

Masterarbeit

Wirkungsgradbestimmung umrichter gespeister Asynchronmaschinen

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

von

Stefan Strauss

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Peter Bacher

Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen



2016

„Erfahrung ist die gemeinsame
Mutter aller Wissenschaften und
Künste.“

*Leonardo da Vinci (*1452,†1519)*

ital. Universalkünstler

Eidesstattlich Erklärung

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.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

Affidavit

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.

.....
date
.....
(signature)

Kurzfassung

Angesichts der steigenden Energiepreise und stets knapper werdender Ressourcen kommt dem Wirkungsgrad elektrischer Antriebe, als ein Maß für die Energieeffizienz, eine immer größer werdende Bedeutung zu. Dabei ist zu beachten, dass der Anteil umrichtergespeister Asynchronmaschinen zur Lösung von Antriebsaufgaben stetig steigt. Da die Wirkungsgradbestimmung umrichtergespeister Asynchronmaschinen von vielen Faktoren beeinflusst wird, ist in Normen eine Zusammenstellung hinreichend genauer, einheitlicher Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung definiert.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die einzelnen normierten Messverfahren zur Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb und behandelt die Umsetzung dieser in der Praxis. Dazu werden die verschiedenen Messmethoden miteinander verglichen, um die Abweichungen zueinander aufzeigen zu können. Des Weiteren wird auch die Wirkungsgradänderung aufgrund der Umrichterspeisung analysiert.

Weiters werden die zusätzlichen, umrichterbedingten Oberschwingungsverluste in dieser Arbeit behandelt, indem die Einzelverluste bei Netz- und Umrichterspeisung gegenübergestellt und die gemäß der Norm ermittelten Oberschwingungsverluste betrachtet werden.

Zum Abschluss wird noch untersucht, ob aus den Grundsicherungswerten bei Umrichterbetrieb die Parameter des Ersatzschaltbildes mit Hilfe eines normierten Messverfahrens bestimmt werden können und ob diese zur Wirkungsgradbestimmung geeignet sind.

Abstract

Considering the rising energy prices and dwindling resources, the efficiency of electric drives takes on an ever-increasing importance as a measure of energy efficiency. Furthermore, an ever-increasing number of inverter-fed induction machines for the solution of drive tasks must be considered. As the efficiency determination of inverter-fed induction machines is influenced by numerous factors, a compilation of standard procedures to determine the efficiency is defined in standards.

This master thesis provides an overview of the individual standardized measuring methods, which determine the efficiency with inverter supply, and deals with the implementation of those in practice. For this purpose, the different measuring methods are compared in order to show the deviations to each other. Furthermore, the change in efficiency is analyzed due to the inverter supply.

Moreover, the additional harmonic losses are examined in this work by comparing the individual losses of inverter and mains supply and by considering harmonic losses according to the standard.

In a final step, this master thesis also examines whether the parameters of the equivalent circuit diagram can be determined from the fundamental values of inverter supply by using a standardized measuring method and whether they are suitable for efficiency determination.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeine Einführung	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.3	Methodik	3
1.4	Aufbau der Arbeit	4
1.5	Zielsetzung	5
2	Theoretische Grundlagen	6
2.1	Auswirkungen der Umrichterspeisung auf die Verluste	6
2.1.1	Parasitäre Auswirkungen des Umrichterbetriebs	7
2.1.2	Einflussfaktoren auf die Oberschwingungsverluste	13
2.2	Normen zur Wirkungsgradbestimmung im Überblick	16
2.3	Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb (IEC 60034-2-3)	18
2.3.1	Prüfverfahren im Überblick	19
2.3.2	Die Input-Output Methode	20
2.3.3	Das Einzelverlustverfahren	21
2.4	Verfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades (IEC 60034-2-1)	27
2.4.1	Prüfverfahren im Überblick	29
2.4.2	Das direkte Prüfverfahren mit Drehmomentmessung	33
2.4.3	Das Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung	34
2.4.4	Das Einzelverlustverfahren ohne Belastungsprüfung	44
2.4.5	Bestimmung des Wicklungswiderstandes	53
3	Praktische Durchführung	55
3.1	Beschreibung des Messaufbaus	55

3.2	Die direkte Wirkungsgradbestimmung	60
3.2.1	Die Input-Output Methode	61
3.2.2	Das direkte Prüfverfahren mit Drehmomentmessung . . .	62
3.3	Die indirekte Wirkungsgradbestimmung	64
3.3.1	Bestimmung des Ständerwicklungswiderstandes	64
3.3.2	Prüfungen bei sinusförmiger Versorgung	65
3.3.3	Prüfungen bei Umrichterbetrieb	73
3.3.4	Die Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb . . .	79
3.3.5	Die Wirkungsgradbestimmung bei Netzbetrieb	80
3.4	Einzelverlustverfahren ohne Belastungsprüfung	82
3.4.1	Bestimmung der Parameter bei Umrichterspeisung	82
3.4.2	Bestimmung der Gesamtverluste bei Umrichterbetrieb . .	91
3.4.3	Die Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb . . .	93
3.4.4	Die Wirkungsgradbestimmung bei Netzbetrieb	95
4	Evaluierung der Messergebnisse	97
4.1	Analyse der Wirkungsgrade	97
4.1.1	Vergleich der direkten mit indirekten Messmethode	99
4.1.2	Vergleich der Wirkungsgrade bei Netz- und Umrichterbe- trieb	100
4.2	Wirkungsgradbestimmung für Umrichterspeisung nach IEC 60034- 2-1	101
4.3	Betrachtung der Oberschwingungsverluste	104
4.4	Analyse des Einzelverlustverfahrens ohne Belastungsprüfung . .	109
	Literatur	112
	A Die Typenschilder der verwendeten Maschinen	116
	B Matlab-Code	118
B.1	File - Auswertung	118
B.2	Funktion - Belastungsversuch	123
B.3	Funktion - direkte Auswertung	132
B.4	Funktion - Methode mittels Ersatzschaltbild	133

B.5 Funktion - Wirkungsgradbestimmung gemäß IEC 60034-2-3 . . .	140
B.6 Funktion - indirekte Auswertung	153
B.7 Funktion - Kurzschlussversuch bei verminderter Frequenz	154
B.8 Funktion - Leerlaufversuch	158
B.9 Funktion - Widerstandsbestimmung	166
B.10 Funktion - Plotten	167

1. Einleitung

In diesem Kapitel wird ein einführender Leitfaden geschaffen, welcher einen Überblick über diese Arbeit gibt.

1.1. Allgemeine Einführung

Angesichts der steigenden Energiepreise und stets knapper werdender Ressourcen kommt dem Wirkungsgrad elektrischer Antriebe, als ein Maß für die Energieeffizienz, eine immer größer werdende Bedeutung zu. Einerseits fordern daher EU-Vorgaben für energiebetriebene Produkte Mindestwirkungsgrade für innerhalb der EU in Verkehr gebrachte Induktionsmaschinen zur Schonung der Energiereserven [1]. Andererseits werden damit auch wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt, da der Wirkungsgrad auch die Einsparungen an Energie über die gesamte Betriebsdauer der Maschine widerspiegelt. Vor allem für Industriebetriebe sind die Themen Energiekosten und Energiesparmaßnahmen von essentieller Bedeutung, um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben. Aufgrund dieser Tatsachen wird die exakte Wirkungsgradbestimmung von elektrischen Maschinen ein immer wichtigerer Aspekt. [2] [3]

Bei der Wirkungsgradbestimmung muss nun allerdings beachtet werden, dass der Anteil umrichter gespeister Asynchronmaschinen zur Lösung von Antriebsaufgaben stetig steigt. Dieser Anstieg ergibt sich aus den vielen Vorzügen der Umrichterspeisung, welche im Wesentlichen eine deutlich bessere Dosierbarkeit der Antriebsleistung und somit die Ermöglichung produkt- und maschinenschonender Produktionsweisen, sowie ein großes Energieeinsparungspotential

1. Einleitung

im Vergleich zur konventionellen Leistungsanpassung über diverse Drosselkomponenten sind. [4] Im Vergleich zum Betrieb am Netz erhöhen sich jedoch durch den Umrichtereinsatz die Maschinenverluste und die Maschinenerwärmung, was eine Verringerung des Wirkungsgrades nach sich zieht. Wie und in welchem Ausmaß sich die Maschinenverluste durch den Einsatz von Umrichtern ändern, hängt im Wesentlichen von den verwendeten Maschinen (Blecheigenschaften, Nutformen, Sättigungsgrad) und den Eigenschaften der verwendeten Umrichter ab. Dementsprechend wird auch der Wirkungsgrad von all diesen Faktoren beeinflusst, wodurch eine genaue Wirkungsgradbestimmung von umrichter gespeisten Asynchronmaschinen schwer ist. [5]

Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird in Normen eine Zusammenstellung hinreichend genauer, einheitlicher Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung umrichter gespeisten Asynchronmaschinen definiert, um eine einheitliche Klassifizierung der Wirkungsgrade von elektrischen Antrieben zu erhalten. [3]

Aus den vorhin beschriebenen Tatsachen ergeben sich viele Herausforderungen bei der Ermittlung des Wirkungsgrades bei Umrichterspeisung. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Untersuchung der Wirkungsgradbestimmung umrichter gespeister Asynchronmaschine unter Anwendung normierter Messverfahren durchgeführt und deren Anwendung in der Praxis erörtert.

1.2. Aufgabenstellung

Diese Arbeit befasst sich prinzipiell mit der Wirkungsgradbestimmung von Asynchronmaschinen bei Umrichterspeisung. Zur Bestimmung gibt es verschiedene normierte Messverfahren, sowohl für den Umrichterbetrieb als auch den Betrieb am Netz. Generell ist es jedoch schwierig, spezifische Regeln dafür aufzustellen. [6]

Vor allem beim Betrieb mit einem Umrichter ist die Wirkungsgradbestimmung aufwändig, da hier der Wirkungsgrad von vielen Faktoren beeinflusst wird. Daher beschreiben standardisierte Normen eine Anzahl von unterschiedlichen

1. Einleitung

Messansätzen. Jeder dieser Ansätze hat andere Anforderungen an die Verfügbarkeit der Prüfeinrichtungen als auch an die Genauigkeit der Messeinrichtungen. Welcher dieser Messansätze nun in der Praxis angewendet wird, hängt von der geforderten Genauigkeit, der Art und Größe der beteiligten Maschinen und der Verfügbarkeit der Prüfeinrichtungen (Einspeisung, Belastungs- oder Antriebsmaschine) ab. [6]

Die vorliegende Arbeit soll nun einen Überblick über die einzelnen normierten Messverfahren zur Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb schaffen. Dazu soll gezeigt werden, wie die einzelnen Messansätze in der Praxis umgesetzt werden können und welche Unterschiede zwischen den einzelnen Messansätzen existieren.

Außerdem werden auch die zusätzlichen Maschinenverluste (die Oberschwingungsverluste) aufgrund der Umrichterspeisung betrachtet. Dazu werden diese unter Anwendung eines normierten Messverfahrens erfasst. Dadurch ist es möglich, die Veränderung der Teilverluste aufgrund der Umrichterspeisung zu bestimmen und zu analysieren.

Dies soll für mehrere handelsübliche Normmotoren durchgeführt werden, um zu analysieren, wie sich der Wirkungsgrad sowie die Maschinenverluste bei den verschiedenen Motoren ändern, wenn diese über einen Umrichter gespeist werden.

1.3. Methodik

In dem vorliegenden Abschnitt wird die Herangehensweise kurz erläutert, um einen besseren Gesamtblick über die Vorgehensweise in dieser Arbeit zu erhalten.

Als erstes müssen die Wirkungsgrade der verschiedenen umrichtergespeisten Normmotoren bestimmt werden. Dazu sind entsprechend dem Stand der gültigen Normen die erforderlichen Prüfeinrichtungen aufzubauen und die nötigen Versuche der verschiedenen Messansätze durchzuführen. Somit können

im Anschluss die mit den diversen Messansätzen bestimmten Wirkungsgrade miteinander verglichen werden.

Zugleich werden auch die Zusammenhänge der Wirkungsgradverschlechterung bei einer Umrichterspeisung im Vergleich zu einer sinusförmigen Versorgung betrachtet. Dazu werden der Wirkungsgrad und die Verlustleistungen der einzelnen Maschinen bei Netzbetrieb bestimmt und mit jenen bei Umrichterbetrieb verglichen.

Aus dem Vergleich der Verlustleistungen zwischen Netz- und Umrichterbetrieb können die zusätzlichen Maschinenverluste aufgrund der Umrichterspeisung bestimmt und für die unterschiedlichen Normmotoren miteinander verglichen werden. Außerdem wird das Verhältnis der zusätzlichen Maschinenverluste (aufgrund der Umrichterspeisung) zu den Gesamtverlusten (bei Netzbetrieb) für die einzelnen Motoren berechnet und gegenübergestellt.

1.4. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist im Wesentlichen in drei große Bereiche gegliedert.

Als erstes werden in Kapitel 2 alle erforderlichen theoretischen Aspekte erläutert, welche als Basis für die nachfolgenden Kapitel dienen soll. Dabei werden die zusätzlichen Maschinenverluste bei Umrichterbetrieb im Überblick erörtert und alle notwendigen normierten Messverfahren beschrieben.

Im Anschluss werden in Kapitel 3 die praktischen Aspekte näher betrachtet. Dieser Teil beruht auf den theoretischen Grundlagen und setzt diese in der Praxis um. Im Mittelpunkt steht hier vor allem die Umsetzung der normierten Messansätze.

Zum Abschluss folgt in Kapitel 4 noch eine Auswertung und Interpretation der Messergebnisse. Insbesondere wird an dieser Stelle auf die Wirkungsgrade und die zusätzlichen Verluste aufgrund der Umrichterspeisung eingegangen. Des Weiteren werden in diesem Abschnitt auch die einzelnen normierten Messansätze miteinander verglichen.

1.5. Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Überblick über die möglichen Messverfahren zur Bestimmung des Wirkungsgrades umrichter gespeister Asynchronmaschinen zu schaffen und deren Anwendung in der Praxis zu demonstrieren. Hierbei soll auch auf die unterschiedlichen Anforderungen der einzelnen Messverfahren hingewiesen und die Unterschiede zwischen den einzelnen Messverfahren aufgezeigt werden.

Des Weiteren soll eine Analyse der zusätzlichen Maschinenverluste aufgrund der Umrichterspeisung erfolgen. Dazu sollen die einzelnen Teilverluste bei Netz- und Umrichterbetrieb für verschiedene Normmotoren erfasst werden, mit dem Ziel, diese vergleichen zu können.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel soll das theoretische Fundament für die weitere Arbeit geschaffen werden. Dabei wird auf die zusätzlichen Beanspruchungen und deren Einflussfaktoren aufgrund der Umrichterspeisung eingegangen. Außerdem wird ein Überblick über die verschiedenen normierten Messverfahren geschaffen und die Unterschiede aufgezeigt.

2.1. Auswirkungen der Umrichterspeisung auf die Verluste

Grundsätzlich ermöglicht das System aus Umrichter und Asynchronmaschine eine effiziente Bereitstellung der mechanischen Energie in allen Geschwindigkeits- und Leistungsbereichen. Der Einsatz von Umrichtern führt aber auch dazu, dass der Motor bzw. das gesamte Antriebssystem zusätzlich beansprucht werden, da diese mit getakteten und somit Oberschwingungsbehafteten Spannungen und Strömen aus dem Umrichter gespeist werden. [7]

Die aus der nichtsinusförmigen Speisung resultierenden Oberschwingungen verursachen umrichterbedingte Zusatzverluste, welche sich vor allem bei der Erwärmung der Maschine bemerkbar machen. Weitere negative (parasitäre) Auswirkungen der Umrichterspeisung sind beispielsweise eine erhöhte Geräuschentwicklung, eine erhöhte mechanische Beanspruchung, kapazitive Lagerströme und eine erhöhte Isolationsbeanspruchung. Diese Verlustquellen führen zu Einbußen beim Wirkungsgrad. Aus diesem Grund werden diese im folgenden Abschnitt näher betrachtet. [7]

Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die zusätzlichen Verluste aufgrund der Umrichterspeisung von unterschiedlichen Parametern der Maschine beeinflusst werden und auch in einem hohen Maß von den Betriebsparametern des Umrichters abhängen. All diese Einflussfaktoren sind somit in der Lage, eine Wirkungsgradveränderung hervorzurufen weshalb sie für die Wirkungsgradbestimmung von Bedeutung sind. Deshalb werden diese im Abschnitt 2.1.2 näher betrachtet. [7]

2.1.1. Parasitäre Auswirkungen des Umrichterbetriebs

Bei Umrichterspeisung wird die Asynchronmaschine gegenüber dem Betrieb am sinusförmigen Netz zusätzlich beansprucht, wodurch es zu verlustbehafteten Parasitärerscheinungen kommt. [8] [9]

Einige dieser verlustbehafteten Parasitärerscheinungen sind beispielsweise: [8]

- Erhöhte mechanische Beanspruchung (Pulsationsmomente)
- Erhöhte Geräusentwicklung
- Wellenspannungen und Lagerströme
- Oberschwingungsbedingte Zusatzverluste und die daraus entstehende Erwärmung der Wicklungen und des Eisenkreises
- Erhöhte Isolationsbeanspruchung

Dabei ist zu beachten, dass Pulsationsmomente, Geräusche und Wellenspannungen eine Belastung des gesamten Antriebssystems bzw. der Umgebung bedeuten, also nicht nur des Motors. [8]

Die Ursache dieser negativen parasitären Auswirkungen liegt in der nicht-sinusförmigen Speisung durch den Umrichter und den daraus resultierenden Spannungs- und Stromüberschwingungen. Die zuletzt aufgeführte erhöhte Beanspruchung der Isolation hingegen wird durch das schnelle und häufige Schalten der Halbleiterelemente im Umrichter verursacht, wobei Laufzeiteffekte in den Motorzuleitungen zu weiteren Spannungsüberhöhungen an den Motorklemmen führen können. [8]

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die physikalischen Ursachen für diese verlustbehafteten Parasitärerscheinungen und die daraus resultierenden Auswirkungen für die Maschine näher betrachtet.

Erhöhte mechanische Beanspruchung

Aufgrund der Oberschwingungsströme werden im Luftspalt neben der Grundwelle auch noch zusätzliche Oberwellen ausgebildet. Der Einfluss der Oberwellen von den Oberschwingungsströmen auf die Bildung zusätzlicher parasitärer Drehmomente ist jedoch vernachlässigbar klein. [10] [11]

Dennoch bilden sich durch das Zusammenwirken der Strom Oberschwingungen und dem magnetischen Fluss des Grundfeldes merkbare Pulsationsmomente. Ihre Amplitude sinkt dabei mit zunehmender Frequenz schnell ab. [8]

Diese Pulsationsmomente haben jedoch einige störende Wirkungen. Einerseits wirken die Pulsationsmomente mit kleiner Ordnungszahl störend, da diese bei niedrigen Drehzahlen einen unrunder Lauf des Motors verursachen. Des Weiteren führen diese Wechselmomente beim Hochlaufvorgang zu Schwierigkeiten, wenn mechanische Eigenfrequenzen (kritische Drehzahlen) des Antriebssystems durchfahren werden müssen. Außerdem können sie eine unerwünschte Dauerbeanspruchung von Teilen des mechanischen Systems darstellen (z.B. Lüfter, Blechhauben), wenn deren Eigenfrequenzen in der Nähe von Pendelmomentfrequenzen liegen. [8]

Darüber hinaus werden durch die zusätzlichen Oberwellen aufgrund der Umrichterspeisung auch noch zeitlich konstante asynchrone und synchrone Oberwellenmomente erzeugt, welche die Drehmoment-Drehzahl Kennlinie verzerren. Die Verzerrung ist aber klein, da diese Oberwellenmomente in ihrer Größe gering sind, so dass ihr Einfluss im Allgemeinen vernachlässigt werden darf und sie sich somit nicht störend bemerkbar machen. [10]

Erhöhte Geräuschentwicklung

Grundsätzlich ist beim Betrieb elektrischer Maschinen zwischen Luft- und Lagergeräuschen sowie den magnetischen Geräuschen zu unterscheiden. [8]

Im Vergleich zum Netzbetrieb, wo hauptsächlich die drehzahlabhängigen Luft- und Lagergeräusche auftreten, fallen beim Umrichterbetrieb die magnetischen Geräusche mehr ins Gewicht, welche durch Schwingungen des Ständerjoch und des Gehäuses erzeugt werden. Die von den Oberschwingungsströmen erregten zusätzlichen Luftspaltfeldwellen führen zu zusätzlichen Radialkräften, welche genau diese Schwingungen erzeugen. [10] [8]

Bei umrichtergespeisten Maschinen kann es aus diesem Grunde zu Resonanzerscheinungen kommen. Daher muss beachtet werden, dass Resonanzüberhöhungen zumindest bei den Betriebsdrehzahlen vermieden werden, die stationär über einen längeren Zeitraum gefahren werden. [8]

Bei Umrichterspeisung entspricht die dominante Frequenz der zusätzlich abgestrahlten Luftschallwellen der doppelten Schaltfrequenz. Somit kann durch Erhöhung der Umrichter-Schaltfrequenz das Geräusch verringert werden. [10]

Wellenspannungen und Lagerströme

Bei Lagerströme handelt es sich um zirkulierende Ströme durch beide Motorlager als Folge von unterschiedlichen Arten sogenannter Wellenspannungen. Dieser Stromfluss durch die Lager kann bei Maschinen mit Wälz- und mit Gleitlagern zu Schäden bis hin zum Totalausfall führen. [8] [12]

Für umrichtergespeiste Maschinen sind folgende Arten von Wellenspannungen wichtig: [8]

- Induktive Wellenspannung
- Kapazitive Wellenspannung

2. Theoretische Grundlagen

Unter induktiven Wellenspannungen versteht man Spannungen, welche in einer Leiterschleife induziert werden, die aus der Welle, den beiden Lagern, den Lagerschilden bzw. Lagerböcken sowie dem Gehäuse bzw. dem Grundrahmen besteht. Die physikalische Ursache dieser sind Unsymmetrien bzw. Inhomogenitäten oder Sättigungserscheinungen im Motor. Wenn die Isolierwirkung der Schmiermittel in den Lagern nicht ausreicht, führt die induktive Wellenspannung in der bezeichneten Leiterschleife zu zirkulierenden Lagerströmen durch beide Lager. Diese Art der Wellenspannung tritt bereits bei sinusförmigen Betrieb auf. Bei umrichter gespeisten Maschinen sind jedoch höhere Werte der induktiven Wellenspannung infolge der Vielzahl der von den Stromober-schwingungen gebildeten Oberwellen im Luftspaltfeld zu beobachten. [8] [12]

Bei der kapazitiven Wellenspannung handelt es sich um eine zweite Art elektrischer Lagerbeanspruchung, nämlich eine kapazitiv eingekoppelte Lagerspannung. Diese Art der Spannung tritt bei Verwendung moderner Umrichter mit hoher Taktfrequenz auf. Die Größe dieser Wellenspannung hängt unter anderem von der kapazitiven Kopplung des Ständer- mit dem Läuferisenpaketes der Maschine über den Luftspalt ab, nicht jedoch vom magnetischen Aufbau des Ständerjoches. Die Spitzenwerte der kapazitiven Wellenspannung können ein Mehrfaches des Scheitelwertes der induktiven Wellenspannung betragen. Unter der Wirkung der Spitzen in der kapazitiven Wellenspannung kann der Schmierfilm der Lager durchschlagen und ein Zirkularstrom eingeleitet werden. [8] [12]

Im Netzbetrieb geht die Gefährdung der Lager durch Lagerströme ausschließlich von induktiven Wellenspannungen aus. Die Wellenspannungen im Netzbetrieb betragen 250 mV bis 350 mV. Diese Größen sind jedoch für die Lagerlebensdauer unkritisch. Bei Umrichterbetrieb können leicht höhere Werte auftreten, wodurch bei umrichter gespeisten Maschinen Lagerausfälle häufiger auftreten als bei Maschinen, die am starren Netz betrieben werden. [8] [12]

Oberschwingungsbedingte Zusatzverluste und Erwärmungen

Die Zusatzverluste infolge der Umrichterspeisung und die daraus resultierende Erwärmung lassen sich durch die zusätzlichen Oberschwingungsverluste erklären, welche beim Umrichterbetrieb gegenüber den Netzbetrieb entstehen. Diese Verluste werden aufgrund der vermehrten Oberschwingungen bei Umrichterspeisung erzeugt, da jede Oberschwingung Verluste verursacht, die aufsummiert die gesamten Oberschwingungsverluste ergeben. Jene überschwingungsbedingten Zusatzverluste können dabei im Bereich einiger Prozent der Nennleistung liegen. Derartig große zusätzliche Verluste ziehen vor allem thermische Probleme nach sich, führen aber natürlich auch zu Einbußen beim Wirkungsgrad. [7] [13]

Prinzipiell lassen sich diese zusätzlichen Oberschwingungsverluste begründen durch folgende zwei Auswirkungen der umrichterbedingten Oberschwingungen: [13]

- Zunahme der Stromwärmeverluste, sowohl in der Statorwicklung als auch im Rotorkäfig
- Zunahme der Eisenverluste

Somit bilden die erhöhten Stromwärmeverluste einen Anteil der Oberschwingungsverluste. Diese entstehen aufgrund der von den Spannungsüberschwingungen getriebenen Ströme bzw. der Oberschwingungsströme, die im Stator und Rotor der Maschine an den ohmschen Widerständen zu zusätzlichen Stromwärmeverlusten führen. Dabei kommt es zu einer verlustbedingten Zusatzerwärmung der Maschine. [13]

Den anderen Anteil der Oberschwingungsverluste bilden die erhöhten Eisenverluste. Dabei erregen die Oberschwingungsströme bzw. die Oberschwingungen in der Spannung je einen zusätzlichen Fluss im Eisen mit der Frequenz der jeweiligen Oberschwingung. Diese zusätzlichen Flussanteile überlagern sich mit dem von der Grundschwingung erzeugten magnetischen Feld. Die Flussdichtewerte zufolge der Oberschwingungen sind klein gegenüber jenen der Grundschwingung. Allerdings haben die zusätzlich hervorgerufenen magnetischen Flüsse

trotz ihrer kleinen Amplitude wegen ihren hohen Frequenzen deutlich messbare Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste im Eisen zur Folge, die sich in den Eisenverlusten niederschlagen. [14] [7] [13]

Erhöhte Isolationsbeanspruchung

Bei umrichter gespeisten Maschinen muss darauf geachtet werden, dass die Wicklungsisolation stärker beansprucht wird als im konventionellen Netzbetrieb. [8] [10]

Dies resultiert aus der Steilheit und großen zeitlichen Häufigkeit der erzeugten Spannungsimpulse von modernen, schnell schaltenden Umrichter mit Schaltzeiten im Nanosekundenbereich. Jene Spannungsimpulse durchwandern dann als Wanderwellen die Verbindungskabel zwischen Umrichter und Motor. An den Motorwicklungen werden sie reflektiert, da die Maschinenwicklungsimpedanz als Abschlussimpedanz des Kabels deutlich größer als die Wellenimpedanz des Kabels ist. Eine nahezu vollständige Spannungsreflexion tritt auf, sobald die Schaltzeit kürzer als die doppelte Laufzeit der Spannungswelle entlang des Motorkabels ist. Dies führt nun zu Spannungsüberhöhungen an den Motorklemmen und somit zu einer erhöhten Beanspruchung der Wicklungsisolation. [8] [10]

Die Gefahr großer Überspannungen an den Klemmen besteht insbesondere bei sehr kurzen Anstiegszeiten der Umrichterspannungsimpulse und zugleich großen Kabellängen zwischen Umrichter und Motor. Darunter versteht man Kabellängen, bei denen die Laufzeiten der Wellen größer als die Anstiegszeit der Impulse sind. [8]

Durch das ständige Anliegen solcher hohe Spannungsimpulse und Überspannungen altert die Isolation vorzeitig. [8]

2.1.2. Einflussfaktoren auf die Oberschwingungsverluste

Im vorherigen Abschnitt wurden die negativen Auswirkungen der Umrichterspeisung diskutiert und auf die Oberschwingungsbedingten Zusatzverluste eingegangen. Dabei muss nun aber noch berücksichtigt werden, dass diese Oberschwingungsverluste von einigen Faktoren abhängig sind. All diese Einflussfaktoren können eine Erhöhung bzw. Reduzierung der Oberschwingungsverluste bewirken und somit den Wirkungsgrad beeinflussen. Deswegen wird an dieser Stelle nun auf jene Faktoren näher eingegangen.

Auf der folgenden Abbildung sind einige Einflussfaktoren überblicksmäßig dargestellt, welche auf das Oberschwingungsspektrum einen Einfluss ausüben und somit auch die Höhe der zusätzlichen Oberschwingungsverluste beeinflussen. [15]

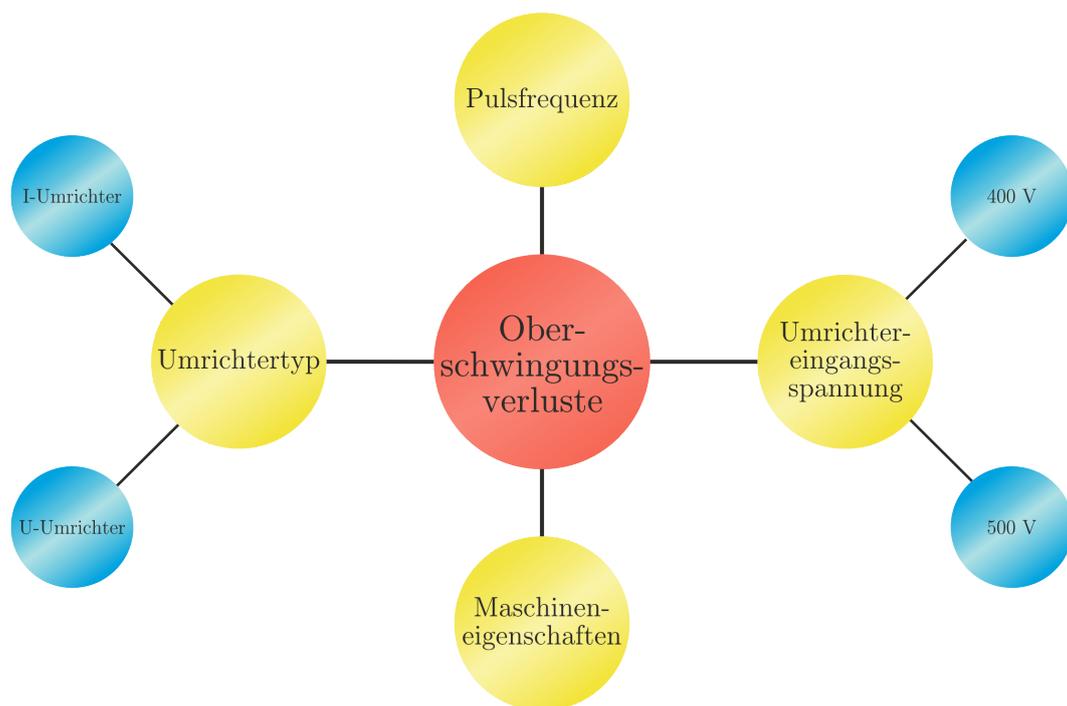


Abbildung 2.1.: Einflussfaktoren auf die Oberschwingungsverluste [15]

Wie aus dieser Abbildung ersichtlich, sind die umrichterbedingten Oberschwingungsverluste vorwiegend von den einzelnen Betriebsparametern des Umrichters

2. Theoretische Grundlagen

ters abhängig. Sie werden aber auch durch die Eigenschaften der verwendeten Asynchronmaschine beeinflusst.

Im Folgenden wird nun auf die einzelnen Einflussfaktoren näher eingegangen.

Umrichtereingangsspannung

Ein Einflussfaktor auf die Oberschwingungsverluste ist die Umrichtereingangsspannung. Hier ist zu beachten, dass eine Erhöhung der Umrichtereingangsspannung (z.B. von 400 V auf 500 V) bei Maschinenbemessungsspannung zu einer Erhöhung der Eisenverluste und damit einer Zunahme der Zusatzverluste führt. Dieses lässt sich dadurch erklären, dass der Effektivwert der Umrichter-
ausgangsspannung im Verhältnis zur Grundschwingungsspannung prozentual ansteigt, wodurch auch der Oberschwingungsanteil steigt. Die erhöhten Oberschwingungsanteile bewirken einen Anstieg der Verluste. [14]

Eingestellte Pulsfrequenz

Die Oberschwingungsverluste sind außerdem von der Pulsfrequenz des Umrichters abhängig. Dabei gilt, je höher die Pulsfrequenz gewählt wird, umso besser gleicht sich der Maschinenstrom bzw. die Maschinenspannung der Grundschwingung an und die Oberschwingungsverluste in der Maschine gehen zurück. Gegenläufig dazu steigen aber bei höheren Pulsfrequenzen die Verluste im Umrichter an. [16]

Maschineneigenschaften

Es muss auch beachtet werden, dass die Eigenschaften der Maschine wie Bleicheigenschaften, Nutformen und Sättigungsgrad einen Einfluss auf die Oberschwingungsverluste haben. Die Anwendung konstruktiver Maßnahmen bezüglich der Maschineneigenschaften, die bei netzbetriebenen Motoren durchaus positiv

auf die Betriebseigenschaften wirken, können somit im Umrichterbetrieb jedoch zu einer deutlichen Erhöhung der Oberschwingungsverluste führen. [17]

Verwendeter Umrichtertyp

Die Wahl des Umrichtertyps entscheidet darüber, ob das Oberschwingungsspektrum entweder der Spannung oder des Stroms größer ist, was wiederum die Oberschwingungsverluste unterschiedlich beeinflusst.

Hierbei wird grundsätzlich zwischen folgenden zwei Umrichterarten unterschieden: [8]

- Spannungszwischenkreisumrichter (U-Umrichter), welche eine Spannungsquelle darstellen
- Stromzwischenkreisumrichter (I-Umrichter), welche eine Stromquelle darstellen

Dabei prägt der Spannungszwischenkreisumrichter der Motorwicklung eine gepulste Spannung auf, wodurch sich zusätzliche Spannungsüberschwingungen ausbilden. Aus dem größeren Oberschwingungsspektrum der Spannung ergeben sich größere Eisenverlusten im Vergleich zum Stromzwischenkreisumrichter. Der Strom in den Motorwicklungen stellt sich zwar überschwingungsbehaftet ein, ist aber im Wesentlichen sinusförmig. [8]

Der Stromzwischenkreisumrichter hingegen prägt in den Motorwicklungen einen blockförmigen oder gepulsten Strom ein, was zur Ausbildung zusätzlicher Stromüberschwingungen führt. Durch den erhöhten Oberschwingungsanteil des Stroms kommt es verglichen zum Spannungszwischenkreisumrichter zu einer Erhöhung der Stromwärmeverluste, was folglich eine zusätzliche Erwärmung der Maschine verursacht. Die Spannung an den Motorwicklungen stellt sich zwar überschwingungsbehaftet ein, ist aber im Wesentlichen sinusförmig. [8]

2.2. Normen zur Wirkungsgradbestimmung im Überblick

In diesem Abschnitt werden alle Normen, die sich mit speziellen Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung von Asynchronmaschinen befassen, im Überblick dargestellt.

Prinzipiell ist die Norm IEC 60034 Teil 1 (bzw. IEC 60034-1) der International Electrotechnical Commission (IEC) ein Standard für jede Art von rotierenden elektrischen Maschinen zur Beschreibung der grundlegenden, gemeinsamen Eigenschaften. Dabei beschreibt diese die Bemessung und das Betriebsverhalten elektrischer Maschinen. Zu dieser Norm kommen noch eine Reihe von Standards mit den individuellen Eigenschaften und Ergänzungen für einzelne Maschinenarten hinzu, z. B. Turbogeneratoren (Teil 3 und Teil 4), Schrittmotoren (Teil 20), Umrichter motoren (Teil 17 und Teil 25) oder mit speziellen Verfahren wie beispielsweise Messung des Wirkungsgrads (Teil 2), äquivalente Belastung (Teil 29), Bestimmung von Ersatzschaltbildgrößen (Teil 28) und viele mehr. [18]

Zur Wirkungsgradermittlung werden momentan die Norm IEC 60034-2 in Europa und die Norm IEEE 112 in Nordamerika angewendet [6] [5]. Diese definieren jeweils hinreichend genaue einheitliche Verfahren zur Verlust- und Wirkungsgradbestimmung mit dem Ziel der energetischen Optimierung und der einheitlichen Klassifizierung von Wirkungsgraden elektrischer Maschinen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es schwierig ist, spezifische Regeln für die Bestimmung des Wirkungsgrades aufzustellen, da diese von der geforderten Genauigkeit, der Art und Größe der beteiligten Maschinen sowie den Prüfeinrichtungen abhängen. [3] [6] [5]

Obwohl die Norm IEC 60034-2 mit signifikantem Bezug auf die Norm IEEE 112 entstanden ist, gibt es Unterschiede zwischen diesen Beiden bei der Bestimmung der Statorwicklungsverluste, der Eisenverluste und der lastabhängigen Zusatzverluste. Die Abweichung bei den Nenn-Statorwicklungsverlusten ist dabei innerhalb der Messtoleranz, aber jene bei den Eisenverlusten und lastabhängige Zusatzverluste sind nicht zu vernachlässigen. Bei der Bestimmung der

2. Theoretische Grundlagen

Rotorwicklungsverluste sowie den Reibungs- und Lüftungsverluste hingegen gibt es keine Unterschiede. [19]

Verglichen mit IEEE 112 bietet der IEC Standard zwar mehr Genauigkeit, liefert aber geringere Werte bei den Eisenverlusten und somit höhere bei den lastabhängige Zusatzverluste. Da bei beiden Normen jedoch ähnliche Gesamtverluste herauskommen, sind die errechneten Nennwirkungsgrade nahezu gleich. [19]

An dieser Stelle soll nun die Norm IEC 60034-2 näher betrachtet werden. Dieser Teil des Standards IEC 60034 dient der Zusammenstellung von Verfahren zur Ermittlung des Wirkungsgrades und zur Erfassung bestimmter Verluste aus Prüfungen an der Maschine. [6]

Dabei besteht diese Norm aus drei Teilen: [6]

- Der erste Teil (IEC 60034-2-1) deckt Maschinen innerhalb des Geltungsbereichs von IEC 60034-1 ab, die gewöhnlich unter Last geprüft werden
- Der zweite Teil (IEC 60034-2-2) behandelt Prüfungen, die hauptsächlich bei größeren Maschinen angewendet werden, wo eine Vollastprüfung praktisch nicht durchführbar ist
- Der dritte Teil (IEC 60034-2-3) beschäftigt sich mit Prüfungen an Maschinen mit Umrichterspeisung zur Bestimmung des Wirkungsgrades, sowie der zusätzlichen Motorverluste aufgrund der nichtsinusförmigen Versorgung [5]

Da die vorliegende Arbeit sich mit der Wirkungsgradbestimmung umrichter gespeister Maschinen beschäftigt, ist vor allem der dritte Teil (IEC 60034-2-3) von Interesse, wobei dieser abschnittsweise auf dem ersten Teil der Norm (IEC 60034-2-1) basiert. Auf diese beiden wird deshalb in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

2.3. Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb (IEC 60034-2-3)

Die Wirkungsgradbestimmung von Maschinen, die von einem Umrichter versorgt werden, ist sehr schwierig. Dies resultiert zum einen daher, dass der im Antriebssystem verwendete Motor sowohl aus dem Netz als auch von verschiedenen Typen von Frequenzumrichtern unterschiedlicher Hersteller versorgt werden kann, wodurch sich je nach gewählte Motor-Versorgungs-Kombination auch unterschiedliche Wirkungsgrade ergeben. Zum anderen nehmen die einzelnen individuellen Betriebsparameter des Umrichters (Pulsfrequenz, Zwischenkreisspannung, usw.) einen Einfluss auf die Effizienz des Motors. Es ist somit unmöglich, den Wirkungsgrad für jede Kombination von Motor, Frequenzumrichter, Anschlusskabel, Ausgangsfilter und Parametereinstellungen zu bestimmen.

