zu allen Maschinen liefert, egal ob diese die Teilbarkeitsregeln verletzen, oder nicht (siehe Kapitel 5.1 „Teilbarkeitsregeln“). In der Realität rufen nur Maschinen, welche die Teilbarkeitsregeln nicht einhalten, Wellenspannungen durch Segmentierung des Ständerblechpaketes hervor, wie zu Beginn von Kapitel 5.2 „Berechnung der Wellenspannung“ definiert wurde.

7.2.2 Berechnungsszenario 2

Berechnungsszenario 2 beschäftigt sich mit der Optimierung der Stoßfugenbreite. Aufgrund der Überlappung der einzelnen Ständerblechsegmente können die magnetischen Feldlinien über benachbarte Bleche ausweichen (siehe Abbildung 5-1 rechts). Somit verändert sich die tatsächlich wirksame Stoßfugenbreite. Eine etwaige Teilung des Ständerblechpaketes, und die damit zusätzlich veränderte Stoßfugenbreite, wird nicht einbezogen. Dieses Szenario soll bezüglich der Ergebnisse den realen gemessenen Wellenspannungen näherkommen, was in Abbildung 7-2 ersichtlich wird:

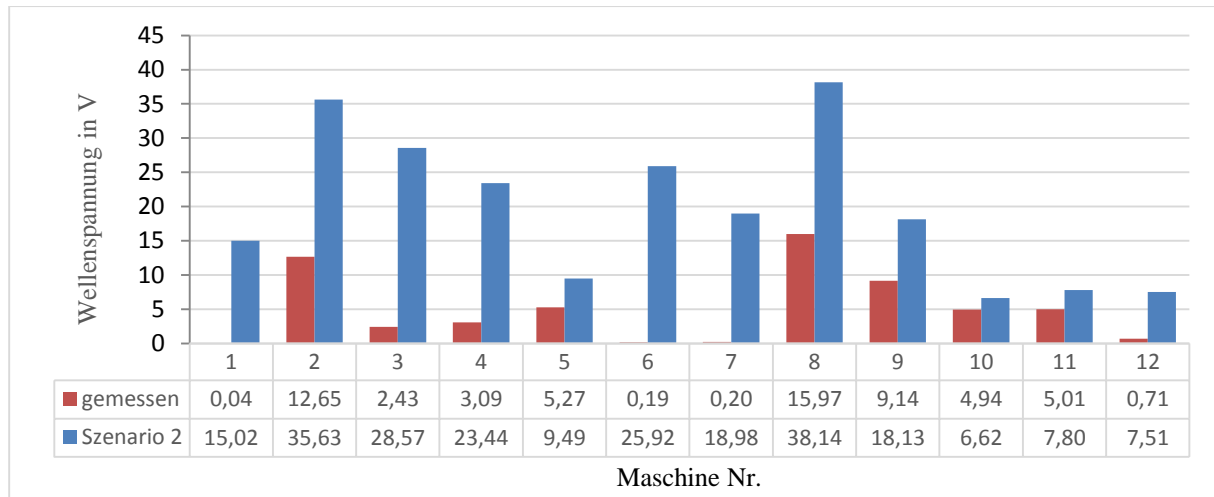


Abbildung 7-2: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 2

Die berechneten Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien in segmentierten Ständerblechpaketen sind in Abbildung 7-2 als blaue Balken dargestellt. In rot sind die Wellenspannungen aus Messungen an Hydrogeneratoren zu sehen. Es werden hierbei ebenso die Segmentierung als auch die jeweilige Überlappung der Ständerblechsegmente berücksichtigt. Die Stoßfugenbreite unterscheidet sich hier jedoch zum vorangegangenen Berechnungsversuch und beträgt 20 µm. Bei Betrachtung der einzelnen Balken für die gemessenen und berechneten Wellenspannungen sieht man, dass dieses Berechnungsszenario näher zu den gemessenen Wellenspannungen heran kommt, als Berechnungsszenario 1. Die Ergebnisse in Abbildung 7-2 machen eine Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit klar erkennbar. Die errechneten Wellenspannungen werden, verglichen mit dem Szenario aus 6.2.1, mehr als halbiert. Dies lässt sich am besten bei Betrachtung der Maschinen 2 und 8 nachvollziehen. Beispielsweise sinkt die berechnete Wellenspannung aus magnetischen Unsymmetrien bedingt durch Ständerblechsegmentierung bei Maschine 8 von vormals 98 V auf 38 V. Als Erkenntnis wird festgehalten, dass im Rahmen des Abschätzungsverfahrens dieses Szenario, verglichen zum vorigen Szenario, besser ist: Die berechneten Wellenspannungen befinden sich näher an den gemessenen Werten, sind aber immer noch zu hoch, um eine wertvolle Abschätzung zu ermöglichen.

Die für dieses Berechnungsszenario erforderlichen Berechnungen wurden für alle zur Verfügung gestellten Maschinen testweise durchgeführt. Zu beachten ist hierbei, dass das vorgestellte Berechnungsverfahren Ergebnisse zu allen Maschinen liefert, egal ob diese die Teilbarkeitsregeln verletzen, oder nicht (siehe Kapitel 5.1 „Teilbarkeitsregeln“). In der Realität rufen nur Maschinen, welche die Teilbarkeitsregeln nicht einhalten, Wellenspannungen durch Segmentierung des Ständerblechpaketes hervor, wie zu Beginn von Kapitel 5.2 „Berechnung der Wellenspannung“ definiert wurde.

7.2.3 Berechnungsszenario 3

Dieses Berechnungsszenario dient der Untersuchung der Auswirkungen geteilter Ständerblechpakete auf Wellenspannungen. Es wird nur Rücksicht auf die Ständerblechteilung genommen, eine Segmentierung des Ständerblechpakets wird nicht Berücksichtigt. Das Szenario hat keine praktische Relevanz, da unter den ausgewählten Hydrogeneratoren keiner ein geteiltest Ständerblechpaket ohne Segmentierung hat. Obwohl dieses Szenario für sich allein keine Praxisrelevanz hat, dient es als Baustein für die folgenden Berechnungsszenarien. Die Berechnung ist nur bei Maschinen mit geteilten Ständerblechpaketen möglich. Aus diesem Grund sind im nachfolgenden Diagramm nur Maschinen mit geteiltem Ständerblechpaket dargestellt.

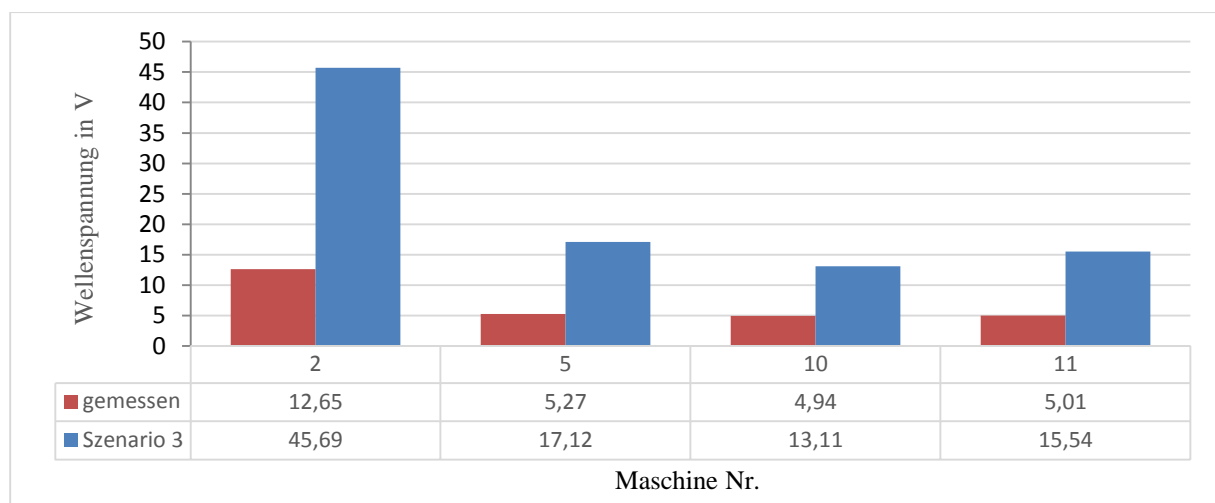


Abbildung 7-3: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 3

Die berechneten Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien in segmentierten Ständerblechpaketen sind in Abbildung 7-3 als blaue Balken dargestellt. In rot sind die Wellenspannungen aus Messungen an Hydrogeneratoren zu sehen. Bei Vernachlässigung der Ständersegmentierung bleiben nur mehr wenige Stoßstellen durch die Teilung übrig. Diese bewegen sich bei den vorgestellten Maschinen bei zwei bis vier Stellen. Durch die vergleichsweise großen Stoßfugenbreiten von 1 mm erhält man bei diesem Szenario mit der verwendeten Berechnungsmethode zu hohe Wellenspannungen. Als gut ersichtliches Beispiel kann hier Maschine 2 angeführt werden: Die errechnete Wellenspannung aufgrund magnetischer Unsymmetrien bedingt durch Segmentierung im

Ständerblech beträgt 45 V und wird nur durch 3 Stoßfugen verursacht. An den Ergebnissen wird deutlich, dass das hier verwendete Berechnungsszenario aufgrund der Beschränkung auf die Ständerblechpaketteilung ohne Ständerblechsegmentierung nicht zielführend ist. Das Berechnungsszenario macht aber sehr deutlich, dass die Größe der Wellenspannung durch magnetische Unsymmetrien im Ständerblechpaket bedingt durch Ständerblechsegmentierung in starkem Maß von der Stoßfugenbreite abhängt.