Unter Berücksichtigung der vorher genannten Schwierigkeiten beschreibt die Norm IEC 60034-2-3 einige Ansätze bzw. Prüfverfahren für die Bestimmung der Wirkungsgrade von umrichtergespeisten Induktionsmotoren im Rahmen der Norm IEC 60034-1.

Des Weiteren definiert die Norm IEC 60034-2-3 Prüfverfahren für die Bestimmung der zusätzlichen Oberschwingungsverluste von umrichtergespeisten Induktionsmotoren. Diese Verluste treten zusätzlich zu den Grundschwingungsverlusten bei sinusförmiger Versorgung auf, welche mit den Methoden der Norm IEC 60034-2-1 bestimmt werden. Es wird somit ermöglicht, verschiedene Induktionsmotoren hinsichtlich ihrer umrichterbedingten Zusatzverluste zu vergleichen. Aus diesem Grund definiert die Norm auch noch das Oberschwingungsverlustverhältnis r_{HL} (engl. harmonic loss ration), welches dem Verhältnis der zusätzlichen Oberschwingungsverluste zu den gesamten Motorverlusten bei sinusförmiger Versorgung entspricht.

In diesem Abschnitt werden nun die in der Norm 60034-2-3 definierten Ansätze zur Bestimmung des Wirkungsgrades und der zusätzlichen Oberschwingungsverluste näher betrachtet.

2.3.1. Prüfverfahren im Überblick

Die untenstehende Tabelle liefert einen Überblick über die in der Norm IEC 60034-2-3 beschriebenen Prüfverfahren und die dazu benötigte Prüfeinrichtung. Diese Norm definiert grundsätzlich drei Prüfverfahren, welche nachfolgend kurz erklärt werden.

Methode	Beschreibung	erforderliche Prüfeinrichtung
Einzelverlustverfahren	Bestimmung der Oberschwingungsverluste	sinusförmige Versorgung
Input - Output Methode	Drehmomentmessung	Drehmomentmesseinrichtung
kalorimetrisches Verfahren	Verlustbestimmung durch Temperaturanstieg des Kühlmittels	spezielle thermische Umhüllung

Tabelle 2.1.: Prüfverfahren gemäß IEC 60034-2-3

Bei dem Einzelverlustverfahren werden sowohl der Wirkungsgrad als auch die umrichterbedingten Oberschwingungsverluste bestimmt. Dafür müssen jedoch Messungen mit sinusförmiger Versorgung sowie mit Umrichterversorgung durchgeführt werden.

Bei der Input-Output Methode handelt es sich um eine Prüfung zur direkten Wirkungsgradbestimmung mittels einer Drehmomentmesseinrichtung. Dabei wird nur der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine bestimmt ohne expliziter Berechnung der Oberschwingungsverluste.

Der Wirkungsgrad kann auch durch eine kalorimetrische Messung der Gesamtverluste innerhalb des Kühlkreislaufes bestimmt werden. Bei diesem Verfahren ermitteln sich die Verluste in der Maschine aus der Wärmeabgabe je Zeiteinheit, welche durch die Verluste entstehen. Diese werden dabei berechnet aus der Wärmemenge, die an das umgebende Medium abgeführt wird, zuzüglich dem

Produkt der Kühlmittelmenge und ihrer Temperaturerhöhung. Dieses Verfahren stellt jedoch große Anforderungen an die erforderliche Prüfeinrichtung. Der genaue Prüfablauf wird in der Norm IEC 60034-2-2 näher beschrieben. [6]

Wenn die Motorleistung jedoch die zur Verfügung stehenden Testmöglichkeiten überschreitet, erfolgt die Bestimmung der zusätzlichen Oberschwingungsverluste durch ein alternatives Verfahren basierend auf Berechnungen. Diese Berechnungen müssen auf dem realen Pulsmuster des Umrichters und den frequenzabhängigen Ersatzschaltbild-Parametern des elektrischen Motors unter Verwendung geeigneter Motormodelle basieren, um in der Lage zu sein, alle Auswirkungen der Oberschwingungen abzudecken.

In den folgenden Punkten wird auf das Gesamtverlustverfahren und die Input-Output Methode näher eingegangen. Das kalorimetrische Verfahren und die alternativen Berechnungen bei zu großer Motorleistung werden aufgrund des Umfangs nicht näher betrachtet.

2.3.2. Die Input-Output Methode

Dies ist ein Prüfverfahren, bei dem die mechanisch abgegebene Leistung P_{2C} der Maschine im Motorbetrieb durch direkte Messung des Wellen-Drehmoments mittels einer Drehmomentmesseinrichtung zusammen mit der Drehzahl bestimmt wird. Dabei wird die zu prüfende Maschine mit einer Belastungsmaschine mechanisch gekuppelt. Die elektrische Leistung P_{1C} des Stators wird in derselben Prüfung gemessen. [6]

Vor dem Beginn der Aufzeichnung von Messwerten für diese Prüfung muss die Maschine so lange mit dem Nenndrehmoment belastet werden, bis thermisches Gleichgewicht (Temperaturgradient von 2 K pro Stunde oder weniger) erreicht ist. Während der Prüfungen wird das Drehmoment der Maschine M , die Drehzahl n und die aufgenommene elektrische Leistung P_{1C} gemessen.

Um den Wirkungsgrad zu berechnen wird als erstes die abgegebene mechanische Leistung wie folgt berechnet:

$$P_{2C} = 2\pi \cdot M \cdot n \quad (2.1)$$

Mit dieser kann nun die Wirkungsgradbestimmung mit nachfolgender Gleichung durchgeführt werden:

$$\eta = \frac{P_{2C}}{P_{1C}} \quad (2.2)$$

2.3.3. Das Einzelverlustverfahren

Bei diesem Verfahren wird durch indirekte Messungen der Wirkungsgrad ermittelt, indem die durch Umrichterspeisung verursachten Oberschwingungsverluste bestimmt werden.

Dabei erfordert dieses Verfahren Prüfungen gemäß der Norm IEC 60034-2-1. Zunächst werden Prüfungen an der Maschine mit sinusförmiger Versorgung durchgeführt, um die Gesamtverluste der Grundschiwingung bei sinusförmiger Versorgung P_{Tsin} zu berechnen [20]. Im Anschluss werden die Oberschwingungsverluste P_{HL} aus Belastungs- und Leerlaufprüfung sowohl mit sinusförmiger Versorgung als auch mit Umrichterspeisung bestimmt. Dann werden die Gesamtverluste bei Umrichterspeisung P_{TC} berechnet, indem zu den Gesamtverlusten aus der ersten Prüfung P_{Tsin} die Oberschwingungsverluste P_{HL} hinzuaddiert werden. Mit Hilfe dieser kann nun der Wirkungsgrad bestimmt werden. [21]

Um bessere Vergleichbarkeit zu erhalten, definiert die Norm eine Konfiguration für Umrichter. Durch die Verwendung dieser Konfiguration wird ein unternehmensübergreifender Vergleich der Wirkungsgrade von verschiedenen Maschinen ermöglicht, da das Pulsmuster vorgeschrieben wird und somit nicht von der jeweiligen Konfiguration der Firmen abhängt. Werden firmenspezifische Konfigurationen verwendet, ist diese Vergleichbarkeit nicht gegeben, da die Ausgangsspannung von den jeweiligen herstellerspezifischen Regelungsmethoden

abhängt. Der Prüfungsablauf ist jedoch, unabhängig von der gewählten Konfiguration, der Gleiche. Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit wird nicht weiter auf die in der Norm definierte Konfiguration eingegangen.

Der genaue Ablauf der Prüfungen und die anschließende Berechnungen mit den Messwerten werden nun näher beschrieben. Zunächst wird jedoch noch kurz auf die in der Norm verwendete Begriffe und Definitionen der Motorverluste bei Umrichterspeisung eingegangen.

Die Motorverluste bei Umrichterspeisung gemäß IEC 60034-2-3

Grundsätzlich sind die Motorverluste bei Umrichterspeisung höher als während des Betriebs an einer sinusförmigen Versorgung (die Gründe hierfür wurden im Abschnitt 2.1 näher betrachtet). Dies resultiert aus den zusätzlichen Oberschwingungsverlusten, die bei Umrichterbetrieb auftreten. Wenn ein Motor durch einen Umrichter angetrieben wird, sind die gesamten Motorverluste eine Kombination aus Verlusten einerseits verursacht durch die Grundschwingung (üblicherweise 50 Hz oder 60 Hz) und andererseits durch die Oberschwingungen des Umrichters.

Die Grundschwingungsverluste sind dabei die Verluste eines Motors, welcher bei der Grundfrequenz ohne jeglichen Oberschwingungen betrieben wird. Diese werden laut Norm 60034-2-3 in fünf verschiedene Komponenten aufgeteilt:

- Eisenverluste P_{fe} (variieren mit der Motorfrequenz und der angelegten Grundschwingung der Spannung)
- Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} (variieren mit der Motordrehzahl)
- Ständerwicklungsverluste P_s , Rotorwicklungsverluste P_r und lastabhängige Zusatzverluste P_{LL} (alle drei variieren mit dem Motorstrom)

Die Oberschwingungsverluste hingegen werden im Motor durch den nicht-sinusförmigen Spannungs- und Stromverlauf erzeugt, welche durch den Umrichterbetrieb verursacht werden. Diese schlagen sich in zusätzlichen Eisen-,

2. Theoretische Grundlagen

Rotorwicklungs-, Statorwicklungsverlusten und lastabhängige Zusatzverlusten nieder.

Da diese Oberschwingungsverluste mit der Belastung ansteigen, unterteilt die Norm diese in einen lastabhängigen Anteil $P_{HL_{Load}}$ und einen lastunabhängigen (konstanten) Anteil $P_{HL_{No-Load}}$.

Der Prüfungsablauf

Die Norm 60034-2-3 legt fest, dass zunächst Prüfungen an der Maschine bei sinusförmiger Versorgung genau nach dem Prüfungsablauf der indirekten Messung mit dem Einzelverlustverfahren entsprechend der Norm IEC 60034-2-1 durchzuführen sind. Dieser Prüfungsablauf besteht aus einer Prüfung mit Bemessungsbelastung, einer Prüfung mit Belastungskurve und einer Leerlaufprüfung. Im Anschluss muss die Prüfung mit Belastungskurve und die Leerlaufprüfung für den Motor bei Umrichterspeisung wiederholt werden. [22]

Um einen besseren Überblick über den Ablauf der durchzuführenden Prüfungen gemäß IEC 60034-2-1 (Einzelverlustverfahren) am Motor bei sinusförmiger Versorgung zu erhalten, werden diese hier schematisch aufgezählt:

- Als erstes muss nach einer Aufwärmphase eine Prüfung mit Bemessungsbelastung bei Nennfrequenz und Nennspannung durchgeführt werden
- Im Anschluss folgt eine Prüfung mit Belastungskurve bei Nennfrequenz und Nennspannung
- Zum Abschluss ist noch eine Leerlaufprüfung bei Nennfrequenz durchzuführen

Aus diesen Prüfungen lassen sich nun die Verluste bei sinusförmiger Versorgung ermitteln, wie die lastabhängigen Verluste P_{LL} , die konstanten Verluste im Leerlauf P_k als auch die Gesamtverluste P_{Tsin} .

2. Theoretische Grundlagen

Anschließend müssen noch folgende Prüfungen gemäß IEC 60034-2-1 (Einzelverlustverfahren), diesmal jedoch bei Umrichterspeisung, durchgeführt werden:

- Zunächst muss eine Prüfung mit Belastungskurve bei Nennfrequenz und Nennspannung durchgeführt werden
- Anschließend folgt eine Leerlaufprüfung bei Nennfrequenz und Nennspannung

Daraus lassen sich die Verluste bei Umrichterspeisung bestimmen, unter anderem die konstanten Verluste im Leerlauf P_{kC} .

Die genaue Vorgehensweise für die oben genannten Prüfungen und die Berechnung der Einzelverluste nach der Norm IEC 60034-2-1 wird im Abschnitt 2.4 dieser Arbeit näher betrachtet.

Mit Hilfe der aus diesen Prüfungen erhaltenen Messwerte können nun die Oberschwingungsverluste und im Anschluss der Wirkungsgrad bestimmt werden.

Berechnung der Oberschwingungsverluste P_{HL}

Wie bereits erwähnt bestehen die Oberschwingungsverluste aus einem lastabhängigen und einem lastunabhängigen (konstanten) Anteil. Diese werden nun getrennt voneinander aus den Messwerten der vorhin beschriebenen Prüfungen eruiert.

Die lastabhängigen Oberschwingungsverluste $P_{HL_{Load}}$:

Zunächst werden die Restverluste gemäß IEC 60034-2-1 für jeden Lastpunkt bestimmt, indem von der Eingangsleistung die Ausgangsleistung, die nicht korrigierte Ständerverluste, die Eisenverluste, die Reibungs- und Lüftungsverluste und die nicht korrigierten Rotorwicklungsverluste subtrahiert werden.

2. Theoretische Grundlagen

Die Restverluste für die sinusförmige Versorgung (P_{Lr}), als auch für den Umrichterbetrieb (P_{LrC}) werden demnach wie folgt bestimmt, wobei diese für die gleichen Lastpunkte berechnet werden müssen:

$$\begin{aligned} P_{Lr} &= P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \\ P_{LrC} &= P_{1C} - P_{2C} - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dabei ist P_1 die elektrisch aufgenommene Leistung, P_2 die abgegebene mechanische Leistung, P_s die Ständerverluste, P_r die Rotorverluste, P_{fe} die Eisenverluste und P_{fw} die Reibungs- und Lüftungsverluste bei sinusförmiger Versorgung. Hingegen ist P_{1C} die aufgenommene elektrische Leistung und P_{2C} die abgegebene mechanische Leistung bei Umrichterspeisung. Die genaue Bestimmung dieser einzelnen Verluste wird im Abschnitt 2.4.3 näher beschrieben.

Das oben verwendete P_{fw} entspricht an dieser Stelle den korrigierten Reibungs- und Lüftungsverlusten, welche wie folgt aus den Reibungs- und Lüftungsverlusten bei synchroner Drehzahl P_{fw0} für den jeweiligen Schlupf s bestimmt werden:

$$P_{fw} = P_{fw0} \cdot (1 - s)^{2.5} \quad (2.4)$$

Für beide Versorgungsarten werden die Restverluste mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse entsprechend IEC 60034-2-1 geglättet, die darauf beruht, dass die Verluste als Funktion des quadrierten Last-Drehmoments ausgedrückt werden können. Daraus resultieren folgende Beziehungen: [6]

$$P_{Lr} = A \cdot M^2 + B \quad \text{und} \quad P_{LrC} = A_C \cdot M_C^2 + B_C$$

Hierbei ist B der Schnittpunkt mit der Ordinate und A die Steigung des jeweiligen Verlaufs der Restverluste. Die Berechnung dieser Größen wird im Abschnitt 2.4 näher beschrieben.

2. Theoretische Grundlagen

Wurde die Steigung A festgelegt, so werden die Werte für die lastabhängigen Zusatzverluste für den Nennlastpunkt jeweils für den Umrichterbetrieb (P_{LLC}) und für die sinusförmige Versorgung (P_{LL}) mit folgender Gleichung bestimmt: [6]

$$P_{LL} = A \cdot M_N^2 \quad \text{und} \quad P_{LLC} = A_C \cdot M_N^2$$

Der ermittelte Wert P_{LLC} deckt somit alle lastabhängigen zusätzlichen Verluste bei Umrichterspeisung ab, darunter sowohl jene, die durch die Grundschiwingung des Laststroms verursacht werden als auch den lastabhängigen Teil, welcher von den Oberschwingungen des Umrichters erzeugt wird.

Die Differenz zwischen den lastabhängigen Zusatzverlusten für den Betrieb mit dem Umrichter und denen mit einer sinusförmigen Versorgung ergibt den lastabhängigen Teil der Oberschwingungsverluste $P_{HL\text{Load}}$:

$$P_{HL\text{Load}} = P_{LLC} - P_{LL} \quad (2.5)$$

Die konstanten Oberschwingungsverluste $P_{HL\text{No-Load}}$:

Der lastunabhängige konstante Teil der Oberschwingungsverluste ergibt sich aus der Differenz zwischen den konstanten Verlusten im Leerlauf bei Umrichterspeisung P_{kC} und jenen bei einer sinusförmigen Versorgung P_k :

$$P_{HL\text{No-Load}} = P_{kC} - P_k \quad (2.6)$$

Die gesamten Oberschwingungsverluste P_{HL} :

Die Summe der lastabhängigen und konstanten Oberschwingungsverluste ergibt die gesamten Oberschwingungsverluste die durch den Betrieb mit dem Umrichter zusätzlich zu den Verlusten bei sinusförmiger Versorgung entstehen:

$$P_{HL} = P_{HL\text{No-Load}} + P_{HL\text{Load}} \quad (2.7)$$

Die Wirkungsgradbestimmung

Um den Wirkungsgrad zu ermitteln werden zunächst die Gesamtverluste bei Umrichterspeisung P_{TC} bestimmt. Um diese zu erhalten, werden die Oberschwingungsverluste P_{HL} zu den Gesamtverlusten bei sinusförmiger Versorgung P_{Tsin} addiert:

$$P_{TC} = P_{Tsin} + P_{HL} \quad (2.8)$$

Der Wirkungsgrad bei Umrichterspeisung wird nun wie folgt mit Hilfe der Gesamtverluste bei Umrichterspeisung bestimmt:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{TC}} \quad (2.9)$$

Zur besseren Vergleichbarkeit der umrichterbedingten Zusatzverluste verschiedener Maschinen wird noch das Oberschwingungs-Verlustverhältnis r_{HL} definiert. Dieses ist gegeben durch:

$$r_{HL} = \frac{P_{HL}}{P_{Tsin}} \cdot 100 \% , \quad r_{HL} \in \mathbb{N} \quad (2.10)$$

Dabei sollte r_{HL} auf eine positive ganze Zahl gerundet werden.

2.4. Verfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades (IEC 60034-2-1)

Die Norm IEC 60034-2-1 ist eine Zusammenstellung von Verfahren zur Ermittlung des Wirkungsgrades aus Prüfungen und gibt des weiteren Verfahren zur Erfassung bestimmter Verluste an. Sie gilt sowohl für Gleichstrommaschinen sowie Synchron- und Induktions-Wechselstrommaschinen aller Größen innerhalb des Geltungsbereichs der Norm IEC 60034-1.

2. Theoretische Grundlagen

Die zur Bestimmung des Wirkungsgrades beschriebenen Verfahren können in folgenden drei Gruppen eingeteilt werden:

- Messungen der aufgenommenen sowie der abgegebenen Leistung an einer einzigen Maschine. Dieses Verfahren erfordert die Messung der elektrischen und mechanischen Leistung, wie sie von der Maschine entweder aufgenommen oder abgegeben wird
- Messung der aufgenommenen und der abgegebenen Leistung zweier Maschinen, die mechanisch gekuppelt sind. Dadurch werden bei diesem Verfahren Messungen der mechanisch aufgenommenen oder abgegebenen Leistung der Maschine vermieden
- Messung der Verluste einer Maschine. Das Verfahren kann dazu verwendet werden, die Gesamtverluste oder bestimmte Einzelverluste zu berechnen und aus diesen Verlusten auf den Wirkungsgrad zu schließen

Die Prüfungsverfahren bestehen meist aus mehreren Teilprüfungen, welche zusammen das Prüfverfahren ergeben. Dabei ist es nicht notwendig, die einzelnen Teilprüfungen unmittelbar nacheinander durchzuführen. Werden die Prüfungen verzögert oder einzeln ausgeführt, müssen jedoch die festgelegten thermischen Bedingungen vor Aufnahme der Prüfwerte wiederhergestellt werden. Die Wahl der durchzuführenden Teilprüfungen wiederum hängt ab von der erforderlichen Information, der geforderten Genauigkeit, der Art und Größe der beteiligten Maschinen und der Verfügbarkeit der Prüfeinrichtungen (Einspeisung, Belastungs- und Antriebsmaschine).

In diesem Abschnitt werden nun die in der Norm 60034-2-1 definierten Ansätze zur Bestimmung des Wirkungsgrades und der Verluste näher betrachtet. Zusätzlich wird noch darauf eingegangen, wie gemäß der Norm der Wicklungswiderstandes zu ermitteln ist.

Hier ist jedoch zu beachten, dass zwar drei Leiterspannungen und Leiterströme gemessen werden, jedoch bei Mehrphasen-Wechselstrommaschinen in den weiteren Berechnung zu den einzelnen Prüfungen laut der Norm IEC 60034-2-1 der arithmetische Mittelwert dieser zu verwenden ist.

2.4.1. Prüfverfahren im Überblick

In diesem Abschnitt wird ein Auszug der möglichen Prüfverfahren für Induktionsmaschinen gemäß der Norm IEC 60034-2-1 dargestellt. In der Norm wird grundsätzlich zwischen direkter und indirekter Messmethoden zur Bestimmung des Wirkungsgrades unterschieden.

Bei der direkten Messmethode erfolgt die Ermittlung des Wirkungsgrades durch Messung der aufgenommenen sowie der abgegebenen Leistung. Der Wirkungsgrad wird hier aus dem Verhältnis der gemessenen Ausgangsleistung zur gemessenen Eingangsleistung bestimmt. Die Verlustleistung der Maschine wird als die Differenz zwischen gemessener aufgenommenener zur abgegebenen Leistung definiert. In der nachfolgenden Tabelle werden die möglichen Methoden zur direkten Wirkungsgradbestimmung dargestellt sowie die zugehörige Messunsicherheit. [23]

Methode	erforderliche Prüfeinrichtung	Unsicherheit
Drehmomentmessung	Drehmomentmesseinrichtung, Dynamometer für Volllast	Niedrig
Prüfung mit kalibrierter Maschine	Kalibrierte Maschine	Mittel
Rückspeisung mit zwei Einspeisungen	Maschine unter Volllast aufgebaut, zwei gleiche Maschinen	Niedrig

Tabelle 2.2.: direkte Prüfverfahren gemäß IEC 60034-2-1

Hierbei ist die in der Tabelle angegebene Messunsicherheit die Unsicherheit bei der Bestimmung des tatsächlichen Wirkungsgrades. Sie resultiert aus Abweichungen in den Prüfverfahren und den Unsicherheiten bei der Messung.

2. Theoretische Grundlagen

Die Unsicherheit sollte grundsätzlich als numerischer Wert ausgedrückt werden, wobei weitere Prüfungen erforderlich wären, um repräsentative und vergleichbare Werte zu erhalten. Deshalb verwendet die Norm IEC 60034-2-1 folgende relative Unsicherheitsbegriffe:

- „niedrig“ wird verwendet, wenn der Wirkungsgrad vollständig auf Messergebnisse beruht
- „mittel“ wird benützt für Wirkungsgrade, welche auf begrenzten Näherungen beruhen
- „hoch“ wird verwendet, wenn der ermittelte Wirkungsgrad auf Annahmen beruht

Bei der direkten Messung mit Drehmomentmeseinrichtung handelt es sich um Prüfungen, bei der die mechanisch abgegebene Leistung (Motorbetrieb) oder die mechanisch aufgenommene Leistung (Generatorbetrieb) einer Maschine mittels einer Drehmomentmeseinrichtung bestimmt wird.

Bei der Prüfung mit kalibrierter Maschine wird die mechanische Leistung der zu prüfenden Maschine aus der elektrischen Leistung einer kalibrierten Maschine berechnet, die miteinander gekuppelt sind. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für große Maschinen angewendet, wo die Kosten der Einrichtungen zur Durchführung anderer Verfahren nicht wirtschaftlich erscheinen. Der genaue Prüfablauf wird in der Norm IEC 60034-2-2 näher beschrieben

Beim Verfahren der Rückeinspeisung mit zwei Einspeisungen werden zwei identische Maschinen mechanisch gekuppelt und die Gesamtverluste beider Maschinen aus der Differenz der elektrisch aufgenommenen Leistung der einen und der elektrisch abgegebenen Leistung der anderen Maschine bestimmt (mechanisches Rückarbeitsverfahren). Der Wirkungsgrad wird dann aus der Hälfte der Gesamtverluste und der mittleren aufgenommenen Leistung der beiden Maschinen berechnet.

2. Theoretische Grundlagen

Bei der indirekten Messmethode wird nicht die Eingangs- und Ausgangsleistung direkt gemessen. Hier erfolgt die Ermittlung des Wirkungsgrades durch Messung entweder der aufgenommenen Leistung oder der abgegebenen Leistung und Ermittlung der Gesamtverluste. Wird die abgegangene Leistung gemessen, so wird die aufgenommene Leistung berechnet indem zur gemessenen abgegebenen Leistung die ermittelten Gesamtverluste addiert werden (bevorzugt für den Generatorbetrieb). Wird hingegen die aufgenommene Leistung gemessen, so wird die abgegebene Leistung berechnet indem zur gemessenen aufgenommenen Leistung die ermittelten Gesamtverluste subtrahiert werden (bevorzugt für den Motorbetrieb). Es wird also nur die Eingangs- oder Ausgangsleistung direkt gemessen und die zweite Größe mit Hilfe der Gesamtverluste berechnet.

In der nachfolgenden Tabelle wird ein Auszug der möglichen Methoden zur indirekten Wirkungsgradbestimmung dargestellt sowie die zugehörige Messunsicherheit. [23]

Methoden	erforderliche Prüfeinrichtung	Unsicherheit
Messung der Gesamtverluste		
Kalorimetrisches Verfahren	Spezielle thermische Umhüllung	Niedrig/Mittel
Rückarbeitsverfahren mit einer Einspeisung	Zwei gleiche Maschinen (gewickelter Läufer)	Niedrig
Messung der Einzelverluste mit Belastungsprüfung		
P_{LL} aus den Restverlusten	Drehmomentmesseinrichtung	Niedrig
P_{LL} als festgesetzter Wert	-	Mittel/Hoch
Messung der Einzelverluste ohne Belastungsprüfung		
Verfahren mit Ersatzschaltbild, P_{LL} als festgesetzter Wert	Falls Prüfeinrichtung für andere Prüfungen nicht vorhanden	Mittel/Hoch

Tabelle 2.3.: indirekte Prüfverfahren gemäß IEC 60034-2-1

2. Theoretische Grundlagen

Die in der Tabelle 2.3 verwendeten relativen Messunsicherheitsbegriffe beziehen sich auf die vorhin bei den direkten Prüfverfahren genannten Begriffe.

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, definiert die Norm grundsätzlich zwei Verfahren die Gesamtverluste im Rahmen der indirekten Messmethode zu bestimmen:

- Messung der Gesamtverluste
- Messung und Summierung der Einzelverluste

Beim kalorimetrischen Verfahren werden die Gesamtverluste gemessen. Da dieses bereits im Punkt 2.3.1 näher beschrieben ist, wird an dieser Stelle auf dieses nicht näher eingegangen.

Beim Rückarbeitsverfahren mit einer Einspeisung handelt es sich um eine Prüfung, bei der zwei identische Maschinen mechanisch gekuppelt und elektrisch an ein Versorgungssystem angeschlossen werden (Rückarbeitsverfahren mit elektrischer Prüfung). Hier werden die Gesamtverluste beider Maschinen der aufgenommenen Leistung gleichgesetzt. Bei der Berechnung des Wirkungsgrades wird jeder Maschine die Hälfte der Gesamtverluste zugeordnet.

Bei dem Einzelverlustverfahren werden die einzelnen Verluste bestimmt und im Anschluss zu den Gesamtverlusten aufaddiert. Dieses Verfahren kann sowohl mit als auch ohne einem Belastungsversuch durchgeführt werden. Beim Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung können die lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} auf die in der Tabelle beschriebenen Arten bestimmt werden, was aber Auswirkungen auf die Messunsicherheit hat. Das Einzelverlustverfahren ohne Belastungsprüfung wird dann eingesetzt, wenn keine Prüfungseinrichtung zur Durchführung einer Belastungsprüfung vorhanden ist, wodurch jedoch die Messunsicherheit verschlechtert wird.

Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit wird im Folgenden nur das direkte Prüfverfahren mit Drehmomentmesseinrichtung und das indirekte Prüfverfahren nach der Einzelverlustmethode (mit und ohne Belastungsprüfung) näher eingegangen.

2.4.2. Das direkte Prüfverfahren mit Drehmomentmessung

Bei diesem Prüfverfahren wird die mechanische Leistung P_{mech} einer Maschine durch Messung des Wellen-Drehmoments M mittels einer Drehmomentmess-einrichtung und der Drehzahl n bestimmt. Dies erfolgt gemäß folgender Formel:

$$P_{mech} = 2\pi \cdot M \cdot n \quad (2.11)$$

Des Weiteren wird in derselben Prüfung auch die elektrische Leistung P_{el} (des Ständers), die Klemmenspannung U , der Leiterstrom I gemessen.

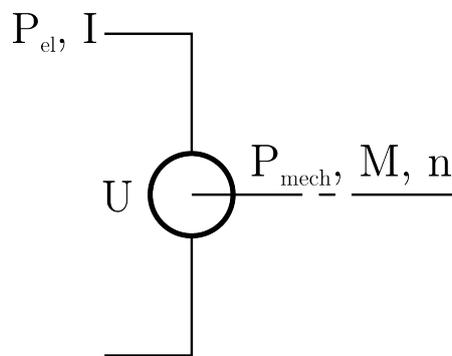


Abbildung 2.2.: Skizze zur Drehmomentmessung [6]

Dazu wird der zu prüfende Motor mit einer Belastungsmaschine oder der zu prüfende Generator mit einem Motor über die Drehmomentmesseinrichtung gekuppelt und unter Belastung betrieben.

Der Wirkungsgrad wird anschließend wie folgt aus der abgegebenen Leistung P_2 und der aufgenommenen Leistung P_1 bestimmt:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.12)$$

Wobei die aufgenommene und abgegebene Leistung je nach Betriebsart wie folgt definiert sind:

- Im Motorbetrieb: $P_1 = P_{el}$ $P_2 = P_{mech}$
- Im Generatorbetrieb: $P_1 = P_{mech}$ $P_2 = P_{el}$

2.4.3. Das Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung

In diesem Abschnitt wird das Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung der indirekten Messmethode näher erläutert. Dazu wird zunächst betrachtet, aus welchen Einzelverlusten sich die gesamten Motorverluste laut der Norm zusammensetzen und woher sie resultieren. Im Anschluss wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Einzelverluste beschrieben sowie die dazu notwendigen Prüfungen. Wenn alle Einzelverluste bestimmt wurden, ergeben diese aufsummiert die Gesamtverluste, mit welchen sich in weiterer Folge der Wirkungsgrad berechnen lässt.

Die Motorverluste gemäß IEC 60034-2-1

Die gesamten Motorverluste sind generell die Differenz zwischen der aufgenommenen und der abgegebenen Leistung. Diese setzen sich dabei aus den konstanten Verlusten, den lastabhängigen Verlusten und den lastabhängigen Zusatzverlusten zusammen. Auf diese Verluste wird im Folgenden genauer eingegangen.

Bei den konstanten Verlusten P_k handelt es sich um die Summe aus den Eisenverlusten P_{fe} und den Reibungs- und Lüftungsverlusten P_{fw} . Die Eisenverluste P_{fe} wiederum entsprechen den Verlusten im aktiven Eisen und den Leerlauf-Zusatzverluste in anderen metallischen Teilen. Die Reibungsverluste enthalten die Verluste durch Reibung (in Lagern), nicht eingeschlossen jedoch die Verluste in einem separaten Schmierungssystem. Die Lagerverluste hängen dabei von der Betriebstemperatur, Ölsorte und Öltemperatur ab. Bei den Lüftungsverlusten in der Maschine ist die Leistungsaufnahme von Lüftern an der Welle miteingeschlossen.

Die lastabhängige Verluste P_L bestehen hierbei aus den Wicklungsverlusten, welche den Stromwärmeverlusten in den Ständer- und Läuferwicklungen entsprechen.

2. Theoretische Grundlagen

Die lastabhängigen Zusatzverlusten P_{LL} stellen die bei Last auftretenden Verluste im aktiven Eisen und anderen metallischen Teilen (ausgenommen stromführende Leiter) dar.

Bestimmung der konstanten Verluste P_k

Die konstanten Verluste P_k als Summe der Eisenverluste und der Reibungs- und Lüftungsverluste lassen sich durch eine Leerlaufprüfung bestimmen. Bei dieser wird die Maschine als Motor ohne nutzbare mechanische Leistung an der Welle oder als Generator mit offenen Klemmen betrieben.

Beim Leerlaufversuch werden Messungen bei mindestens sieben Spannungswerten einschließlich der Bemessungsspannung durchgeführt. Vier oder mehr Messpunkte sollten dabei zwischen 125 % und 60 % der Bemessungsspannung mit annähernd gleich großen Abständen liegen, die verbleibenden drei Messpunkte zwischen 50 % und etwa 20 % der Bemessungsspannung. Bei ungekupelten Maschinen können sogar Messungen bis zu einem niedrigeren Messbereich der Spannung erfolgen, wo der Strom nicht weiter abnimmt. Die Prüfung ist so rasch wie möglich durchzuführen, wobei die Aufzeichnung der Werte in abfallender Reihenfolge beginnend beim höchsten Spannungswert erfolgen soll. In jedem Messpunkt ist dabei die aufgenommene Leerlaufleistung P_0 , der Leerlauf-Leiterstrom I_0 als auch die Leerlaufspannung an den Klemmen U_0 aufzuzeichnen.

Vor Beginn der Aufzeichnung von Messwerten für die Leerlaufprüfung muss jedoch sichergestellt werden, dass die Leerlaufverluste als stabilisiert betrachtet werden können. Dies ist dann der Fall, wenn sich die aufgenommene Leerlaufleistung bei zwei aufeinanderfolgende Messungen im 30 min Intervall um höchstens 3 % ändert oder die Leerlaufprüfung unmittelbar nach der Belastungsprüfung durchgeführt wird.

Nach der Durchführung der Leerlaufprüfung können die konstanten Verluste durch Subtraktion der Leerlauf-Wicklungsverluste P_s von der gemessenen aufgenommenen Leerlaufleistung P_0 ermittelt werden. Dafür müssen zunächst die

2. Theoretische Grundlagen

Leerlauf-Wicklungsverluste (bei der Temperatur während der Leerlaufprüfung) für jeden Leerlaufpunkt wie folgt bestimmt werden:

$$P_s = 1.5 \cdot I_0^2 \cdot R_0 \quad (2.13)$$

Der Widerstand R_0 entspricht dabei dem Widerstandswert nach der Messung des niedrigsten Spannungswertes. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Widerstandswertes nach dem niedrigsten Leerlaufpunkt wird im Abschnitt 2.4.5 näher beschrieben.

Für jeden aufgezeichneten Spannungswert ergeben sich die konstanten Verluste somit folgendermaßen:

$$P_k = P_0 - P_s \quad (2.14)$$

Die ermittelten konstanten Verluste setzen sich dabei aus den Eisenverluste P_{fe} sowie den Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} zusammen:

$$P_k = P_{fw} + P_{fe} \quad (2.15)$$

Um die Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} aus den konstanten Verlusten zu bestimmen, wird zunächst eine Kurve der konstanten Verluste (P_k) über der quadrierten Leerlaufspannung (U_0^2) für jene eingestellten Spannungswerte der Leerlaufprüfung erstellt, die keinen erheblichen Sättigungseffekt aufweisen. Im Anschluss ist eine Gerade bis zur Spannung null zu extrapoliert. Der Schnittpunkt dieser Gerade mit der Ordinate ergibt die Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} .

Diese Reibungs- und Lüftungsverluste werden entsprechend der Norm als lastunabhängig betrachtet, wodurch der vorhin ermittelte Wert der Reibungs- und Lüftungsverluste für jeden Lastpunkt verwendet werden kann.

Um die Eisenverluste P_{fe} aus den konstanten Verlusten zu bestimmen, wird für alle Spannungswerten zwischen 60 % und 125 % Bemessungsspannung die Reibungs- und Lüftungsverluste von den konstanten Verluste subtrahiert:

$$P_{fe} = P_k - P_{fw} \quad (2.16)$$

2. Theoretische Grundlagen

Die Eisenverluste hingegen sind lastabhängig und müssen somit für jeden Lastpunkt bestimmt werden. Dazu sind die vorhin ermittelten Eisenverlustwerte P_{fe} in einer Kurve über der Leerlaufspannung U_0 aufzutragen. Die Eisenverluste am gewünschten Lastpunkt werden aus der Kurve bei der korrigierten Spannung U_r des jeweiligen Lastpunktes entnommen. Dabei berücksichtigt die Spannung U_r den ohmschen Spannungsabfall in der Primärwicklung und kann für einen Lastpunkt wie folgt bestimmt werden:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin\varphi\right)^2} \quad (2.17)$$

Mit:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad \text{und} \quad \sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$$

Hier ist P_1 die aufgenommene Leistung, U die Klemmenspannung, I der Leiterstrom und R der Widerstandswert, wobei alle Werte aus der Belastungsprüfung im jeweiligen Lastpunkt entnommen werden (diese werden bei der Prüfung mit Belastungskurve gemessen, welche bei der Bestimmung der lastabhängigen Verluste näher beschrieben werden).

Bestimmung der lastabhängigen Verluste P_L

Die lastabhängigen Verluste P_L setzen sich aus den Ständerwicklungsverlusten P_s und den Rotorwicklungsverlusten P_r zusammen:

$$P_L = P_s + P_r \quad (2.18)$$

Die Ständer- und Rotorwicklungsverluste können mit Hilfe von Belastungsprüfungen bestimmt werden. Dafür wird zunächst eine Prüfung mit Bemessungsbelastung durchgeführt und im Anschluss eine Prüfung mit Belastungskurve. Diese beiden Prüfungen werden nun näher betrachtet.

Bei der Prüfung mit Bemessungsbelastung ist die Maschine mit einem geeigneten Betriebsmittel zu belasten, wobei die Leistung der Speiseeinrichtung der

2. Theoretische Grundlagen

Maschinen-Nennleistung entspricht. Dies soll so lange erfolgen, bis thermisches Gleichgewicht (Temperaturgradient von 2 K je Stunde) erreicht ist. Wenn nach dieser Erwärmungsphase das thermische Gleichgewicht erreicht wurde, ist die Klemmenspannung U , der Leiterstrom I , die aufgenommene Leistung P_1 , die Drehzahl der Maschine n , das Drehmoment der Maschine M sowie die Frequenz der Einspeisung f für diesen Bemessungslastungspunkt aufzuzeichnen.

Nach der Prüfung mit Bemessungsbelastung erfolgt eine Prüfung mit Belastungskurve. Hierbei ist die Maschine mit einem geeigneten Betriebsmittel an sechs Lastpunkten zu betreiben. Vier Lastpunkte sollen zwischen nicht weniger als 25 % und 100 % Belastung annähernd gleichmäßig verteilt liegen, die verbleibenden zwei Lastpunkte zwischen 100 % und maximal 150 % Belastung. Die Prüfung ist so rasch wie möglich durchzuführen um Temperaturveränderungen in der Maschine gering zu halten. Dabei muss mit dem mit höchsten Lastpunkt begonnen und in absteigender Folge bis zum niedrigsten Wert vorgegangen werden. Für jeden Lastpunkt ist die Klemmenspannung U , der Leiterstrom I , die aufgenommene Leistung P_1 , die Drehzahl der Maschine n , das Drehmoment der Maschine M sowie die Frequenz der Einspeisung f aufzunehmen.

Vor dem Beginn der Aufzeichnung von Messwerten für die Prüfung mit Belastungskurve muss sichergestellt werden, dass die Änderung der Wicklungstemperatur im Vergleich zur Prüfung mit Bemessungsbelastung kleiner als 5 K ist. Des Weiteren sollen Frequenzabweichungen zwischen allen Lastpunkten weniger als 0.1 % betragen.

Nach der Durchführung der beiden Belastungsprüfungen können nun die Wickleungsverluste für die jeweils gemessenen Lastpunkte bestimmt werden. Dabei ergeben sich die Ständerwicklungsverluste P_s für jeden Lastpunkt wie folgt:

$$P_s = 1.5 \cdot I^2 \cdot R \quad (2.19)$$

Hierbei ist für jeden Lastpunkt I der Leiterstrom und R der Widerstand. Als Widerstand für Lastpunkte mit größerer Belastung als 100 % gilt der Widerstandswert vor der Messung des höchsten Lastpunktes. Der Widerstand für Belastungen unter 100 % ist in linearer Lastabhängigkeit unter Verwendung des

2. Theoretische Grundlagen

Widerstandswertes vor der höchsten und nach der niedrigsten Lasteinstellung zu bestimmen. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Widerstandswertes vor dem höchsten und nach dem niedrigsten Lastpunkt wird im Abschnitt 2.4.5 näher beschrieben.

Für die Ermittlung der Rotorwicklungsverluste P_r in jedem Lastpunkt wird folgende Gleichung verwendet:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s \quad (2.20)$$

Dabei entspricht P_1 der aufgenommenen Leistung, P_s der vorhin ermittelten Ständerwicklungsverluste, P_{fe} der Eisenverluste (berechnet mit der zum Lastpunkt zugehörigen Spannung U_r) und s dem Schlupf. Der Schlupf s wiederum lässt sich aus der Frequenz der Einspeisung f , der Polpaarzahl p und der Drehzahl n im jeweiligen Lastpunkt berechnen:

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f} \quad (2.21)$$

Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL}

Für die Ermittlung der lastabhängigen Zusatzverluste definiert die Norm mehrere Verfahren. Der begrenzte Umfang der Arbeit erlaubt jedoch nur auf die Ermittlung aus den Restverlusten und durch festgelegte Zuschläge näher einzugehen.

Ermittlung aus den Restverlusten:

Um die lastabhängigen Zusatzverluste aus den Restverlusten zu bestimmen, müssen diese zunächst ermittelt werden, wozu eine Drehmomentmesseinrichtung erforderlich ist. Die Restverluste P_{Lr} ergeben sich für jeden Lastpunkt aus der Subtraktion der abgegebenen Leistung P_2 , der Ständerwicklungsverluste P_s , der Eisenverluste P_{fe} (berechnet mit der zum Lastpunkt zugehörigen Spannung U_r), der Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} und der Läuferwicklungsverluste P_r von der aufgenommenen Leistung P_1 :

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \quad (2.22)$$

2. Theoretische Grundlagen

Die abgegebene Leistung P_2 lässt sich hierbei aus der nachfolgenden Gleichung berechnen, wobei M dem Drehmoment der Maschine und n der Drehzahl im jeweiligen Lastpunkt entspricht:

$$P_2 = 2\pi \cdot M \cdot n \quad (2.23)$$

Die abgegebene Leistung P_2 muss für die gleichen Lastpunkte wie P_{Lr} bestimmt werden.

Wurden die Restverluste für jeden gemessenen Lastpunkt bestimmt, werden diese mittels einer linearen Regressionsanalyse geglättet, die darauf beruht, dass die Restverluste als Funktion des quadrierten Last-Drehmoments ausgedrückt werden können. Voraussetzung für die Anwendung der linearen Regressionsanalyse ist jedoch, dass für den Korrelationskoeffizient gilt: $\gamma \geq 0.95$. Der Korrelationskoeffizient γ ergibt sich wie folgt aus den ermittelten Messwerten an den einzelnen Lastpunkten: [2]

$$\gamma = \frac{i \cdot \sum (P_{Lr} \cdot M^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum M^2}{\sqrt{\left(i \cdot \sum (M^2)^2 - (\sum M^2)^2\right) \cdot \left(i \cdot \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2\right)}} \quad (2.24)$$

Ist der Korrelationskoeffizient jedoch $\gamma < 0.95$, so muss der schlechteste Messpunkt gestrichen und die Regression wiederholt werden. Falls nach der Wiederholung $\gamma < 0.95$ bleibt, weist dies auf Fehler im Versuchsaufbau oder bei der Durchführung hin. Der Versuch ist dann nach Überprüfung des Messaufbaus und Beseitigung der Fehlerquelle zu wiederholen. [2]

Aus dieser linearen Regressionsanalyse resultiert folgende Beziehung:

$$P_{Lr} = A \cdot M^2 + B \quad (2.25)$$

*Die in der Norm verwendete Gleichung zur Bestimmung des Korrelationskoeffizienten enthält anstelle der Restverluste P_{Lr} die lastabhängigen Verluste P_L . Da die lineare Regressionsanalyse jedoch zur Glättung der Restverluste und nicht der lastabhängigen Verluste angewendet wird, wurde in dieser Gleichung P_L durch P_{Lr} ersetzt.

2. Theoretische Grundlagen

Hierbei ist die Konstante A die Steigung und B der Schnittpunkt mit der Ordinate. Diese lassen sich wie folgt bestimmen, wobei die Größe i der Anzahl der aufsummierten Lastpunkte entspricht:

$$A = \frac{i \cdot \sum (P_{Lr} \cdot M^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum M^2}{i \cdot \sum (M^2)^2 - (\sum M^2)^2} \quad B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \cdot \frac{\sum M^2}{i} \quad ** \quad (2.26)$$

Durch Parallelverschiebung der Geradengleichung von P_{Lr} um $-B$ in den Ursprung des Koordinatensystems ergibt sich die nachfolgende Funktion der lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} : [2]

$$P_{LL} = A \cdot M^2 \quad (2.27)$$

Diese Funktion wird nun verwendet um die lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} für jeden betrachteten Lastpunkt mit dem zugehörigen Drehmoment M zu bestimmen. [2]

**Die in der Norm enthaltenen Gleichungen zur Bestimmung der Konstanten A und B verwenden statt den Restverlusten P_{Lr} die lastabhängigen Verluste P_L . Dadurch werden jedoch nicht wie gefordert die Restverluste geglättet sondern die lastabhängigen Verluste. Aus diesem Grund wurde in den Gleichungen P_L durch P_{Lr} ersetzt.

2. Theoretische Grundlagen

Die Glättung der Restverluste P_{Lr} mittels einer linearen Regressionsanalyse aus den berechneten Werten der Messdaten und die zugehörigen Konstanten A und B werden im folgenden Bild veranschaulicht. Außerdem wird in dieser Abbildung auch die Funktion der lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} dargestellt.

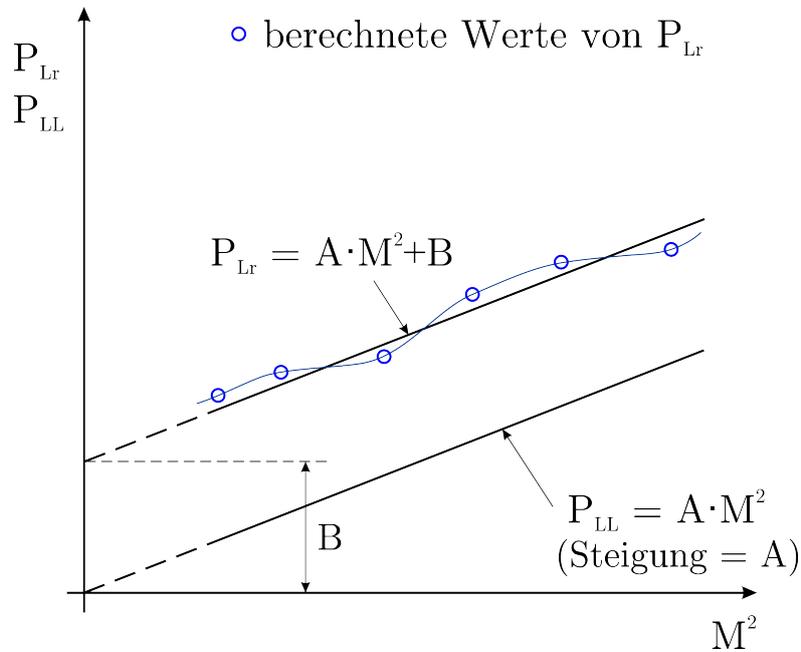


Abbildung 2.3.: Glättung der Restverluste [6]

Ermittlung aus festgelegten Zuschlägen:

Bei dieser Methode werden die lastabhängigen Zusatzverluste ohne Messungen ermittelt. Hier werden die lastabhängigen Zusatzverluste bei Bemessungslast $P_{LL,N}$ als Prozentsatz der aufgenommenen Leistung P_1 ermittelt. Diese lassen sich nach folgenden Gleichungen abhängig von der Bemessungsleistung P_2 der zu prüfenden Maschine bestimmen:

für $P_2 \leq 1 \text{ kW}$	$P_{LL,N} = P_1 \cdot 0.025$
für $1 \text{ kW} < P_2 < 10000 \text{ kW}$	$P_{LL,N} = P_1 \cdot \left[0.025 - 0.005 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right]$
für $P_2 \geq 10000 \text{ kW}$	$P_{LL,N} = P_1 \cdot 0.005$

2. Theoretische Grundlagen

Mit den obigen Gleichungen ergeben sich lediglich die lastabhängigen Zusatzverluste bei Bemessungsbelastung. Für andere Belastungen ist gemäß der Norm anzunehmen, dass sich die lastabhängigen Zusatzverluste quadratisch mit dem Primärstrom abzüglich des Quadrats des Leerlaufstroms ändern.

Berechnung der Gesamtverluste P_T

Wurden nun die konstanten Verluste P_k , die lastabhängigen Verlusten P_L und die lastabhängigen Zusatzverlusten P_{LL} mittels der vorhin beschriebenen Prüfungen bestimmt, ergeben sich die Gesamtverluste für jeden Lastpunkt wie folgt:

$$P_T = P_k + P_L + P_{LL} \quad (2.28)$$

Die Gesamtverluste entsprechen somit der Summe der Einzelverluste:

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_s + P_r + P_{LL} \quad (2.29)$$

Die Wirkungsgradbestimmung

Der Wirkungsgrad lässt sich nun aus der gemessenen aufgenommenen Leistung P_1 oder der gemessenen abgegebenen Leistung P_2 und den vorhin ermittelten Gesamtverlusten P_T für die jeweiligen Lastpunkte berechnen:

$$\eta_{mot} = \frac{P_1 - P_T}{P_1} \quad \text{und} \quad \eta_{gen} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad (2.30)$$

Dabei wird gewöhnlich der erste Ausdruck für den Motorbetrieb, der zweite für den Generatorbetrieb bevorzugt.

2.4.4. Das Einzelverlustverfahren ohne Belastungsprüfung

In diesem Abschnitt wird die Messung der Einzelverluste ohne Belastungsprüfung der indirekten Messmethode näher erläutert. Hier werden die Verluste (welche bereits im Abschnitt 2.4.3 „Die Motorverluste gemäß IEC 60034-2-1“ beschrieben wurden) aus dem Verfahren mittels Ersatzschaltbild bestimmt. Dieses wird angewendet, wenn eine Belastungsprüfung nicht möglich ist.

Das Verfahren mit Ersatzschaltbild beruht dabei auf dem konventionellen T-Ersatzschaltbild für eine Phase einer Induktionsmaschine, welches in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

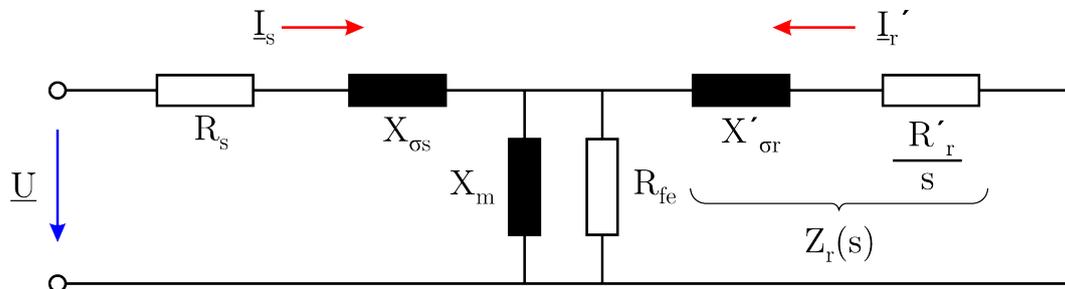


Abbildung 2.4.: T-Ersatzschaltbild einer Induktionsmaschine [6]

In diesem Abschnitt wird nun das Verfahren mit Ersatzschaltbild zur Bestimmung der Verluste ohne Belastungsprüfung behandelt. Dafür wird zunächst erörtert, welche Prüfungen im Rahmen dieses Verfahrens durchgeführt werden müssen. Aus jenen Prüfungen lassen sich im Anschluss die in der vorhergehenden Abbildung dargestellten Parameter des Ersatzschaltbildes bestimmen. Mit Hilfe der Ersatzschaltbildparameter werden die Einzelverluste bestimmt und zu den Gesamtverlusten aufsummiert, wodurch die Wirkungsgradermittlung ermöglicht wird.

Durchzuführende Prüfungen

Um die Verluste aus dem Verfahren mit Ersatzschaltbild zu berechnen, muss zunächst eine Leerlaufprüfung, wie sie bereits im Abschnitt 2.4.3 unter „Bestimmung der konstanten Verluste P_k “ beschrieben wurde, durchgeführt werden.

Des Weiteren muss noch eine Prüfung mit festgebremsten Läufer erfolgen, bei welcher der Läufer auf der Drehzahl null gehalten wird. Dabei wird zwischen Prüfung bei verminderter Frequenz und Prüfung bei Bemessungsfrequenz unterschieden, wobei nur eine von beiden erfolgen muss.

In der Prüfung mit verminderter Frequenz wird die Maschine bei festgebremsten Läufer von einem dreiphasigen Umrichter mit einstellbarer Frequenz gespeist. Während der Prüfung soll der Frequenzwandler (entweder ein Maschinensatz oder ein statischer Umrichter) am Ausgang einen sinusförmigen Strom liefern. Dabei wird in die Maschine bei mindestens drei Frequenzen der Bemessungsstrom eingespeist. Je ein Messpunkt soll dabei mit 25 % der Bemessungsfrequenz und weniger als 25 % aufgenommen werden, die verbleibenden Messpunkte zwischen 25 % und 50 % der Bemessungsfrequenz. Die Prüfung ist so rasch wie möglich durchzuführen, um eine Temperaturerhöhung der Ständerwicklung um 5 K nicht zu überschreiten. Für jeden Messpunkt wird die Klemmenspannung U , der Leiterstrom I , die aufgenommene Leistung P_1 sowie die eingestellte Frequenz f_{lr} aufgezeichnet.

Alternativ kann auch eine Prüfung bei Bemessungsfrequenz durchgeführt werden. Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit wird auf diese Prüfung nicht weiter eingegangen.

Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes

Aus den vorhin beschriebenen Prüfungen lassen sich nun die einzelnen Parameter des Ersatzschaltbildes (Abbildung 2.4) bestimmen. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass alle Spannungen, Ströme und Impedanzen in diesem Abschnitt Strangwerte/Phasenwerte einer Drehstrommaschine in Sternschaltung entsprechen. Leistung und Blindleistungen dagegen gelten für die vollständige Maschine.

Bei Anwendung des Verfahrens mit Ersatzschaltbild auf Käfigläufermotoren müssen allerdings folgenden Werte zur Verfügung stehen:

- Das Verhältnis der Ständer-Streureaktanz zur ständerbezogenen Läufer-Streureaktanz $X_{\sigma s}/X'_{\sigma r}$
- Die Ständer-Streureaktanz $X_{\sigma s}$
- Die Magnetisierungsreaktanz X_m

Diese Werte dienen als Anfangswerte für die iterative Berechnung von $X_{\sigma s}$, X_m sowie $X'_{\sigma r}$, welche nachfolgend beschrieben wird.

Es werden nun die einzelnen Schritte zur Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes beschrieben.

Bestimmung der Reaktanzen $X_{\sigma s}$, X_m sowie $X'_{\sigma r}$:

Zunächst wird die Blindleistung Q_0 aus der Leerlaufprüfung bei Bemessungsspannung ($U_0 = U_N$) ermittelt:

$$Q_0 = \sqrt{(3 \cdot U_0 \cdot I_0)^2 - P_0^2} \quad (2.31)$$

Dabei entspricht U_0 der Leerlauf-Strangspannung, I_0 dem Leerlauf-Strangstrom, P_0 der aufgenommenen Leerlaufleistung aus der Leerlaufprüfung in jenem Leerlaufpunkt, wo der eingestellte Spannungswert der Bemessungsspannung entspricht ($U_0 = U_N$).

2. Theoretische Grundlagen

Des Weiteren muss noch die Blindleistung Q_{lr} aus der Prüfung mit festgebremsten Läufer bei reduzierter Bemessungsfrequenz bestimmt werden. Diese wird dabei für den Messpunkt mit einer eingestellten Frequenz von 25 % der Bemessungsfrequenz wie folgt bestimmt:

$$Q_{lr} = \sqrt{(3 \cdot U \cdot I)^2 - P_1^2} \quad (2.32)$$

Hier ist U die Klemmen-Strangspannung, I der Leiter-Strangstrom, P_1 die aufgenommene Leistung aus der durchgeführten Prüfung mit festgebremsten Läufer bei 25 % Bemessungsfrequenz ($f_{lr} = 0.25 \cdot f_N$)

Mit den Werten dieser Blindleistungen kann nun die Reaktanzen X_m aus der Leerlaufprüfung bei Bemessungsspannung sowie X_{os} aus der Prüfung mit festgebremsten Läufer bei 25 % der Bemessungsfrequenz iterativ berechnet werden. Dazu wird im ersten Schritt $k = 1$ folgende Berechnungen mit den Anfangswerten $X_{os}[k = 0]$, $X_m[k = 0]$ sowie dem konstanten Verhältnis $v = X_{os}/X'_{or}$ durchgeführt (alle Anfangswerte müssen bei Anwendung dieses Verfahren zur Verfügung stehen):

$$\begin{aligned} X_m[k + 1] &= \frac{3 \cdot U_0^2}{Q_0 - 3 \cdot I_0^2 \cdot X_{os}[k]} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{os}[k]}{X_m[k]}\right)^2} \\ X_{os,lr}[k + 1] &= \frac{Q_{lr}}{3 \cdot I^2 \cdot \left(1 + v + \frac{X_{os}[k]}{X_m[k]}\right)} \cdot \left(v + \frac{X_{os}[k]}{X_m[k]}\right) \\ X_{os}[k + 1] &= \frac{f_N}{f_{lr}} \cdot X_{os,lr}[k + 1] \\ X'_{or}[k + 1] &= \frac{X_{os}[k + 1]}{v} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dabei entspricht U_0 der Strang-Leerlaufspannung, I_0 dem Strang-Leerlaufstrom der Leerlaufprüfung bei Bemessungsspannung ($U_0 = U_N$). Der Leiter-Strangstrom I und die eingestellte Frequenz f_{lr} kommen hingegen aus der Prüfung mit festgebremsten Läufers bei 25 % Bemessungsfrequenz ($f_{lr} = 0.25 \cdot f_N$).

2. Theoretische Grundlagen

Aus diesem Schritt resultieren die neuen Werte $X_m[k = 1]$ und $X_{os}[k = 1]$ für die weitere Berechnung. Dieser Berechnungsschritt wird nun mit den neuen Werten so lange wiederholt, bis $X_m[k + 1]$, $X_{os}[k + 1]$ um weniger als 0.1 % von den Werten des vorangegangenen Schrittes ($X_m[k]$, $X_{os}[k]$) abweichen.

Bestimmung des Eisenverlustwiderstandes R_{fe} :

Der Eisenverlustwiderstand bei Bemessungsspannung ergibt sich aus nachfolgender Gleichung:

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_N^2}{P_{fe}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{os}}{X_m}\right)^2} \quad (2.34)$$

Dabei entspricht U_N der Strang-Nennspannung und P_{fe} der Eisenverluste bei Bemessungsspannung. Die Eisenverluste bei Bemessungsspannung werden, wie im Abschnitt 2.4.3 unter „Bestimmung der konstanten Verluste P_k “ beschrieben, aus den konstanten Verlusten für den einen Leerlaufpunkt bestimmt, an dem der eingestellte Spannungswert der Bemessungsspannung entspricht ($U_0 = U_N$). Dazu werden zuerst die Eisenverluste aus den konstanten Verlusten durch Subtraktion der Reibungs- und Lüftungsverluste bestimmt und über der Leerlaufspannung U_0 aufgetragen und bei Bemessungsspannung ($U_0 = U_N$) aus dem Kurvenverlauf abgelesen.

Bestimmung des Läuferwiderstandes R'_{lr} :

Zunächst wird der Läuferwiderstand für jede eingestellte Frequenz der Prüfung mit festgebremsten Läufer wie folgt bestimmt:

$$R'_{r,lr} = \left(\frac{P_1}{3 \cdot I^2} - R_s\right) \cdot \left(1 + \frac{X'_{or}}{X_m}\right)^2 - \left(\frac{X'_{or}}{X_{os}}\right)^2 \cdot \frac{X_{os,lr}^2}{R_{fe}} \quad (2.35)$$

Hier ist P_1 die aufgenommenen Leistung und I der Strangstrom, wobei alle Werte aus der Prüfung mit festgebremsten Läufer bei der jeweiligen Frequenz f_{lr} entnommen werden. Der Widerstand R_s entspricht dem Strang-Widerstandswert im jeweiligen Messpunkt der Prüfung mit festgebremsten Läufer. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Widerstandswertes für die jeweiligen Messpunkte wird im Abschnitt 2.4.5 näher beschrieben. Des Weiteren berechnet sich

2. Theoretische Grundlagen

$X_{os,lr}$ wie folgt aus den jeweiligen Frequenzwert der Prüfung mit festgebremsten Läufer f_{lr} und der Bemessungsfrequenz f_N :

$$X_{os,lr} = \frac{f_{lr}}{f_N} \cdot X_{os} \quad (2.36)$$

Bei $R'_{r,lr}$ handelt es sich um den unkorrigierten Läuferwiderstand und wird deshalb nun folgender Temperaturkorrektur unterzogen. Um den auf die Bezugstemperatur korrigierten Läuferwiderstand für jede eingestellte Frequenz zu erhalten, muss wie folgt vorgegangen werden, wobei $R'_{r,lr}$ der unkorrigierte Läuferwiderstand, α_r der Temperaturkoeffizient des Läuferwicklung, θ_{ref} die Bezugstemperatur und θ_W die Ständer-Wicklungstemperatur im jeweiligen Messpunkt entspricht:

$$R''_{r,lr} = R'_{r,lr} \cdot \frac{1 + \alpha_r \cdot \theta_{ref}}{1 + \alpha_r \cdot \theta_W} \quad (2.37)$$

Der Temperaturkoeffizient α_r ist für Kupfer 1/235 und für Aluminium 1/225, die Bezugstemperatur für die entsprechenden Bemessungs-Wärme Klassen wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Wärme Klasse des Isoliersystems	Bezugstemperatur °C
130 (B)	95
155 (F)	115
180 (H)	135

Tabelle 2.4.: Bezugstemperatur

Um nun den auf den Ständer bezogene Läuferwiderstand R'_r zu bestimmen, wird eine Kurve der berechneten Werte von $R''_{r,lr}$ über die Frequenz f_{lr} gezeichnet. Im Anschluss ist eine Gerade bis zur Frequenz null zu extrapolieren. Der Schnittpunkt dieser Gerade mit der Ordinate ($f_{lr} = 0$) ergibt den auf den Ständer bezogenen Läuferwiderstand R'_r .

2. Theoretische Grundlagen

Bestimmung der lastabhängige Impedanzen:

Nachdem nun alle Parameter des Ersatzschaltbildes bestimmt wurden, werden aus diesen für einen gewählten Lastpunkt folgende schlupfabhängige Impedanz- und Admittanz-Zwischenwerte berechnet:

$$\begin{aligned}
 Z_r &= \sqrt{\left(\frac{R'_r}{s}\right)^2 + X'_{or}{}^2} \\
 Y_g &= \sqrt{\left(\frac{R'_r/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X'_{or}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}\right)^2} \\
 R_g &= \frac{\frac{R'_r/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}}{Y_g^2} \\
 X_g &= \frac{\frac{X'_{or}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}}{Y_g^2}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

Dabei entspricht s dem Schlupf des gewählten Lastpunktes.

Die somit berechneten schlupfabhängige Impedanz- und Admittanz-Zwischenwerte sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

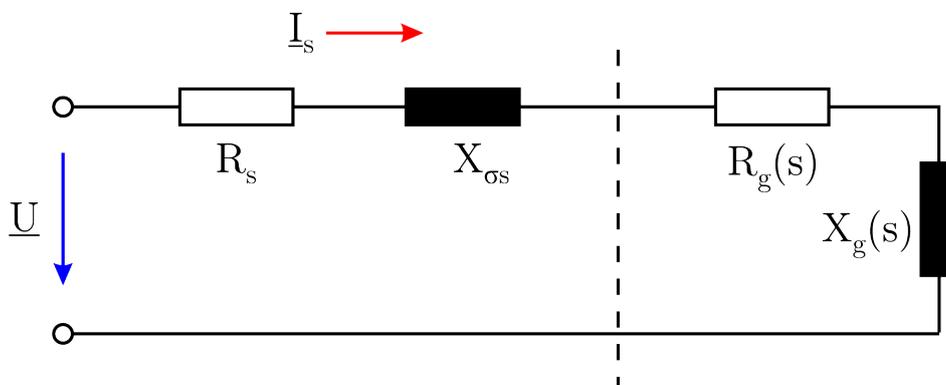


Abbildung 2.5.: Reduziertes Rechenmodell für eine Induktionsmaschine [6]

2. Theoretische Grundlagen

Zuletzt werden noch die von den Klemmen der Maschine aus gesehen, resultierenden Impedanzwerte wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned}R &= R_s + R_g \\X &= X_{\sigma s} + X_g \\Z &= \sqrt{R^2 + X^2}\end{aligned}\tag{2.39}$$

An dieser Stelle entspricht R_s dem Strang-Widerstand des Ständers bei Bezugstemperatur. Dieser lässt sich wie im Abschnitt 2.4.5 beschrieben aus dem Widerstandswert und der Temperatur vor der Prüfung und der Bezugstemperatur (siehe dazu Tabelle 2.4) berechnen.

Bestimmung der Einzel- und Gesamtverluste

Da die einzelnen Parameter sowie die schlupfabhängigen Impedanz- und Admittanzwerte bekannt sind, werden nun die Einzelverluste bestimmt. Dazu wird zunächst der Ständer-Strangstrom I_s und der Läufer-Strangstrom I_r' wie folgt berechnet, wobei U_N der Strang-Nennspannung entspricht:

$$\begin{aligned}I_s &= \frac{U_N}{Z} \\I_r' &= I_s \cdot \frac{1}{Y_g \cdot Z_r}\end{aligned}\tag{2.40}$$

Aus diesen ergeben sich die Ständer- und Läuferwicklungsverluste zu:

$$\begin{aligned}P_s &= 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s \\P_r &= 3 \cdot I_r'^2 \cdot R_r'\end{aligned}\tag{2.41}$$

Da Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} gemäß der Norm lastunabhängig sind, lassen sich diese aus der Leerlaufprüfung, wie im Abschnitt 2.4.3 unter „Bestimmung der konstanten Verluste P_k “ beschrieben, bestimmen. Die Eisenverluste P_{fe} hingegen sind lastabhängig und können somit nicht, wie im Abschnitt 2.4.3

2. Theoretische Grundlagen

beschrieben, berechnet werden, da hierzu eine Belastungsprüfung zur Bestimmung der Spannung U_r des jeweiligen Lastpunktes erforderlich ist. Deshalb werden diese mit Hilfe des Ersatzschaltbildes berechnet:

$$P_{fe} = 3 \cdot I_s^2 \cdot \frac{1}{Y_g^2 \cdot R_{fe}} \quad (2.42)$$

Zur Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} aus dem Wert $P_{LL,N}$ bei Bemessungsbelastung, dem Läufer-Strangstrom I_r' sowie dem Strang-Nennstrom des Läufers $I_{r,N}$ gilt:

$$P_{LL} = P_{LL,N} \cdot \left(\frac{I_r'}{I_{r,N}} \right)^2 \quad (2.43)$$

Der Wert $P_{LL,N}$ bei Bemessungsbelastung kann, wie im Abschnitt 2.4.3 unter „Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} “ beschrieben, durch festgelegte Zuschläge ermittelt werden, da hierzu keine Belastungsprüfung erforderlich ist.

Da nun alle Einzelverluste ermittelt wurden, ergeben sich die Gesamtverluste P_T wie folgt aus der Summe der Einzelverluste:

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_s + P_r + P_{LL} \quad (2.44)$$

Die Wirkungsgradbestimmung

Um den Wirkungsgrad für einen gewählten Lastpunkt zu bestimmen, muss zunächst die aufgenommene Leistung P_1 (mittels dem Gesamtwiderstand R gemäß der Formel 2.39) sowie die abgegebene Leistung P_2 (mit Hilfe der Gesamtverluste P_T) berechnet werden:

$$\begin{aligned} P_1 &= 3 \cdot I_s^2 \cdot R \\ P_2 &= P_1 - P_T \end{aligned} \quad (2.45)$$

Nun ergibt sich der Wirkungsgrad (bei Motorbetrieb) zu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.46)$$

Da die im Punkt „Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes“ berechneten, lastabhängigen Impedanzen nur für den gewählten Lastpunkt gültig sind, muss die Berechnung dieser für jeden gewünschten Lastpunkt mit dem dazugehörigen Schlupf und die anschließende Bestimmung der Einzel- und Gesamtverluste wiederholt werden, um den Wirkungsgrad für mehrere Lastpunkte zu erhalten.

2.4.5. Bestimmung des Wicklungswiderstandes

Generell wird der Wicklungswiderstand bei Mehrphasen-Wechselstrommaschinen in dieser Norm als der Widerstand zwischen den Außenleitern der Ständerwicklung definiert.

Um den Widerstandswert der Ständerwicklung am Ende einer Prüfung zu ermitteln, soll nach dem Extrapolationsverfahren wie es in der Norm IEC 60034-1 näher beschrieben wird, vorgegangen werden. Dabei muss eine erste Messung des Widerstandswertes so schnell wie möglich nach der Prüfung erfolgen. Im Anschluss sollen weitere Widerstandsmessung in Abständen von etwa 1 min erfolgen, bis die Messwerte ein deutliches Absinken von ihrem Höchstwert erkennen lassen. Die Widerstandsmessung erfolgt hier durch Anlegen eines Gleichstromes nach Abschaltung der Energiezufuhr und einer Strom- und Spannungsmessung an der Wicklung. Aus diesen gemessenen Widerstandswerten ist eine Kurve als Funktion der Zeit zu zeichnen und auf den Zeitpunkt Null zu extrapolieren. Der so erhaltene Widerstandswert gilt als Wicklungswiderstand am Ende der Prüfung. [24]

Wenn der Widerstand (unter Last) jedoch nicht direkt durch Anlegen eines Gleichstromes für einen bestimmten Messpunkt einer Prüfung gemessen werden kann, dann darf der Widerstandswert in diesem Messpunkt aus der Wicklungstemperatur sowie den vor der Prüfung gemessenen Werten von Widerstand und Temperatur ermittelt werden. Dafür ist in den jeweiligen Messpunkten allerdings noch zusätzlich die Wicklungstemperatur aufzuzeichnen. Die Messung der Ständerwicklungstemperatur für die Widerstandsbestimmung ist

2. Theoretische Grundlagen

bei Wechselstrommaschinen mittels eines Temperatur-Sensors auf der Wicklung gemäß der Norm erlaubt. Weitere mögliche Verfahren zur Bestimmung der Wicklungstemperatur wären:

- Temperaturmessung mittels ETF (eingebaute Temperaturfühler) oder Thermopaare
- Anwendung des Widerstandsverfahrens an einer gleich großen Maschine derselben Konstruktion und elektrischen Auslegung, welches ein Temperatur-Messverfahren gemäß der Norm IEC 60034-1 ist
- Verwendung von in der Norm festgelegten Bezugstemperaturen, wenn eine direkte Messung nicht möglich ist

Der Widerstandswert in einem Messpunkt einer Prüfung kann mit folgender Formel aus der Wicklungstemperatur im Messpunkt θ_2 , dem vor der Prüfung gemessenen Widerstandswert R_1 , welcher bei der Temperatur θ_1 der Wicklung bestimmt wurde und dem Kehrwert des Temperaturkoeffizienten k ermittelt werden: [24]

$$R_2 = \frac{\Theta_2 + k}{\Theta_1 + k} \cdot R_1 \quad (2.47)$$

Dabei entspricht R_2 dem Widerstandswert der Wicklung im bestimmten Messpunkt. Der Kehrwert des Temperaturkoeffizienten k ist für Kupfer 235 und für Aluminium 225 (falls nicht anders festgelegt).

3. Praktische Durchführung

In diesem Kapitel werden die im vorhergehenden Kapitel 2 beschriebenen Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung umrichter gespeister Asynchronmaschinen in der Praxis umgesetzt. Dabei soll der dazu verwendete Messaufbau und die praktische Vorgehensweise zur direkten und indirekten Wirkungsgradbestimmung näher beschrieben werden. Dies ermöglicht im Anschluss einen Vergleich dieser Prüfverfahren. Um im nachfolgenden Kapitel die Auswirkungen der Umrichterspeisung auf den Wirkungsgrad und die Maschinenverluste zu analysieren, wird dieser auch für den Netzbetrieb der Maschine bestimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Wirkungsgrad für mehrere handelsübliche Normmotoren bestimmt. Die Wirkungsgradermittlung wird jedoch nur exemplarisch für eine 7.5 kW Asynchronmaschine durchgeführt, da die Bestimmung für die anderen Motoren analog abläuft. Weiters wurden alle anfallenden Berechnungen mittels des Software-Tools Matlab durchgeführt, wodurch alle Werte in diesen Berechnungsschritten mit vier Kommastellen angezeigt werden.

3.1. Beschreibung des Messaufbaus

Für die Bestimmung des Wirkungsgrades umrichter gespeister Asynchronmaschinen wurde ein Prüfstand im Labor des Institutes für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen verwendet.

Dieser Prüfstand war dabei ein Maschinensatz bestehend aus einer 92 kW Synchronmaschine mit einer Nenndrehzahl von 3000 min^{-1} als Belastungsmaschine

3. Praktische Durchführung

und einer Asynchronmaschine als Prüfling, welche über die Welle durch Elastomerkupplungen mechanisch miteinander gekuppelt wurden. Zwischen beiden Maschinen befand sich eine Drehmomentmesswelle. Aufgrund von Sicherheitsaspekten war die Kupplung zwischen Drehmomentmesswelle und Synchronmaschine als Sicherheitskupplung mit Rutschkupplung ausgeführt.

Die Synchronmaschine wurde dabei mit einem Umrichter gespeist, wodurch Lastpunkte bis zu 680 Nm sowie eine maximale Drehzahl von 6000 min^{-1} eingestellt werden konnten.