7.2.4 Berechnungsszenario 4

Berechnungsszenario 4 kombiniert die Ergebnisse aus Berechnungsszenario 2 mit der Möglichkeit eines geteilten Ständerblechpakets, ähnlich der Berechnung aus voriger Berechnung in Berechnungsszenario 3. Dieses Szenario versucht die Kombination aus der verringerten Stoßfugenbreite, verursacht durch die Segmentierung, und der vergrößerten Stoßfugenbreite durch eine Teilung des Ständerblechpaketes zu berücksichtigen. Das ursprüngliche Berechnungsverfahren wird um eine Möglichkeit der Berechnung der Wellenspannung durch magnetische Unsymmetrien aus mehreren unterschiedlichen Stoßfugenbreiten ergänzt (siehe Kapitel 6.4). Abbildung 7-4 veranschaulicht die Ergebnisse des Berechnungsversuchs und zeigt zum Vergleich die aus Messungen bekannten Wellenspannungen:

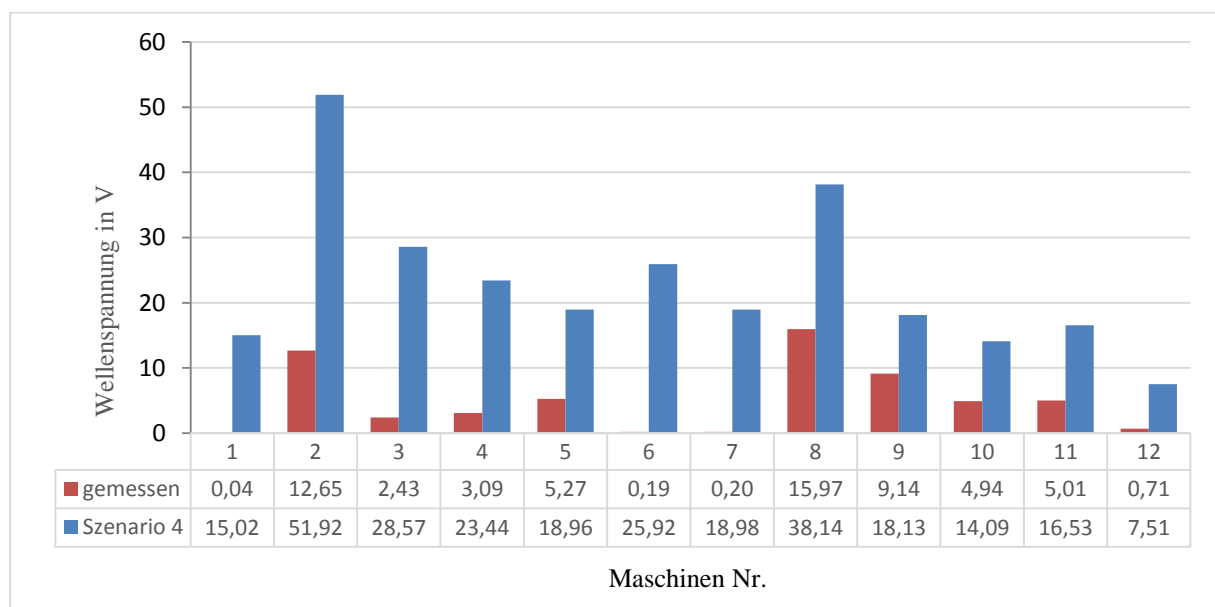


Abbildung 7-4: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 4

Die berechneten Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien in segmentierten Ständerblechpaketen sind in Abbildung 7-4 als blaue Balken dargestellt. In rot sind die Wellenspannungen aus Messungen an Hydrogeneratoren zu sehen. Dieses Szenario berücksichtigt sämtliche konstruktive Maschinenmerkmale und kommt der Realität hinsichtlich der einbezogenen Parameter am nächsten. Es zeigt sich, dass die berechneten Wellenspannungen stark von den bekannten Messergebnissen abweichen. Obwohl dieses Berechnungsszenario der Realität, und somit den Gegebenheiten im realen Hydrogenerator von allen Szenarioen am nächsten kommen, liefert das hier

gezeigte Berechnungsszenario 3 höhere Wellenspannungen als die Ausgangsbasis aus Berechnungsszenario 2.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Berechnungsszenarien 2 und 4 sehr ähnlich sind, liegt es nahe die Ergebnisse dieser miteinander zu vergleichen und die Unterschiede zu analysieren. Die berechneten Wellenspannungen der beiden Szenarien befinden sich in Abbildung 7-5:

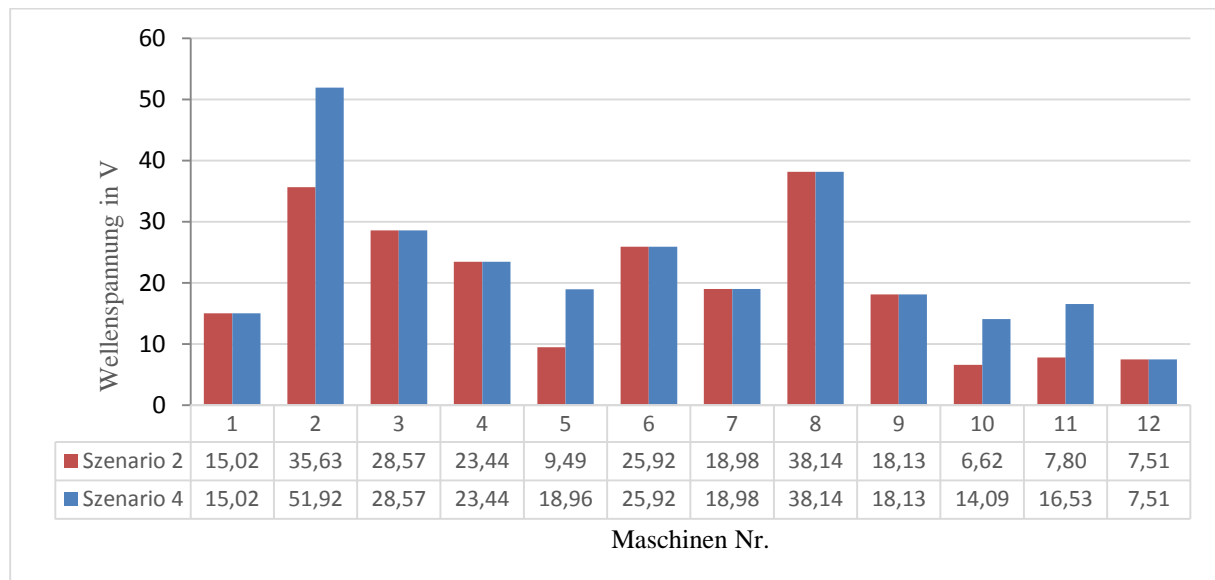


Abbildung 7-5: Vergleich der Wellenspannungen aus Szenario 4 mit Szenario 2

Die berechneten Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien in segmentierten Ständerblechpaketen sind in Abbildung 7-5 dargestellt. Die rote Balken entsprechen den Ergebnissen aus dem Berechnungsszenario 2, die blauen Balken dem Berechnungsszenario 4. Abbildung 7-5 zeigt die Unterschiede zwischen den Berechnungsszenarien 2 und 4. Die beiden Ansätze sollten sich ideenbedingt nur bei jenen Maschinen unterscheiden, bei denen das Ständerblechpaket geteilt ausgeführt ist. Dies sind laut den Maschinendatenblättern folgende Maschinen: Maschine 2, 5, 10, 11. Das obige Diagramm bestätigt die erfolgreiche Umsetzung der Idee, die Ergebnisse unterscheiden sich tatsächlich nur bei Maschinen mit geteiltem Ständerblechpaket. Bei diesen sind die Balken für die jeweils berechneten Wellenspannungen aus magnetischen Unsymmetrien durch Ständerblechsegmentierung unterschiedlich hoch. Die Höhe der Abweichung liegt darin begründet, dass die Stoßfugenbreite an den Ständertrennstellen um ein vielfaches größer ist, als die Stoßstellen der Segmentierung. Der wirksame Luftspalt ist dadurch größer als bei Szenario 2. Dies bewirkt einen erhöhten magnetischen Widerstand und höhere Wellenspannungen.

Die für dieses Berechnungsszenario erforderlichen Berechnungen wurden für alle zur Verfügung gestellten Maschinen testweise durchgeführt. Zu beachten ist hierbei, dass das vorgestellte Berechnungsverfahren Ergebnisse zu allen Maschinen liefert, egal ob diese die Teilbarkeitsregeln verletzen, oder nicht (siehe Kapitel 5.1 „Teilbarkeitsregeln“). In der Realität rufen nur Maschinen, welche

die Teilbarkeitsregeln nicht einhalten, Wellenspannungen durch Segmentierung des Ständerblechpaketes hervor, wie zu Beginn von Kapitel 5.2 „Berechnung der Wellenspannung“ definiert wurde.

7.2.5 Berechnungsszenario 5

Berechnungsszenario 5 kombiniert die Ergebnisse aus Berechnungsszenario 1 mit der Möglichkeit eines geteilten Ständerblechpaketes, ähnlich der Berechnung in Berechnungsszenario 4. Dieses Szenario versucht die Kombination aus der Stoßfugenbreite aus dem Maschinendatenblatt und der vergrößerten Stoßfugenbreite durch eine Teilung des Ständerblechpaketes zu berücksichtigen. Das ursprüngliche Berechnungsverfahren wird um eine Möglichkeit der Berechnung der Wellenspannung durch magnetische Unsymmetrien bedingt durch Ständerblechsegmentierung aus mehreren unterschiedlichen Stoßfugenbreiten ergänzt (siehe Kapitel 6.4). Die folgende Abbildung 7-6 veranschaulicht die Ergebnisse des Berechnungsversuchs und zeigt zum Vergleich die aus Messungen bekannten Wellenspannungen:

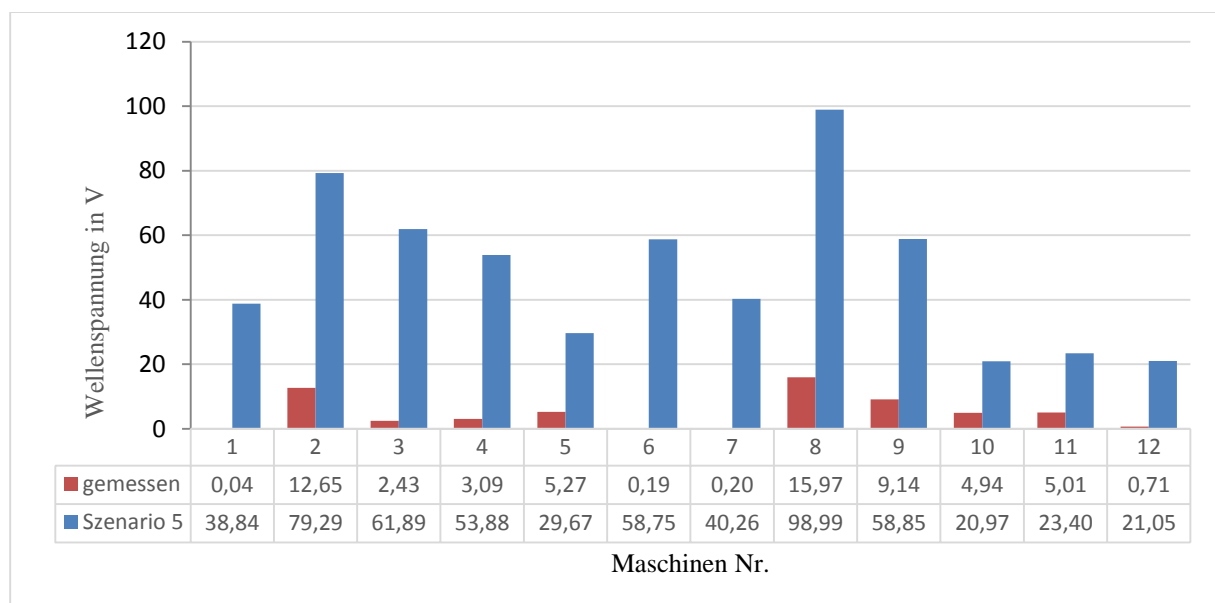


Abbildung 7-6: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 5

Die berechneten Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien in segmentierten Ständerblechpaketen sind in Abbildung 7-6 als blaue Balken dargestellt. In rot sind die Wellenspannungen aus Messungen an Hydrogeneratoren zu sehen. Dieses Szenario berücksichtigt die Stoßfugenbreite aus den Konstruktionsdaten und kommt der Realität hinsichtlich der einbezogenen Parameter relativ nahe. Es zeigt sich, dass die berechneten Wellenspannungen stark von den bekannten Messergebnissen abweichen. Da bereits das zugrundeliegende Berechnungsszenario 1 hohe Abweichungen der berechneten Wellenspannungen zu den gemessenen Werten hervorbrachte, sind die Ergebnisse aus diesem Szenario zu erwarten gewesen. Ein Betrachten der Ergebnisse in obigen Diagramm zeigt eine vergrößerte Differenz zwischen den gemessenen Spannungen und jenen, welche

aus den Berechnungsszenario 3 hervorgehen. Die berechnete Wellenspannung ändert sich nur bei Maschinen, welche ein geteiltes Ständerblechpaket haben.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Berechnungsszenarien 1 und 5 sehr ähnlich sind, liegt es nahe die Ergebnisse dieser miteinander zu vergleichen und die Unterschiede zu analysieren. Die berechneten Wellenspannungen der beiden Szenarien befinden sich in Abbildung 7-7:

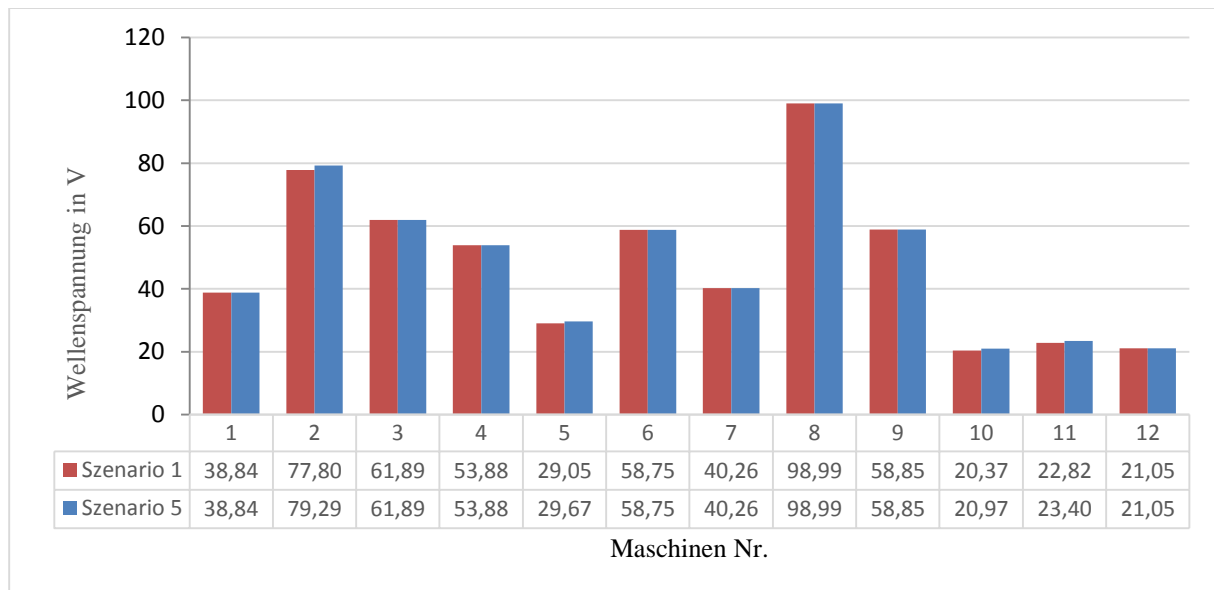


Abbildung 7-7: Vergleich der Wellenspannungen aus Szenario 5 mit Szenario 1

Die berechneten Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien in segmentierten Ständerblechpaketen sind in Abbildung 7-7 dargestellt. Die rote Balken entsprechen den Ergebnissen aus dem Berechnungsszenario 1, die blauen Balken dem Berechnungsszenario 5. Der Vergleich in Abbildung 7-7 zeigt das gleiche Verhalten, das auch in Abbildung 7-5 zu beobachten ist: Es kommt zu einer höheren Wellenspannung begründet durch die größere Stoßfugenbreite an den Ständertrennstellen. Die Änderungen fallen in diesem Szenario jedoch geringer aus. Am besten ersichtlich ist diese Differenz bei den Ergebnissen der Maschine 2. Als Ursache kann die zugrundeliegende Stoßfugenbreite der Ständersegmentierung gefunden werden. Der Abstand der Segmente beträgt hier 300 µm und ist in etwa um den Faktor zehn größer verglichen zum Szenario 2 (siehe Kapitel 6.2). Durch den erhöhten Abstand der Stoßfugen, ist die Differenz zu den Abständen durch die Ständerteilung geringer. Dieser geringere Unterschied führt zu kleineren Wellenspannungserhöhungen verglichen mit den Berechnungen aus Berechnungsszenario 4.

Die für dieses Berechnungsszenario erforderlichen Berechnungen wurden für alle zur Verfügung gestellten Maschinen testweise durchgeführt. Zu beachten ist hierbei, dass das vorgestellte Berechnungsverfahren Ergebnisse zu allen Maschinen liefert, egal ob diese die Teilbarkeitsregeln verletzen, oder nicht (siehe Kapitel 5.1 „Teilbarkeitsregeln“). In der Realität rufen nur Maschinen, welche die Teilbarkeitsregeln nicht einhalten, Wellenspannungen durch Segmentierung des Ständerblechpaketes hervor, wie zu Beginn von Kapitel 5.2 „Berechnung der Wellenspannung“ definiert wurde.

7.3 Gegenüberstellung der Berechnungsszenarien

Die Ergebnisse, die in den vorangegangenen Testszenarien berechnet wurden, sollen im vorliegenden Kapitel miteinander verglichen werden und die jeweiligen Unterschiede in den Ergebnissen diskutiert werden.

Um die Berechnungsergebnisse einfacher untereinander und mit der gemessenen Wellenspannung vergleichen zu können, enthalten die im Anschluss angeführten Diagramme eine Übersicht der Berechnungsszenarien. Auf das Berechnungsszenario mit der Nummer 3 wird hier verzichtet. Der Grund liegt darin, dass zum einen nicht alle Maschinen über geteilte Ständerblechpakete verfügen und zum anderen die Berechnung ohne Segmentierung nur zu Testzwecken diente, um eine Implementierung der veränderten Trennfugen in den Berechnungsszenarien 4 und 5 zu erproben.

Abbildung 7-8 enthält die berechneten und gemessenen Wellenspannungen während in der darauf folgenden Abbildung 7-9 die Berechnungsgenauigkeit der einzelnen Szenarios dargestellt wird. Die Reihung der Berechnungsszenarien wurde bewusst so gewählt. Der Grund liegt in den Zusammenhängen der einzelnen Berechnungsszenarien. Berechnungsszenario 4 basiert auf Erkenntnissen aus Szenario 2, gleichfalls basiert Berechnungsszenario 5 auf Szenario 1. Um die Ergebnisse möglichst ersichtlich zu gestalten, ist es somit von Vorteil, die in Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 verwendete Reihung der Berechnungsszenarien vorzunehmen.

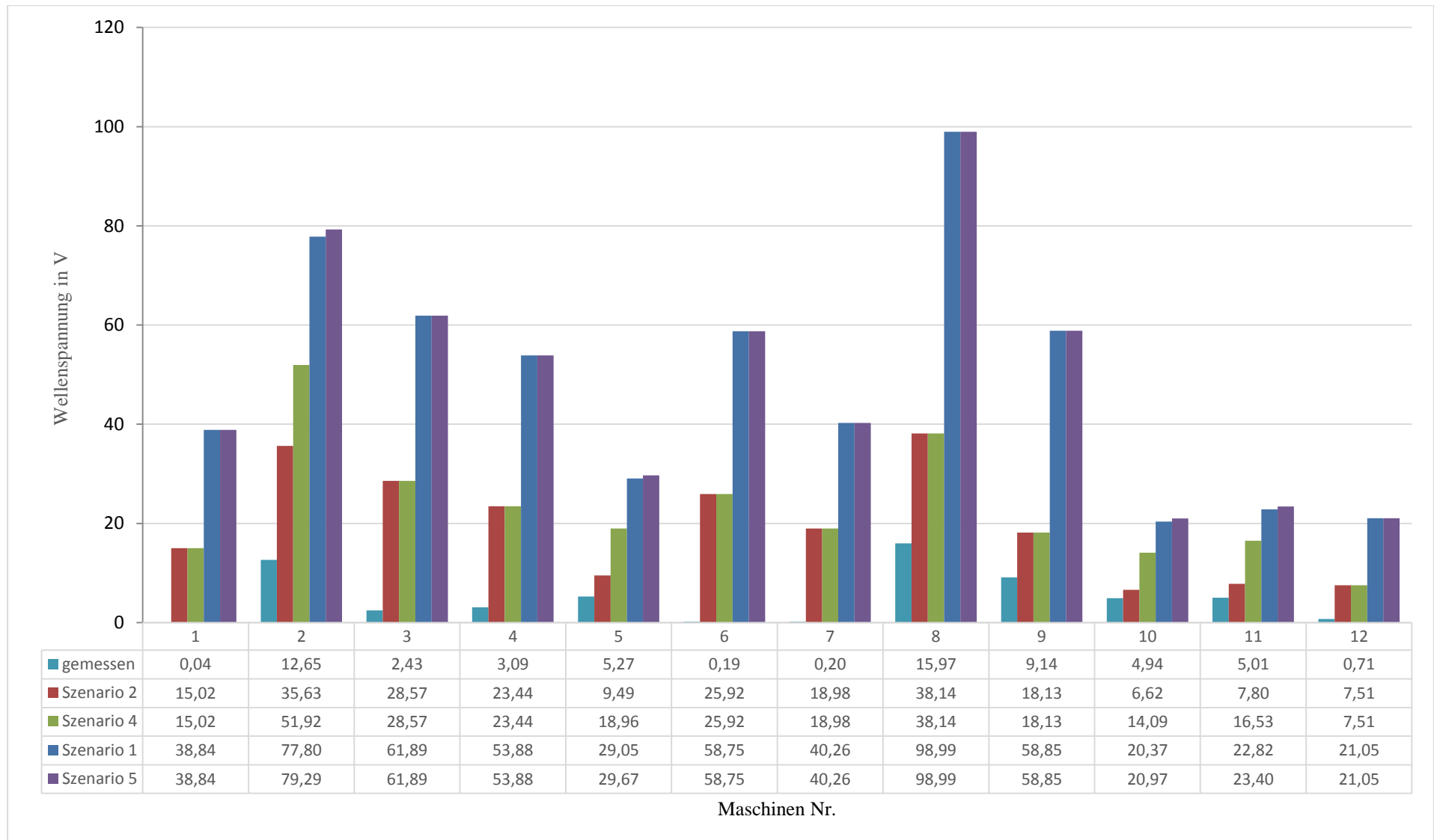


Abbildung 7-8: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Wellenspannungen