Die Anspeisung der Asynchronmaschine erfolgte je nach durchzuführenden Versuch über eine variable Laborspannung von 0 V bis 600 V oder über einen Standard-Industriemrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis (für diese Arbeit wurde der Frequenzumrichter CFW-11 der Firma WEG verwendet). Bei der variablen Laborspannung wurde die Spannung an der Asynchronmaschine über einen 50 kVA Stelltransformator eingestellt. Um die Vergleichbarkeit der Wirkungsgrade der einzelnen Normmotoren zu gewährleisten, wurde jeder Normmotor mit der gleichen Konfiguration des Umrichters vermessen (wie im Abschnitt 2.1.2 bereits beschrieben, haben die Betriebsparameter des Umrichters einen Einfluss auf die Oberschwingungsverluste). Dabei wurde die Pulsfrequenz mit 5 kHz und die Zwischenkreisspannung mit 465 V gewählt. Gesteuert wurde der Umrichter mit einer skalaren Steuerung (U/f-Betrieb), welche auf der Spannungs-Frequenz-Kennlinie (U/f-Kennlinie) basiert.

Des Weiteren wurden alle verwendeten Normmotoren in Dreieck verschaltet, da die für die Sternschaltung erforderliche Spannung von 690 V von der variablen Laborspannung nicht bereitgestellt werden konnte.

3. Praktische Durchführung

Der Messaufbau ist in folgender Abbildung symbolisch dargestellt.

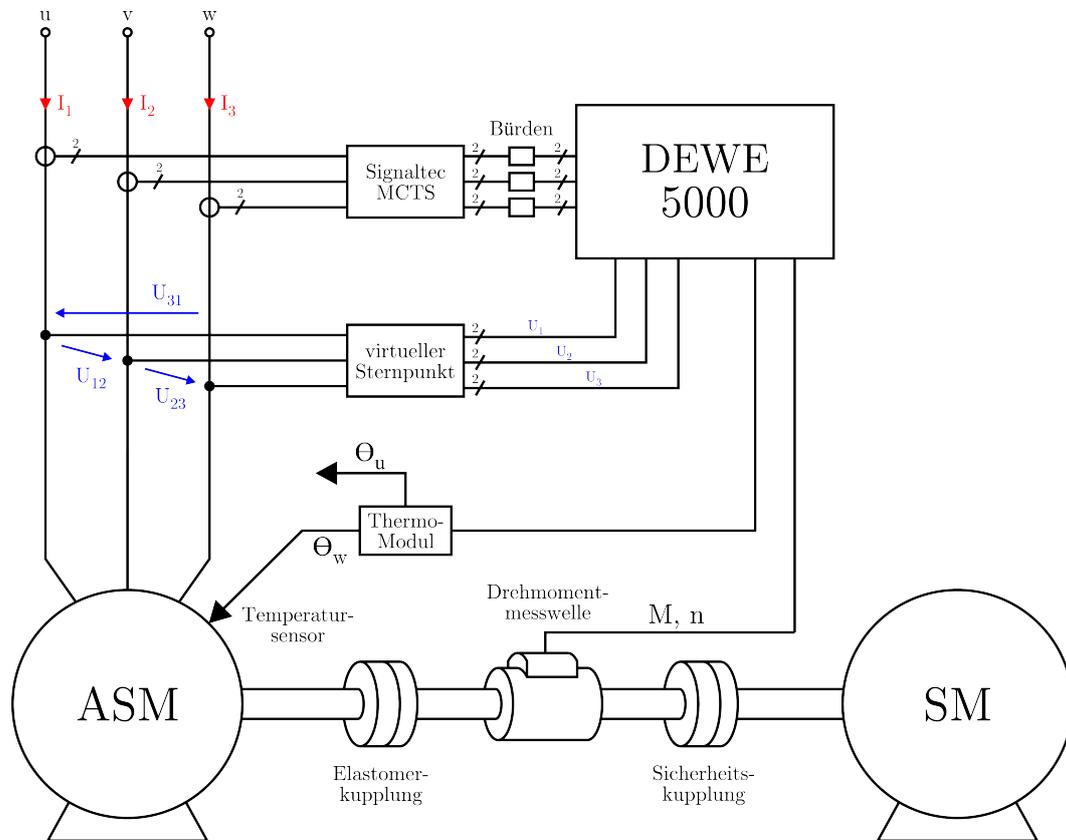


Abbildung 3.1.: Schematischer Messaufbau

Alle Messsignale wurden dabei mit dem Transientenrekorder DEWE 5000 der Firma Dewetron mit einer Abtastrate von 500 kHz (Umrückerbetrieb) bzw. 100 kHz (Netzbetrieb) eingelesen und verarbeitet. Die Leiterströme wurden mit Stromwandlern an den Zuleitungen und geeigneten Bürden gemessen. Die Leistungsmessung mit dem DEWE 5000 erfolgte über einen virtuellen Sternpunkt, da im Normalfall der Sternpunkt nicht ausgeführt wird bzw. die Maschine auch in Dreieck verschaltet sein könnte. Aufgrund der begrenzten Messmodule zur Spannungsmessung mittels DEWE 5000 wurden die verketteten Spannungen aus den Zeitverläufen der Strangspannungen des virtuellen Sternpunktes berechnet. Die Wicklungstemperatur θ_w der Ständerwicklung wiederum wurde mit Hilfe eines Thermoelements auf der Wicklung über ein Thermomodul ge-

3. Praktische Durchführung

messen. Auch die Messung der Umgebungstemperatur θ_u erfolgte mittels eines separaten Thermoelements. Die Drehzahl n sowie das Drehmoment M wurden mit dem Drehmomentsensor und dem Drehzahlsensor der Drehmomentmesswelle erfasst. Damit die Drehmomentmesswelle den erweiterten Spannungsbereich von $\pm 10\text{ V}$ ausgeben konnte, benötigte diese noch eine Spannungsversorgung von 11-30 VDC, welche vom DEWE 5000 zur Verfügung gestellt wird.

Der verwendete Messaufbau ist nun in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

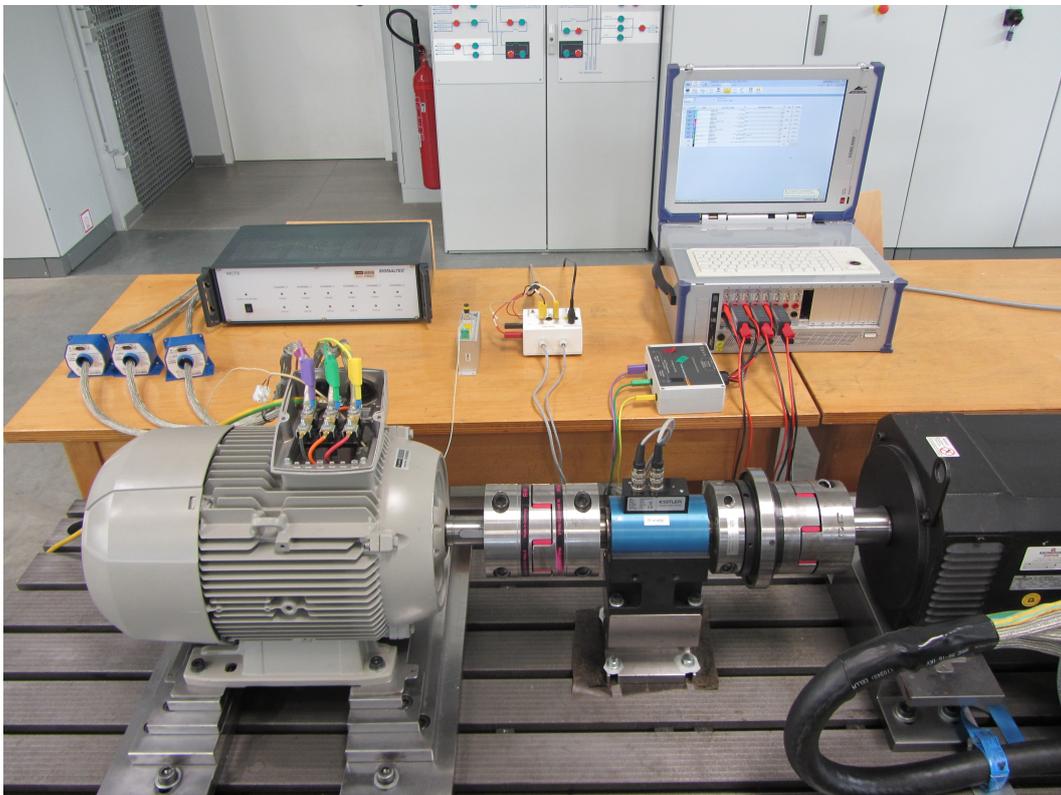


Abbildung 3.2.: Foto des Messaufbaus

3. Praktische Durchführung

Im Anschluss werden die einzelnen Komponenten des Messaufbaus mit ihren wichtigsten Daten aufgelistet, wobei die Typenschilder der verschiedenen Normmotoren im Anhang A aufgelistet sind.

Frequenzumrichter für die Asynchronmaschine

- WEG CFW-11

Strommessung

- STW ELASHBR10, Übersetzungsverhältnis 10 mV/mA, Genauigkeit $\pm 0.02\%$
- STW ELASHBR2.5, Übersetzungsverhältnis 2.5 mV/mA, Genauigkeit $\pm 0.02\%$
- LEM IT 200-S Ultrastab, Verhältnis 1:1000, Messgenauigkeit 0.0084 %
- LEM IT 60-S Ultrastab, Verhältnis 1:600, Messgenauigkeit 0.02725 %
- Signaltec MCTS
- Dewetron DAQP-LV isoliertes Niederspannungs Modul (0... ± 50 V), Messgenauigkeit $\pm 0.04\%$

Leistungs- und Spannungsmessung

- FLUKE Norma Star Point Adapter, max. 500 V verkettete Spannung
- Dewetron DAQP-HV isoliertes Hochspannungs Modul (0... ± 1400 V), Messgenauigkeit $\pm 0.05\%$

Temperaturmessung

- Thermoelement Typ K
- Dewetron EPAD-TH8-P Thermo-Modul, Messgenauigkeit $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$

Belastungsmotor

- Baumüller Drehstromsynchronmotor DS 132 B23R30-5, 92 kW 350 V 166 A 3000 min⁻¹ 150 Hz
- Baumüller b maXX 4000 Leistungsteil

Drehmoment- und Drehzahlmessung

- Kistler 4503A500WA2B1C00, Bereich 500 Nm, max. Drehzahl 7000 min⁻¹, erweiterte Ausgangsspannung 0 ± 10 V, Impulse/Umdrehung 2x360, Genauigkeitsklasse 0.1
- R+W ES2 Sicherheitskupplung
- R+W EK1 Elastomerkupplung mit Passfederverbindung

Norm-Motoren

- Siemens 3 kW
- Siemens 7.5 kW
- Siemens 11 kW
- Siemens 15 kW

3.2. Die direkte Wirkungsgradbestimmung

In diesem Abschnitt wird der Wirkungsgrad mit Hilfe der direkten Messmethode bestimmt, welche gemäß der Norm IEC 60034-2-3 die Input-Output Methode ist. Um neben der Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb auch noch die Auswirkungen der Umrichterspeisung auf den Wirkungsgrad zu analysieren, wurde die 7.5 kW Asynchronmaschine auch am Netz betrieben und der Wirkungsgrad bei Netzbetrieb mit dem direkten Prüfverfahren mit Drehmomentmessung der Norm IEC 60034-2-1 bestimmt.

3.2.1. Die Input-Output Methode

Bei dieser Methode wird der Wirkungsgrad der Asynchronmaschine bestimmt, wenn diese von einem Umrichter versorgt wird.

Vor Beginn der Messung wurde die 7.5 kW Maschine, wie gefordert, so lange mit dem Nenndrehmoment belastet, bis thermisches Gleichgewicht herrschte. Der Temperaturverlauf der Ständerwicklung während dieser Erwärmungsphase ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

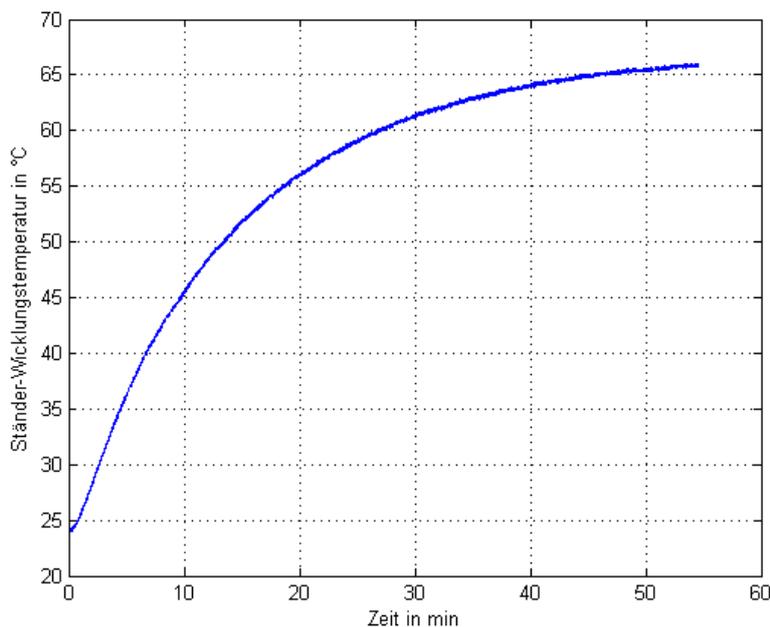


Abbildung 3.3.: Temperaturverlauf während der Erwärmungsphase

Nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtes wurde die zu prüfende Asynchronmaschine mit der Belastungsmaschine in mehreren Lastpunkten betrieben. Für jeden Lastpunkt wurde die abgegebene mechanische Leistung P_{2C} aus dem gemessenen Drehmoment und der Drehzahl errechnet. Aus dieser und der aufgenommenen elektrischen Leistung P_{1C} wurde der Wirkungsgrad wie in 2.3.2 beschrieben bestimmt.

3. Praktische Durchführung

In der folgenden Abbildung ist der Wirkungsgrad η über der elektrischen Leistung in per unit P_{1C}/P_N für die verschiedenen eingestellten Lastpunkte aufgetragen sowie der interpolierte Kurvenverlauf dargestellt. Dabei wurden die Wirkungsgrade sowohl mit den Effektivwerten als auch mit den Werten der 1. Harmonischen bestimmt.

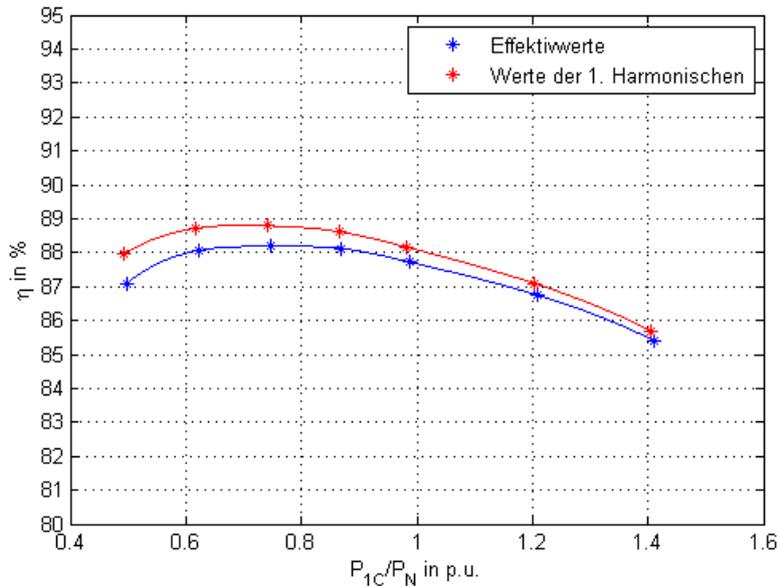


Abbildung 3.4.: Direkte Wirkungsgradbestimmung - Umrichterbetrieb

In der obigen Abbildung ist dabei eine Differenz zwischen den mit den Effektivwerten und jenen mit den Werten der 1. Harmonischen berechneten Wirkungsgraden zu erkennen. Dies ist auf die Oberschwingungsverluste zurückzuführen, welche sich in den Effektivwerten bemerkbar machen.

3.2.2. Das direkte Prüfverfahren mit Drehmomentmessung

Bei dieser Methode wird der Wirkungsgrad der Asynchronmaschine für den Netzbetrieb bestimmt.

Hier wird die zu prüfende Asynchronmaschine mit Hilfe der Belastungsmaschine unter Last betrieben. Dieser Versuch wurde nach der Wirkungsgradbe-

3. Praktische Durchführung

stimmung mit Umrichterbetrieb durchgeführt. Da jedoch während des Umbaus von Umrichter- auf Netzspeisung die Maschine auskühlte, wurde vor Beginn der Messung erneut das thermische Gleichgewicht durch Belastung mit Nenn-drehmoment, wie in Abschnitt 3.2.1 gezeigt, hergestellt.

In jedem Lastpunkt wurde die aufgenommene elektrische Leistung gemessen und die abgegebene mechanische Leistung mit Hilfe der Drehmomentmesswelle bestimmt. Der Wirkungsgrad wurde anschließend, wie im Abschnitt 2.4.2 beschrieben, für jeden eingestellten Lastpunkt bestimmt.

In der nachfolgenden Abbildung ist der Wirkungsgrad η für die eingestellten Lastpunkte über der elektrischen Leistung in per unit P_1/P_N aufgetragen. Des Weiteren ist der interpolierte Kurvenverlauf dargestellt. Der Wirkungsgrad für die einzelnen Lastpunkte wurde auch hier sowohl mit den Effektivwerten als auch mit den Werten der 1. Harmonischen bestimmt.

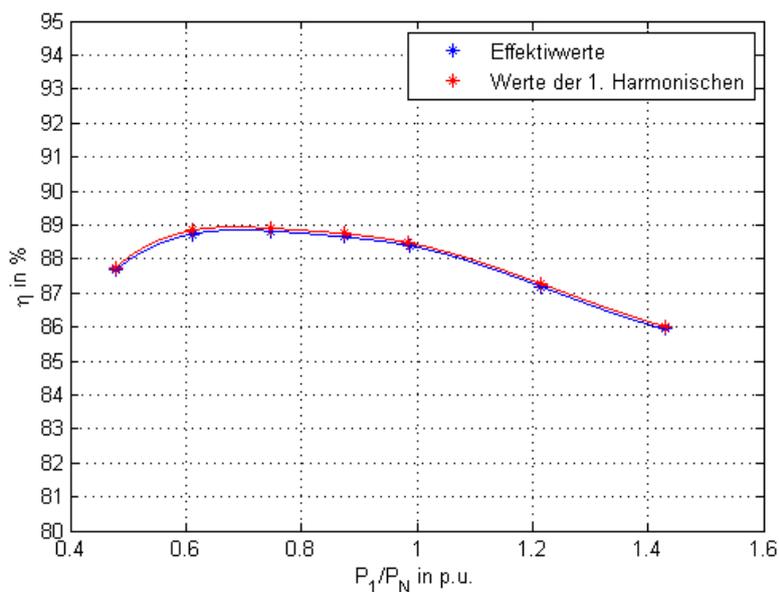


Abbildung 3.5.: Direkte Wirkungsgradbestimmung - Netzbetrieb

In der Abbildung 3.5 ist ersichtlich, dass die aus den Effektivwerten bestimmten Wirkungsgrade geringer sind als jene, bestimmt aus den Werten der 1. Harmonischen. Dies resultiert unter Anderem aus den durch Feldoberwellen

verursachten Oberflächenverlusten in den Stator- und Rotorzahnköpfen, den Pulsationsverlusten in den Zähnen sowie den Wirbelstromverlusten in der Ständerwicklung, auf welche an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen wird. Es ist hierbei jedoch noch anzumerken, dass die Differenz beider Wirkungsgrade bei Netzbetrieb geringer ist als bei der Speisung mit Umrichter, da die zusätzlichen, umrichterbedingten Oberschwingungsverluste hier nicht auftreten. [25]

3.3. Die indirekte Wirkungsgradbestimmung

In diesem Abschnitt wird der Wirkungsgrad mit Hilfe der indirekten Messmethode, gemäß der Norm IEC 60034-2-3 das Einzelverlustverfahren, bestimmt. Dazu wird der im Abschnitt 2.3.3 beschriebene Prüfungsablauf in der Praxis an der 7.5 kW Asynchronmaschine durchgeführt. Hierbei erfolgen zunächst Prüfungen bei sinusförmiger Versorgung und im Anschluss bei Umrichterspeisung. Aus diesen Prüfungen lassen sich dann sowohl die Oberschwingungsverluste, als auch der Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb bestimmen. Neben der Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb werden ebenfalls die Auswirkungen der Umrichterspeisung auf den Wirkungsgrad analysiert, wozu zusätzlich noch der Wirkungsgrad bei Netzbetrieb mit Hilfe der indirekten Prüfung „Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung“ gemäß der Norm IEC 60034-2-1 zu bestimmen ist. Dabei sind jedoch keine weiteren Prüfungen erforderlich, da alle benötigten Prüfungen im Rahmen des Einzelverlustverfahrens nach IEC 60034-2-3 durchzuführen sind.

3.3.1. Bestimmung des Ständerwicklungswiderstandes

Vor Beginn der Prüfungen wurde der Widerstand der kalten Ständerwicklung (gemäß der Norm IEC 60034-2-1 ist dies der arithmetische Mittelwert der Widerstände zwischen den Außenleitern der Ständerwicklungen) mit Hilfe einer spannungsrichtigen Gleichstrommessung ermittelt. Dazu wurde für jede Klemmenkombination der Außenleiterwiderstand der Ständerwicklung gemessen.

3. Praktische Durchführung

Die Messergebnisse dieser Strom-Spannungs-Messung sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

U_{12}	I_1	U_{23}	I_2	U_{31}	I_3
V	A	V	A	V	A
2.2100	2.0898	2.2142	2.1032	2.2108	2.1072

Tabelle 3.1.: Messung des Ständerwiderstandes

Um nun den Widerstand der kalten Ständerwicklung zu erhalten, wird im Anschluss der arithmetische Mittelwert gebildet:

$$R_{s,kalt} = \left(\frac{U_{12}}{I_1} + \frac{U_{23}}{I_2} + \frac{U_{31}}{I_3} \right) \cdot \frac{1}{3}$$

$$R_{s,kalt} = \left(\frac{2.2100 \text{ V}}{2.0898 \text{ A}} + \frac{2.2142 \text{ V}}{2.1032 \text{ A}} + \frac{2.2108 \text{ V}}{2.1072 \text{ A}} \right) \cdot \frac{1}{3} = 1.0532 \Omega$$

Für eine Temperaturkorrektur des Ständerwicklungswiderstandes wurde zudem noch die Temperatur der kalten Ständerwicklung θ_k vor der Widerstandsmessung mit Hilfe eines Thermoelements auf der Wicklung gemessen, welche für die 7.5 kW Asynchronmaschine 18.3 °C beträgt.

3.3.2. Prüfungen bei sinusförmiger Versorgung

Zunächst wurden Prüfungen bei sinusförmiger Versorgung durchgeführt. Als sinusförmige Versorgung wurde für diese Arbeit die Netzversorgung gewählt, da bei Vergleichsmessungen mit einem Leistungsverstärker (welcher eine reine sinusförmige Versorgung darstellt) keine Unterschiede messbar waren. Somit kann die Versorgung aus dem Netz als ausreichend sinusförmig angesehen werden.

Der Ablauf der Prüfungen erfolgt gemäß der Norm IEC 60034-2-1 und wird im Abschnitt 2.4.3 näher beschrieben.

3. Praktische Durchführung

Zuerst erfolgte die Prüfung mit Bemessungsbelastung. Dabei wurde die zu prüfende Asynchronmaschine mit der Belastungsmaschine mit dem Nenndrehmoment betrieben, bis sich das thermische Gleichgewicht eingestellt hat (siehe dazu auch Abbildung 3.3). Anschließend wurden die Messwerte für diesen Bemessungslastpunkt aufgezeichnet. Nun erfolgten die Prüfung mit Belastungskurve und zuletzt die Leerlaufprüfung. Da die Leerlaufprüfung unmittelbar nach den Belastungsprüfungen durchgeführt wurde, können die Leerlaufverluste als stabilisiert betrachtet und die Messwerte aufgezeichnet werden. Aus diesen Prüfungen konnten nun die Einzelverluste, wie folgt beschrieben, bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass die unten angeführten Berechnungen mit den gemessenen Effektivwerten erfolgen. Zusätzlich erfolgen diese Berechnungen jedoch auch für die Werte der 1. Harmonischen, welche analog durchzuführen sind.

Bestimmung der konstanten Verluste P_k

Diese lassen sich aus der Leerlaufprüfung bestimmen. Dazu müssen zuerst die Leerlauf-Wicklungsverluste P_s für jeden eingestellten Spannungswert berechnet werden, wozu allerdings der Ständerwicklungswiderstand nach der Aufzeichnung des niedrigsten Spannungswertes R_0 benötigt wird. Dieser wird wie in der Sektion 2.4.5 beschrieben mit der gemessenen Ständerwicklungstemperatur zum Zeitpunkt der niedrigsten Spannung (θ_W) auf diese Temperatur bezogen.

$$R_0 = \frac{\Theta_W + k}{\Theta_k + k} \cdot R_{s,kalt}$$

$$R_0 = \frac{59.7364 \text{ °C} + 235}{18.3000 \text{ °C} + 235} \cdot 1.0532 \text{ } \Omega = 1.2254 \text{ } \Omega$$

Mit diesem Widerstandswert lassen sich die Leerlauf-Wicklungsverluste für jeden Leerlaufpunkt gemäß der Formel 2.13 bestimmen. In weiterer Folge können dadurch die konstanten Verluste P_k für jeden Spannungswert durch Subtraktion der Leerlauf-Wicklungsverluste von der aufgenommenen Leerlaufleistung berechnet werden (siehe Formel 2.14).

3. Praktische Durchführung

Um nun die Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} zu erhalten, werden die vorhin berechneten konstanten Verluste P_k über der quadrierten Leerlaufspannung aufgetragen und die Kurve bis zur Spannung null extrapoliert. Dies ist in nachfolgenden Abbildung ersichtlich.

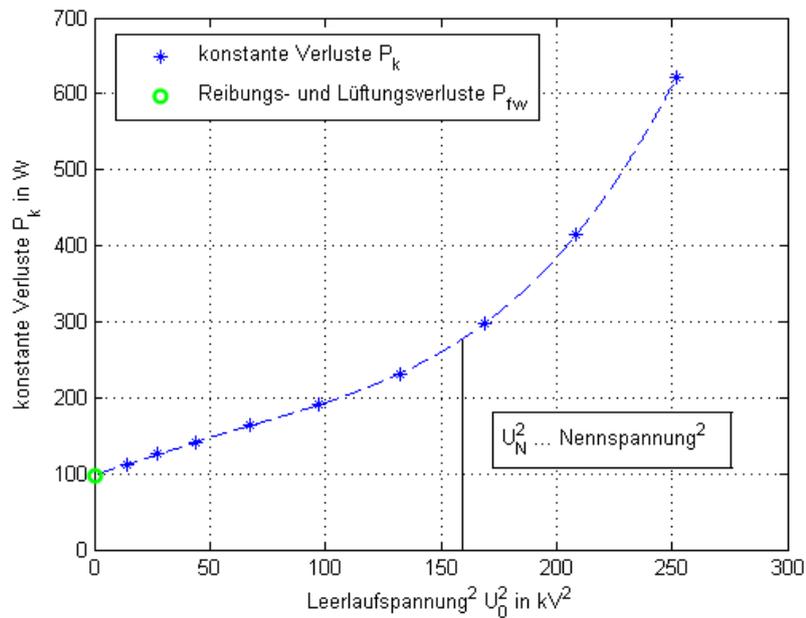


Abbildung 3.6.: Bestimmung der Reibungs- und Lüftungsverluste

Für die 7.5 kW Asynchronmaschine ergeben sich so folgende Reibungs- und Lüftungsverluste:

$$P_{fw} = 97.9915 \text{ W}$$

3. Praktische Durchführung

Die Eisenverluste P_{fe} ergeben sich nun, indem die Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} in jedem Spannungswert von den konstanten Verlusten P_k abgezogen werden. Nachfolgende Abbildung stellt dies grafisch dar.

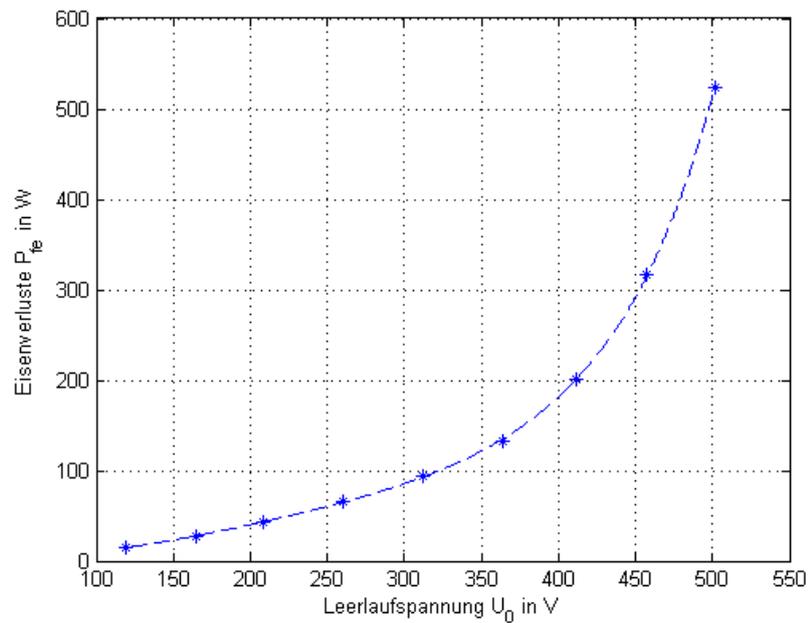


Abbildung 3.7.: Die Eisenverluste P_{fe}

3. Praktische Durchführung

Die Eisenverluste am gewünschten Lastpunkt werden aus dem obigen Kurvenverlauf bei der jeweiligen korrigierten Spannung U_r entnommen. Für den Nennlastpunkt ergibt sich die korrigierte Spannung U_r bei dieser Maschine zu:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$$
$$\cos\varphi = \frac{7401.8280 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 380.4100 \text{ V} \cdot 13.5100 \text{ A}} = 0.8315$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$$
$$\sin\varphi = \sqrt{1 - 0.8315^2} = 0.5555$$

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos\varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin\varphi \right)^2}$$
$$U_r = \sqrt{\left(380.41 \text{ V} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 13.51 \text{ A} \cdot 1.2656 \Omega \cdot 0.8315 \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 13.51 \text{ A} \cdot 1.2656 \Omega \cdot 0.5555 \right)^2}$$
$$U_r = 368.1894 \text{ V}$$

Dabei entspricht der Widerstand R dem Ständerwiderstand vor der Messung des höchsten Lastpunktes. Dieser wird wie in der Sektion 2.4.5 beschrieben mit Hilfe der gemessenen Ständerwicklungstemperatur zum Zeitpunkt vor Messung des höchsten Lastpunktes (θ_w) berechnet.

$$R = \frac{\Theta_w + k}{\Theta_k + k} \cdot R_{s,kalt}$$

$$R = \frac{69.4000 \text{ }^\circ\text{C} + 235}{18.3000 \text{ }^\circ\text{C} + 235} \cdot 1.0532 \Omega = 1.2656 \Omega$$

Durch Ablesen der Eisenverluste an dem Spannungswert $U_r = 368.1894 \text{ V}$ in dem Kurvenverlauf von Abbildung 3.7 ergeben sich folgende Eisenverluste im Nennpunkt:

$$P_{fe} = 138.8036 \text{ W}$$

3. Praktische Durchführung

Bestimmung der lastabhängigen Verluste P_L

Die lastabhängigen Verluste werden aus den Belastungsprüfungen eruiert. Dazu werden zunächst die Ständerwicklungsverluste P_s für jeden Lastpunkt bestimmt. Für den Bemessungslastpunkt berechnen sich diese wie folgt:

$$P_s = 1.5 \cdot I^2 \cdot R$$

$$P_s = 1.5 \cdot (13.5100 \text{ A})^2 \cdot 1.2656 \Omega = 346.4962 \text{ W}$$

Dabei entspricht R dem Ständerwicklungswiderstand, der bereits zur Bestimmung der Spannung U_r berechnet wurde.

Im Anschluss werden noch die Rotorwicklungsverluste P_r ermittelt. Diese ergeben sich im Bemessungslastpunkt zu:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s$$

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f}$$

$$s = 1 - \frac{2 \cdot \frac{1464.7700 \text{ U/min}}{60 \text{ s/min}}}{50.0079 \text{ Hz}} = 0.0236$$

$$P_r = (7401.8280 \text{ W} - 346.4962 \text{ W} - 138.8036 \text{ W}) \cdot 0.0236 = 163.2301 \text{ W}$$

Die lastabhängigen Verluste P_L setzen sich aus den Ständerwicklungsverlusten P_s und den Rotorwicklungsverlusten P_r zusammen und ergeben folgenden Wert für den Bemessungslastpunkt:

$$P_L = P_s + P_r$$

$$P_L = 346.4962 \text{ W} + 163.2301 \text{ W} = 509.7263 \text{ W}$$

Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL}

Die lastabhängigen Zusatzverluste werden an dieser Stelle aus den Restverlusten ermittelt, da Belastungsprüfungen schon durchgeführt wurden. Dabei

3. Praktische Durchführung

werden diese zunächst für jeden eingestellten Lastpunkt bestimmt und sind für den Bemessungslastpunkt folglich:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}$$

$$P_2 = 2\pi \cdot M \cdot n$$

$$P_2 = 2\pi \cdot 42.6553 \text{ Nm} \cdot \frac{1464.7700 \text{ U/min}}{60 \text{ s/min}} = 6542.9120 \text{ W}$$

$$P_{Lr} = 7401.8280 \text{ W} - 6542.9120 \text{ W} - 346.4962 \text{ W} - 163.2301 \text{ W} - 138.8036 \text{ W} \\ - 97.9915 \text{ W}$$

$$P_{Lr} = 112.3946 \text{ W}$$

Um die so ermittelten Restverluste mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse zu glätten, muss für den Korrelationskoeffizienten gelten: $\gamma \geq 0.95$. Für die Messungen mit der 7.5 kW Asynchronmaschine ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von $\gamma = 0.9973$, wodurch die Voraussetzung erfüllt wird.

Die lineare Regressionsanalyse ist in folgender Abbildung dargestellt:

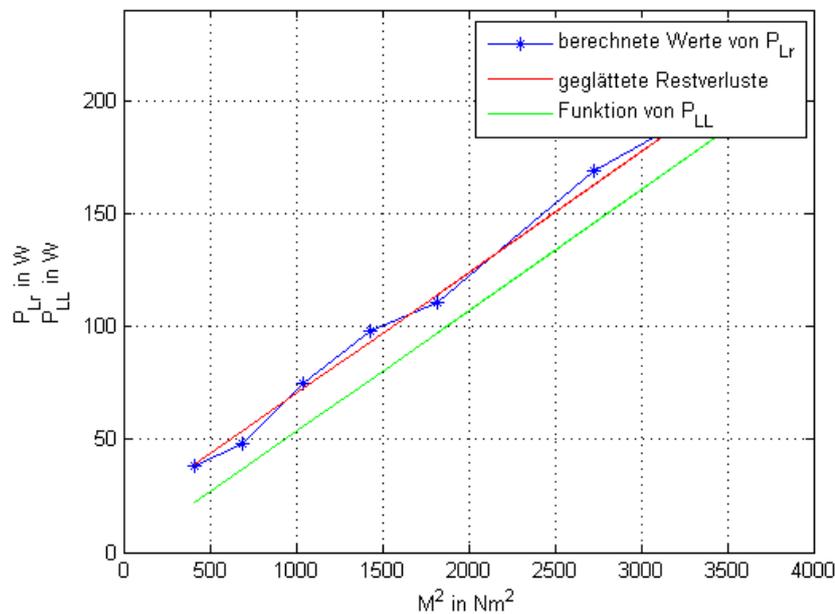


Abbildung 3.8.: Die Glättung der Restverluste

3. Praktische Durchführung

Aus der linearen Regressionsanalyse ergeben sich folgende Werte für die Konstanten A und B :

$$A = 0.05352$$

$$B = 17.9496$$

Daraus resultiert die nachfolgende Funktion von P_{LL} :

$$P_{LL} = A \cdot M^2$$

$$P_{LL} = 0.05352 \cdot M^2$$

Für den Bemessungsbelastungspunkt ergibt diese Funktion den anschließenden Wert:

$$P_{LL} = 0.05352 \cdot (42.6553 \text{ Nm})^2 = 97.3783 \text{ W} \quad (3.1)$$

Berechnung der Gesamtverluste bei Netzspeisung P_{Tsin}

Die Gesamtverluste für sinusförmige Versorgung P_{Tsin} ergeben sich durch Aufsummieren der vorhin ermittelten Einzelverluste. Für den Bemessungslastpunkt resultieren somit folgende Gesamtverluste:

$$P_{Tsin} = P_{fe} + P_{fw} + P_s + P_r + P_{LL}$$

$$P_{Tsin} = 138.8036 \text{ W} + 97.9915 \text{ W} + 346.4962 \text{ W} + 163.2301 \text{ W} \\ + 97.3783 \text{ W}$$

$$P_{Tsin} = 843.8997 \text{ W}$$

3.3.3. Prüfungen bei Umrichterbetrieb

Nachdem die Gesamtverluste bei sinusförmiger Versorgung bestimmt wurden, erfolgen nun die Prüfungen bei Umrichterbetrieb.

Dafür wurde als erstes erneut eine zusätzliche Prüfung mit Bemessungsbelastung durchgeführt, da die Maschine während des Wechsels der Versorgung auf Umrichterbetrieb zu sehr auskühlte und das thermische Gleichgewicht nicht gewährleistet war. Nachdem das thermische Gleichgewicht wieder hergestellt war, wurde der Bemessungslastpunkt aufgezeichnet. Im Anschluss erfolgten analog zu den Messungen am Netz eine Prüfung mit Belastungskurve und eine Leerlaufprüfung. Da auch hier die Leerlaufprüfung unmittelbar nach den Belastungsprüfungen durchgeführt wurde, konnten die Leerlaufverluste als stabilisiert betrachtet und die Messwerte aufgezeichnet werden. Aus diesen Prüfungen können nun die Oberschwingungsverluste bestimmt werden. Auch hier erfolgen die anschließenden Berechnungen mit den Effektivwerten, wobei diese auch zusätzlich für die Werte der 1. Harmonischen durchgeführt werden.