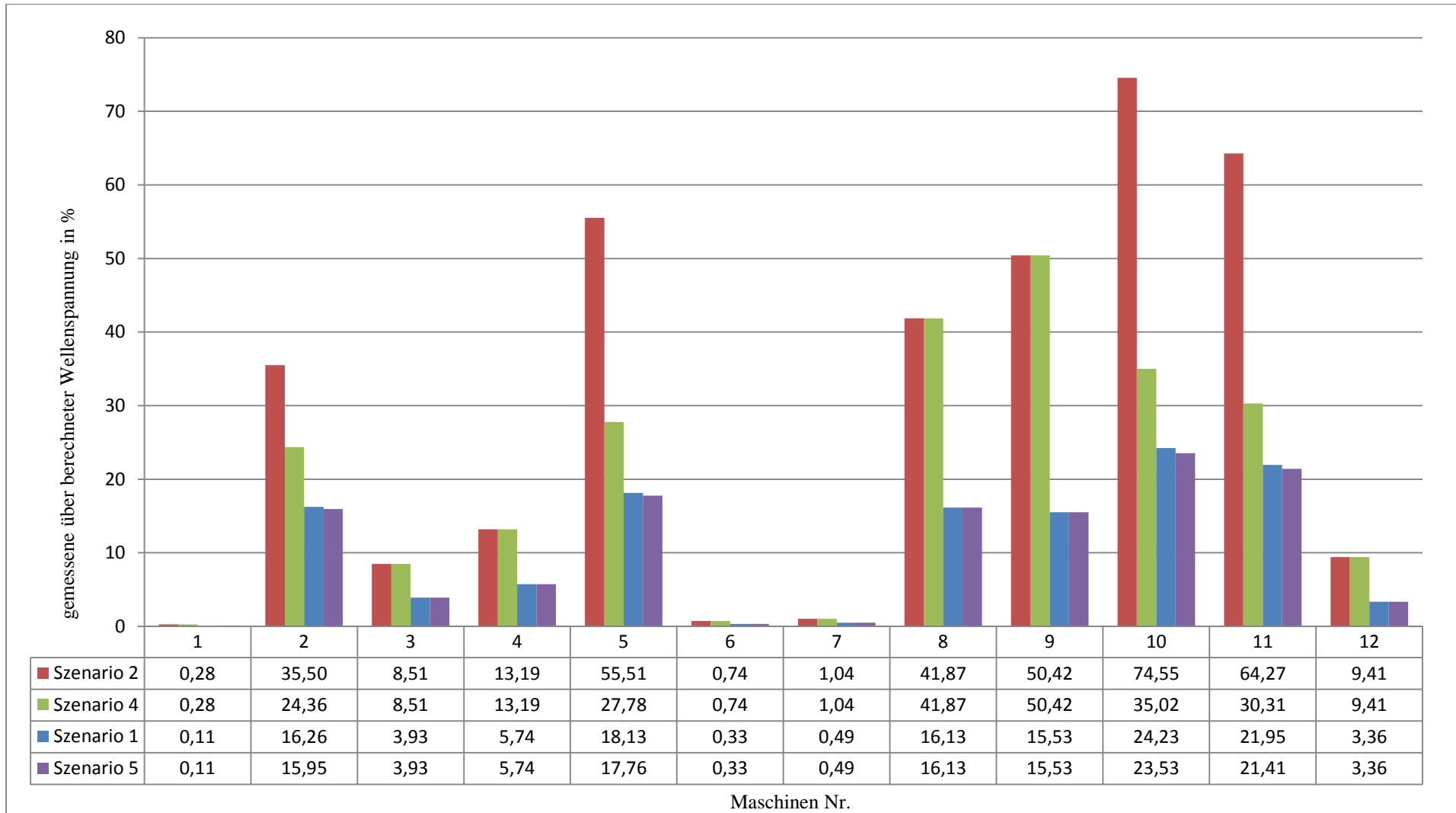


Abbildung 7-9: Abweichungen der Szenarien zur gemessenen Wellenspannung

Die berechneten Wellenspannungen aufgrund von magnetischen Unsymmetrien im Ständerblechpaket sowie deren Abweichungen zu den gemessenen Wellenspannungen sind in den beiden obigen Abbildungen durch Balken visualisiert.

Wie bereits in Kapitel 6 „Berechnungsszenarien“ zu den jeweiligen Berechnungsszenarien aufgeführt, sind zum Test der Funktion des Berechnungstools sämtliche Maschinen nach der in Kapitel 5.2 „Berechnung der Wellenspannung“ vorgestellten Methodik berechnet worden. Die Gültigkeit der Berechnungsmethode ist gebunden an die Teilbarkeitsregeln. Eine Anwendung dieser Methodik ist nur zulässig, wenn die Teilbarkeitsregeln nicht erfüllt werden. Dies trifft den Ergebnissen aus Kapitel 6.1 „Teilbarkeitsregeln“ zufolge auf folgende Maschinen zu: Maschinen 2, 3, 4, 7, 8, 12. Bei diesen Maschinen kommt es aufgrund des Aufbaus zu Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien.

Die Wellenspannungen in Abbildung 7-8 machen deutlich, dass die Berechnungen nach den Berechnungsszenarien 2 und 4 den gemessenen Wellenspannungen am nächsten kommen. Hier sind die Abweichungen von den Messwerten am geringsten. Als Grund hierfür kann die um ein vielfaches kleinere Stoßfugenbreite angesehen werden. Aus den Gleichungen für den fiktiven Wellenstrom (14) und (26) ist ersichtlich, dass die Stoßfugenbreiten ϵ in die Berechnungen stark eingeht. Es ist der fiktive Strom, und in weiterer Folge die Wellenspannung, in hohem Maß von den Annahmen um die Stoßfugenbreiten abhängig. Hierdurch lassen sie die relativ großen Unterschiede in den berechneten Spannungen von Berechnungsszenario 2/4 und Berechnungsszenario 1/5 erklären. Bei ersteren wurde von einer wirksamen Stoßfugenbreite im Bereich 20 μm ausgegangen während diese bei letzteren etwa 300 μm beträgt.

Des Weiteren fällt bei direkter Betrachtung von Abbildung 7-8 auf, dass die Unterschiede zwischen Berechnungsszenario 2 und 4 größer ausfallen als dies zwischen Berechnungsszenario 1 und 5 der Fall ist. Ursache dürfte, wie bereits in Kapitel 6.2.5 „Berechnungsszenario 5“ aufgeführt, die Differenz der Abmessungen der einzelnen Stoßfugenbreiten sein. Die zusätzlichen Stoßfugen durch geteilte Ständerblechpakete, mit Breiten von etwa 1 mm, wirken sich durch die große Differenz zu den angenommen 30 μm Segmentabständen stärker aus als dies bei Berechnungsszenario 5 der Fall ist. Vergleicht man den Unterschied der Ergebnisse von Maschine 2, so ist dies besonders gut ersichtlich: Zwischen Szenario 2 und Szenario 4 ist der Unterschied ca. 16 V. Zwischen Szenario 1 und Szenario 5 beträgt der Unterschied aber lediglich ca. 1.5 V

Abbildung 7-9 bildet die Genauigkeit der vorgestellten Berechnungsszenarien unter Zuhilfenahme des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Berechnungstools ab. Je höher der Prozentsatz/Balken des Berechnungsszenarios, desto genauer ist die Vorausberechnung der Wellenspannung aufgrund von magnetischen Unsymmetrien bedingt durch Segmentierung im Ständerblechpaket. Die bereits bekannten Ergebnisse aus Abbildung 7-8 werden nur in Bezug zur gemessenen Wellenspannung gesetzt. Dies ermöglicht eine bessere Aussage bezüglich der Anwendbarkeit als Approximation von

Wellenspannungen. Als Ergebnis der Analyse der Berechnungsgenauigkeit ist festzuhalten, dass das Berechnungsszenario 2 den Messwerten bei allen Maschinen am nächsten kommt. Die Streubreite der Abweichungen ist sehr hoch, ein Abweichungsbereich zwischen wenigen Prozent und über 70 Prozent führt zu der Erkenntnis, dass die hier vorgestellte Methode der Abschätzung von Wellenspannungen kein zufriedenstellendes Ergebnis liefert und somit alleine nicht ausreicht. Dies ändert sich auch nicht, wenn man jene Maschinen vernachlässigt, welche aufgrund der Teilbarkeitsregeln keine Wellenspannungen verursachen. Abbildung 7-10 stellt eine übersichtliche Form der Berechnungsgenauigkeiten, ohne jene zu vernachlässigenden Maschinen dar:

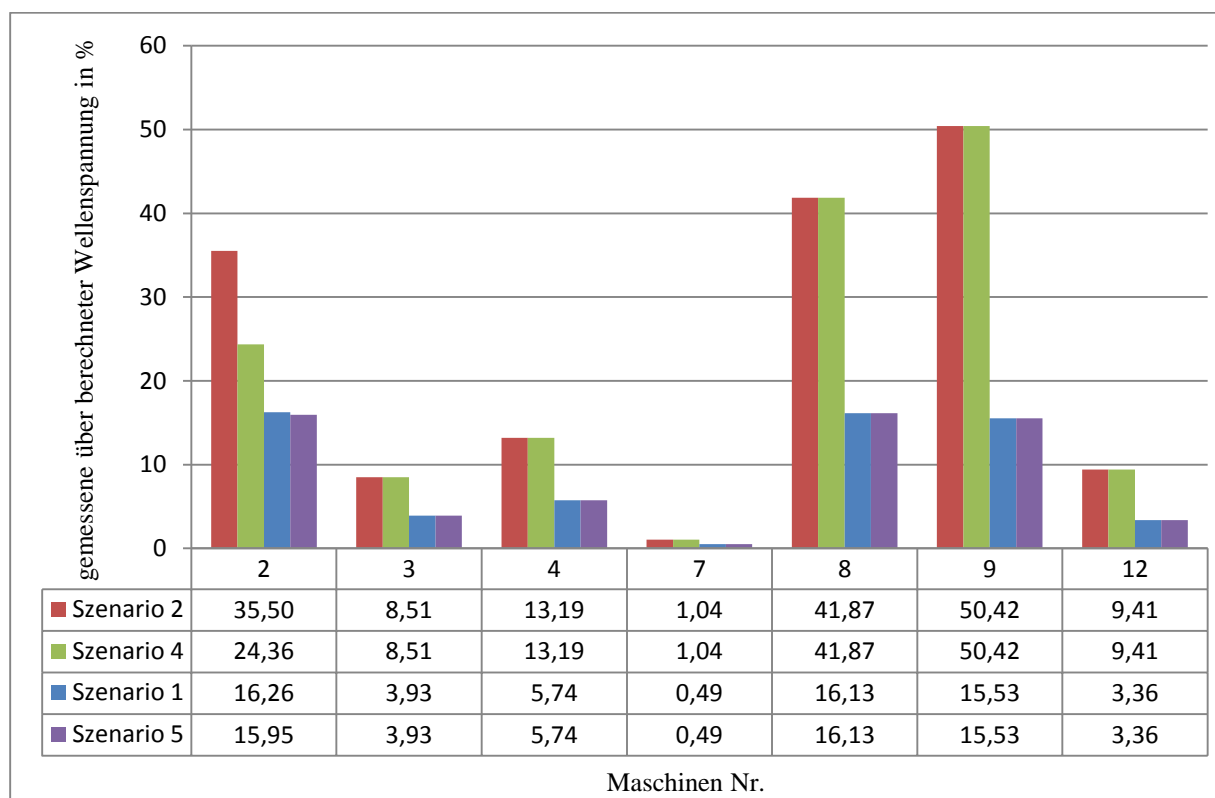


Abbildung 7-10: Abweichungen unter Berücksichtigung der Teilbarkeitsregeln

Die Abweichungen der berechneten Wellenspannungen aufgrund von magnetischen Unsymmetrien im Ständerblechpaket zu den gemessenen Wellenspannungen sind in der obigen Abbildung durch Balken visualisiert

Auch eine detailliertere Betrachtung bezüglich der durch die Teilbarkeitsregeln zulässigen Maschinen bringt keine Verbesserungen hinsichtlich der Beurteilung der Anwendbarkeit der vorgestellten Berechnungsmethodik.

Betrachtet man die Mechanismen zur Entstehung von Wellenspannungen genauer und betrachtet man die Einschränkung der hier vorgestellten Berechnungsmethode, so ist es durchaus plausibel, dass man die gemessenen Wellenspannungen nicht exakt nachbilden kann. Vielmehr ist die Vorgabe an diesen Berechnungsansatz ein anderer: Es soll ein Worst-Case der zu erwartenden Wellenspannung aufgrund

von magnetischen Unsymmetrien bedingt durch Ständerblechsegmentierung und Berücksichtigung der geometrischen Konstruktionsdaten vorausberechnet werden. Der vorgestellte Ansatz, inklusive der Teilbarkeitsregeln, nimmt ausschließlich Rücksicht auf Wellenspannungen aufgrund magnetischer Unsymmetrien durch die Segmentierung des Ständerblechpakets. Beachtet man jedoch, dass die zur Verfügung gestellten Messdaten aus Messungen an fertig installierten Generatoren stammen, liegt die Vermutung nahe, dass diese erfassten Wellenspannungen bedingt durch Segmentierung im Ständerblechpaket die Summe aller möglichen Verursacher (siehe Kapitel 4.2 „Entstehung von Wellenspannungen“) sind. Diese Tatsache lässt somit keine Eingrenzung auf magnetische Unsymmetrien bedingt durch Segmentierung im Ständerblechpaket als einzige Ursache zu. Gemessene Wellenspannungen beispielsweise bei Maschine 10 und 11 stützen diese Vermutung: Beide sollten, schenkt man den Teilbarkeitsregeln glauben, keine Wellenspannungen aufweisen, tun dies jedoch mit Messwerten von jeweils ca. 5 V. Diese Spannung muss durch andere Quellen, zu finden im Kapitel 4.2 „Entstehung von Wellenspannungen“, verursacht werden.

Eine Besonderheit stellt Maschine 7 dar. Sie sollte, begründet durch die Teilbarkeitsregeln, eine Wellenspannung vorweisen. Die Messergebnisse liefern jedoch eine Spannung von 0.2 V, sprich keine Wellenspannung. Dieses Verhalten ist mittels vorangegangener Erklärung schwer nachzuvollziehen. Eine mögliche Überlagerung der einzelnen Wellenspannungsursachen und daraus teilweises auslöschen wäre denkbar, kann jedoch nicht belegt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit etwaiger Fehler bei der gemessenen Wellenspannung. Hierbei könnten Probleme hinsichtlich der Bürsten zur Aufnahme der Wellenspannung das Messergebnis negativ beeinflussen. Dies kann jedoch ebensowenig belegt werden.

Betrachtet man die Vorgabe nach einem Worst-Case-Szenario laut [21], so liefern alle vorgestellten Berechnungsszenarien die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse. Eine genauere Beurteilung ist aber sehr wohl wünschenswert, kann aber aufgrund der Einschränkungen hinsichtlich Wellenspannungen aus magnetischen Unsymmetrien bedingt durch Segmentierung im Ständerblechpaket nicht erfolgen.

8 Zusammenfassung

Im Zuge der anfänglichen Literaturrecherche dieser Arbeit werden die folgenden relevanten Themen betrachtet:

- Aufbau des Maschinensatzes
- Lagertechnik
- Ursachen und Auswirkungen von Wellenspannungen

Zu Beginn findet eine Analyse des Maschinensatzes eines Wasserkraftwerkes statt. Dieser besteht im Allgemeinen aus den drei Komponenten Turbine, Synchrongenerator und Erregereinrichtung. Es wird ein detaillierter Blick auf die Grundlagen von Generatoren geworfen, deren Funktion erläutert sowie auf Komponenten, wie Ständer und Läufer, eingegangen. Ein weiterer wichtiger Baustein des Maschinensatzes, aus elektrischer Sicht, stellt die Erregereinrichtung dar. Hierbei werden die drei meistverwendeten Erregereinrichtungen vorgestellt und auf deren betriebliche Unterschiede eingegangen. Die letzte Komponente des Maschinensatzes, die Turbine, wird ebenfalls vorgestellt und der Vollständigkeit halber beschrieben. Auch wenn diese aus elektrischer Sicht keine Bedeutung für diese Arbeit hat, ist sie bestimmend hinsichtlich konstruktiver Generatorparameter wie Drehzahl und Polzahl.

Der zweite Punkt der Literaturrecherche widmet sich der Lagerung des Maschinensatzes. Hierbei wird eine allgemeine Übersicht zu den unterschiedlichen Lagerungsarten erarbeitet und in weiterer Folge wird detailliert auf die in Generatoren verwendeten Lagermechanismen eingegangen und deren Funktionsweise beschrieben. Da die Lagerkomponenten besonders stark von Auswirkungen der Wellenspannungen betroffen sind, kommt der Kenntnis über das Lagerverhalten eine große Bedeutung zu.

Der letzte Schwerpunkt in der Recherchearbeit widmet sich der Wellenspannungstheorie. Es wird im Detail auf die Auslösemechanismen eingegangen und diese vorgestellt. Durch die Aufgabenstellung, welche dieser Arbeit zugrunde liegt, können hier bereits Einschränkungen hinsichtlich der Faktoren für deren Entstehung getroffen und diese genauer behandelt werden. Außerdem kann eine Einteilung der Wellenspannung hinsichtlich ihrer Charakteristik und den möglichen Schadensbildern gefunden werden. Induktive oder kapazitive Wellenspannungen haben völlig andere Schadensmechanismen zur Folge. Während induktive Wellenspannungen sehr hohe Ströme verursachen und in kürzester Zeit Lager zerstören, liefern kapazitive Spannungen kleinere Ströme bei Teilentladungen, im Laufe von Wochen oder Monaten zu schwerwiegenden Schäden führen. Zum Abschluss der Literaturrecherche finden sich noch Beispiele zu Schäden verursacht von Wellenspannungen und eine Übersicht zu den Mechanismen von Wellenspannungen und Maßnahmen um Wellenspannungen zu minimieren.

Der praktisch orientierte Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Berechnung und Beurteilung von Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien bedingt durch die Segmentierung des Ständerblechpaketes und einem Vergleich der Ergebnisse mit zur Verfügung gestellten Messdaten realer Maschinen. Es wurden zur Abschätzung von vorhandenen Wellenspannungen verschiedene Berechnungen mit den Teilbarkeitsregeln durchgeführt. Diese ermöglichen eine erste Aussage, ob mit magnetisch verursachten Wellenspannungen bedingt durch die Segmentierung der Ständerblechpaketes zu rechnen ist und in welchem Frequenzbereich sich diese voraussichtlich bewegen. Es konnte hierdurch festgestellt werden, dass es zwar laut Berechnungen zu Wellenspannungen kommen kann, diese jedoch aufgrund der Höhe ihrer Frequenz, und damit ihrer Ordnungszahl, sehr klein sind. In weiterer Folge wurde eine Berechnungsmethode vorgestellt, welche unter Berücksichtigung der Teilbarkeitsregeln und Verwendung der Grundwelle des magnetischen Flusses ein einfaches Abschätzen der zu erwartenden Wellenspannungen ermöglichen soll. Hierzu entstand ein Berechnungstool unter Zuhilfenahme der Software MATLAB. Die Umsetzung des Berechnungstools findet sich im Anhang. Zur Optimierung der Ergebnisse entstanden unter Zuhilfenahme des Berechnungstools verschiedene Berechnungsansätze, welche hinsichtlich größtmöglichen Realitätsbezugs gewählt wurden.

Die Analyse der Berechnungen, sowohl jener der Teilbarkeitsregeln, als auch jene des Berechnungstools, ergab wie zu erwarten große Abweichungen verglichen zu den bekannten Messdaten. Die Ergebnisse weichen stark voneinander ab und erschweren eine klare Aussage hinsichtlich der Tauglichkeit der Ansätze. Der Hauptgrund für die wenig zufriedenstellenden Ergebnisse lässt sich in der Aufgabenstellung finden: Sowohl die Teilbarkeitsregeln, als auch der verwendete Berechnungsansatz beschränken sich ausschließlich auf Wellenspannungen, verursacht durch magnetische Unsymmetrien bedingt durch die Segmentierung des Ständerblechpaketes. Zwar können im Bereich der betrachteten Hydrogeneratoren Faktoren wie elektrostatische Aufladung ausgeschlossen werden, es bleiben aber weiterhin Verursacher durch Erregung und magnetische Unsymmetrien durch Läuferexzentrizität bestehen. Die zum Vergleich herangezogenen Messwerte bilden die Wellenspannung als Summe aller Verursacher ab. Diese Tatsache macht einen Vergleich der Ergebnisse nahezu unmöglich und führt zu dem Schluss, dass weitere Nachforschungen hinsichtlich der Berechnung anderer Wellenspannungsarten notwendig sind. Es wären auch detailliertere Ansätze für magnetisch verursachte Wellenspannungen denkbar, diese erfüllen jedoch nicht die Vorgabe nach einer einfachen, schnellen und unkomplizierten Vorausberechnung.