Bestimmung der lastabhängigen Oberschwingungsverluste $P_{HL_{Load}}$

Um die lastabhängigen Oberschwingungsverluste zu erhalten, müssen zunächst die Restverluste bei Netzbetrieb und Umrichterbetrieb mit den korrigierten Reibungs- und Lüftungsverlusten bestimmt werden. Die korrigierten Reibungs- und Lüftungsverluste für den Bemessungslastpunkt mit den vorhin berechneten Schlupf und den Reibungs- und Eisenverluste aus dem Abschnitt 3.3.2 berechnen sich dabei zu:

$$P_{fw} = P_{fw0} \cdot (1 - s)^{2.5}$$

$$P_{fw} = 97.99151 \text{ W} \cdot (1 - 0.0236)^{2.5}$$

$$P_{fw} = 92.3119 \text{ W}$$

3. Praktische Durchführung

Mithilfe dieser werden die Restverluste bei Netzbetrieb für jeden aufgezeichneten Lastpunkt bestimmt. Für den Bemessungslastpunkt ergeben sich jene wie folgt:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}$$

$$P_{Lr} = 7401.8280 \text{ W} - 6542.9120 \text{ W} - 346.4962 \text{ W} - 163.2301 \text{ W} - 138.8036 \text{ W} \\ - 92.3119 \text{ W}$$

$$P_{Lr} = 118.0742 \text{ W}$$

Im Anschluss müssen nun die Restverluste bei Umrichterbetrieb berechnet werden. Da dies für die gleichen Lastpunkte wie bei Netzbetrieb erfolgen muss, jedoch eine so exakte Einstellung der Lastpunkte nicht möglich war, wird an dieser Stelle mit Kennlinien gearbeitet. Dazu wird sowohl für den Netz- als auch Umrichterbetrieb die aufgenommene Leistung über der mechanischen Leistung aufgetragen und eine Kurve zwischen diesen Messpunkten interpoliert. Aus dem interpolierten Kurvenverlauf können somit Werte der elektrischen Leistung an gleichen Lastpunkten bestimmt werden. Diese Vorgehensweise zeigt die folgende Abbildung.

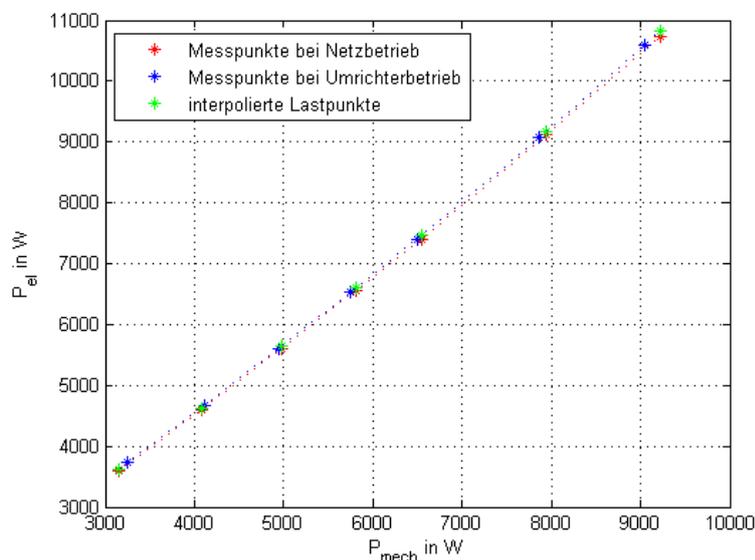


Abbildung 3.9.: Interpolation auf gleiche Lastpunkte

3. Praktische Durchführung

Mit den resultierenden elektrischen Leistungen an den gleichen Lastpunkten und den vorher ermittelten Einzelverlusten für den Netzbetrieb können nun die Restverluste bei Umrichterbetrieb bestimmt werden. Für den Bemessungslastpunkt ergibt sich:

$$P_{LrC} = P_{1C} - P_{2C} - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}$$

$$P_{LrC} = 7460.4360 \text{ W} - 6542.9120 \text{ W} - 346.4962 \text{ W} - 163.2301 \text{ W} - 138.8036 \text{ W} \\ - 92.3119 \text{ W}$$

$$P_{LrC} = 176.6822 \text{ W}$$

Die so erhaltenen Restverluste werden mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse geglättet. Dazu wird zunächst überprüft, ob für den Korrelationskoeffizienten $\gamma \geq 0.95$ gilt. Der Korrelationskoeffizient bei Netzbetrieb beträgt $\gamma = 0.9974$, jener bei Umrichterbetrieb $\gamma = 0.9971$, womit die Voraussetzung für die lineare Regressionsanalysen erfüllt ist. Aus der Regressionsanalyse resultieren folgende Werte der Konstanten A und B für den Netz- (A, B) und Umrichterbetrieb (A_C, B_C):

$$A_C = 0.0768$$

$$A = 0.0554$$

$$B_C = 38.5214$$

$$B = 20.0028$$

3. Praktische Durchführung

Daraus ergeben sich die Funktionen der lastabhängigen Zusatzverluste für Netz- und Umrichterbetrieb, welche in nachfolgender Abbildung dargestellt sind:

$$\begin{aligned} P_{LLC} &= A_C \cdot M^2 & P_{LL} &= A \cdot M^2 \\ P_{LLC} &= 0.0768 \cdot M^2 & P_{LL} &= 0.0554 \cdot M^2 \end{aligned}$$

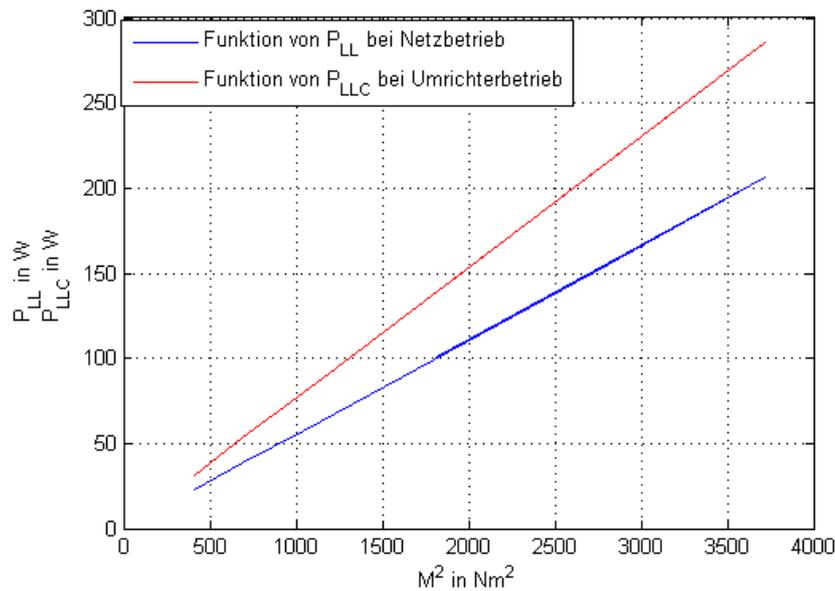


Abbildung 3.10.: Lastabhängige Zusatzverluste bei Netz- und Umrichterbetrieb

Für den Bemessungslastpunkt ergeben die Gleichungen der lastabhängigen Zusatzverluste folgende Werte:

$$\begin{aligned} P_{LL} &= 0.0554 \cdot (42.6553 \text{ Nm})^2 = 100.7989 \text{ W} \\ P_{LLC} &= 0.0768 \cdot (42.6553 \text{ Nm})^2 = 139.7357 \text{ W} \end{aligned}$$

3. Praktische Durchführung

Die Differenz zwischen den lastabhängigen Zusatzverlusten für beide Betriebsarten ergibt den lastabhängigen Teil der Oberschwingungsverluste $P_{HL_{Load}}$. Für den Bemessungslastpunkt resultiert folgender Wert der lastabhängigen Oberschwingungsverluste:

$$P_{HL_{Load}} = P_{LLC} - P_{LL}$$
$$P_{HL_{Load}} = 139.7357 \text{ W} - 100.7989 \text{ W} = 38.9368 \text{ W}$$

Bestimmung der konstanten Oberschwingungsverluste $P_{HL_{No-Load}}$

Hierbei müssen zunächst die konstanten Verluste P_k bei Umrichterbetrieb aus der Leerlaufprüfung bestimmt werden. Dazu muss zur Bestimmung der Leerlaufwicklungsverluste P_s der Ständerwicklungswiderstand nach der Aufzeichnung des niedrigsten Spannungswertes R_{0C} berechnet werden, wie in Abschnitt 2.4.5 beschrieben:

$$R_{0C} = \frac{\Theta_W + k}{\Theta_k + k} \cdot R_{s,kalt}$$
$$R_{0C} = \frac{62.2744 \text{ °C} + 235}{18.3000 \text{ °C} + 235} \cdot 1.0532 \text{ } \Omega = 1.2360 \text{ } \Omega$$

Mit diesem Widerstandswert werden nun für jeden eingestellten Leerlaufpunkt die Leerlauf-Wicklungsverluste P_s gemäß der Formel 2.13 bestimmt. Durch Subtraktion dieser von der aufgenommenen Leistung im Leerlauf ergeben sich die konstanten Verluste P_{kC} bei Umrichterspeisung.

Die konstanten Verluste P_k bei sinusförmiger Versorgung wurden bereits im vorhergehenden Abschnitt berechnet.

3. Praktische Durchführung

Die nachfolgende Abbildung zeigt die konstanten Verluste bei Netz- und Umrichterbetrieb.

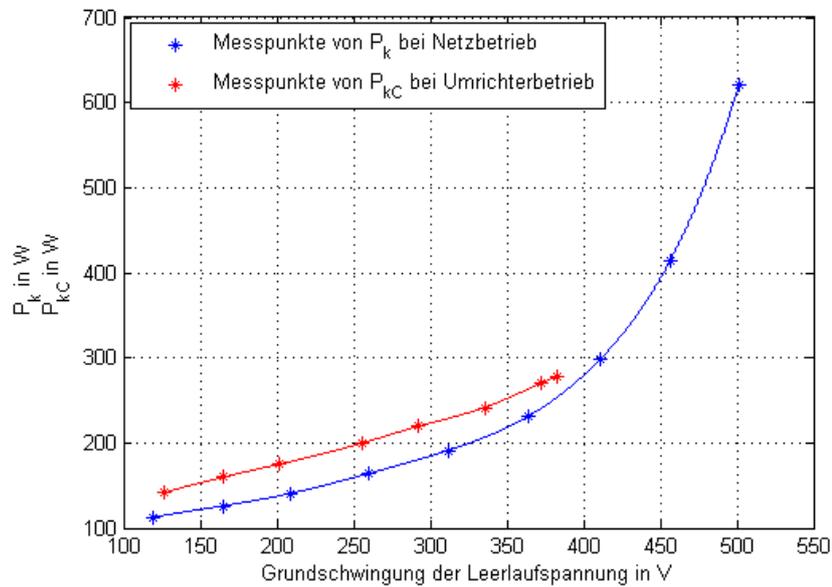


Abbildung 3.11.: Die konstanten Verluste P_k bei Netz- und Umrichterspeisung

Um die konstanten Oberschwingungsverluste zu erhalten, muss die Differenz zwischen den konstanten Verlusten bei Umrichterspeisung und jenen bei Netzbetrieb gebildet werden. Dazu werden zunächst die konstanten Verluste bei einem im Belastungsversuch eingestellten Spannungswert der Grundschnwingung von 378 V aus den Kennlinien für Umrichterbetrieb (P_{kC}) und Netzbetrieb (P_k) aus der Abbildung 3.11 abgelesen:

$$P_k = 248.3834 \text{ W}$$

$$P_{kC} = 275.2757 \text{ W}$$

Die Differenz dieser beiden ergibt die konstanten Oberschwingungsverluste $P_{HL_{No-Load}}$:

$$P_{HL_{No-Load}} = P_{kC} - P_k$$

$$P_{HL_{No-Load}} = 275.2757 \text{ W} - 248.3834 \text{ W} = 26.8923 \text{ W}$$

Bestimmung der gesamten Oberschwingungsverluste P_{HL}

Die Summe der lastabhängigen und konstanten Oberschwingungsverluste ergibt die gesamten Oberschwingungsverluste P_{HL} bei Umrichterbetrieb. Im Bemessungslastpunkt sind somit:

$$P_{HL} = P_{HL\text{No-Load}} + P_{HL\text{Load}}$$
$$P_{HL} = 26.8923 \text{ W} + 38.9368 \text{ W} = 65.8291 \text{ W}$$

3.3.4. Die Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb

Der Wirkungsgrad wird ermittelt, indem zunächst die Gesamtverluste bei Umrichterspeisung P_{TC} aus der Addition der Oberschwingungsverluste P_{HL} und der Gesamtverluste bei sinusförmiger Versorgung P_{Tsin} bestimmt werden. Für den Bemessungslastpunkt folgt:

$$P_{TC} = P_{Tsin} + P_{HL}$$
$$P_{TC} = 843.8997 \text{ W} + 65.8291 \text{ W} = 909.7288 \text{ W}$$

Nun wird der Wirkungsgrad bei Umrichterspeisung mit Hilfe der Gesamtverluste bei Umrichterspeisung gemäß der Formel 2.9 bestimmt. Folglich ergibt sich der Wirkungsgrad η im Bemessungslastpunkt mit der im Abschnitt 3.3.2 berechneten mechanischen Leistung P_2 zu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{TC}} \cdot 100 \%$$
$$\eta = \frac{6542.9120 \text{ W}}{6542.9120 \text{ W} + 909.7288 \text{ W}} \cdot 100 \% = 87.7932 \%$$

Des Weiteren kann noch das Oberschwingungs-Verlustverhältnis r_{HL} berechnet werden, welches hier für den Bemessungslastpunkt ermittelt wird:

$$r_{HL} = \frac{P_{HL}}{P_{Tsin}} \cdot 100 \%$$
$$r_{HL} = \frac{65.8291 \text{ W}}{843.8997 \text{ W}} \cdot 100 \% = 7.8006 \%$$
(3.2)

3. Praktische Durchführung

In der folgenden Abbildung ist der Wirkungsgrad η bei Umrichterbetrieb über der elektrischen Leistung in per unit P_{1C}/P_N für die eingestellten Lastpunkte aufgetragen sowie der interpolierte Kurvenverlauf dargestellt. Dabei wurden die Wirkungsgrade sowohl mit den Effektivwerten als auch mit den Werten der 1. Harmonischen bestimmt.

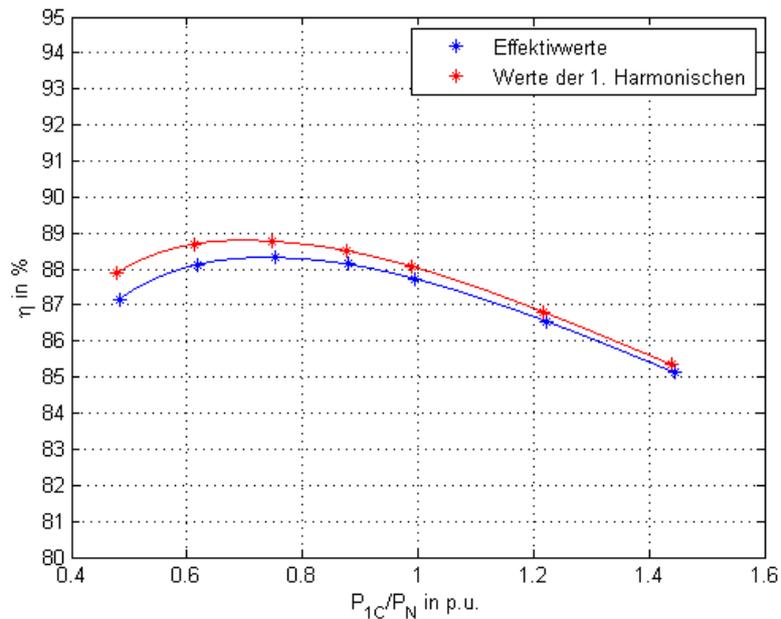


Abbildung 3.12.: Indirekte Wirkungsgradbestimmung - Umrichterbetrieb

3.3.5. Die Wirkungsgradbestimmung bei Netzbetrieb

In diesem Abschnitt erfolgt nun die Bestimmung des Wirkungsgrades bei Netzbetrieb, um eine Analyse der Auswirkungen der Umrichterspeisung auf den Wirkungsgrad im nachfolgenden Kapitel 4 zu ermöglichen.

Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt dabei gemäß der im Abschnitt 2.4 beschriebenen „Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung“ der Norm IEC 60034-2-1.

3. Praktische Durchführung

Da die Gesamtverluste P_{Tsin} , wie es das Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung erfordert, bereits bestimmt wurden, kann an dieser Stelle der Wirkungsgrad bei Netzspeisung bestimmt werden. Im Bemessungslastpunkt ergibt sich dieser wie folgt:

$$\eta = \frac{P_1 - P_{Tsin}}{P_1} \cdot 100\%$$
$$\eta = \frac{7401.8280 \text{ W} - 843.8997 \text{ W}}{7401.8280 \text{ W}} \cdot 100\% = 88.5988\%$$

Abbildung 3.13 stellt den Wirkungsgrad η für die eingestellten Lastpunkte über aufgenommenen Leistung in per unit P_1/P_N dar. Weiters ist der interpolierte Kurvenverlauf aufgetragen. Der Wirkungsgrad für die einzelnen Lastpunkte wurde auch hier sowohl mit den Effektivwerten als auch mit den Werten der 1. Harmonischen bestimmt.

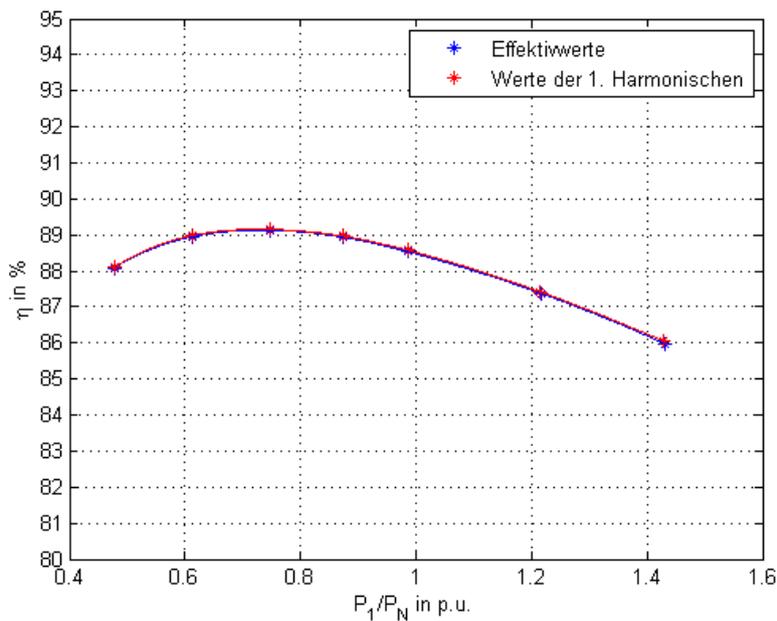


Abbildung 3.13.: Indirekte Wirkungsgradbestimmung - Netzbetrieb

Die bei Netzbetrieb resultierende Differenz zwischen den Wirkungsgraden ist auch hier geringer als bei Umrichterbetrieb. Dies ist auf die zusätzlichen Ober-

schwingungsverluste bei Umrichterspeisung zurückzuführen, wie es im Abschnitt 3.2.2 bereits diskutiert wurde.

3.4. Einzelverlustverfahren ohne Belastungsprüfung

In diesem Abschnitt der vorliegenden Arbeit wird der Wirkungsgrad bei Umrichterspeisung mit Hilfe des Verfahrens mittels Ersatzschaltbild bestimmt. Dies ist eine indirekte Messmethode der Norm IEC 60034-2-1. Dabei wird untersucht, ob die Bestimmung der Parameter mit den Werten der 1. Harmonischen bei Umrichterspeisung möglich ist und die anschließende Wirkungsgradbestimmung korrekte Resultate erbringt. Dazu werden die Parameter des Ersatzschaltbildes sowie der Wirkungsgrad mittels Ersatzschaltbild auch bei Netzspeisung ermittelt, um im anschließenden Kapitel die Unterschiede in den berechneten Parametern im Vergleich zur Umrichterspeisung zu erhalten.

3.4.1. Bestimmung der Parameter bei Umrichterspeisung

In diesem Abschnitt werden nun die Parameter des Ersatzschaltbildes bei Umrichterspeisung, wie im Abschnitt 2.4.4 beschrieben, berechnet.

Dazu wurde zunächst eine Leerlaufprüfung, wie sie im Abschnitt 2.4.3 unter „Bestimmung der konstanten Verluste P_k “ beschrieben wurde, durchgeführt. Im Anschluss erfolgte eine Prüfung mit festgebremsten Läufer bei verminderter Frequenz, wobei die Frequenz bei Umrichterspeisung variabel eingestellt wurde. Dabei wurde der Läufer blockiert und die 7.5 kW Asynchronmaschine mit den Frequenzen von 25 %, 30 1/3 % sowie 50 % der Bemessungsfrequenz gespeist, sodass der Bemessungsstrom fließt. Der Versuch wurde so schnell wie möglich durchgeführt, um eine Änderung der Ständerwicklungstemperatur von nicht mehr als 5 K zu vermeiden.

3. Praktische Durchführung

Aus diesen Prüfungen können nun die Parameter des Ersatzschaltbildes wie folgt bestimmt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die unten angeführten Berechnungen mit den gemessenen Werten der 1. Harmonischen erfolgen und dabei Stranggrößen darstellen.

Bestimmung der Reaktanzen X_{os} , X_m sowie X'_{or}

Als erstes werden die Reaktanzen X_{os} , X_m sowie X'_{or} mit Hilfe eines iterativen Verfahrens bestimmt. Dazu wird zunächst die Blindleistung Q_0 aus der Leerlaufprüfung bei Bemessungsspannung ermittelt. Da die Asynchronmaschine jedoch bei den vorhergegangenen Belastungsversuchen der indirekten und direkten Wirkungsgradbestimmung (Abschnitt 3.2 und 3.3) mit 378 V betrieben wurde, wird Q_0 für die Strang-Leerlaufspannung von 378 V und dem dazugehörigen Leerlaufstrom I_0 bestimmt, um im Weiteren die Wirkungsgrade miteinander vergleichen zu können:

$$Q_0 = \sqrt{(3 \cdot U_0 \cdot I_0)^2 - P_0^2}$$
$$Q_0 = \sqrt{(3 \cdot 377.9365 \text{ V} \cdot 2.9369 \text{ A})^2 - (293.6047 \text{ W})^2} = 3316.9000 \text{ W}$$

Im Anschluss wird nun die Blindleistung Q_{lr} aus der Prüfung mit festgebremsten Läufer bei 25 % der Bemessungsfrequenz bestimmt:

$$Q_{lr} = \sqrt{(3 \cdot U \cdot I)^2 - P_1^2}$$
$$Q_{lr} = \sqrt{(3 \cdot 30.9721 \text{ V} \cdot 7.1758 \text{ A})^2 - (490.9055 \text{ W})^2} = 451.1845 \text{ W}$$

3. Praktische Durchführung

Im nächsten Schritt werden die Anfangswerte von $X_{\sigma s}$, X_m sowie das Verhältnis $X_{\sigma s}/X'_{\sigma r}$ zur iterativen Berechnung benötigt. Da jedoch für die hier vorliegende Asynchronmaschine keine Konstruktionsdaten bekannt waren, wurden die Anfangswerte für $X_{\sigma s}$ und X_m mit einer vereinfachten Methode aus der Leerlaufimpedanz Z_0 bei Nennspannung ($U_0 = U_N$) berechnet. Dabei wird folgender Ansatz verwendet:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$$
$$Z_0 = X_{\sigma s} + X_m$$

Dabei werden die Reaktanzen der Leerlaufimpedanz mit folgenden Annahme für das Streuverhältnis aufgeteilt:

$$\frac{X_{\sigma s}}{X_m} = 0.05$$

Des Weiteren wird noch der Anfangswert des Verhältnisses $X_{\sigma s}/X'_{\sigma r}$ benötigt. Gemäß der Norm IEEE 112 darf dieses für den verwendeten Maschinentyp mit 1 angenommen werden, wenn jenes nicht vorliegt:

$$v = \frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} = 1$$

Für die 7.5 kW Asynchronmaschine ergaben sich somit folgende Anfangswerte, wobei auch hier die Leerlaufimpedanz anstelle der Nennspannung für die Spannung von 378 V, aufgrund der vorhin bereits genannten Gründe, bestimmt wurde:

$$Z_0 = \frac{377.9365 \text{ V}}{2.9369 \text{ A}} = 128.6855 \Omega$$
$$Z_0 = X_{\sigma s} + X_m = 0.05 \cdot X_m + X_m = 1.05 \cdot X_m$$

$$X_m[k=0] = \frac{Z_0}{1.05} = \frac{128.6855 \Omega}{1.05} = 122.5576 \Omega$$
$$X_{\sigma s}[k=0] = 0.05 \cdot X_m = 0.05 \cdot 122.5576 \Omega = 6.1279 \Omega$$

3. Praktische Durchführung

Mit diesen Anfangswerten kann nun mit der iterative Berechnung begonnen werden. Dabei wird der erste Berechnungsschritt wie folgt durchgeführt:

$$X_m[k = 1] = \frac{3 \cdot U_0^2}{Q_0 - 3 \cdot I_0^2 \cdot X_{os}[k = 0]} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{os}[k=0]}{X_m[k=0]}\right)^2}$$
$$X_m[k = 1] = \frac{3 \cdot (377.9365 \text{ V})^2}{3316.9 \text{ W} - 3 \cdot (2.9369 \text{ A})^2 \cdot 6.1279 \Omega} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{6.1279 \Omega}{122.5576 \Omega}\right)^2} = 123.0621 \Omega$$

$$X_{os,lr}[k = 1] = \frac{Q_{lr}}{3 \cdot I^2 \cdot \left(1 + v + \frac{X_{os}[k=0]}{X_m[k=0]}\right)} \cdot \left(v + \frac{X_{os}[k = 0]}{X_m[k = 0]}\right)$$
$$X_{os,lr}[k = 1] = \frac{451.1845 \text{ W}}{3 \cdot (7.1758 \text{ A})^2 \cdot \left(1 + 1 + \frac{6.1279 \Omega}{122.5576 \Omega}\right)} \cdot \left(1 + \frac{6.1279 \Omega}{122.5576 \Omega}\right) = 1.4960 \Omega$$

$$X_{os}[k = 1] = \frac{f_N}{f_{lr}} \cdot X_{os,lr}[k = 1]$$

$$X_{os}[k = 1] = \frac{50 \text{ Hz}}{12.5243 \text{ Hz}} \cdot 1.4960 \Omega = 5.9723 \Omega$$

$$X'_{\sigma r}[k = 1] = \frac{X_{os}[k = 1]}{v}$$

$$X'_{\sigma r}[k = 1] = \frac{5.9723 \Omega}{1} = 5.9723 \Omega$$

Hieraus resultieren die neuen Werte $X_m[k = 1]$ und $X_{os}[k = 1]$ für den nächsten Berechnungsschritt. Um eine Abweichung der Werte zum vorangegangenen Schritt von weniger als 0.1 % zu erlangen, muss diese Iteration mit den neuen Werten eben so lange wiederholt werden bis dies erfüllt ist. Nach genügend vielen Durchgängen resultieren folgende Werte:

$$X_{os} = 5.9679 \Omega$$

$$X_m = 123.2711 \Omega$$

$$X'_{\sigma r} = 5.9679 \Omega$$

3. Praktische Durchführung

Bestimmung des Eisenverlustwiderstandes R_{fe}

Dieser wird gemäß der Formel 2.34 berechnet. Auch hier wird der Eisenverlustwiderstand anstelle der Strang-Nennspannung für eine Spannung von $U_N = 378 \text{ V}$ bestimmt. Aus dem interpolierten Kurvenverlauf der Eisenverluste über der Leerlaufspannung werden die Eisenverluste P_{fe} bei einer Spannung von 378 V abgelesen. Die Bestimmung dieser Kurve wurde bereits im Abschnitt 3.3.2 unter „Bestimmung der konstanten Verluste P_k “ beschrieben. Daraus resultiert folgender Eisenverlustwiderstand:

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_N^2}{P_{fe}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{os}}{X_m}\right)^2}$$
$$R_{fe} = \frac{3 \cdot (377.9365 \text{ V})^2}{137.7668 \text{ W}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{5.9679 \Omega}{123.2711 \Omega}\right)^2} = 2829.8000 \Omega$$

Bestimmung des Läuferwiderstandes R'_r

Zunächst wird der unkorrigierte Läuferwiderstand für jede eingestellte Frequenz der Prüfung mit festgebremsten Läufer mithilfe der Formel 2.35 ermittelt. Für eine eingestellte Frequenz von 25 % der Bemessungsfrequenz ergibt sich dieser folglich zu:

$$X_{os,lr} = \frac{f_{lr}}{f_N} \cdot X_{os}$$
$$X_{os,lr} = \frac{12.5243 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \cdot 5.9679 \Omega = 1.4949 \Omega$$

$$R'_{r,lr} = \left(\frac{P_1}{3 \cdot I^2} - R_s\right) \cdot \left(1 + \frac{X'_{\sigma r}}{X_m}\right)^2 - \left(\frac{X'_{\sigma r}}{X_{os}}\right)^2 \cdot \frac{X_{os,lr}^2}{R_{fe}}$$
$$R'_{r,lr} = \left(\frac{490.9 \text{ W}}{3 \cdot (7.1758 \text{ A})^2} - 1.8265 \Omega\right) \cdot \left(1 + \frac{5.9679 \Omega}{123.2711 \Omega}\right)^2 - \left(\frac{5.9679 \Omega}{5.9679 \Omega}\right)^2 \cdot \frac{(1.4949 \Omega)^2}{2829.8 \Omega}$$
$$R'_{r,lr} = 1.4846 \Omega$$

3. Praktische Durchführung

Der Strang-Widerstandswert R_s in diesem Messpunkt wird, wie in der Sektion 2.4.5 geschildert, aus der gemessenen Ständerwicklungstemperatur berechnet.

Anschließend wird der unkorrigierte Läuferwiderstand auf die Bezugstemperatur bezogen, um den korrigierten Läuferwiderstand für jede eingestellte Frequenz zu erhalten. Da die hier verwendete Asynchronmaschine die Wärmeklasse F besitzt, ist die Bezugstemperatur gemäß der Tabelle 2.4 $\theta_{ref} = 115^\circ\text{C}$. Für den Aluminium-Käfigläufer dieser Maschine gilt des Weiteren ein Temperaturkoeffizient von $\alpha_r = 1/255$.

$$R''_{r,lr} = R'_{r,lr} \cdot \frac{1 + \alpha_r \cdot \theta_{ref}}{1 + \alpha_r \cdot \theta_W}$$
$$R''_{r,lr} = 1.4846 \Omega \cdot \frac{1 + 1/225 \cdot 115^\circ\text{C}}{1 + 1/225 \cdot 58.4599^\circ\text{C}} = 1.7758 \Omega$$

Um den auf den Ständer bezogene Läuferwiderstand R'_r zu bestimmen, werden nun die berechneten Werte von $R''_{r,lr}$ über die eingestellten Frequenzen f_{lr} aufgetragen und eine Gerade bis zur Frequenz null extrapoliert. Der Schnittpunkt dieser Gerade mit der Ordinate ($f_{lr} = 0$) ergibt demnach den auf den Ständer bezogenen Läuferwiderstand R'_r . Nachfolgende Abbildung illustriert dies.

3. Praktische Durchführung

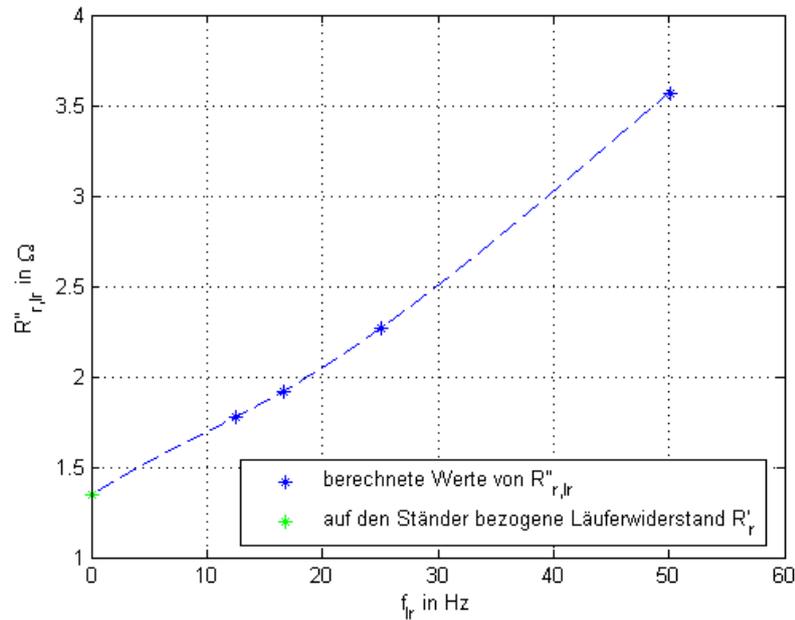


Abbildung 3.14.: Bestimmung des auf den Ständer bezogene Läuferwiderstandes R'_r

Weiters ist in der oben dargestellten Abbildung auch ersichtlich, dass es sich bei dem Läufer der hier verwendeten Asynchronmaschine um einen Stromverdrängungsläufer handelt. Bei diesem wird der Strom aufgrund der Stromverdrängung vom Nutgrund zur Nutöffnung hin verdrängt (Skinneffekt), wodurch der resultierende Stabstrom nur in einer dünnen Schicht an der Staboberkante fließt. Daraus resultiert, dass der Wechselstromwiderstand höher ist als der Gleichstromwiderstand, wie es in Abbildung 3.14 erkennbar ist. [10]

Durch die Extrapolation ergibt sich folgender, auf den Ständer bezogenen Läuferwiderstand für die 7.5 kW Asynchronmaschine:

$$R'_r = 1.3426 \Omega$$

3. Praktische Durchführung

Zusammenfassung der berechneten Parameter

Eine zusammenfassende Übersicht über die ermittelten Parameter bei Umrichterspeisung, die aus den Werten der 1. Harmonischen bestimmt wurden, gibt folgende Tabelle:

$X_{\sigma s}$	5.9679 Ω
X_m	123.2711 Ω
$X'_{\sigma r}$	5.9679 Ω
R_{fe}	2829.8 Ω
R'_r	1.3426 Ω

Tabelle 3.2.: Ersatzschaltbild-Parameter bei Umrichterbetrieb

Bestimmung der lastabhängigen Impedanzen

An dieser Stelle werden die last- bzw. schlupfabhängigen Impedanzen und Admittanzen nur für den Nennpunkt berechnet. Dieser Berechnungsablauf wurde für alle eingestellten Lastpunkte der Belastungsprüfung aus dem Abschnitt 3.3 wiederholt, um im Nachfolgenden vergleichbar zu machen.

Der Schlupf im Nennpunkt der 7.5 kW Maschine ergibt sich zu:

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f}$$
$$s = 1 - \frac{2 \cdot \frac{1464.7700 \text{ U/min}}{60 \text{ s/min}}}{50.0079 \text{ Hz}} = 0.0236$$

3. Praktische Durchführung

Daraus können nun die schlupfabhängigen Impedanz- und Admittanz-Zwischenwerte für den Nennpunkt bestimmt werden:

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R'_r}{s}\right)^2 + X'_{or}{}^2}$$

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{1.3426 \Omega}{0.0236}\right)^2 + (5.9679 \Omega)^2} = 57.2020 \Omega$$

$$Y_g = \sqrt{\left(\frac{R'_r/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X'_{or}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}\right)^2}$$

$$Y_g = \sqrt{\left(\frac{1.3426 \Omega/0.0236}{(57.2020 \Omega)^2} + \frac{1}{2829.8 \Omega}\right)^2 + \left(\frac{5.9679 \Omega}{(57.2020 \Omega)^2} + \frac{1}{123.2711 \Omega}\right)^2}$$

$$Y_g = 0.0203 \text{ S}$$

$$R_g = \frac{\frac{R'_r/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}}{Y_g^2}$$

$$R_g = \frac{\frac{1.3426 \Omega/0.0236}{(57.2020 \Omega)^2} + \frac{1}{2829.8 \Omega}}{(0.0203 \text{ S})^2} = 43.0486 \Omega$$

$$X_g = \frac{\frac{X'_{or}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}}{Y_g^2}$$

$$X_g = \frac{\frac{5.9679 \Omega}{(57.2020 \Omega)^2} + \frac{1}{123.2711 \Omega}}{(0.0203 \text{ S})^2} = 24.1115 \Omega$$

3. Praktische Durchführung

Mittels dieser Zwischenwerte können die von den Klemmen der Maschine aus gesehen, resultierenden Impedanzwerte bestimmt werden. Der Strang-Widerstandswert R_s wird hierbei auf die Bezugstemperatur $\theta_{ref} = 115^\circ\text{C}$ bezogen (Abschnitt 2.4.5).

$$R = R_s + R_g$$

$$R = 2.1828 \Omega + 43.0486 \Omega = 45.2314 \Omega$$

$$X = X_{os} + X_g$$

$$X = 5.9679 \Omega + 24.1115 \Omega = 30.0794 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$Z = \sqrt{(45.2314 \Omega)^2 + (30.0794 \Omega)^2} = 54.3199 \Omega$$

3.4.2. Bestimmung der Gesamtverluste bei Umrichterbetrieb

Um auf die Gesamtverluste für den Nennpunkt der Maschine zu erhalten, werden zunächst alle Einzelverluste bestimmt. Dazu wird der Ständer-Strangstrom I_s und der Läufer-Strangstrom I'_r bezogen auf die Spannung $U_N = 378 \text{ V}$ berechnet:

$$I_s = \frac{U_N}{Z}$$

$$I_s = \frac{377.9365 \text{ V}}{54.3199 \Omega} = 6.9576 \text{ A}$$

$$I'_r = I_s \cdot \frac{1}{Y_g \cdot Z_r}$$

$$I'_r = 6.9576 \text{ A} \cdot \frac{1}{0.0203 \text{ S} \cdot 57.2020 \Omega} = 5.9917 \text{ A}$$

3. Praktische Durchführung

Aus diesen berechneten Strömen ergeben sich die Einzelverluste wie folgt:

$$P_{fe} = 3 \cdot I_s^2 \cdot \frac{1}{Y_g^2 \cdot R_{fe}}$$

$$P_{fe} = 3 \cdot (6.9576 \text{ A})^2 \cdot \frac{1}{(0.0203 \text{ S})^2 \cdot 2829.8 \Omega} = 124.5350 \text{ W}$$

$$P_s = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s$$

$$P_s = 3 \cdot (6.9576 \text{ A})^2 \cdot 2.1828 \Omega = 316.9960 \text{ W}$$

$$P_r = 3 \cdot I_r'^2 \cdot R_r'$$

$$P_r = 3 \cdot (5.9917 \text{ A})^2 \cdot 1.3426 \Omega = 144.6000 \text{ W}$$

Die lastabhängigen Zusatzverluste bei Bemessungsbelastung $P_{LL,N}$ ergeben sich aus festgelegten Zuschlägen, wie bereits im Abschnitt 2.4.3 unter „Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL} “ diskutiert, wobei auch hier für $U_N = 378 \text{ V}$ verwendet wird:

$$P_{LL,N} = P_1 \cdot \left[0.025 - 0.005 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right]$$

$$= 3 \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N \cdot \left[0.025 - 0.005 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right]$$

$$P_{LL,N} = 3 \cdot 377.9382 \text{ V} \cdot 14.7 \text{ A} \cdot 0.83 \cdot \left[0.025 - 0.005 \cdot \log_{10} \left(\frac{7.5 \text{ kW}}{1 \text{ kW}} \right) \right] = 285.3152 \text{ W}$$

Da diese Berechnung hier für den Bemessungsbelastungspunkt durchgeführt wird, entspricht jener Wert in diesem Fall den lastabhängigen Zusatzverlusten ($P_{LL} = P_{LL,N}$). Für andere Belastungspunkte sei auf Formel 2.43 verwiesen.