9 Ausblick

Diese Arbeit kommt zum Schluss, dass der vorliegende Berechnungsansatz nicht die gewünschte Genauigkeit liefern kann. Ein erster Schritt zur Präzisierung der Wellenspannungsberechnung wäre die Erweiterung des Berechnungsansatzes auf etwaige Oberwellen. Eine Möglichkeit dies zu realisieren wird in „Wellenspannungen von Drehstrommaschinen infolge überlappter Stoßfugen“ (siehe [22]) erläutert. Diese Berechnungsmethode erhöht aber die Komplexität des Berechnungsverfahrens und den Aufwand. Dies steht jedoch im Widerspruch zu der, in der Aufgabenstellung definierten, Einfachheit des Berechnungstools.

Um die Genauigkeit der erhaltenen Berechnungsergebnisse zu erhöhen, besteht noch die Möglichkeit der genaueren Betrachtung der Anzahl der wirksamen Stoßstellen durch Segmentierung und Überlappung. Die Zahl der wirksamen Stoßfugen hat einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der Wellenspannungen aufgrund von magnetischen Unsymmetrien im Ständerblechpaket. In der vorliegenden Arbeit wird vom Worst-Case ausgegangen: jede Stoßfuge aufgrund der Segmentierung ist voll wirksam und eine Überlappung verdoppelt, oder verdreifacht diese Stoßfugenanzahl. Betrachtet man jedoch Abbildung 5-1, so wird ersichtlich, dass dies real nicht der Fall ist und auch dem Grundgedanken der Überlappung widerspricht. Wählt man nun eine entsprechend angepasste Anzahl an wirksamen Stoßstellen lässt sich die Berechnungsgenauigkeit verbessern.

Kapitel 4.2.1 „Unsymmetrie im magnetischen Kreis“ stellt als Ursache von Wellenspannungen einen ungleichmäßigen Luftspalt, bezeichnet als Läuferexzentrizität, vor. Dieser entspricht im Berechnungsansatz einer zusätzlichen Stoßfuge (siehe Abbildung 4-4). Das vorgestellte Berechnungstool beinhaltet noch keine geeignete Methodik zu Implementierung der Läuferexzentrizität. Zur weiteren Verbesserung des Tools und der Rechenergebnisse wäre eine Erweiterung um Wellenspannungen verursacht durch Läuferexzentrizität zu implementieren.

Um die Berechnungen der Wellenspannungen magnetischen Ursprungs nochmals zu präzisieren besteht zusätzlich die Möglichkeit die Aufgabenstellung mittels Finiter Elemente Methode zu lösen. Mittels FEM erhöht sich der Berechnungsaufwand nochmals enorm und entspricht nicht den Ideen einer schnellen und unkomplizierten Berechnungsmethode.

Es werden zu den bereits durchgeführten Untersuchungen der aus magnetischen Unsymmetrien stammenden Wellenspannungen weitere Versuche zur Bestimmung der Einflüsse weiterer Auslösemechanismen von Nöten sein. Zunächst müssen hierzu Untersuchungen der Auswirkungen des Erregersystems, durchgeführt werden. Durch diese Ergänzung kann die Vergleichbarkeit mit den bekannten Messergebnissen neu bewertet werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe - Grundlagen Betriebsverhalten, Berlin Heidelberg, Deutschland, Springer, 2012
- [2] D. Oeding und B. R. Oswald, Elektrische Kraftwerke und Netze, Berlin Heidelberg, Deutschland, Springer, 2011
- [3] R. Fischer, Elektrische Maschinen, München, Deutschland, Hansa, 2013
- [4] H. Renner, „Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme" Skriptum, TU Graz, Österreich, 2013
- [5] M. Weck und C. Brecher, Werkzeugmaschinen 2 Konstruktion und Berechnung, Berlin Heidelberg, Deutschland, Springer Vieweg, 2006
- [6] H. Haberhauer und F. Bodenstern, Maschinenelemente Gestaltung, Berechnung, Anwendung, Berlin Heidelberg, Deutschland, Springer Vieweg, 2014
- [7] R. Hinz, Verbindungselemente Achsen Wellen Lager Kupplungen, Leipzig, Deutschland, VEB Fachbuchverlag, 1989
- [8] G. Niemann, Maschinenelemente Band 1, Berlin Heidelberg, Deutschland, Springer Vieweg, 1975
- [9] C. U. Ammann, „Wellenspannungen in grossen, statisch erregten Turbogeneratoren", Ph. D Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, Schweiz, 1988
- [10] T. Plazenet, T. Boileau, C. Caironi, B. Nahid-Mobarakeh, „An overview of shaft voltages and bearing currents in rotating machines," in 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, USA, 2016, ©IEEE, doi: 10.1109/IAS.2016.7731884
- [11] M. J. Costello, „Shaft Voltages and Rotating Machinery," in IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 29, Issue: 2), 1993, ©IEEE, doi: 10.1109/28.216553
- [12] S. P. Verma, „Damages due to Shaft - Potentials in modern Generators," in Athens Power Tech, 1993. APT 93. Proceedings. Joint International Power Conference, Athen, Griechenland, 1993, ©IEEE, doi: 10.1109/APT.1993.673913
- [13] W. Yucai, L. Yonggang, L. Heming, „Diagnosis of Turbine Generator Typical Faults by Shaft Voltage," in 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, USA, 2012, ©IEEE, doi: 10.1109/IAS.2012.6374011
- [14] P. L. Alger and H. W. Samson, „Shaft Currents in Electric Machines," in Journal of the American Institute of Electrical Engineers (Volume: 42, Issue: 12), 1923, ©IEEE, doi: 10.1109/JoAIEE.1923.6593419
- [15] R. Richter, Elektrische Maschinen, Band 2, Synchronmaschinen und Einankerumformer, Basel, Schweiz, Springer Basel AG, 1953
- [16] T. Katayama, H. Kokumai, T. Nakayama, T. Ogitsu, H. Takemura, H. Mizoguchi, „Study on Effect of Neutral Voltages on Shaft Voltages Causing Bearing Currents," in Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Wien, Österreich, 2013, ©IEEE, doi: 10.1109/IECON.2013.6699892
- [17] M. Xiping, L. Ruifang, Z. Bohua, Z. Yihuang, „Analysis and Calculation of Capacitance Parameters in Induction Machines to Predict Shaft Voltage," in Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, Japan, 2012, ©IEEE, Electronic ISBN: 978-4-88686-077-4

- [18] D. Busse, J. Erdman, R. Kerkman, D. Schlegel, G. Skibinski, „Characteristics of shaft voltage and bearing currents," in IEEE Industry Applications Magazine (Volume: 3, Issue: 6) , 1997, ©IEEE, doi: 10.1109/2943.628116
- [19] C. Ammann, K. Reichert, R. Joho, Z. Posedel, „Shaft voltages in generators with static excitation systems-problems and solution," in IEEE Transactions on Energy Conversion (Volume: 3, Issue: 2), 1988, ©IEEE, doi: 10.1109/60.4749
- [20] G. Müller, K. Vogt, B. Ponick, Berechnung elektrischer Maschinen, Weinheim, Deutschland, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2008
- [21] W. Freise, H. Jordan, „Die Ermittlung von Wellenspannung und Lagerstrom in elektrischen Maschinenunter Berücksichtigung der magnetischen Spannung im Eisen," in Elektrotechnik und Maschinenbau 80, 1963
- [22] F. Taegen, S. P. Verma, J. Kolbe, „Wellenspannungen von Drehstrommaschinen infolge überlappter Stoßfugen," in Archiv für Elektrotechnik (Volume: 66, Issue: 3), 1983, ©Springer-Verlag, doi: 10.1007/BF01578424
- [23] R. Gloor (2014, April 22), Wasserturbinen [Online], Available: <http://www.energie.ch/wasserturbinen>
- [24] H. Prashad, Tribology in Electrical Enviroments, vol. 49, Tribology and Interface Engineering Series, Elsevier, 2006, ISBN: 978-0-444-51880-4
- [25] A. Muetze, „On a New Type of Inverter-Induced Bearing Current in Large Drives With One Journal Bearing," in IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 46, Issue: 1), 1993, ©IEEE, doi: 10.1109/TIA.2009.2036672

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Vertikaler Maschinensatz mit Francisturbine; 1 Generator; 2 Spurlager;	2
Abbildung 2-2: „Erzeugung einer mehrphasigen sinusförmigen Spannung	3
Abbildung 2-3: Beispiel eines zweipoligen Vollpolläufers [1]	4
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Schenkelpolläufers [1].....	5
Abbildung 2-5: Statische Erregung [4]	6
Abbildung 2-6: Anwendungsbereiche der Turbinenarten [23].....	8
Abbildung 3-1: Berührungsvermeidung bei Gleit- und Wälzlager	9
Abbildung 3-2: Radialwälzlager, 1 Außenring,	10
Abbildung 3-3: Axialwälzlager, 1 Käfig, 2 Wellenscheibe,.....	10
Abbildung 3-4: Wälzkörperarten [7]	10
Abbildung 3-5: Anwendungsbeispiel Wälzlager an einer Kranfußlagerung, 1 Radialpendelrollenlager, 2 Axialpendelrollenlager [6]	11
Abbildung 3-6: Schema eines Radialgleitlagers, 1 Zapfen,	12
Abbildung 3-7: Schema eines Axialgleitlagers, 1 Welle, 2 Zapfen,	12
Abbildung 3-8: Kombiniertes Radial-Axial-Lager einer Dampfturbine, 1 Radiallager, 2 Axiallager [6]	13
Abbildung 3-9: Axiales Endspurlager für hohe Kräfte einer Wasserturbine [6].....	14
Abbildung 3-10: Festkörperreibung, 1 Haftsichten [7]	15
Abbildung 3-11: Schwimmreibung, 1 Schmierfilm [7]	15
Abbildung 3-12: Mischreibung, 1 Schmierstoff, 2 Berührungsstellen [7]	15
Abbildung 3-13: Zapfenverlagerung und Verlauf des Schmierfilmdrucks [5]	16
Abbildung 3-14: Schematischer Aufbau eines hydrostatischen Axiallagers [6]	17
Abbildung 3-15: Schema der Ölversorgung Hydrostatischer Lager, 1 Lagertasche, 2 Öldruckmessgerät,	17
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung magnetischer Unsymmetrien [9]	20
Abbildung 4-2: Flussaufteilung in zwei Flussanteile einer 4- bzw. 6-poligen Maschine mit 2 Segmenten [9]	20
Abbildung 4-3: Darstellung der Flussverläufe bei exzentrischer Läuferlagerung [13].....	21
Abbildung 4-4: Analogie zwischen Läuferexzentrizität und einer einzelnen Stoßfuge [15]	22
Abbildung 4-5: Wellenspannung Aufgrund elektrostatischer Aufladung [9]	23
Abbildung 4-6: Induzierte Spannung aufgrund magnetischer Flüsse in der Läuferwelle [9]	24
Abbildung 4-7: Generator mit statischer Erregung [9].....	25
Abbildung 4-8: Zusammenhang zwischen Schmierfilm und Lagerkapazität C_b [17]	27
Abbildung 4-9: Beispielhafter Verlauf der Wellenspannung (Quelle: Andritz Hydro)	29
Abbildung 4-10: Frequenzspektrum der Wellenspannung (Quelle: Andritz Hydro)	29
Abbildung 4-11: Defekte Lagerschale verursacht durch Wellenstromfluss (Quelle: Andritz Hydro)..	30

Abbildung 4-12: Detailansicht der zerstörten Lagerschalenoberfläche (Quelle: Andritz Hydro).....	30
Abbildung 4-13: Beschädigte Läuferwelle verursacht durch Wellenstromfluss (Quelle: Andritz Hydro)	31
Abbildung 4-14: Abhilfekzept nach Ammann [9].....	33
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Ständerbleche – Überlappung und deren Auswirkung auf den Feldlinienverlauf [20]	38
Abbildung 5-2: Aufteilung des Hauptflusses in zwei gegenläufige Jochflüsse	41
Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Umlaufkoordinate x [21]	43
Abbildung 5-4: Kennlinie von H_c bei einer Rückeninduktionen von 0.1, 0.2 und 0.3Tesla	43
Abbildung 5-5: Interpolierte Magnetisierungskennlinie	45
Abbildung 5-6: Zoom zur Verdeutlichung der Unterschiede der verscheidenen Interpolationsverfahren	45
Abbildung 5-7: Näherung zur Integralberechnung.....	46
Abbildung 5-8: Beispiel des fiktiven Wellenstromes über der Rückeninduktivität	47
Abbildung 5-9: Interpolierte Gerade zur Bestimmung von $Bz0$	49
Abbildung 6-1: Schematische Darstellung überlappter Ständerblechsegmente	51
Abbildung 7-1: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Szenario 1	58
Abbildung 7-2: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 2	59
Abbildung 7-3: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 3	60
Abbildung 7-4: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 4	61
Abbildung 7-5: Vergleich der Wellenspannungen aus Szenario 4 mit Szenario 2.....	62
Abbildung 7-6: Vergleich gemessene Wellenspannung mit Berechnungsszenario 5	63
Abbildung 7-7: Vergleich der Wellenspannungen aus Szenario 5 mit Szenario 1.....	64
Abbildung 7-8: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Wellenspannungen	66
Abbildung 7-9: Abweichungen der Szenarien zur gemessenen Wellenspannung	67
Abbildung 7-10: Abweichungen unter Berücksichtigung der Teilbarkeitsregeln	69

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Wellenspannungsquellen [19]	35
Tabelle 2: Zusammenfassung der Abhilfemaßnahmen von Wellenspannungen [19]	36
Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Berechnungsszenarien	50
Tabelle 4: Ergebnisse der Teilbarkeitsregeln nach Richter	54
Tabelle 5: Teilbarkeitsregeln nach Taegen unter Berücksichtigung der Überlappung	55
Tabelle 6: Teilbarkeitsregeln nach Taegen ohne Überlappung	55
Tabelle 7: Gegenüberstellung der gemessenen Wellenspannung mit den Teilbarkeitsregeln	56

13 Anhang

13.1 Berechnungstool Teilbarkeitsregeln

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnungstool zum Prüfen auf theoretisches Vorhandensein
% von Wellenspannungen der Maschine nach Richter [1] bzw. Alger [2] und
% Taegen / Verma [3]
% =====
% Quellen:
% =====
% [1]      R. Richter, Elektrische Maschinen, Band 2, Synchronmaschinen und
%          Einankerumformer, Basel, Schweiz, Springer Basel AG, 1953
% [2]      P. L. Alger and H. W. Samson, „Shaft Currents in Electric
%          Machines," in Journal of the American Institute of Electrical
%          Engineers (Volume: 42, Issue: 12), 1923, ©IEEE,
%          doi: 10.1109/JoAIEE.1923.6593419
% [3]      F. Taegen, S. P. Verma, J. Kolbe, „Wellenspannungen von
%          Drehstrommaschinen infolge überlappter Stoßfugen," in Archiv
%          für Elektrotechnik (Volume: 66, Issue: 3), 1983,
%          ©Springer-Verlag, doi: 10.1007/BF01578424
%
% Ersteller: Christian Dorfer
% Letzte Änderung: 23.10.2017
%
% wichtige, verwendete Variablen:
% =====
% cnt      Schleifencounter
% f        Netzfrequenz
% k_s      Überlappung
% n_s      Nenndrehzahl
% m_num    Maschinenummer
% ow_r     Ordnungszahl der Oberwelle nach Richter
% ow_t     Ordnungszahl der Oberwelle nach Taegen
% p        Polpaarzahl
% s        Anzahl Stoßstellen
% s_g     Stoßstellen gesamt
% t        größter Teiler zw. Polpaarzahl und Anzahl Stoßstellen insgesamt
% wspg     Berechnung, bei welchen Oberwellen Wellenspannung auftritt
% x        Indexvariable
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all
clear all
%% Öffnen der Excel - Datei mit Maschinenparameter und Maschinenwahl

[machines,m_txt] = xlsread('machine_data');
m_num = 6;

%% Definition der grundlegenden Berechnungsgrößen und Konstanten

f = machines(2,m_num);
s = machines(6,m_num);
k_s = machines(7,m_num);
n_s = machines(17,m_num);

%% Berechnung grundlegende Parameter

p = round((f*60)/n_s);
```

```

%% Berechnung der wirksamen Stoßstellen

s_g = s/k_s;

%% Teilbarkeitsregeln nach Richter bzw. Alger

t = gcd(p,s_g);

if mod(s_g/t,2)==0
    disp(['Keine Wellenspannung aufgrund von magnetischen Unsymmetrien'...
        ' im Ständerblechpaket zu erwarten!'])
else
    disp(['Wellenspannung aufgrund von magnetischen Unsymmetrien'...
        ' im Ständerblechpaket tritt auf!'])
end

%% Teilbarkeitsregeln nach Taegen bzw. Verma TEST Wörnschi

n = (1:1:50)';
% n = [1 3 5 7 9 11 13 15]';           % Drehfeld -> ungerade Ordnungszahlen
% n = [2 4 6 8 10 12 14 16]';       % nur gerade bei z.B. unsym. Pole

wspg = n.*(p/s_g);
x = 1;

for cnt = 1:length(n)
    if mod(wspg(cnt),1)==0
        ow_t(x) = cnt;
        x = x+1;
    end
end
ow_t'

%% Gegenprüfung zu Taegen, Verma

ow_r = s_g/t

```

13.2 Berechnungstool Wellenspannungen

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Berechnungstool für Wellenspannungen durch magnetische Unsymmetrien
% nach Berechnungsansatz von W. Freise [1]
% =====
%
% Quellen:
% =====
% [1]      W. Freise, H. Jordan, „Die Ermittlung von Wellenspannung und
%          Lagerstrom in elektrischen Maschinenunter Berücksichtigung der
%          magnetischen Spannung im Eisen,“ in Elektrotechnik und
%          Maschinenbau 80, 1963
%
% Ersteller: Christian Dorfer
% Letzte Änderung: 20.10.2017
%
%
% Anmerkung: Alle Ergebnisse sind Scheitelwerte, sofern
%            nicht anders gekennzeichnet!
%
% wichtige, verwendete Variablen:
% =====
% A_j      Jochquerschnittsfläche
% B_curve  gemessene Flussdichte der Hysterese
% B_ej     Luftspaltfeldverlauf, dient Ploterstellung in fig1
% B_e      Flussdichte unter Eisenberücksichtigung
% B_j      Jochflussdichte
% B_z      Flussdichte durch Ringfluss im Ständerrücken
% B_zs     Startwert von B_z
% B_z0     Nulldurchgang I_w(B_z)
% B_zmax   Maximalwert von B_z
% B_zplot  Wert von B_z bei dem der Plot erfolgen soll
% B_zstart Startwert von B_z
% d_a      Außendurchmesser in mm
% d_i      Innendurchmesser in mm
% d        Offset der Geradengleichung zur Nulldurchgangsermittlung
% eps1     breite erste Stoßfuge in mm je nach gewünschtem Test
% eps2     breite zweite Stoßfuge in mm je nach gewünschtem Test
% f        Netzfrequenz
% fx       Näherungsfunktion zur Bestimmung von B_z0
% H_curve  gemessene Feldstärke der Hysterese
% H_e      Feldstärke aus BH-Kennlinie zu B_e
% H_eint   Berechnetes Integral von H_e
% H_int    interpolierte Feldstärke der Hysteresekurve
% H_mw     Mittelwert von 2 benachbarten H_e
% h_j      Jochhöhe in mm (ohne Nut)
% h_z      Zahnhöhe in mm
% I_w      Wellenstrom
% k_s      Überlappung
% k        Steigung in Geradengleichung zur Nulldurchgangsermittlung
% l_s      Statorlänge in mm
% m        Anzahl der Stränge
% m_num    Auswahl der Maschinenummer (1,2,3,...)
% machines Speicher der Maschinendaten
% my_0     magnetische Feldkonstante
% N        Anzahl der Nuten
% N1       mittleree Jochhöhe in mm (ohne Zahn)
% number   Anzahl der Stützstellen der Interpolation
% n_s      Nenndrehzahl
% p        Polpaarzahl
% phi_h    Hauptfluss
```

```

% phi_j      Jochfluss
% points     Anzahl Abtastungspunkte, muss gerader Wert sein
% q          Nuten pro Pol und Phase
% r_a       Aussendurchmesser in mm
% r_i       Innendurchmesser in mm
% s         Anzahl Stoßstellen
% s_g       Anzahl Stoßfugen
% s_t       Statorteilung
% s1        Stoßfugen durch Überlappung
% s2        Stoßfugen durch Statorpaketteilung
% sheet     Blechsorte
% t         größter gemeinsamer Teiler von p und s_g
% t_p       Polteilung
% Test      Auswahl des Berechnungsversuchs
% U_s       Ständerspannung
% U_w       Wellenspannung
% w_fakt    Wicklungsfaktor
% w1        Wdg pro Phase
% x         Abtastungspunkte mit gleichmäßiger Schrittweite
% x_delta   Abstand der Abtastungspunkte
% x_step    Schrittweite zwischen B_z0/B_zmax nach x
% x_plot    Stützpunkte zum erstellen eines Plots für Funktion fx
% x1        letzter positiver Wert von I_w (x-Achse)
% x2        erster negativer Wert von I_w (x-Achse)
% y1        letzter positiver Wert von I_w (y-Achse)
% y2        erster negativer Wert von I_w (y-Achse)
% zero      sucht letzten Wert in I_w vorm Nulldurchgang
%
% Verwendete Funktionen:
% =====
% BHinterpl liefert nach Eingabe von B , der interpolierten Feldstärke,
%           Stützpunkte und der Schrittweite den besten korrespondierenden
%           H-Wert
%           Syntax: H_search = BHinterpl( B_search, H_int, points, step )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all
clear all
%% Öffnen der Excel - Datei mit Maschinenparameter und Maschinenwahl

[machines,m_txt] = xlsread('machine_data');
m_num = 3;
Test = 1;

%% Definition der grundlegenden Berechnungsgrößen und Konstanten

my_0 = (4*pi)*1e-7;
U_s = machines(1,m_num)/sqrt(3);
f = machines(2,m_num);
w_fakt = machines(3,m_num);
N = machines(4,m_num);
w1 = machines(5,m_num);
s = machines(6,m_num);
k_s = machines(7,m_num);
s_t = machines(8,m_num);
d_a = machines(9,m_num)/1000;
d_i = machines(10,m_num)/1000;
h_z = machines(11,m_num)/1000;
l_s = machines(12,m_num)/1000;
m = machines(14,m_num);
q = machines(15,m_num);
sheet = machines(16,m_num);
n_s = machines(17,m_num);