Die Reibungs- und Lüftungsverluste P_{fw} werden, wie im Punkt 3.3.2 unter „Bestimmung der konstanten Verluste P_k “ beschrieben, bestimmt und ergeben folgenden Wert:

$$P_{fw} = 107.8926 \text{ W}$$

3. Praktische Durchführung

Aus all diesen Einzelverlusten resultieren folglich die Gesamtverluste P_T im Nennpunkt:

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_s + P_r + P_{LL}$$

$$P_T = 124.5350 \text{ W} + 107.8926 \text{ W} + 316.9960 \text{ W} + 144.6000 \text{ W} + 285.3152 \text{ W}$$

$$P_T = 979.3390 \text{ W}$$

3.4.3. Die Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterbetrieb

Bevor der Wirkungsgrad für den Nennpunkt ermittelt wird, muss zuerst die aufgenommene Leistung P_1 sowie die abgegebene Leistung P_2 (mit Hilfe der Gesamtverluste P_T) berechnet werden:

$$P_1 = 3 \cdot I_s^2 \cdot R$$

$$P_1 = 3 \cdot (6.9576 \text{ A})^2 \cdot 45.2314 \Omega = 6568.7100 \text{ W}$$

$$P_2 = P_1 - P_T$$

$$P_2 = 6568.7100 \text{ W} - 979.3390 \text{ W} = 5589.3700 \text{ W}$$

Nun ergibt sich der Wirkungsgrad im Nennpunkt zu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

$$\eta = \frac{5589.3700 \text{ W}}{6568.7100 \text{ W}} \cdot 100 \% = 85.0900 \%$$

3. Praktische Durchführung

Diese exemplarische Bestimmung der lastabhängigen Impedanzen, die Bestimmung der Gesamtverluste und die anschließende Berechnung des Wirkungsgrades für den Nennpunkt wurden für alle Lastpunkte, welche auch im Abschnitt 3.3 eingestellt wurden, durchgeführt. Somit ist es möglich, den Wirkungsgrad η über den berechneten, elektrischen Leistungen in per unit P_{1C}/P_N für die verschiedenen Lastpunkte aufzutragen und die interpolierte Wirkungsgradkennlinie darzustellen:

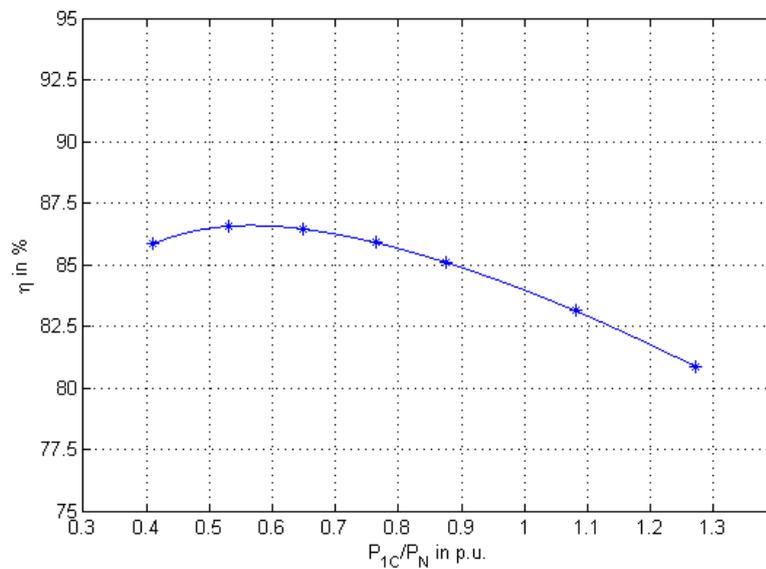


Abbildung 3.15.: Wirkungsgradbestimmung mittels der Methode mit Ersatzschaltbild - Umrichterbetrieb

3.4.4. Die Wirkungsgradbestimmung bei Netzbetrieb

In diesem Abschnitt wird nun noch der Wirkungsgrad mit Hilfe des Verfahrens mit Ersatzschaltbild bei Netzspeisung bestimmt.

Dabei wurde eine Leerlaufprüfung, wie sie im Abschnitt 2.4.3 unter „Bestimmung der konstanten Verluste P_k “ beschrieben wurde, durchgeführt. Im Anschluss erfolgte eine Prüfung mit festgebremsten Läufer bei verminderter Frequenz, wobei die Maschine von einem dreiphasigen Leistungsverstärker bei verschiedenen Frequenzen mit Bemessungsstrom gespeist wurde. Als dreiphasige Leistungsverstärker diente dabei das „Three-Phase Mains Simulation System (DM 15000 / PAS)“ der Firma Spitzenberger + Spies.

Da die Bestimmung der Parameter, der Gesamtverluste sowie die Wirkungsgradbestimmung analog zu jener bei Umrichterbetrieb erfolgen, wird auf diese Berechnungen an dieser Stelle verzichtet (siehe vorhergehende Abschnitte 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3).

Die aus den Messungen bei Netzspeisung ermittelten Parameter des Ersatzschaltbildes sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst aufgelistet.

$X_{\sigma s}$	5.7949 Ω
X_m	117.7451 Ω
$X'_{\sigma r}$	5.7949 Ω
R_{fe}	2570.0870 Ω
R'_r	1.3476 Ω

Tabelle 3.3.: Ersatzschaltbild-Parameter bei Netzbetrieb

3. Praktische Durchführung

In folgender Abbildung ist der Wirkungsgrad η über der berechneten, elektrischen Leistung in per unit P_1/P_N für die verschiedenen Lastpunkte aufgetragen und der interpolierte Kurvenverlauf dargestellt.

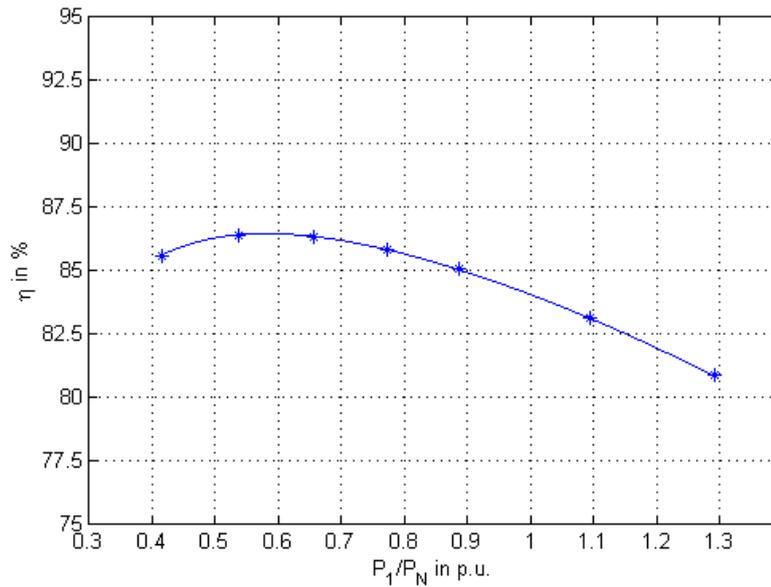


Abbildung 3.16.: Wirkungsgradbestimmung mittels der Methode mit Ersatzschaltbild - Netzbetrieb

4. Evaluierung der Messergebnisse

In diesem abschließenden Kapitel werden die gemessenen Daten analysiert und miteinander verglichen. Dabei werden die mit den verschiedenen Methoden berechneten Wirkungsgrade gegenübergestellt und die Auswirkungen der Umrichterspeisung auf den Wirkungsgrad diskutiert. Des Weiteren werden auftretenden Oberschwingungsverluste näher betrachtet und die bei Netz- und Umrichterbetrieb berechneten Parameter des Ersatzschaltbildes miteinander verglichen.

4.1. Analyse der Wirkungsgrade

Dieser Abschnitt behandelt die durch die unterschiedlichen Methoden berechneten Wirkungsgrade. Dazu werden zunächst die Wirkungsgradkennlinien der vermessenen Maschinen für die verschiedenen Methoden der Wirkungsgradbestimmung und Versorgungsarten dargestellt.

4. Evaluierung der Messergebnisse

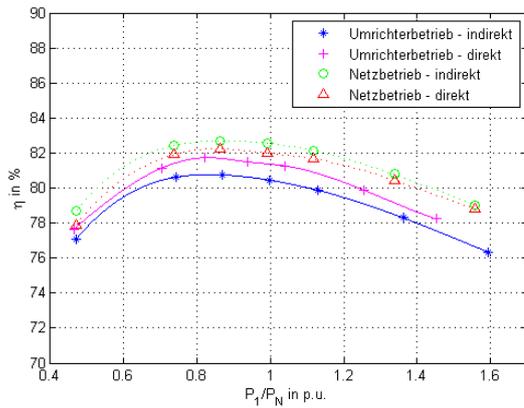


Abbildung 4.1.: 3 kW Maschine

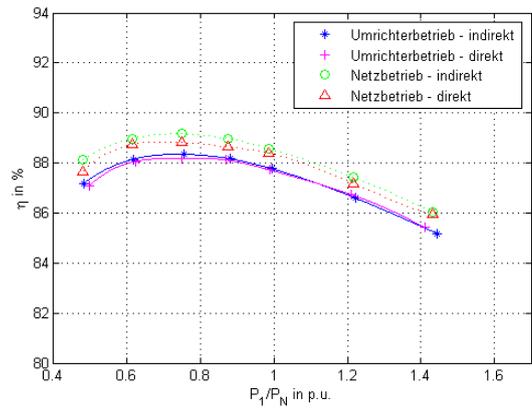


Abbildung 4.2.: 7,5 kW Maschine

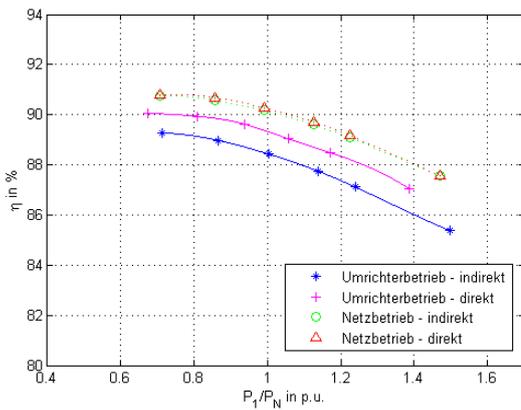


Abbildung 4.3.: 11 kW Maschine

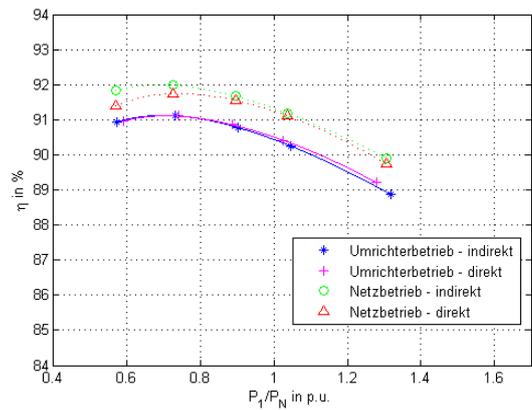


Abbildung 4.4.: 15 kW Maschine

Abbildungen 4.1. - 4.4.: Wirkungsgradkennlinien der unterschiedlichen Messverfahren und Versorgungen

Aus diesen Diagrammen ist ersichtlich, dass der Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb gegenüber dem Netzbetrieb wie erwartet geringer ist. Nachfolgend werden nun die einzelnen Wirkungsgradkennlinien gegeneinander verglichen.

4.1.1. Vergleich der direkten mit indirekten Messmethode

Die nachfolgende Tabelle betrachtet die Differenz der mit der direkten zur indirekten Messmethode bestimmten Wirkungsgrade für verschiedene Lastpunkte bei der jeweiligen Speisung. Um einen Vergleich bei den unterschiedlichen Lastpunkten, die bei jeder Prüfung variierten, anstellen zu können, wurden die Kurvenverläufe zwischen den Messpunkten zunächst interpoliert. Somit konnten die Wirkungsgrade für die gewünschten Lastpunkte bestimmt und die Wirkungsgraddifferenz $\Delta\eta$ zwischen der direkten und indirekten Messmethode für die beiden Versorgungsarten (Netz und FU) gebildet werden.

P_{el}/P_N	3 kW Motor		7.5 kW Motor	
	$\Delta\eta_{Netz}$	$\Delta\eta_{FU}$	$\Delta\eta_{Netz}$	$\Delta\eta_{FU}$
0.8	-0.45 %	+0.94 %	-0.36 %	-0.13 %
0.9	-0.49 %	+0.9 %	-0.3 %	-0.07 %
1.0	-0.57 %	+0.93 %	-0.17 %	-0.08 %
1.1	-0.48 %	+0.98 %	-0.17 %	-0.02 %
1.2	-0.39 %	+0.87 %	-0.24 %	+0.07 %
P_{el}/P_N	11 kW Motor		15 kW Motor	
	$\Delta\eta_{Netz}$	$\Delta\eta_{FU}$	$\Delta\eta_{Netz}$	$\Delta\eta_{FU}$
0.8	+0.08 %	+0.8 %	-0.18 %	+0.01 %
0.9	+0.09 %	+0.89 %	-0.12 %	+0.03 %
1.0	+0.1 %	+0.89 %	-0.08 %	+0.07 %
1.1	+0.11 %	+0.87 %	-0.07 %	+0.1 %
1.2	+0.1 %	+0.97 %	-0.1 %	+0.11 %

Tabelle 4.1.: Wirkungsgraddifferenz der verschiedenen Messmethoden

$$\Delta\eta = \eta_{direkt} - \eta_{indirekt}$$

Daraus lässt sich schließen, dass die mit den beiden unterschiedlichen Methoden berechneten Wirkungsgrade sehr nahe beieinander liegen. Die resultierende Messunsicherheit liegt dabei bei ca. $\pm 1\%$ des berechneten Wirkungsgrades.

4.1.2. Vergleich der Wirkungsgrade bei Netz- und Umrichterbetrieb

Anschließend wird nun die Auswirkung der Umrichterspeisung auf den Wirkungsgrad analysiert. Dazu wird an dieser Stelle die Wirkungsgraddifferenz $\Delta\eta$ zwischen Netz- und Umrichterbetrieb aus den interpolierten Wirkungsgradkennlinien für verschiedene Lastpunkte gebildet, welche in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet sind. Da die mit der direkten und indirekten Messmethode berechneten Wirkungsgrade nur gering voneinander abweichen, werden hier nur die mit der indirekten Messmethode berechneten Werte miteinander verglichen. Daraus lässt sich im Anschluss folgern, in welchem Ausmaß sich der Wirkungsgrad aufgrund der Umrichterspeisung im Vergleich zur Netzspeisung verringert.

P_{el}/P_N	3 kW Motor	7.5 kW Motor	11 kW Motor	15 kW Motor
	$\Delta\eta$	$\Delta\eta$	$\Delta\eta$	$\Delta\eta$
0.8	1.87 %	0.81 %	1.54 %	0.87 %
0.9	1.98 %	0.79 %	1.61 %	0.87 %
1.0	2.1 %	0.77 %	1.69 %	0.89 %
1.1	2.19 %	0.78 %	1.77 %	0.91 %
1.2	2.24 %	0.8 %	1.84 %	0.94 %

Tabelle 4.2.: Wirkungsgraddifferenz zwischen Netz- und Umrichterbetrieb

$$\Delta\eta = \eta_{\text{Netz}} - \eta_{\text{FU}}$$

Aus dieser Tabelle lässt sich schließen, dass der Wirkungsgrad bei Umrichterbetrieb wie erwartet um ca. 0.8-2% geringer ist. Dies ist auf die größeren Oberschwingungsverluste, wie im Kapitel 2 diskutiert, zurückzuführen. Weiters geht aus der Tabelle hervor, dass die Verringerung des Wirkungsgrades bei der 3 kW sowie der 11 kW Maschine größer als bei den anderen beiden ist. Da diese beiden Motoren um ca. 10 Jahre älter sind, ist es naheliegend, dass die

Blechqualität nicht dem der beiden neueren Motor entspricht, wodurch sich die größere Wirkungsgraddifferenz erklären lässt.

4.2. Wirkungsgradbestimmung für Umrichterspeisung nach IEC 60034-2-1

Des Weiteren wurden die Wirkungsgrade bei Umrichterspeisung auch gemäß dem Einzelverlustverfahren mit Belastungsprüfung der Norm IEC 60034-2-1 bestimmt, welches laut Norm für die Wirkungsgradbestimmung bei sinusförmiger Versorgung definiert ist. Dadurch lässt sich erkennen, ob es Unterschiede in den gemäß der Norm IEC 60034-2-1 und IEC 60034-2-3 berechneten Wirkungsgraden bei Umrichterspeisung gibt bzw. ob sich die Norm IEC 60034-2-1 überhaupt zur Wirkungsgradbestimmung bei Umrichterspeisung eignet. Dazu ist zunächst für die verschiedenen Maschinen der nach der jeweiligen Norm berechnete Wirkungsgrad η über der aufgenommenen Leistung in per unit P_{1C}/P_N aufgetragen.

4. Evaluierung der Messergebnisse

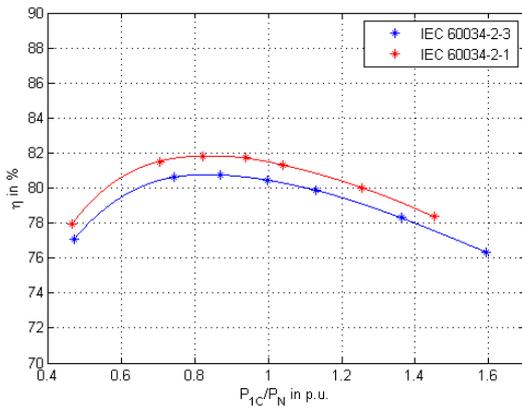


Abbildung 4.5.: 3 kW Maschine

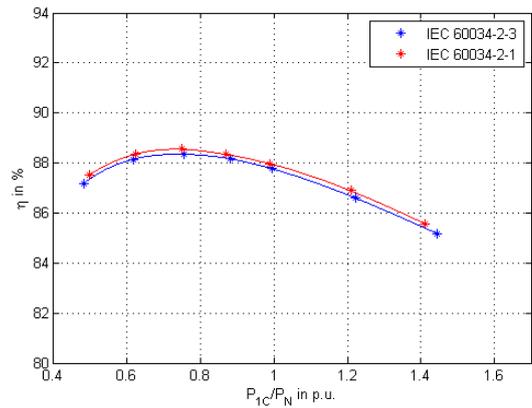


Abbildung 4.6.: 7.5 kW Maschine

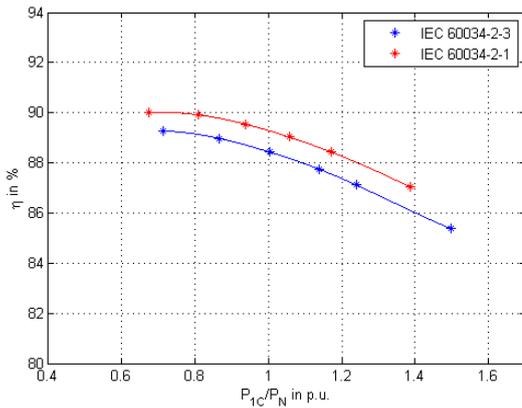


Abbildung 4.7.: 11 kW Maschine

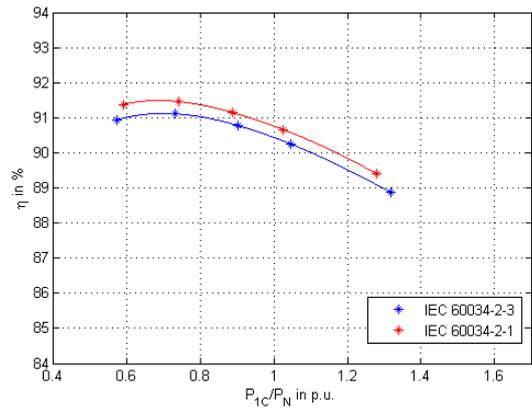


Abbildung 4.8.: 15 kW Maschine

Abbildungen 4.5. - 4.8.: Wirkungsgradkennlinien im Umrichtertrieb gemäß der Normen IEC 60034-2-1 und IEC 60034-2-3

Aus diesen Abbildungen ist eine leichte Differenz zu erkennen, jedoch ist deren Kurvenverlauf annähernd gleich. Um diese Differenz an einem Lastpunkt zu bestimmen, wurden die Differenz der Wirkungsgrade $\Delta\eta$ am Nennpunkt ($P_{el}/P_N = 1$) aus der interpolierten Kennlinien gebildet. Diese sind für die unterschiedlichen Maschinen in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

4. Evaluierung der Messergebnisse

Motor	$\Delta\eta$
3 kW	1.06 %
7.5 kW	0.18 %
11 kW	0.85 %
15 kW	0.33 %

Tabelle 4.3.: Differenz der mit den verschiedenen Normen berechneten Wirkungsgrade für $P_{el}/P_N = 1$

$$\Delta\eta = \eta_{IEC\ 60034-2-1} - \eta_{IEC\ 60034-2-3}$$

Es ist hier ersichtlich, dass der mit der Norm IEC 60034-2-1 berechnete Wirkungsgrad immer etwas größer ist als jener, welcher mit der Norm IEC 60034-2-3 bestimmt wurde. Es ergibt sich eine Abweichung der berechneten Wirkungsgrade von ca. 1 %, wenn eine umrichter gespeiste Maschine mit der für sinusförmige Versorgung definierten Norm IEC 60034-2-1 vermessen wird.

4.3. Betrachtung der Oberschwingungsverluste

Die Oberschwingungsverluste P_{HL} aufgrund des Umrichterbetriebs wurden bereits, wie im Abschnitt 3.3.3 illustriert, gemäß der Norm IEC 60034-2-3 berechnet. An dieser Stelle wird zusätzlich die Oberschwingungsleistung ΔP_{el} aus der Differenz zwischen der gemessenen, aufgenommenen Gesamtwirkleistung und der Grundschwingungswirkleistung bestimmt. Dabei kann die Oberschwingungsleistung den Oberschwingungsverlusten gleichgesetzt werden, da wie bereits im Abschnitt 2.1.1 diskutiert, das durch die Oberschwingungen erzeugte zeitlich-konstante Drehmoment aufgrund der geringen Oberschwingungsströme vernachlässigbar klein ist. Die laut Norm berechneten (P_{HL}) und die direkt gemessenen Oberschwingungsverluste (ΔP_{el}) sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. [17]

P_{el}/P_N	3 kW Motor		7.5 kW Motor	
	ΔP_{el}	P_{HL}	ΔP_{el}	P_{HL}
0.8	17.1 W	52.4 W	38 W	52 W
0.9	17 W	62.9 W	36.5 W	58.8 W
1.0	16.9 W	74.4 W	36.6 W	66.2 W
1.1	17.1 W	87 W	36.4 W	74.3 W
1.2	17.2 W	100.4 W	35.7 W	83 W
P_{el}/P_N	11 kW Motor		15 kW Motor	
	ΔP_{el}	P_{HL}	ΔP_{el}	P_{HL}
0.8	50 W	152.2 W	73.9 W	112.6 W
0.9	49 W	181.9 W	72.9 W	130.3 W
1.0	49 W	214.5 W	67.8 W	149.9 W
1.1	48 W	249.8 W	62 W	171.3 W
1.2	44.7 W	288.3 W	60.2 W	194.3 W

Tabelle 4.4.: Gemessene (ΔP_{el}) und berechnete (P_{HL}) Oberschwingungsverluste

4. Evaluierung der Messergebnisse

Aus der obigen Tabelle ist erkennbar, dass die direkt gemessenen und berechneten Oberschwingungsverluste stark voneinander abweichen. Dabei kann beobachtet werden, dass die direkt gemessenen Oberschwingungsverluste ΔP_{el} unabhängig von der Belastung relativ konstant bleiben. Die leichte Verringerung der direkt gemessenen Oberschwingungsverluste lässt sich darauf zurückführen, dass bei höherer Belastung die Spannung sinkt und somit auch die Eisenverluste, welche einen dominanten Anteil der Oberschwingungsverluste darstellen. Bei den berechneten Oberschwingungsverlusten P_{HL} hingegen lässt sich eine deutliche Lastabhängigkeit erkennen.

Die gemäß der Norm IEC 60034-2-3 berechneten Oberschwingungsverluste P_{HL} bestehen dabei aus einem konstanten Anteil $P_{HLNo-Load}$ und einen lastabhängigen Anteil P_{HLLoad} . Wird nur der konstante Anteil $P_{HLNo-Load}$ betrachtet, ist ersichtlich, dass dieser gut mit den direkt gemessenen Oberschwingungsverluste ΔP_{el} übereinstimmt. Zu diesem Zweck ist der berechnete konstante Anteil in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

Motor	$P_{HLNo-Load}$
3 kW	14.7 W
7.5 kW	26.89 W
11 kW	40.09 W
15 kW	45.8 W

Tabelle 4.5.: Berechnete konstante Oberschwingungsverluste

Es lässt sich erkennen, dass sich der konstante Anteil der berechneten Oberschwingungsverluste gut mit den direkt gemessenen Oberschwingungsverlusten deckt und die Abweichung zwischen den berechneten und den direkt gemessenen Oberschwingungsverlusten somit aus dem lastabhängigen Anteil der berechneten Verluste resultiert. Die genaue Herleitung des Berechnungsvorgangs für den lastabhängigen Anteil der berechneten Oberschwingungsverluste ist jedoch nicht nachvollziehbar sowie diese in der Norm beschrieben wird.

4. Evaluierung der Messergebnisse

Des Weiteren werden nun die gemäß der Norm IEC 60034-2-1 berechneten Einzelverluste bei den verschiedenen Versorgungsarten miteinander verglichen, um die Auswirkungen der Umrichterspeisung erkennbar zu machen. Diese sind für den Nennpunkt ($P_{el}/P_N = 1$) in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet. Die Reibungs- und Lüftungsverluste sind hier nicht enthalten, da diese sowohl bei Netz- als auch Umrichterbetrieb gleich sind.

Einzelverluste	3 kW Motor		7.5 kW Motor	
	Netz	FU	Netz	FU
Ständerverluste $P_s / (W)$	219.9	216.9	354.7	361.6
Rotorverluste $P_r / (W)$	125.2	136.9	168.4	173.8
Eisenverluste $P_{fe} / (W)$	114.4	133.4	138.5	157.9
Lastabhängigen Zusatzverluste $P_{LL} / (W)$	24.2	26.9	99.9	103.9
Einzelverluste	11 kW Motor		15 kW Motor	
	Netz	FU	Netz	FU
Ständerverluste $P_s / (W)$	456.7	482.7	535.2	558.4
Rotorverluste $P_r / (W)$	213.2	235.7	274.3	289.6
Eisenverluste $P_{fe} / (W)$	202.4	235.7	242.6	277.7
Lastabhängigen Zusatzverluste $P_{LL} / (W)$	130.5	136.1	157.7	165.7

Tabelle 4.6.: Vergleich der Einzelverluste für $P_{el}/P_N = 1$

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass es aufgrund der Umrichterspeisung zu einer Zunahme der Stromwärmeverluste sowohl in der Statorwicklung als auch im Rotorkäfig kommt, welche durch die zusätzlichen Oberschwingungen hervorgerufen werden. Des Weiteren verursachen diese zusätzlichen Oberschwingungen eine Zunahme der Eisenverluste aufgrund erhöhter Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste im Eisen. Die Abweichung der lastabhängigen Zusatzverluste wiederum fällt verhältnismäßig gering aus.

4. Evaluierung der Messergebnisse

Die nachfolgende Tabelle enthält die prozentuelle Erhöhung der Einzelverluste im Umrichterbetrieb verglichen zum Netzbetrieb.

Einzelverluste	3 kW Motor	7.5 kW Motor	11 kW Motor	15 kW Motor
Ständerverluste P_s	-1.36 %	1.95 %	5.69 %	4.34 %
Rotorverluste P_r	9.35 %	3.21 %	10.55 %	5.58 %
Eisenverluste P_{fe}	16.61 %	14.01 %	16.45 %	14.47 %
Lastabhängigen Zusatzverluste P_{LL}	11.16 %	4 %	4.29 %	5.07 %

Tabelle 4.7.: Prozentuelle Erhöhung der Einzelverluste aufgrund der Umrichterspeisung für $P_{el}/P_N = 1$

Dabei geht deutlich hervor, dass die Eisenverluste den größten Teil der umrichterbedingten Oberschwingungsverluste ausmachen.

Im Anschluss wird noch das berechnete Oberschwingungs-Verlustverhältnis der einzelnen Maschinen betrachtet. Dieses wurde zwar für jeden eingestellten Lastpunkt bestimmt, da es jedoch nur geringe Abweichungen der Werte zwischen den einzelnen Lastpunkte gibt, wurde in der folgenden Tabelle nur der Mittelwert des Oberschwingungs-Verlustverhältnis über alle Lastpunkte aufgelistet.

Motor	r_{HL}
3 kW	13.7 %
7.5 kW	7.84 %
11 kW	19.84 %
15 kW	11.53 %

Tabelle 4.8.: Mittelwert des Oberschwingungs-Verlustverhältnis r_{HL}

4. Evaluierung der Messergebnisse

Auch hier ist ersichtlich, dass die älteren Maschinen aufgrund ihrer schlechteren Blecheigenschaften ein höheres Oberschwingungs-Verlustverhältnis aufweisen. Das Oberschwingungs-Verlustverhältnis ermöglicht somit die Analyse einer Maschine in Hinblick auf ihre Oberschwingungsverluste.

4.4. Analyse des Einzelverlustverfahrens ohne Belastungsprüfung

In diesem Abschnitt werden nun die bei dem Einzelverlustverfahren ohne Belastungsprüfung aus den Grundschwingungswerten ermittelten Parameter des Ersatzschaltbildes bei Netz- sowie Umrichterspeisung miteinander verglichen. Dazu sind die berechneten Parameter bei den verschiedenen Versorgungsarten in der nachfolgenden Tabelle für die verschiedenen Maschinen erfasst.

Parameter	3 kW Motor		7.5 kW Motor	
	Netz	FU	Netz	FU
$X_{os} / (\Omega)$	12.24	12.15	5.8	5.97
$X_m / (\Omega)$	168.47	192.03	117.75	123.27
$X'_{or} / (\Omega)$	12.24	12.15	5.8	5.97
$R_{fe} / (\Omega)$	3032.8	3159.5	2570.1	2829.8
$R'_r / (\Omega)$	7.25	7.21	1.35	1.34
Parameter	11 kW Motor		15 kW Motor	
	Netz	FU	Netz	FU
$X_{os} / (\Omega)$	3.92	3.76	2.86	2.8
$X_m / (\Omega)$	80.86	88.42	64.14	68.7
$X'_{or} / (\Omega)$	3.92	3.76	2.86	2.8
$R_{fe} / (\Omega)$	1868.2	1950	1540.3	1623.7
$R'_r / (\Omega)$	0.79	0.79	0.52	0.46

Tabelle 4.9.: Vergleich der berechneten Parameter des Ersatzschaltbildes bei Netz- und Umrichterspeisung

Obenstehende Tabelle zeigt auf, dass zwischen den berechneten Parametern bei Netz- und Umrichterbetrieb nur geringe Abweichungen existieren. Es ist somit möglich, die Parameter des Ersatzschaltbildes auch aus den Werten der 1. Harmonischen bei Umrichterspeisung zu bestimmen.

4. Evaluierung der Messergebnisse

Im Anschluss werden nun, mit Hilfe der berechneten Parameter des Ersatzschaltbildes, die Wirkungsgrade für die Grundschiebungswerte bestimmt. Dies geschieht sowohl mit den errechneten Parametern für Netz- und Umrichterbetrieb, um erkennbar zu machen, ob die geringen Abweichungen der Parameter Auswirkungen auf die Wirkungsgradbestimmung haben. Hierzu sind anschließend die Wirkungsgradkennlinien, berechnet mit den Parametern der jeweiligen Versorgung, aufgetragen.

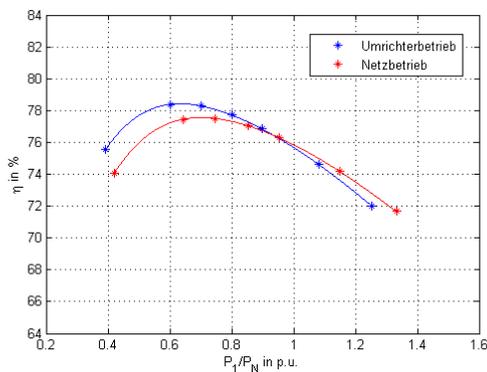


Abbildung 4.9.: 3 kW Maschine

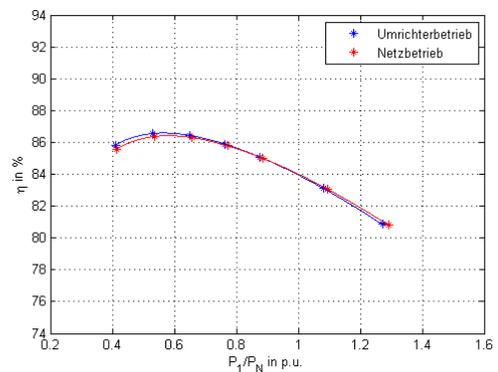


Abbildung 4.10.: 7,5 kW Maschine

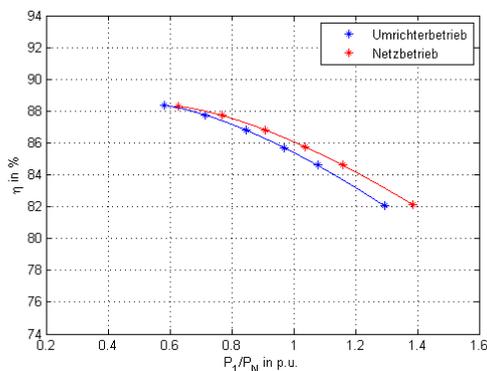


Abbildung 4.11.: 11 kW Maschine

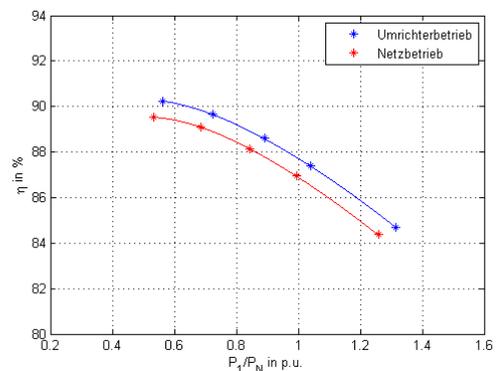


Abbildung 4.12.: 15 kW Maschine

Abbildungen 4.9. - 4.12.: Wirkungsgradbestimmung mittels dem Verfahren mit Ersatzschaltbild

4. Evaluierung der Messergebnisse

Aus diesen Abbildungen ist eine Differenz zwischen den beiden Wirkungsgradkennlinien zu erkennen, welche jedoch sehr gering ist. Um diese Differenz an einem Lastpunkt zu bestimmen, wurden die Differenz der Wirkungsgrade $\Delta\eta$ am Nennpunkt ($P_{el}/P_N = 1$) aus der interpolierten Kennlinien gebildet. Diese ist in der nachfolgenden Tabelle enthalten.

Motor	$\Delta\eta$
3 kW	+ 0.17 %
7.5 kW	+ 0.06 %
11 kW	+ 0.68 %
15 kW	- 0.83 %

Tabelle 4.10.: Wirkungsgraddifferenz für $P_{el}/P_N = 1$ $\Delta\eta = \eta_{Netz} - \eta_{FU}$

Aus dieser Tabelle ergibt sich eine Abweichung zwischen den Wirkungsgraden bei Netz- und Umrichterbetrieb von ca. $\pm 1\%$. Es ist somit möglich, die Wirkungsgrade der Grundschnungswerte für Netzbetrieb zu bestimmen, indem zunächst die Parameter des Ersatzschaltbildes aus den Grundschnungswerten bei Umrichterspeisung berechnet und im Anschluss die Wirkungsgrade bestimmt werden. Somit ergibt sich die Möglichkeit, die Wirkungsgrade für die Grundschnungswerte bei Versorgung mit Frequenzen verschieden von der Netzfrequenz (z.B. 60 Hz) mittels eines Umrichters zu bestimmen. Dadurch ist es mit Hilfe des Umrichters beispielsweise möglich, die Wirkungsgradkennlinie einer Maschine für eine 60 Hz Versorgung zu bestimmen, auch wenn keine 60 Hz Versorgung zur Verfügung steht.

Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die in Tabelle 2.3 angeführte Unsicherheit für das Verfahren mittels Ersatzschaltbild höher ist als jenes bei den direkten und indirekten Messverfahren, da dieses auf Annahmen beruht. Für den Nennpunkt ergibt sich beispielsweise eine relative Differenz der Wirkungsgrade zwischen diesem Verfahren und den direkten/indirekten Messverfahren von ca. 5%.

Literatur

- [1] Europäische Union. *Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren*. 2009.
- [2] Christian LEHRMANN, Uwe DREGER und Frank LIENESCH. "Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen". In: *Bulletin SEV/VSE* 101.11 (2010), S. 37.
- [3] Uwe DREGER, Frank LIENESCH und Ulrich ENGEL. "Bewertung der Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung von Drehstrom-Asynchronmaschinen unter Anwendung des GUM". In: *PTB MITTEILUNGEN* 113.2 (2003), S. 143–149.
- [4] Christian LEHRMANN. "Umrichter gespeiste Antriebe - Messung und Vorhersage der auftretenden Verluste und Erwärmungen unter den Aspekten des Explosionsschutzes". In: *SPS/IPC/DRIVES 2003: SPS/IPC/DRIVES/Elektrische Automatisierung - Systeme und Komponenten, Fachmesse & Kongress 25. - 27. Nov. 2003* (Nürnberg 2003), S. 641–650. URL: http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_3/explosionsschutz/Veroeffentlichungen/372/03111lehrmann.pdf (besucht am 29.05.2016).
- [5] IEC 60034 2-3. *Rotating electrical machines - Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors*. Edition 1.0, 2013-11.

- [6] IEC 60034-2-1. *Drehende elektrische Maschinen - Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge)*. (ÖVE/ÖNORM EN 60034-2-1). Ausgabe: 2008-10-01.
- [7] Harald NEUDORFER, Erich SCHMIDT und Florian MÜLLNER. "Analytische Berechnung und messtechnischer Vergleich von Zusatzverlusten stromrichter gespeister Asynchron-Traktionsmaschinen". In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 128.5 (2011), S. 142–150.
- [8] P. STUPIN. "Beanspruchung und Auswahl von Drehstrom-Asynchronmotoren bei Umrichterspeisung". In: *EMZ Elektro-Maschinen-Zentrale* (Dresden). URL: http://www.emz.de/content/emz/emz000114/Motoren_am_Umrichter.pdf (besucht am 29.05.2016).
- [9] Gernar MÜLLER und Bernd PONICK. *Grundlagen elektrischer Maschinen*. John Wiley & Sons, 2006.
- [10] Andreas BINDER. *Elektrische Maschinen und Antriebe - Grundlagen, Betriebsverhalten*. Springer, 2012.
- [11] Roland LACH. "Magnetische Geräuschemission umrichtergespeister Käfigläufer-Asynchronmaschinen". Diss. Universität Dortmund, 2005.
- [12] V. HAUSBERG und H.O. SEINSCH. "Wellenspannungen und zirkulierende Lagerströme bei umrichtergespeisten Induktionsmaschinen". In: *Electrical Engineering* 82.6 (2000), S. 313–326.
- [13] Christian LEHRMANN u. a. "Umrichtergespeiste Antriebe - Ein neuartiges Schutzkonzept für Antriebe in explosionsgefährdeten Bereichen". In: *Ex-Zeitschrift 2006, R. Stahl Schaltgeräte GmbH* (2006), S. 36–47.
- [14] Christian LEHRMANN, Frank LIENESCH und Ulrich ENGEL. "Oberschwingungsverluste und Erwärmungen umrichtergespeister Induktionsmaschinen: Bestimmung der Verluste in Abhängigkeit der Betriebsparameter". In: *Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke* 93.15 (2002), S. 9–14.
- [15] Christian LEHRMANN, Ulrich ENGEL und Frank LIENESCH. "Verluste umrichtergespeister Induktionsmaschinen in Funktion der Betriebsparameter: Nachbildung realer Umrichter mit einem Linearverstärkersystem

- zur Erfassung der Oberschwingungsverluste und der Erwärmung". In: *Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke* 94.7 (2003), S. 9–15.
- [16] G. SCHENKE. "Stromrichter gespeiste Drehstromantriebe mit Asynchronmaschinen". In: *FB Technik, Abt. E+I* (7.2008), S. 57–73. URL: http://www.antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompodium/Fachvorlesungen/Antriebstechnik/AA_5.pdf (besucht am 29.05.2016).
- [17] Andreas HEIMBROCK und Hans Otto SEINSCH. "Neue Erkenntnisse über Oberschwingungsverluste in Umrichter gespeisten Käfigläufern". In: *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik* 122.7-8 (2005), S. 274–282.
- [18] Martin DOPPELBAUER. "Die Normung elektrischer Maschinen". In: *etz Heft S2* (2007).
- [19] Wenping CAO. "Comparison of IEEE 112 and new IEC Standard 60034-2-1". In: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 24.3 (2009), S. 802–808.
- [20] M. BENHADDADI, G. OIVIER und B. DIMA. "Energy savings by means of generalization adjustable speed drive Utilization". In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2007, S. 389–392.
- [21] Aldo BOGLIETTI u. a. "Efficiency determination of converter-fed induction motors: Waiting for the IEC 60034–2–3 standard". In: *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*. IEEE. 2013, S. 230–237.
- [22] Riccardo ANTONELLO, Fabio TINAZZI und Mauro ZIGLIOTTO. "Energy efficiency measurements in IM: The non-trivial application of the norm IEC 60034-2-3: 2013". In: *Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2015 IEEE Workshop on*. IEEE. 2015, S. 248–253.
- [23] Aldo BOGLIETTI, Andrea CAVAGINO und Silvio VASCHETTO. "Induction motor EU standards for efficiency evaluation: The scenario after IEC 60034-2-1". In: *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2011, S. 2786–2791.
- [24] IEC 60034-1. *Drehende elektrische Maschinen - Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2020, modifiziert)*. (ÖVE/ÖNORM EN 60034-1). Ausgabe: 2011-04-01.

- [25] Reinhard HAGEN. "Die Berechnung der Drehstrom-Käfigläufer-Asynchronmaschine mit Berücksichtigung der Zusatzverluste bei Netz- und Umrichterbetrieb". Diss. Technische Universität Darmstadt, 2014.

A. Die Typenschilder der verwendeten Maschinen

Siemens	3~MOT				EFF 2
24 kg	IP 55	100L	IM B3	IEC/EN 60034	ThCl 155(F)
50 Hz	400/690 V	Δ/Y	60 Hz	460 V Δ	
3 kW	6.4/3.7 A		3.45 kW	6.2 A	
$\cos\varphi$ 0.82	1420/min		$\cos\varphi$ 0.83	1720/min	
380-420/660-725 V	Δ/Y		440-480 V Δ		
6.5-6.8/3.8-3.9 A			6.3-6.4 A		

Tabelle A.1.: Typenschild Siemens 3 kW Asynchronmaschine

Siemens							
3~MOT							
IEC/EN 60034		132M		IMB3		IP55	
49kg		Th.Cl. 155(F)			-20°C <= TAMB <= 40°C		
V	Hz	A	kW	$\cos\varphi$	NOM.EFF	1/min	IE-CL
400 Δ	50	14.7	7.5	0.83	88.7	1465	IE2
690 Y	50	8.5	7.5	0.83	88.7	1465	IE2
460 Δ	60	14.5	8.6	0.83	89.5	1765	IE2
460 Δ	60	12.8	7.5	0.82	89.5	1770	IE2

Tabelle A.2.: Typenschild Siemens 7.5 kW Asynchronmaschine

A. Die Typenschilder der verwendeten Maschinen

Siemens 3~MOT							
IEC/EN 60034		160M		IMB3		IP55	
71kg		Th.Cl. 155(F)			-20°C ≤ TAMB ≤ 40°C		
V	Hz	A	kW	cosφ	NOM.EFF	1/min	IE-CL
400 Δ	50	21.0	11	0.85	89.8	1470	IE2
690 Y	50	12.1	11	0.85	89.8	1470	IE2
460 Δ	60	20.5	12.6	0.85	91.0	1770	IE2
460 Δ	60	18.1	11	0.84	91.0	1775	IE2

Tabelle A.3.: Typenschild Siemens 11 kW Asynchronmaschine

Siemens 3~MOT							
IEC/EN 60034		160L		IMB3		IP55	
83kg		Th.Cl. 155(F)			-20°C ≤ TAMB ≤ 40°C		
V	Hz	A	kW	cosφ	NOM.EFF	1/min	IE-CL
400 Δ	50	28.0	15	0.85	90.6	1475	IE2
690 Y	50	16.3	15	0.85	90.6	1475	IE2
460 Δ	60	27.5	17.3	0.86	92.4	1775	IE2
460 Δ	60	24.5	15	0.84	91.0	1780	IE2

Tabelle A.4.: Typenschild Siemens 15 kW Asynchronmaschine

B. Matlab-Code

B.1. File - Auswertung

```
1 clear all; close all; clc
2
3 warning('off','all')
4
5 %Auswahlmöglichkeiten
6 wahl = 2;    %0 --> Netz
7              %1 --> FU
8              %2 --> Vergleich Netz & FU
9
10
11 %Maschinenparameter:
12 widerstand = func_Widerstand;%Widerstand und Temperatur
    der kalten Wicklung
13 maschine = struct;           %Struct für die
    Maschinenparameter
14 maschine.M_diff = 0.31;     %Offset der
    Drehmomentmesswelle
15 maschine.n_N = 1465;       %Nenndrehzahl
16 maschine.p = 2;           %Polpaarzahl
17 maschine.P_N = 7.5;       %Nennleistung in kW
18 maschine.U_N = 400;       %Nennspannung in V
19 maschine.f_N = 50;        %Nennfrequenz in Hz
```

B. Matlab-Code

```
20 maschine.I_N = 14.7;           %Nennstrom in A
21 maschine.cosq_N = 0.83;       %Nenn-Leistungsfaktor
22
23  %Daten für die Berechnung des ESB:
24 maschine.Streifaktor = 0.05;   %Verhältniss Xs_sig / X_m,
    Z0_N = X_m + Xs_sig
25 maschine.Streuverhaeltnis = 1; %Verhältniss Xs_sig /
    Xr_sig'
26 maschine.Bezugstemp = 115;    %Wärmeklasse des
    Isoliersystems
27  eps_u_N = 0.01;              %Epsilon in V für
    Interpolation der Nennspannung
28  eps_f_N = 0.1;               %Epsilon in Hz für
    Abweichung der Frequenz (25% von f_N)
29  eps_i_N = 0.1;               %Abweichung des KS_50Hz
    Stroms vom Nennstrom
30
31  %gewünschte Versorgungsart definieren (je nach
    ausgesuchter Wahl)
32  switch wahl
33      case 0
34          n = 0;
35      case 1
36          n = 1;
37      case 2
38          n = 0:1;
39  end
40
41  for wahl = n
42      %Leerlauf
43      if wahl == 0 %Netz
```

```
44     non_fit_ui_LL = [];      %löscht [i1 i2 ..]
        Messwerte
45     non_fit_pk_LL = 2;      %schneidet letzte n Werte
        weg
46 elseif wahl == 1 %FU
47     non_fit_ui_LL = [];      %löscht [i1 i2 ..]
        Messwerte
48     non_fit_pk_LL = 1;      %schneidet letzte n Werte
        weg
49 end
50
51 %Kurzschluss
52 non_fit_ui_KS50 = [];      %löscht [i1 i2 ..] Messwerte
53
54 %Leerlaufversuch
55 LL = func_Leerlaufversuch(wahl, 'effektiv', widerstand
        , non_fit_ui_LL, non_fit_pk_LL);
56 LL_h1 = func_Leerlaufversuch(wahl, 'grundwelle',
        widerstand, non_fit_ui_LL, non_fit_pk_LL);
57 %func_Plot(wahl, 'leerlauf', LL, LL_h1);
58
59 %Reibungs- und Lüftungsverluste müssen gleich sein.
        Bei
60 %Umrichterbetrieb müssen diese gleich jenem Wert sein,
        welche mit der
61 %Grundschiwingung bestimmt wurde, da bei den
        Effektivwerten noch die
62 %Oberschwingungsverluste hinzukommen
63 LL.Pfw = LL_h1.Pfw;
64
65 %Belastungsversuch
```

```
66     Bel = func_Belastungsversuch(wahl, 'effektiv',
        widerstand, LL, maschine);
67     Bel_h1 = func_Belastungsversuch(wahl, 'grundwelle',
        widerstand, LL_h1, maschine);
68     %func_Plot(wahl, 'belastung', Bel, Bel_h1);
69
70     %Nennspannung für weitere Berechnung auf den
        Mittelwert der Spannung
71     %setzten, mit welcher die Maschine im
        Belastungsversuch betrieben wurde
72     maschine.U_N = mean(Bel_h1.u_Bel);
73
74     %indirekte Wirkungsgradbestimmung
75     iAuswertung = func_indirekte_Auswertung(LL, Bel,
        maschine);
76     iAuswertung_h1 = func_indirekte_Auswertung(LL_h1,
        Bel_h1, maschine);
77     %func_Plot(wahl, 'iauswertung', iAuswertung,
        iAuswertung_h1);
78
79     %direkte Wirkungsgradbestimmung
80     dAuswertung = func_direkte_Auswertung(Bel, maschine);
81     dAuswertung_h1 = func_direkte_Auswertung(Bel_h1,
        maschine);
82     %func_Plot(wahl, 'dauswertung', dAuswertung,
        dAuswertung_h1);
83
84     %Kurzschluss variable Frequenzen
85     KS_fvar = func_Kurzschluss_fvar(wahl, 'effektiv',
        widerstand);
86     KS_fvar_h1 = func_Kurzschluss_fvar(wahl, 'grundwelle',
        widerstand);
```

```
87     %func_Plot(wahl, 'kurzschlussFvar', KS_fvar,
88             KS_fvar_h1);
89
90     %ESB Berechnung
91     ESB = func_ESB(LL, KS_fvar, Bel,maschine, widerstand,
92                 eps_u_N, eps_f_N);
93     ESB_h1 = func_ESB(LL_h1, KS_fvar_h1, Bel_h1,maschine,
94                     widerstand, eps_u_N, eps_f_N);
95     %func_Plot(wahl, 'esb', ESB, ESB_h1);
96
97     %Für direkten Vergleich zwischen Netz und FU die
98     berechneten Werte in
99     %zwei structs speichern
100    if wahl == 0 %Netz
101        netz = struct;
102        netz.LL = LL;
103        netz.LL_h1 = LL_h1;
104        netz.Bel = Bel;
105        netz.Bel_h1 = Bel_h1;
106        netz.iAuswertung = iAuswertung;
107        netz.iAuswertung_h1 = iAuswertung_h1;
108        netz.dAuswertung = dAuswertung;
109        netz.dAuswertung_h1 = dAuswertung_h1;
110        netz.ESB = ESB;
111        netz.ESB_h1 = ESB_h1;
112    elseif wahl == 1 %FU
113        FU = struct;
114        FU.LL = LL;
115        FU.LL_h1 = LL_h1;
116        FU.Bel = Bel;
117        FU.Bel_h1 = Bel_h1;
118        FU.iAuswertung = iAuswertung;
```

```
115     FU.iAuswertung_h1 = iAuswertung_h1;
116     FU.dAuswertung = dAuswertung;
117     FU.dAuswertung_h1 = dAuswertung_h1;
118     FU.ESB = ESB;
119     FU.ESB_h1 = ESB_h1;
120 end
121
122 %Wirkungsgradbestimmung laut Norm IEC 60034-2-3 (wahl
    = 2)
123 if wahl == 1 && length(n) == 2
124     func_eta_FU(maschine, netz, FU);
125 end
126
127 %Wirkungsgradbestimmung Vergleich (wahl = 2)
128 if length(n) == 2
129     wahl = 2;
130     %func_Plot(wahl, 'iauswertung', iAuswertung,
        iAuswertung_h1);
131     %func_Plot(wahl, 'dauswertung', dAuswertung,
        dAuswertung_h1);
132 end
133
134 end
```

B.2. Funktion - Belastungsversuch

```
1 function Belastung = func_Belastungsversuch(wahl, methode,
    widerstand, LL, maschine)
2
3     %% Daten auslesen:
4
```

```
5 %Belastungs-File für jeweilige Versorgung laden:
6 switch wahl
7     case 0
8         str_folder = 'Netz';
9     case 1
10        str_folder = 'FU';
11 end
12
13 temp = load([str_folder, '\Belastung.mat']);
14
15 %Feldnamen der .mat-Datei um die Ausdrücke Data1_ und
16   _Latch reduzieren
17 % wodurch später ein übersichtlicheres Auslesen der
18   Daten möglich ist
19 from_names = fieldnames(temp);
20 to_names    = from_names;
21 to_names = strrep(to_names, 'Data1_', ''); % entfernt
22   Data1_
23 to_names = strrep(to_names, '_Latch', ''); % entfernt
24   _Latch
25
26 for k = 1:numel(from_names)
27     temp.(to_names{k}) = temp.(from_names{k});
28 end
29
30 %benötigen Messwerte auslesen
31 from_names = {'U_rms_L12', 'U_rms_L23', 'U_rms_L31', '
32   U_L12_H1', ...
33   'U_L23_H1', 'U_L31_H1', 'I1', 'I2', 'I3', 'I_L1_H1', '
34   I_L2_H1', ...
35   'I_L3_H1', 'P', 'P_H1', 'Kistler_100Nm', '
36   B0_CNT0_Frequenz', 'I1_Freq'};
```

B. Matlab-Code

```
30   to_names    = {'u12v', 'u23v', 'u31v', 'u12v_h1', 'u23v_h1'  
31               , 'u31v_h1', ...  
32               'i1', 'i2', 'i3', 'i1_h1', 'i2_h1', 'i3_h1', 'P', 'P_h1',  
33               'M1', 'n', 'f'};  
34  
35   for k = 1:numel(to_names)  
36       eval_str = [to_names{k}, '=', 'temp.', from_names{k},  
37                 ';'];  
38       eval(eval_str);  
39  
40   %Wicklungstemperaturen auslesen  
41   %Wicklungstemperatur im Nennpunkt  
42   Theta_w_n = temp.Wicklungstemp(1);  
43   %Wicklungstemperatur nach letzten Messung  
44   Theta_w = temp.Wicklungstemp(end);  
45   %Mittlere Umgebungstemperatur (  
46       Kühlmitteltemperatur)  
47   Theta_u = sum(temp.Umgebungstemp)/length(temp.  
48       Umgebungstemp);  
49  
50   %Belastungs-File wieder schließen  
51   clear temp;  
52  
53   %% Spannungen und Ströme mitteln und Drehmoment  
54   korrigieren:  
55  
56   %Auswahl ob mit Effektiv-, oder Grundsicherungswerten  
57   gerechnet wird  
58   switch lower(methode)  
59       case 'effektiv'
```

```
55         u123 = [u12v u23v u31v];
56         i123 = [i1 i2 i3];
57         P_Bel = P;
58     case 'grundwelle'
59         u123 = [u12v_h1 u23v_h1 u31v_h1];
60         i123 = [i1_h1 i2_h1 i3_h1];
61         P_Bel = P_h1;
62 end
63
64 %Klemmenspannung ist der Mittelwert der
65   Leiterspannungen
66 u_Bel = mean(u123,2); %Mittelwert: (u+u2+u3)/3 für
67   jeden Messpunkt
68
69 %Leiterstrom ist der Mittelwert der Leiterströme
70 i_Bel = mean(i123,2);
71
72 %mechanische Leistung berechnen und um Offset der
73   Drehmomentmesswelle
74 % korrigieren
75 M_diff = maschine.M_diff;
76 M = (-1)*M1-M_diff; %korrigiertes Drehmoment (
77   abzüglich des Offsets)
78
79 Pmech=M.*n*2*pi/60;
80
81 %Nennzahl der Maschine
82 n_n = maschine.n_N;
```

%% Widerstandsbestimmung

```

83 Ra_kalt = widerstand.Ra_kalt;           %Kaltwiderstand
84 Theta_k = widerstand.Theta_k;         %Temperatur der
      Kalten Wicklung bei Widerstandsmessung
85 k = widerstand.k_Rs;                 %
      Temperaturkoeffizient für Kupfer
86
87 %Bestimmung des Widerstands während der Messung (warm)
88 %Widerstandswert für Bemessungslast
89 % (ist gleichzeitig auch Widerstand vor höchsten
      Last)
90 Ra_n = (Theta_w_n+k)/(Theta_k+k)*Ra_kalt;
91
92 %Widerstandswert nach Ablesen des letzten
      Messpunktes
93 Ra_l = (Theta_w+k)/(Theta_k+k)*Ra_kalt;
94
95 %lineare Lastabhängigkeit des Widerstandes
96 Ra_linear=polyfit([M(find(n_n-2<= n & n<= n_n+2))],
      M(find(n==max(n)))],[Ra_n, Ra_l],1);
97 %M(find(n_n-2<= n(a) & n(a)<= n_n+2)) --> M
      des Nennpunktes
98 %M(find(n==max(n))) --> M bei niedrigster
      Belastung
99 % +-2 U/min da Drehzahl nicht exakt
      eingestellt werden kann
100 %mit polyfit wird zwischen den beiden
      Punkten (Ra_n, Ra_l)
101 % linear interpoliert
102 %lineare Abhängigkeit:
103 % Ra = d + k*M = Ra_linear(1) + Ra_linear
      (2)*M
104

```

```

105
106     %% Pfe und Ps bestimmen
107
108     %Initialisierung
109         Ps = zeros(1,length(i_Bel));
110         Ur = zeros(1,length(i_Bel));
111         Pfe_bel = zeros(1,length(i_Bel));
112
113     cosq = P_Bel./(sqrt(3).*u_Bel.*i_Bel);
114     sinq = sqrt(1-cosq.^2);
115
116
117     for a = 1:length(i_Bel)
118         %Messung im Nennpunkt (inkl. Toleranz von +-2U/min
119             )
120         if n_n-2<= n(a) && n(a)<= n_n+2
121             Ps(a) = 1.5*Ra_n*i_Bel(a)^2;
122             Ur(a) = sqrt((u_Bel(a)-(sqrt(3)/2)*i_Bel(a)*
123                 Ra_n*cosq(a))^2 + ((sqrt(3)/2)*i_Bel(a)*
124                 Ra_n*sinq(a))^2);
125
126         %Messungen über dem Nennpunkt
127         elseif n(a) > n_n
128             Ps(a) = 1.5*Ra_n*i_Bel(a)^2;
129             Ur(a) = sqrt((u_Bel(a)-(sqrt(3)/2)*i_Bel(a)*
130                 Ra_n*cosq(a))^2 + ((sqrt(3)/2)*i_Bel(a)*
131                 Ra_n*sinq(a))^2);
132
133         %Messungen unter dem Nennpunkt
134         else
135             Ra_lin = Ra_linear(2)+Ra_linear(1)*M(a);
136             Ps(a) = 1.5*Ra_lin*i_Bel(a)^2;

```

```
132         Ur(a) = sqrt((u_Bel(a)-(sqrt(3)/2)*i_Bel(a)*
133                 Ra_lin*cosq(a))^2 + ((sqrt(3)/2)*i_Bel(a)*
134                 Ra_lin*sinq(a))^2);
135
136     end
137 end
138
139 %Pfe aus Kurve Pfe über U_LL (Leerlaufversuch) für
140     jedes Ur ermitteln
141 for a = 1:length(Ur)
142     Pfe_bel(a) = interp1(LL.u_LL,LL.Pfe_points,Ur(a),
143         'linear');
144 end
145
146 %% Pr bestimmen:
147
148 p = maschine.p;
149 s = 1-((p*n/60)./f)';
150
151 Pr = (P_Bel' - Ps - Pfe_bel).*s;
152
153 %% Pl (lastabgängige Verluste) bestimmen
154
155 Pl = Ps + Pr;
156
157 %% Lastabhängigen Zusatzverluste Pl1 bestimmen
158
159 %Berechnung der Restverluste Plr
```

```
160 Plr=P_Bel'-Pmech'-Ps-Pr-Pfe_bel-LL.Pfw;
161
162 %lineare Regressionsanalyse
163 i = length(Plr); %Anzahl der aufgenommenen
    Lastpunkte
164 % (temporäre Variable)
165
166 A=(i*sum(Plr.*(M.^2)')-sum(Plr).*sum(M.^2)) / (i*sum((
    M.^2).^2)-(sum(M.^2))^2);
167 B=sum(Plr)/i - A*sum(M.^2)/i;
168
169 %mittels Regressionsanalyse geglättete Restverluste
170 Plr_reg = A*M.^2+B;
171
172
173 %Lastabhängigen Zusatzverluste Pl1
174 Pl1 = A*M.^2;
175
176 %Korrelationskoeffizient:
177 gamma = (i*sum(Plr.*(M.^2)')-sum(Plr).*sum(M.^2)) /
    sqrt((i*sum((M.^2).^2)-(sum(M.^2))^2)*(i*sum(Plr
    .^2)-(sum(Plr).^2)));
178
179 %Werte sortieren (fürs Plot)
180 [Plr_sort y]=sort(Plr);
181 M_sort=M(y);
182
183
184 %% Structure - Rückgabeparameter:
185
186 Belastung = struct;
187 Belastung.u_Bel = u_Bel; %Klemmenspannung
```

B. Matlab-Code

```
188     Belastung.i_Bel = i_Bel;           %Leiterstrom
189     Belastung.P_Bel = P_Bel;         %aufgenommene Leistung
        im Belastungsversuch
190
191     Belastung.M_Bel = M;             %Drehmoment je
        Belastungspunkt
192     Belastung.n_Bel = n;            %Drehzahl im
        Belastungsversuch
193     Belastung.Pmech_Bel = Pmech;     %abgegebene mech
        Leistung im Belastungsversuch
194     Belastung.s = s;                %berechneter Schlupf
195
196     %Einzelverluste
197     Belastung.Pfe_bel = Pfe_bel;     %Eisenverluste
198     Belastung.Ps = Ps;              %Ständerverluste
199     Belastung.Pr = Pr;              %Läuferverluste
200
201     Belastung.Pl = Pl;               %lastabhängige
        Verluste
202     Belastung.Pl1 = Pl1;            %lastabhängige
        Zusatzverluste
203
204     Belastung.gamma = gamma;        %
        Korrelationskoeffizient der Regressionsanalyse
205
206     %Plr über M^2 - Kurve
207     Belastung.M_sort_squared = M_sort.^2; %sortiertes
        quadratisches Drehmoment
208     Belastung.Plr_sort = Plr_sort;   %sortierte
        Restverluste
209     Belastung.M_squared = M.^2;     %quadratisches
        Drehmoment
```



```
22 end
```

B.4. Funktion - Methode mittels Ersatzschaltbild

```
1 function ESB = func_ESB(LL, KS_fvar, Bel,maschine,  
2   widerstand, eps_u_N, eps_f_N)  
3  
4   %% Blindleistungen bestimmen:  
5  
6   % Werte der Leerlaufprüfung bei Bemessungsspannung  
7   % auslesen  
8   N = abs(LL.u_ausgleich -maschine.U_N) < eps_u_N; %  
9   % alle Werte um den Nennpunkt (logische Indizierung)  
10  u_LL_N = LL.u_ausgleich(N);  
11  u_LL_N = u_LL_N(ceil(length(u_LL_N)/2)); %mit ceil  
12  % mittleren Punkt nehmen  
13  
14  i_LL_N = LL.i_ausgleich(N);  
15  i_LL_N = i_LL_N(ceil(length(u_LL_N)/2));  
16  i_LL_N = i_LL_N/sqrt(3); %Strangstrom  
17  
18  P_LL_N = LL.P_ausgleich(N);  
19  P_LL_N = P_LL_N(ceil(length(u_LL_N)/2));  
20  
21  %Blindleistung aus Leerlaufprüfung bei  
22  % Bemessungsspannung  
23  Q_LL = sqrt((3*u_LL_N*i_LL_N)^2 - P_LL_N^2);  
24  
25  %Werte aus der Prüfung mit festgebremsten Läufer bei  
26  % verminderter
```

```

22  %auslesen
23  u_KS = KS_fvar.u_KS;
24  i_KS = KS_fvar.i_KS./sqrt(3);  %Strangstrom
25  P_KS = KS_fvar.P_KS;
26  freq = KS_fvar.freq;
27
28  %Blindleistung aus Prüfung mit festgebremsten Läufer
    bestimmen
29  Q_KS = sqrt((3*u_KS.*i_KS).^2 - P_KS.^2);
30
31
32  %% Reaktanzen bestimmen
33
34  %Anfangswerte berechnen
35  Z0_N = u_LL_N/i_LL_N;
36  X_m = [Z0_N/(1 + maschine.Streufaktor), 0];
37  Xs_sig = [maschine.Streufaktor*X_m(1), 0];
38
39  %iterative Berechnung
40  F = abs(freq - 0.25*maschine.f_N) < eps_f_N;  %Index
    des Messpunkt wo die eingestellte Frequenz 25% der
    Nennfrequenz entspricht
41
42  bedingung = 1;
43  while( bedingung == 1 )
44
45      Xs_sig(2) = maschine.f_N/freq(F)*Q_KS(F)/(3*i_KS(F)
        )^2.*(1 + maschine.Streuverhaeltnis + Xs_sig(1)
        /X_m(1))* (maschine.Streuverhaeltnis + Xs_sig
        (1)/X_m(1));
46      X_m(2) = 3*u_LL_N^2/(Q_LL - 3*i_LL_N^2*Xs_sig(1))
        *1/((1 + Xs_sig(1)/X_m(1))^2);

```

```
47
48     bed1 = abs(1 - Xs_sig(1)/Xs_sig(2));
49     bed2 = abs(1 - X_m(1)/X_m(2));
50
51     Xs_sig(1) = Xs_sig(2);
52     X_m(1) = X_m(2);
53
54     %Überprüfen ob neue Werte um weniger als 0.1% von
55     den vorherigen abweichen
56     if (bed1 < 0.001 && bed2 < 0.001)
57         bedingung = 0;
58         Xs_sig = Xs_sig(1);
59         X_m = X_m(1);
60         Xr_sig = Xs_sig/maschine.Streuverhaeltnis;
61     end
62
63     end
64
65     %% Eisenverlustwiderstand
66
67     %Eisenverluste bei Bemessungsspannung aus der Kurve
68     P_fe über U0 des
69     %Leerlaufversuches bestimmen
70     Pfe_LL_N = LL.Pfe_line(N);
71     Pfe_LL_N = Pfe_LL_N(ceil(length(Pfe_LL_N)/2));
72
73     %Eisenverlustwiderstand berechnen
74     Rfe = 3*u_LL_N^2/Pfe_LL_N*1/((1 + Xs_sig/X_m)^2);
75
76     %% Läuferwiderstand
```

```
77 %Strangwiderstände (warme Wicklung) aus der Prüfung
    mit festgebremsten Läufer bei verminderter
78 %Frequenz und jene bei Bemessungsfrequenz
    zusammenfügen
79 Rs_w = KS_fvar.Rs_w;
80
81 %unkorrigierten Läuferwiderstand berechnen
82 Rr_lr = (P_KS./(3.*i_KS.^2) - Rs_w).*((1 + Xr_sig/X_m)
    ^2) - (1/maschine.Streuverhaeltnis)^2.*((Xs_sig.*
    freq./maschine.f_N).^2)./Rfe;
83
84 %Temperaturkorrektur des Läuferwiderstandes
85 alpha_r = 1/widerstand.k_Rr;
86 Rr_lr_k = Rr_lr.*(1 + alpha_r*maschine.Bezugstemp)./(1
    + alpha_r.*KS_fvar.Theta_w);
87
88 %Rr_lr_k über Frequenz - Kurve zur Bestimmung des auf
    den Ständer
89 %bezogenen Läuferwiderstandes
90
91 %Rr ergibt sich aus dem Schnittpunkt mit Frequenz
    = 0
92 Rr = interp1(freq, Rr_lr_k, 0, 'linear','extrap');
93
94 %Kurvenverlauf interpolieren
95 f_line_Rr = linspace(0, max(freq), 10000);
96 Rr_lr_line = interp1([freq; 0], [Rr_lr_k; Rr],
    f_line_Rr, 'spline');
97
98
99 %% Bestimmung der lastabhängigen Impedanzen
100
```

```
101 %Berechnung der Schlupfwerte für die gleichen
      eingestellten Lastpunkte
102 %des Belastungsversuchs
103 s = 1-((maschine.p*Bel.n_Bel/60)./maschine.f_N);
104
105 %Bestimmung der schlupfabhängigen Impedanz- und
106 %Addmittanz-Zwischenwerte
107 Zr = sqrt((Rr./s).^2 + Xr_sig^2);
108 Yg = sqrt(((Rr./s)./(Zr.^2) + 1/Rfe).^2 + (Xr_sig./(Zr
      .^2) + 1/X_m).^2);
109 Rg = ((Rr./s)./(Zr.^2) + 1/Rfe)./(Yg.^2);
110 Xg = (Xr_sig./(Zr.^2) + 1/X_m)./(Yg.^2);
111
112 %Ständer-Strangwiderstand auf die Bezugstemperatur
      korrigieren
113 Rs_bez = (maschine.Bezugstemp+widerstand.k_Rs)/(
      widerstand.Theta_k+widerstand.k_Rs)*widerstand.
      Rs_kalt;
114
115 %Die resultierenden Impedanzwerte ermitteln
116 R = Rs_bez + Rg;
117 X = Xs_sig + Xg;
118 Z = sqrt(R.^2 + X.^2);
119
120
121 %% Ströme und Verluste ermitteln
122
123 %Ströme für die einzelnen Lastpunkte bestimmen
124 Is =maschine.U_N./Z;
125 Ir = Is.*1./(Yg.*Zr);
126
127 %Einzelverluste berechnen
```

B. Matlab-Code

```
128     P_d = 3.*Ir.^2.*Rr./s;
129     Pfe = 3.*Is.^2.*(1./(Yg.^2*Rfe));
130     Ps = 3.*Is.^2.*Rs_bez;
131     Pr = 3.*Ir.^2.*Rr;
132     Pfw = LL.Pfw;
133
134     %Lastabhängige Zusatzverluste bestimmen
135     N_n = (maschine.n_N-2 <= Bel.n_Bel & Bel.n_Bel<=
          maschine.n_N+2); %Index des Nennpunktes, um Ir im
           Nennpunkt zu erhalten
136     P1l_n = 3*maschine.U_N*maschine.I_N*maschine.cosq_N
           *(0.025-0.005*log10(maschine.P_N)); %P1l bei
           Bemessungsbelastung
137     P1l = P1l_n.*(Ir./Ir(N_n)).^2; %Ir(N_n) entspricht
           dem Läufer-Strangstrom im Nennpunkt
138
139     %Die Gesamtverluste entsprechen der Summe der
           Einzelverluste
140     Pt = Ps + Pfe + Pr + P1l + Pfw;
141
142
143     %% Wirkungsgradbestimmung
144
145     %aufgenommene und abgegebene Leistung bestimmen
146     P1 = 3*Is.^2.*R;
147     P2 = P1 - Pt;
148
149     %Wirkungsgrade berechnen
150     eta = P2./P1.*100;
151
152     %eta über P/P_N - Kurve
153     P_pu = P1./(maschine.P_N*1000);
```

```
154
155 P_ESB_line = linspace(min(P_pu), max(P_pu), 100000);
156 eta_line = interp1(P_pu, eta, P_ESB_line, 'spline'); %
      Interpolation
157
158
159 %% Structure - Rückgabeparameter:
160
161 ESB = struct;
162
163 %ESB - Parameter
164 ESB.Xs_sig = Xs_sig; %Ständer-Streureaktanz
165 ESB.X_m = X_m; %Hauptreaktanz
166 ESB.Rfe = Rfe; %Eisenverlustwiderstand
167 ESB.Rr = Rr; %Läuferwiderstand
168 ESB.Xr_sig = Xr_sig; %Läufer-Streureaktanz
169
170 ESB.f_points = freq; %eingestellte Frequenzpunkte
171
172 %Läuferwiderstand über Frequenz - Kurve
173 ESB.Rr_lr_k = Rr_lr_k; %korrigierter
      Läuferwiderstände je Frequenz
174 ESB.Rr_lr_line = Rr_lr_line; %interpolierte
      Läuferwiderstände
175 ESB.f_line_Rr = f_line_Rr; %interpolierte Frequenz
176
177 %Wirkungsgradkennlinie
178 ESB.eta = eta; %berechnete
      Wirkungsgrade
179 ESB.P_pu = P_pu; %Leistung in p.u.
180 ESB.P_ESB_line = P_ESB_line; %%Wirkungsgrade
      interpoliert
```

B. Matlab-Code

```
181     ESB.eta_line = eta_line;           %Leistung (p.u.)
        interpoliert
182
183     %Verluste und aufgenommene/abgegebene Leistungen
184     ESB.P_d = P_d; %zum Läufer übertragene
        Luftspaltleistung
185     ESB.Pfe = Pfe; %Eisenverluste
186     ESB.Ps = Ps; %Ständer-Wicklungsverluste
187     ESB.Pr = Pr; %Läufer-wicklungsverluste
188     ESB.P11 = P11; %lastabhängige Zusatzverluste
189     ESB.Pt = Pt; %Gesamtverluste
190     ESB.P1 = P1; %aufgenommene Leistung
191     ESB.P2 = P2; %abgegebene Leistung
192
193 end
```