```

```

% Variation von eps1/2 ja nach Testfall!
switch Test
case 1
    eps1 = machines(13,m_num)/1000; % Abstand Überlappung
    eps2 = eps1; % ohne Überlappung
case 2
    eps1 = 20/1e6; % Abstand Lackschichten
    eps2 = eps1; % ohne Überlappung
case 3
    eps1 = 1/1000; % Abstand Blechpaketteilung
    eps2 = eps1; % ohne Überlappung
case 4
    eps1 = 20/1e6; % Abstand Lackschichten
    eps2 = 1/1000; % mit Überlappung
case 5
    eps1 = machines(13,m_num)/1000; % Abstand Überlappung
    eps2 = 1/1000; % mit Überlappung
end

%% Berechnung grundlegende Maschinenparameter

p = round((f*60)/n_s);
t_p = (d_i*pi)/(2*p);
t_p1 = (2*pi)/(2*p);
r_a = d_a/2;
r_i = d_i/2;

h_j = (r_a-(r_i+h_z));
N1 = (r_i+h_z+r_a)/2;

A_j = h_j*1_s;

%% Bestimmung der Flüsse und Flussdichten im Ständerrücken

phi_h = U_s/(4.44*f*w_fakt*w1);
phi_j = phi_h/2;

B_j = phi_j/A_j;

%% Berechnung Stoßstellen je nach Segmentierung und Statorteilung
% Unterscheidung nach Test

if Test == 3
    s_g = s_t;
    s1 = s_g;
    s2 = 0;
else
    if s_t < 2
        s_g = s/k_s;
        s1 = s_g;
        s2 = 0;
    else
        s_g = s/k_s;
        s1 = s/k_s-s_t;
        s2 = s_t;
    end
end
end

```



```

%% Maschine mit potentiellen W-Spg. identifizieren (nach Richter)

t = gcd(p,s_g);
if mod(s_g/t,2)==0
    disp('Keine Wellenspannung zu erwarten!')
else
    disp('Wellenspannung tritt auf!')
end

%% Auswahl Blech + laden + Fit erstellen

switch sheet
    case 250
        Data = xlsread('M250_50A');
        B_curve = Data(:,1);
        H_curve = Data(:,2);
        number = 4000;
        point = linspace(min(B_curve),max(B_curve),number);
        step = (-min(B_curve)+max(B_curve))/number;
        H_int = interp1(B_curve,H_curve,point,'pchip'); % pchip == cubic
    case 270
        Data = xlsread('M270_50A');
        B_curve = Data(:,1);
        H_curve = Data(:,2);
        number = 4000;
        point = linspace(min(B_curve),max(B_curve),number);
        step = (-min(B_curve)+max(B_curve))/number;
        H_int = interp1(B_curve,H_curve,point,'pchip'); % pchip == cubic
    otherwise
        msg = 'Curve not available for type of sheet!';
        error(msg)
end

%% Bestimmung Rückeninduktion inklusive Eiseneigenschaften

points = 200;
x = linspace(0,2*pi,points);

B_zstart = 0.1;
B_zs = B_zstart;
B_zmax = 0.6;
x_step = (B_zmax-B_zs)/length(x);

B_ej = B_j*cos(x-pi/2);

for xc = 1:length(x)

    B_e(xc,:) = B_j*cos(x-pi/2)-B_zs;

```

```

% Vorzeichenunterscheidung BH Funktion
for xa = 1:length(B_e)
    if B_e(xc,xa)<0
        H_e(xc,xa) = -Bhinterpl(abs(B_e(xc,xa)),H_int, point, step);
    else
        H_e(xc,xa) = Bhinterpl(B_e(xc,xa),H_int, point, step);
    end
end
B_zs = B_zs+x_step;
% findet gewünschten Plot für B_z=0.2T
if B_zs>=0.2 && B_zs<=0.2+x_step
    B_zplot = xc;
end
end

figure (1)
plot(rad2deg(x),B_ej,rad2deg(x),H_e(B_zplot,:)/100,...
    rad2deg(x),H_e(round(B_zplot/2),:)/100,...
    rad2deg(x),H_e(round(3*B_zplot/2),:)/100,'LineWidth',2)
% plot(x,B_ej,x,H_e(B_zplot,:)/100,x,H_e(round(B_zplot/2),:)/100,...
%     x,H_e(round(3*B_zplot/2),:)/100,'LineWidth',2) %für AH
grid on
legend({'\it B}_{e}','\it H}_{e} mit {\it B}_{z=0.2T',...
    '\it H}_{e} mit {\it B}_{z=0.1T',...
    '\it H}_{e} mit {\it B}_{z=0.3T'});
xlabel({'\it x} in °')
ylabel({'\it H}_{e} in A/cm, {\it B}_{e} in T')
set(gca,'FontSize',24); % Schriftgröße

%% Punktplot Doku

count = 1;
divider = 50;
stepping = length(x)/divider;
if mod(stepping,1)==0
    for pos = 1:divider
        H_k(pos) = H_e(B_zplot,count);
        l_k(pos) = x(count);
        count = count+stepping;
    end
    figure (2)
    plot(rad2deg(x),B_ej,rad2deg(l_k),H_k/100,'xr','LineWidth',2)
%     plot(x,B_ej,l_k,H_k/100,'xr','LineWidth',2) %für AH
    grid on
    legend('B_{ej}','H_{k}')
    xlabel({'\tau_p} in °')
    ylabel({'H_{ej} in A/cm, B_{ej} in T'})
    set(gca,'FontSize',24);
else
    disp('Anzahl der Stützstellen/Teiler muss eine ganze Zahl ergeben!!')
end

%% Berechnung Integral He

x_delta = x(2)-x(1);

```

```

% Berechnung Mittelwert der H-Werte
for xb = 2:length(H_e)
    H_mw(:,xb-1) = (H_e(:,xb-1)+H_e(:,xb))./2;
end

H_eint = sum(H_mw.*x_delta,2);

%% Berechnung Wellenstrom und Kennlinie plotten

B_z = transpose(linspace(B_zstart,B_zmax,points));
for xd=1:length(B_z)
    B_jg1(xd,:)=B_j;
end

I_w = (N1*H_eint)./sqrt(2)+(((s1*eps1)/(my_0*sqrt(2)))+...
    ((s2*eps2)/(my_0*sqrt(2)))).*(B_jg1-B_z);

figure (3)
plot(B_z, I_w, 'LineWidth',2)
grid on
legend({'\it I}_w')
xlabel('$\hat{B}_z$ in T', 'Interpreter', 'latex')
ylabel({'\it I}_w in A')
set(gca, 'FontSize', 32);

%% Position des letzten positiven Wertes von I_w vorm Nulldurchgang finden

zero = find((I_w(1:end-1) > 0 & I_w(2:end)<0) | ...
    (I_w(1:end-1) < 0 & I_w(2:end)>0));

%% Geradengleichung f(x)=k*x+d mit x=B_z aufstellen und berechnen
% B_z0 im Punkt I_w/fx = 0
% -> 0=k*x0+d mit x0=B_z0

x1 = B_z(zero);
x2 = B_z(zero+1);
y1 = I_w(zero);
y2 = I_w(zero+1);

d = (x2*y1-x1*y2)/(x2-x1);
k = (y2-y1)/(x2-x1);
B_z0 = -d/k

x_plot = linspace(B_z(zero),B_z(zero+1));
fx = k*x_plot+d;

figure(4)
curve=plot( B_z,I_w, x_plot,fx, x1,y1,'xr', x2,y2,'xr', B_z0,0,'xr',...
    'LineWidth',2)
curve(3).MarkerSize = 14;
curve(4).MarkerSize = 14;
curve(5).MarkerSize = 14;
grid on
legend({'\it I}_w berechnet', '\it I}_w angenähert', 'Messpunkte')
xlabel('$\hat{B}_z$ in T', 'Interpreter', 'latex')
ylabel({'\it I}_w in A')
set(gca, 'FontSize', 32);

```

```
%% Berechnung Wellenspannung
```

```
U_w = (2*pi*f)/sqrt(2)*A_j*B_z0 % Effektivwert
```

13.3 Funktion zur Interpolation der Magnetisierungskennlinie

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Script zur Demo unterschiedlicher Interpolationsverfahren  
% =====  
%  
% Ersteller: Christian Dorfer  
% Letzte Änderung: 20.10.2017  
%  
%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
close all  
clear all  
  
Data = xlsread('M250_50A');  
B_curve = Data(:,1);  
H_curve = Data(:,2);  
number = 4000;  
point = linspace(min(B_curve),max(B_curve),number);  
step = (-min(B_curve)+max(B_curve))/number;  
H_int1 = interp1(B_curve,H_curve,point,'pchip'); % pchip == cubic  
H_int2 = interp1(B_curve,H_curve,point,'spline');  
H_int3 = interp1(B_curve,H_curve,point,'linear');  
  
figure (1)  
l1 = plot(H_curve, B_curve, 'xk',H_int1,point,H_int2,point,'m',...  
         H_int3,point,'g','LineWidth',1.5)  
l1(1).MarkerSize = 14;  
legend('Messpunkte','Kubische Interpolation','Interpolation mit Spline',...  
       'Lineare Interpolation','Location','southeast')  
xlim([0 0.6e4]);  
xlabel('Feldstärke {\it H} in A/m');  
ylabel('Flussdichte {\it B} in T')  
grid on  
set(gca,'FontSize',24);  
  
figure (2)  
l2 = plot(H_curve, B_curve, 'xk',H_int1,point,H_int2,point,'m',...  
         H_int3,point,'g','LineWidth',1.5)  
l2(1).MarkerSize = 14;  
legend('Messpunkte','Kubische Interpolation','Interpolation mit Spline',...  
       'Lineare Interpolation','Location','southeast')  
xlim([200 1500]);  
ylim([1.2 1.5]);  
xlabel('Feldstärke {\it H} in A/m');  
ylabel('Flussdichte {\it B} in T')  
grid on  
set(gca,'FontSize',24);
```