B.5. Funktion - Wirkungsgradbestimmung gemäß IEC 60034-2-3

```
1 function func_eta_FU(maschine, netz, FU)
2
3
4 %%-----
5 %%Berechnungen mit den Effektivwerten
6 %%-----
7
8
9 %% Lastabhängige Zusatzverluste bei Netzbetrieb mit
        korrigierten Pfw
10
```

```
11 Pfw_k = netz.LL.Pfw *(1-netz.Bel.s).^2.5); %korrigierten
    Reibungs- und Lüftungsverluste
12
13 Plr = netz.Bel.P_Bel - netz.Bel.Pmech_Bel - netz.Bel.Ps' -
    netz.Bel.Pr' - netz.Bel.Pfe_bel' - Pfw_k'; %
    Restverluste bei Netzspeisung
14
15 %lineare Regressionsanalyse
16     i = length(Plr); %Anzahl der aufgenommenen
    Lastpunkte
17
18     A=(i*sum(Plr.*(netz.Bel.M_Bel.^2))-sum(Plr).*sum(netz.
    Bel.M_Bel.^2)) / (i*sum((netz.Bel.M_Bel.^2).^2)-(
    sum(netz.Bel.M_Bel.^2))^2);
19
20     gamma_netz = (i*sum(Plr.*(netz.Bel.M_Bel.^2))-sum(Plr)
    .*sum(netz.Bel.M_Bel.^2)) / sqrt((i*sum((netz.Bel.
    M_Bel.^2).^2)-(sum(netz.Bel.M_Bel.^2))^2)*(i*sum(
    Plr.^2)-(sum(Plr).^2))); %Korrelationskoeffizient
    bei Netzspeisung
21
22 %Lastabhängigen Zusatzverluste Pll bei Netzspeisung
23 Pll = A*netz.Bel.M_Bel.^2;
24
25
26 %% Elektrische Leistung auf die gleichen Lastpunkte
    interpolieren
27
28 Pmech_min = min([netz.Bel.Pmech_Bel; FU.Bel.Pmech_Bel]);
29 Pmech_max = max([netz.Bel.Pmech_Bel; FU.Bel.Pmech_Bel]);
30
31 %Kurvenverlauf bei Netzspeisung interpolieren
```

```
32 Pmech_netz_line = linspace(Pmech_min, Pmech_max, 100000);
33 netz_Pel_Pmech_line = interp1(netz.Bel.Pmech_Bel, netz.Bel
    .P_Bel, Pmech_netz_line, 'spline','extrap');
34
35 %Kurvenverlauf bei Umrichterspeisung interpolieren
36 Pmech_FU_line = linspace(Pmech_min, Pmech_max, 100000);
37 FU_Pel_Pmech_line = interp1(FU.Bel.Pmech_Bel, FU.Bel.P_Bel
    , Pmech_FU_line, 'spline','extrap');
38
39 %elektrische Leistung bei Umrichterspeisung auf die
    gleichen Lastpunkte wie
40 %bei Netzspeisung interpolieren
41 FU_Pel_Pmech_netz = interp1(Pmech_FU_line,
    FU_Pel_Pmech_line, netz.Bel.Pmech_Bel, 'spline','extrap
    '); %elektrische Leistung bei Umrichterspeisung bei den
    gleichen Lastpunkten wie Netzspeisung
42
43
44 %Kurve P_el über P_mech
45 figure
46 plot(netz.Bel.Pmech_Bel, netz.Bel.P_Bel, 'r*', FU.Bel.
    Pmech_Bel, FU.Bel.P_Bel, 'b*')
47 hold on
48 plot(netz.Bel.Pmech_Bel, FU_Pel_Pmech_netz, 'g*')
49 plot(Pmech_netz_line, netz_Pel_Pmech_line, 'r:')
50 plot(Pmech_FU_line, FU_Pel_Pmech_line, 'b:')
51 xlabel('P_{mech}_in_W')
52 ylabel('P_{el}_in_W')
53 grid on
54 legend('Messpunkte_bei_Netzbetrieb', 'Messpunkte_bei_
    Umrichterbetrieb', 'interpolierte_Lastpunkte')
55 title('Effektivwerte')
```

```

56
57
58 %% Lastabhängige Zusatzverluste bei Umrichterbetrieb
59
60 PlrC = FU_Pel_Pmech_netz - netz.Bel.Pmech_Bel - netz.Bel.
    Ps' - netz.Bel.Pr' - netz.Bel.Pfe_bel' - Pfw_k'; %
    Restverluste bei Umrichterspeisung
61
62 %lineare Regressionsanalyse
63     i = length(PlrC); %Anzahl der aufgenommenen
        Lastpunkte
64
65     A_C=(i*sum(PlrC.*(FU.Bel.M_Bel.^2))-sum(PlrC).*sum(FU.
        Bel.M_Bel.^2)) / (i*sum((FU.Bel.M_Bel.^2).^2)-(sum(
        FU.Bel.M_Bel.^2))^2);
66
67     gamma_FU = (i*sum(PlrC.*(FU.Bel.M_Bel.^2))-sum(PlrC).*
        sum(FU.Bel.M_Bel.^2)) / sqrt((i*sum((FU.Bel.M_Bel
        .^2).^2)-(sum(FU.Bel.M_Bel.^2))^2)*(i*sum(PlrC.^2)
        -(sum(PlrC).^2))); %Korrelationskoeffizient bei
        Umrichterspeisung
68
69 %Lastabhängigen Zusatzverluste Pll bei Umrichterspeisung
70 PllC = A_C*netz.Bel.M_Bel.^2;
71
72
73 %Vergleich der Pll zwischen Netz- und Umrichterbetrieb
74 figure
75 plot(netz.Bel.M_Bel.^2,Pll,'b-')
76 hold on
77 plot(netz.Bel.M_Bel.^2,PllC,'r-')
78 ylabel('P_{LL}_in_W')

```

```
79 xlabel('M^2_in_Nm^2')
80 legend('Funktion_von_P_{LL}_bei_Netzbetrieb','Funktion_von
      _P_{LL}_bei_Umrichterbetrieb')
81 grid on
82 title('Effektivwerte')
83
84
85 %% Lastabhängige Oberschwingungsverluste
86
87 P_HL_Load = P11C - P11;
88
89
90 %% Konstante Oberschwingungsverluste
91
92 %Pk über u_LL - Kurve bei Netzbetrieb interpolieren
93 u_LL_line_netz = linspace(min(netz.LL_h1.u_LL), max(netz.
      LL_h1.u_LL), 100000);
94 Pk_line_netz = interp1(netz.LL_h1.u_LL, netz.LL.Pk_points,
      u_LL_line_netz, 'spline'); %interpolation
95
96 %Pk über u_LL - Kurve bei Umrichterbetrieb interpolieren
97 u_LL_line_FU = linspace(min(FU.LL_h1.u_LL), max(FU.LL_h1.
      u_LL), 100000);
98 Pk_line_FU = interp1(FU.LL_h1.u_LL, FU.LL.Pk_points,
      u_LL_line_FU, 'spline'); %interpolation
99
100 %Vergleich der Pk zwischen Netz- und Umrichterbetrieb
101 figure
102 plot(netz.LL_h1.u_LL, netz.LL.Pk_points, 'b*')
103 hold on
104 plot(FU.LL_h1.u_LL, FU.LL.Pk_points, 'r*')
105 plot(u_LL_line_netz, Pk_line_netz, 'b-')
```

```
106 plot(u_LL_line_FU,Pk_line_FU,'r-')
107 grid on
108 xlabel('Grundschwingung_der_Leerlaufspannung_in_V')
109 ylabel('P_k_in_W')
110 legend('Messpunkte_von_P_k_bei_Netzbetrieb','Messpunkte_
        von_P_k_bei_Umrichterbetrieb')
111 title('Effektivwerte')
112
113 %Mittelwert der Spannung bei welcher die Maschine in den
114 %Belastungsversuchen betrieben wurde
115 u_Bel = 0.5*(mean(FU.Bel_h1.u_Bel) + mean(netz.Bel_h1.
        u_Bel));
116
117 %Konstanten Verluste bei u_Bel herauslesen
118 Pk_netz = interp1(netz.LL_h1.u_LL, netz.LL.Pk_points,
        u_Bel, 'spline');
119 Pk_FU = interp1(FU.LL_h1.u_LL, FU.LL.Pk_points, u_Bel, '
        spline');
120
121 %Bestimmung der konstanten Oberschwingungsverluste
122 P_HL_NoLoad = Pk_FU - Pk_netz;
123
124
125 %% Gesamte Oberschwingungsverluste
126
127 P_HL = P_HL_NoLoad + P_HL_Load;
128
129
130 %% Wirkungsgradbestimmung
131
132 %Gesamtverluste bei Umrichterspeisung
133 P_TC = netz.iAuswertung.Pt' + P_HL;
```

B. Matlab-Code

```
134
135 %Wirkungsgradbestimmung
136 eta_FU = netz.Bel.Pmech_Bel./(netz.Bel.Pmech_Bel+P_TC)
      *100;
137
138 %Bestimmung des Oberschwingungs-Verlustverhältnisses
139 r_HL = P_HL./netz.iAuswertung.Pt'*100;
140
141
142
143
144 %%-----
145 %%Berechnungen mit der Grundschiwingung
146 %%-----
147
148
149 %% Lastabhängige Zusatzverluste bei Umrichterbetrieb mit
      korrigierten Pfw
150
151 Plr_h1 = netz.Bel_h1.P_Bel - netz.Bel_h1.Pmech_Bel - netz.
      Bel_h1.Ps' - netz.Bel_h1.Pr' - netz.Bel_h1.Pfe_bel' -
      Pfw_k'; %Restverluste bei Netzspeisung
152
153 %lineare Regressionsanalyse
154 i = length(Plr_h1); %Anzahl der aufgenommenen
      Lastpunkte
155
156 A_h1=(i*sum(Plr_h1.*(netz.Bel_h1.M_Bel.^2))-sum(Plr_h1
      ).*sum(netz.Bel_h1.M_Bel.^2)) / (i*sum((netz.Bel_h1
      .M_Bel.^2).^2)-(sum(netz.Bel_h1.M_Bel.^2))^2);
157
```

```
158     gamma_netz_h1 = (i*sum(Plr_h1.*(netz.Bel_h1.M_Bel.^2))
    -sum(Plr_h1).*sum(netz.Bel_h1.M_Bel.^2)) / sqrt((i*
    sum((netz.Bel_h1.M_Bel.^2).^2)-(sum(netz.Bel_h1.
    M_Bel.^2))^2)*(i*sum(Plr_h1.^2)-(sum(Plr_h1).^2)));
    %Korrelationskoeffizient bei Netzspeisung
159
160 %Lastabhängigen Zusatzverluste Pll bei Netzspeisung
161 Pll_h1 = A_h1*netz.Bel_h1.M_Bel.^2;
162
163
164 %% Elektrische Leistung auf die gleichen Lastpunkte
    interpolieren
165
166 Pmech_min_h1 = min([netz.Bel_h1.Pmech_Bel; FU.Bel_h1.
    Pmech_Bel]);
167 Pmech_max_h1 = max([netz.Bel_h1.Pmech_Bel; FU.Bel_h1.
    Pmech_Bel]);
168
169 %Kurvenverlauf bei Netzspeisung interpolieren
170 Pmech_netz_line_h1 = linspace(Pmech_min_h1, Pmech_max_h1,
    100000);
171 netz_Pel_Pmech_line_h1 = interp1(netz.Bel_h1.Pmech_Bel,
    netz.Bel_h1.P_Bel, Pmech_netz_line_h1, 'spline','extrap
    ');
172
173 %Kurvenverlauf bei Umrichterspeisung interpolieren
174 Pmech_FU_line_h1 = linspace(Pmech_min_h1, Pmech_max_h1,
    100000);
175 FU_Pel_Pmech_line_h1 = interp1(FU.Bel_h1.Pmech_Bel, FU.
    Bel_h1.P_Bel, Pmech_FU_line_h1, 'spline','extrap');
176
```

B. Matlab-Code

```
177 %elektrische Leistung bei Umrichterspeisung auf die
      gleichen Lastpunkte wie
178 %bei Netzspeisung interpolieren
179 FU_Pel_Pmech_netz_h1 = interp1(Pmech_FU_line_h1,
      FU_Pel_Pmech_line_h1, netz.Bel_h1.Pmech_Bel, 'spline',
      'extrap'); %elektrische Leistung bei Umrichterspeisung
      bei den gleichen Lastpunkten wie Netzspeisung
180
181
182 % %Kurve P_el über P_mech
183 % figure
184 % plot(netz.Bel_h1.Pmech_Bel,netz.Bel_h1.P_Bel,'r*',FU.
      Bel_h1.Pmech_Bel,FU.Bel_h1.P_Bel,'b*')
185 % hold on
186 % plot(netz.Bel_h1.Pmech_Bel,FU_Pel_Pmech_netz_h1,'g*')
187 % plot(Pmech_netz_line_h1,netz_Pel_Pmech_line_h1,'r:')
188 % plot(Pmech_FU_line_h1,FU_Pel_Pmech_line_h1,'b:')
189 % xlabel('P_{mech} in W')
190 % ylabel('P_{el} in W')
191 % grid on
192 % legend('Messpunkte bei Netzbetrieb','Messpunkte bei
      Umrichterbetrieb', 'interpolierte Lastpunkte')
193 % title('Werte der 1. Harmonischen')
194
195
196 %% Lastabhängige Zusatzverluste bei Umrichterbetrieb
197
198 PlrC_h1 = FU_Pel_Pmech_netz_h1 - netz.Bel_h1.Pmech_Bel -
      netz.Bel_h1.Ps' - netz.Bel_h1.Pr' - netz.Bel_h1.Pfe_bel
      ' - Pfw_k'; %Restverluste bei Umrichterspeisung
199
200 %lineare Regressionsanalyse
```

B. Matlab-Code

```
201     i = length(PlrC_h1);      %Anzahl der aufgenommenen
                                Lastpunkte
202
203     A_C_h1=(i*sum(PlrC_h1.*(FU.Bel_h1.M_Bel.^2))-sum(
                                PlrC_h1).*sum(FU.Bel_h1.M_Bel.^2)) / (i*sum((FU.
                                Bel_h1.M_Bel.^2).^2)-(sum(FU.Bel_h1.M_Bel.^2))^2);
204
205     gamma_FU_h1 = (i*sum(PlrC_h1.*(FU.Bel_h1.M_Bel.^2))-
                                sum(PlrC_h1).*sum(FU.Bel_h1.M_Bel.^2)) / sqrt((i*
                                sum((FU.Bel_h1.M_Bel.^2).^2)-(sum(FU.Bel_h1.M_Bel
                                .^2))^2)*(i*sum(PlrC_h1.^2)-(sum(PlrC_h1).^2)));
                                %Korrelationskoeffizient bei Umrichterspeisung1
206
207 %Lastabhängigen Zusatzverluste P11 bei Umrichterspeisung
208 P11C_h1 = A_C_h1*netz.Bel_h1.M_Bel.^2;
209
210
211 % %Vergleich der P11 zwischen Netz- und Umrichterbetrieb
212 % figure
213 % plot(netz.Bel_h1.M_Bel.^2,P11_h1,'b-')
214 % hold on
215 % plot(netz.Bel_h1.M_Bel.^2,P11C_h1,'r-')
216 % ylabel('P_{LL} in W')
217 % xlabel('M^2 in Nm^2')
218 % legend('Funktion von P_{LL} bei Netzbetrieb','Funktion
                                von P_{LL} bei Umrichterbetrieb')
219 % grid on
220 % title('Werte der 1. Harmonischen')
221
222
223 %% Lastabhängige Oberschwingungsverluste
224
```

B. Matlab-Code

```
225 P_HL_Load_h1 = P11C_h1 - P11_h1;
226
227
228 %% Konstante Oberschwingungsverluste
229
230 %Pk über u_LL - Kurve bei Netzbetrieb interpolieren
231 u_LL_line_netz_h1 = linspace(min(netz.LL_h1.u_LL), max(
    netz.LL_h1.u_LL), 100000);
232 Pk_line_netz_h1 = interp1(netz.LL_h1.u_LL, netz.LL_h1.
    Pk_points, u_LL_line_netz_h1, 'spline'); %interpolation
233
234 %Pk über u_LL - Kurve bei Umrichterbetrieb interpolieren
235 u_LL_line_FU_h1 = linspace(min(FU.LL_h1.u_LL), max(FU.
    LL_h1.u_LL), 100000);
236 Pk_line_FU_h1 = interp1(FU.LL_h1.u_LL, FU.LL_h1.Pk_points,
    u_LL_line_FU_h1, 'spline'); %interpolation
237
238 %%Vergleich der Pk zwischen Netz- und Umrichterbetrieb
239 % figure
240 % plot(netz.LL_h1.u_LL, netz.LL_h1.Pk_points,'b*')
241 % hold on
242 % plot(FU.LL_h1.u_LL, FU.LL_h1.Pk_points,'r*')
243 % plot(u_LL_line_netz_h1, Pk_line_netz_h1, 'b-')
244 % plot(u_LL_line_FU_h1,Pk_line_FU_h1,'r-')
245 % grid on
246 % xlabel('Grundschwungung der Leerlaufspannung in V')
247 % ylabel('P_k in W')
248 % legend('Messpunkte von P_k bei Netzbetrieb','Messpunkte
    von P_k bei Umrichterbetrieb')
249 % title('Werte der 1. Harmonischen')
250
251 %Mittelwert der Spannung bei welcher die Maschine in den
```

B. Matlab-Code

```
252 %Belastungsversuchen betrieben wurde
253 u_Bel_h1 = 0.5*(mean(FU.Bel_h1.u_Bel) + mean(netz.Bel_h1.
    u_Bel));
254
255 %Konstanten Verluste bei u_Bel_h1 herauslesen
256 Pk_netz_h1 = interp1(netz.LL_h1.u_LL, netz.LL_h1.Pk_points
    , u_Bel_h1, 'spline');
257 Pk_FU_h1 = interp1(FU.LL_h1.u_LL, FU.LL_h1.Pk_points,
    u_Bel_h1, 'spline');
258
259 %Bestimmung der konstanten Oberschwingungsverluste
260 P_HL_NoLoad_h1 = Pk_FU_h1 - Pk_netz_h1;
261
262
263 %% Gesamte Oberschwingungsverluste
264
265 P_HL_h1 = P_HL_NoLoad_h1 + P_HL_Load_h1;
266
267
268 %% Wirkungsgradbestimmung
269
270 %Gesamtverluste bei Umrichterspeisung
271 P_TC_h1 = netz.iAuswertung_h1.Pt' + P_HL_h1;
272
273 %Wirkungsgradbestimmung
274 eta_FU_h1 = netz.Bel_h1.Pmech_Bel./(netz.Bel_h1.Pmech_Bel+
    P_TC_h1)*100;
275
276 %Bestimmung des Oberschwingungs-Verlustverhältnisses
277 r_HL_h1 = P_HL_h1./netz.iAuswertung_h1.Pt'*100;
278
279
```

B. Matlab-Code

```
280
281
282 %% Wirkungsgrade plotten
283
284 %Effektivwerte
285 P_pu_FU = FU_Pel_Pmech_netz./(maschine.P_N*1000); %eta
    über P/P_N - Kurve
286
287 P_Bel_line_FU = linspace(min(P_pu_FU), max(P_pu_FU),
    100000);
288 eta_line_FU = interp1(P_pu_FU, eta_FU, P_Bel_line_FU, '
    spline'); %interpolation
289
290 %Grundschwingungswerte
291 P_pu_FU_h1 = FU_Pel_Pmech_netz_h1./(maschine.P_N*1000); %
    eta über P/P_N - Kurve
292
293 P_Bel_line_FU_h1 = linspace(min(P_pu_FU_h1), max(
    P_pu_FU_h1), 100000);
294 eta_line_FU_h1 = interp1(P_pu_FU_h1, eta_FU_h1,
    P_Bel_line_FU_h1, 'spline'); %interpolation
295
296 %Wirkungsgrade plotten
297 figure
298 plot(P_pu_FU, eta_FU, 'b*')
299 hold on
300 plot(P_pu_FU_h1, eta_FU_h1, 'r*')
301 plot(netz.iAuswertung.P_pu_points, netz.iAuswertung.
    eta_points, 'g*')
302 plot(netz.iAuswertung_h1.P_pu_points, netz.iAuswertung_h1.
    eta_points, 'm*')
303 plot(P_Bel_line_FU, eta_line_FU, 'b-')
```

```
304 plot(P_Bel_line_FU_h1, eta_line_FU_h1, 'r-')
305 plot(netz.iAuswertung.P_Bel_line, netz.iAuswertung.eta_line
      , 'g-')
306 plot(netz.iAuswertung_h1.P_Bel_line, netz.iAuswertung_h1.
      eta_line, 'g-')
307 xlim([0.4 1.6])
308 ylim([80 95])
309 grid on
310 title('indirekte_Wirkungsgradbestimmung_-_Vergleich_
      Umrichter_mit_Netz')
311 xlabel('P_{1C}/P_{N_in_p.u.}')
312 ylabel('\eta_in_%')
313 legend('Effektivwerte_-_Umrichterbetrieb', 'Werte_der_1.
      Harmonischen_-_Umrichterbetrieb', 'Effektivwerte_-_
      Netzbetrieb', 'Werte_der_1. Harmonischen_-_Netzbetrieb'
      )
314
315
316 end
```

B.6. Funktion - indirekte Auswertung

```
1 function iAuswertung = func_indirekte_Auswertung(LL, Bel,
      maschine)
2
3     %% Gesamtverluste Pt
4     Pt = (LL.Pfw + Bel.Pfe_bel) + Bel.Pl + Bel.Pl1';
5
6
7     %% Wirkungsgrad bestimmen
8     eta = (Bel.P_Bel' - Pt) ./ Bel.P_Bel' * 100;
```

```
9
10 %eta über P/P_N - Kurve
11 P_pu = Bel.P_Bel./(maschine.P_N*1000);
12
13 P_Bel_line = linspace(min(P_pu), max(P_pu), 100000);
14 eta_line = interp1(P_pu, eta, P_Bel_line, 'spline'); %
    Interpolation
15
16
17 %% Structure - Rückgabeparameter:
18
19 iAuswertung = struct;
20 iAuswertung.Pt = Pt; %
    Gesamtverluste
21 iAuswertung.eta_points = eta; %berechnete
    Wirkungsgrade
22 iAuswertung.P_pu_points = P_pu; %Leistung in p
    .u.
23
24 iAuswertung.P_Bel_line = P_Bel_line; %Wirkungsgrade
    interpoliert
25 iAuswertung.eta_line = eta_line; %Leistung (p.u
    .) interpoliert
26
27 end
```

B.7. Funktion - Kurzschlussversuch bei verminderter Frequenz

```
1 function KS_fvar = func_Kurzschluss_fvar(wahl, methode,
    widerstand)
```

```
2
3 %% Daten auslesen:
4
5 %File für jeweilige Versorgung laden:
6 switch wahl
7     case 0
8         str_folder = 'Netz';
9     case 1
10        str_folder = 'FU';
11 end
12
13 temp = load([str_folder, '\KS_fvar.mat']);
14
15 %Feldnamen der .mat-Datei um die Ausdrücke Data1_ und
16   _Latch reduzieren
17 % wodurch später ein übersichtlicheres Auslesen der
18   Daten möglich ist
19 from_names = fieldnames(temp);
20 to_names    = from_names;
21 to_names = strrep(to_names, 'Data1_', ''); % entfernt
22   Data1_
23 to_names = strrep(to_names, '_Latch', ''); % entfernt
24   _Latch
25
26 for k = 1:numel(from_names)
27     temp.(to_names{k}) = temp.(from_names{k});
28 end
29
30 %benötigen Messwerte auslesen
31 from_names = {'U_rms_L12', 'U_rms_L23', 'U_rms_L31', '
32   U_L12_H1', ...
```

```

28     'U_L23_H1', 'U_L31_H1', 'I1', 'I2', 'I3', 'I_L1_H1', '
        I_L2_H1', ...
29     'I_L3_H1', 'P', 'P_H1', 'Kistler_100Nm', '
        B0_CNT0_Frequenz', 'I1_Freq'};
30 to_names = {'u12v', 'u23v', 'u31v', 'u12v_h1', 'u23v_h1'
        , 'u31v_h1', ...
31     'i1', 'i2', 'i3', 'i1_h1', 'i2_h1', 'i3_h1', 'P', 'P_h1',
        'M1', 'n', 'f'};
32
33 for k = 1:numel(to_names)
34     eval_str = [to_names{k}, '=', 'temp.', from_names{k},
        ';''];
35     eval(eval_str);
36 end
37
38 %Wicklungstemperaturen für jeweiligen Messpunkte
        auslesen
39 Theta_w = temp.Wicklungstemp;
40
41 %File wieder schließen
42 clear temp;
43
44
45 %% Widerstandsbestimmung
46
47 Rs_kalt = widerstand.Rs_kalt;           %Strangwiderstand
        kalt
48 Theta_k = widerstand.Theta_k;           %Temperatur der
        kalten Wicklung bei Widerstandsmessung
49 k = widerstand.k_Rs;                     %
        Temperaturkoeffizient für Kupfer
50

```

B. Matlab-Code

```
51     %Bestimmung des Widerstands für jeden Messpunkt (warme
      Wicklung)
52     Rs_fvar = zeros(size(Theta_w)); %Initialisierung
53
54     for i=1:length(Theta_w)
55         Rs_fvar(i) = (Theta_w(i)+k)/(Theta_k+k)*Rs_kalt;
56     end
57
58
59     %% Spannungen und Ströme für die Berechnung mitteln:
60
61     %Auswahl ob mit Effektiv-, oder Grundschwingungswerten
      gerechnet wird
62     switch lower(methode)
63         case 'effektiv'
64             u123=[u12v u23v u31v];
65             i123=[i1 i2 i3];
66             P_fvar=P;
67         case 'grundwelle'
68             u123=[u12v_h1 u23v_h1 u31v_h1];
69             i123=[i1_h1 i2_h1 i3_h1];
70             P_fvar=P_h1;
71     end
72
73     %Klemmenspannung ist der Mittelwert der
      Leiterspannungen
74     u_fvar=mean(u123,2); %Mittelwert: (u+u2+u3)/3 für
      jeden Messpunkt
75
76     %Leiterstrom ist der Mittelwert der Leiterströme
77     i_fvar=mean(i123,2);
78
```

```
79
80 %% Structure - Rückgabeparameter:
81
82 KS_fvar = struct;
83
84 KS_fvar.u_KS = u_fvar;           %Kurzschlussspannung
    bei variablen Frequenzen
85 KS_fvar.i_KS = i_fvar;           %Kurzschlussstrom bei
    variablen Frequenzen
86 KS_fvar.P_KS = P_fvar;           %Kurzschlussleistung
    bei variablen Frequenzen
87 KS_fvar.Rs_w = Rs_fvar;           %Strangwiderstände (
    warm) bei variablen Frequenzen
88 KS_fvar.freq = f;               %Frequenz
89 KS_fvar.Theta_w = Theta_w;       %Wicklungstemperatur
    der jeweiligen Messpunkte
90
91 end
```

B.8. Funktion - Leerlaufversuch

```
1 function Leerlauf = func_Leerlaufversuch(wahl, methode,
    widerstand, non_fit_ui, non_fit_pk)
2
3 %% Daten auslesen:
4
5 %LL-File für jeweilige Versorgung laden:
6 switch wahl
7     case 0
8         str_folder = 'Netz';
9     case 1
```

```
10         str_folder = 'FU';
11     end
12
13     temp = load([str_folder, '\LL.mat']);
14
15     %Feldnamen der .mat-Datei um die Ausdrücke Data1_ und
16     %_Latch reduzieren
17     % wodurch später ein übersichtlicheres Auslesen der
18     % Daten möglich ist
19     from_names = fieldnames(temp);
20     to_names    = from_names;
21     to_names = strrep(to_names, 'Data1_', ''); % entfernt
22     % Data1_
23     to_names = strrep(to_names, '_Latch', ''); % entfernt
24     % _Latch
25
26     for k = 1:numel(from_names)
27         temp.(to_names{k}) = temp.(from_names{k});
28     end
29
30     %benötigen Messwerte auslesen
31     from_names = {'U_rms_L12', 'U_rms_L23', 'U_rms_L31', '
32     U_L12_H1', ...
33     'U_L23_H1', 'U_L31_H1', 'I1', 'I2', 'I3', 'I_L1_H1', '
34     I_L2_H1', ...
35     'I_L3_H1', 'P', 'P_H1', 'I1_Freq'};
36     to_names    = {'u12v', 'u23v', 'u31v', 'u12v_h1', 'u23v_h1'
37     , 'u31v_h1', ...
38     'i1', 'i2', 'i3', 'i1_h1', 'i2_h1', 'i3_h1', 'P', 'P_h1',
39     'f'};
40
41     for k = 1:numel(to_names)
```

```
34     eval_str = [to_names{k}, '=', 'temp.', from_names{k},
35               ''];
36     eval(eval_str);
37
38     %Wicklungstemperatur nach dem letzten Messpunkt
39     auslesen
40     Theta_w = temp.Wicklungstemp(end);
41
42     %LL-File wieder schließen
43     clear temp;
44
45     %% Widerstandsbestimmung:
46
47     Ra_kalt = widerstand.Ra_kalt;           %Kaltwiderstand
48     Theta_k = widerstand.Theta_k;         %Temperatur der
49     kalten Wicklung bei Widerstandsmessung
50     k = widerstand.k_Rs;                   %
51     Temperaturkoeffizient für Kupfer
52
53     %Bestimmung des Widerstands nach Ablesen des letzten
54     Messpunktes (warme Wicklung)
55     Ra_LL = (Theta_w+k)/(Theta_k+k)*Ra_kalt;
56
57     %% Spannungen und Ströme für die Berechnung mitteln:
58
59     %Auswahl ob mit Effektiv-, oder Grundsicherungswerten
60     gerechnet wird
61     switch lower(methode)
62     case 'effektiv'
```

```
60         u123=[u12v u23v u31v];
61         i123=[i1 i2 i3];
62         P_LL = P;
63     case 'grundwelle'
64         u123=[u12v_h1 u23v_h1 u31v_h1];
65         i123=[i1_h1 i2_h1 i3_h1];
66         P_LL = P_h1;
67 end
68
69 %Klemmenspannung ist der Mittelwert der
70   Leiterspannungen
71 u_LL=mean(u123,2); %Mittelwert: (u+u2+u3)/3 für
72   jeden Messpunkt
73
74 %Leiterstrom ist der Mittelwert der Leiterströme
75 i_LL=mean(i123,2);
76
77 %% Leerlaufkurve berechnen:
78
79 %fehlerhafte Messpunkte löschen (für das Plot)
80 u_fit = u_LL; u_fit(non_fit_ui)=[];
81 i_fit = i_LL; i_fit(non_fit_ui)=[];
82 p_fit = P_LL; p_fit(non_fit_ui)=[];
83
84 %Polynom für die Interpolation erstellen
85 n=4; %Ordnung des Polynoms
86 exp_p = polyfit(u_fit,log(i_fit),n); %
87   logarithmieren
88 exp_pll = polyfit(u_fit,log(p_fit),n); %
89   logarithmieren
```

B. Matlab-Code

```
88 %interpolierte Leerlaufkurve
89 u_LL_neu = linspace(min(u_LL),max(u_LL),100000);
90 i_exp = exp(polyval(exp_p,u_LL_neu));
91
92 %interpolierte Leistung über der Leerlaufspannung
93 P_LL_line = exp(polyval(exp_pll,u_LL_neu));
94
95
96 %% Ps und Pk berechnen:
97
98 Ps = 1.5*Ra_LL.*(i_LL.^2); %LL-Wicklungsverluste
99 Pk = P_LL - Ps; %Konstante Verluste (wobei Pk=Pfe+
    Pfw)
100
101
102 %% Pfw bestimmen:
103
104 %Pk über u_LL^2 - Kurve zur Bestimmung von Pfw
105 u_LL2 = u_LL.^2;
106 u_LL2_i = 0:0.1:max(u_LL2);
107
108 %interpolation (exponentieller Verlauf)
109 %Polynom für die Interpolation erstellen
110 n=4; %Ordnung des Polynoms
111 exp_pk = polyfit(u_LL2,log(Pk),n); %
    logarithmieren
112
113 %interpolierter Verlauf
114 u_LL2_exp = linspace(min(u_LL2),max(u_LL2),100000)
    ;
115 Pk_exp = exp(polyval(exp_pk,u_LL2_exp));
116
```

```
117
118 %extrapolation gegen 0 (linearer Verlauf)
119     %Punkte mit Sättigungserscheinungen für
        extrapolation nicht verwenden
120     nofit = length(Pk):-1:(length(Pk)-non_fit_pk+1);
121     u_LL2_lin = u_LL2; u_LL2_lin(nofit)=[];
122     Pk_fit = Pk; Pk_fit(nofit)=[];
123
124     %extrapolierter Verlauf
125     Pk_fit_i=interp1(u_LL2_lin,Pk_fit,u_LL2_i, 'linear
        ', 'extrap');
126
127
128     %beide Verläufe (extrapolierter Verlauf gegen 0 und
        der interpolierte
129     % Verlauf) von Pk über  $u_{LL}^2$  zu einer gemeinsamen
        Kurve zusammenfügen
130     % um sie besser plotten zu können
131     %interpolierte Verlauf (ohne Punkte mit
        Sättigungserscheinungen
132     u_LL2_line = u_LL2_exp(u_LL2_exp >= u_LL2_lin(end)
        );
133     %extrapolierten Verlauf anfügen (ohne
        Sättigungspunkte)
134     u_LL2_line = [u_LL2_line, u_LL2_i(u_LL2_i <
        u_LL2_lin(end))];
135
136     %interpolierte Verlauf (ohne Punkte mit
        Sättigungserscheinungen
137     Pk_line = Pk_exp(u_LL2_exp >= u_LL2_lin(end));
138     %extrapolierten Verlauf anfügen (ohne
        Sättigungspunkte)
```

```
139     Pk_line = [Pk_line, Pk_fit_i(u_LL2_i < u_LL2_lin(
140         end))];
141
142     %Messpunkte sortieren
143     [u_LL2_line y]=sort(u_LL2_line);
144     Pk_line = Pk_line(y);
145
146     %Pfw ergibt sich aus dem Schnittpunkt mit der
147     % Spannungsachse (u_LL2=0)
148     % dabei wurden wiederum jene Punkte mit
149     % Sättigungserscheinungen nicht
150     % verwendet
151     Pfw=interp1(u_LL2_lin,Pk_fit,0, 'linear','extrap');
152
153     %% Pfe berechnen:
154
155     Pfe = Pk - Pfw;
156
157     %Pfe über u_LL - Kurve bestimmen
158     %fehlerhafte Messpunkte löschen (für das Plot)
159     pfe_fit = Pfe; pfe_fit(non_fit_ui)=[];
160
161     %Polynom für die Interpolation erstellen
162     n=4; %Ordnung des Polynoms
163     exp_pfe = polyfit(u_fit,log(pfe_fit),n); %
164     logarithmieren
165
166     %interpolierte Leerlaufkurve
167     u_LL_neu = linspace(min(u_LL),max(u_LL),100000);
168     Pfe_line = exp(polyval(exp_pfe,u_LL_neu));
```

```
167
168
169 %% Structure - Rückgabeparameter:
170
171 Leerlauf = struct;
172 Leerlauf.u_LL = u_LL;           %Leerlaufspannung
173 Leerlauf.i_LL = i_LL;           %Leerlaufstrom
174 Leerlauf.P_LL = P_LL;           %Leerlaufleistung
175
176 Leerlauf.Pfw = Pfw;             %Reibungs- /
    Lüftungsverluste
177
178 %Leerlaufkurve
179 Leerlauf.i_ausgleich = i_exp;    %Leerlaufstrom
    interpoliert
180 Leerlauf.u_ausgleich = u_LL_neu; %Leerlaufspannung
    interpoliert
181
182 %Pk über  $u_{LL}^2$  - Kurve
183 Leerlauf.u_LL2_points = u_LL2;    %
    Leerlaufspannung2
184 Leerlauf.Pk_points = Pk;          %konstante
    Verluste
185 Leerlauf.u_LL2_line = u_LL2_line; %
    Leerlaufspannung2 interpoliert
186 Leerlauf.Pk_line = Pk_line;      %konstante
    Verluste interpoliert
187
188 %Pfe über  $U_{LL}$  - Kurve
189 Leerlauf.Pfe_points = Pfe;        %Eisenverluste im
    Leerlauf
```

```
190     Leerlauf.Pfe_line = Pfe_line;      %Eisenverluste
        interpoliert
191
192     %für die Berechnung des ESB
193     Leerlauf.P_ausgleich = P_LL_line;  %Leerlaufleistung
        interpoliert
194
195 end
```

B.9. Funktion - Widerstandsbestimmung

```
1 function widerstand = func_Widerstand
2
3     %File mit Messwerten laden:
4     fid = fopen('Außenwiderstand\R_kalt.txt');
5     C = textscan(fid, '%f%f', 'delimiter', ',', ');
6     % textscan durchsucht Datei nach bestimmten Parametern
        -> %f = ,
7
8     %File wieder schließen
9     fclose(fid);
10
11    %Messdaten aufteilen
12    [Ua,Ia]=deal(C{:}); %Variable Ua enthält die
        verketteten Spannungen
13                                %Variable Ia enthält die
        Außenleiterströme
14
15    %Außenwiderstand ist Mittelwert der einzelnen
        Widerstände zwischen
16    %Außenleitern
```

```
17 Ra = Ua./Ia; %einzelne Widerstände zwischen den
    Außenleitern
18 Ra_kalt = mean(Ra); %Mittelwert
19
20 %Strangwiderstand für Dreieckschaltung
21 Rs_kalt = Ra_kalt * 1.5;
22
23 %Temperatur der kalten Wicklung bei Widerstandsmessung
24 Theta_k = load('Außenwiderstand\R_kalt_Temp.txt');
25
26
27 %% Structure - Rückgabeparameter:
28 widerstand = struct;
29 widerstand.Ra_kalt = Ra_kalt; %Außenleiter-
    Widerstand
30 widerstand.Rs_kalt = Rs_kalt; %Strangwiderstand
31 widerstand.Theta_k = Theta_k; %Temperatur der kalten
    Wicklung bei Widerstandsmessung
32 widerstand.k_Rs = 235; %
    Temperaturkoeffizient für Kupfer
33 widerstand.k_Rr = 225; %
    Temperaturkoeffizient für Aluminium
34 end
```

B.10. Funktion - Plotten

```
1 function func_Plot(wahl, versuch, eff, grund)
2
3 %Beschriftung für jeweilige Versorgung festlegen
4 switch wahl
5     case 0
```

```
6     str = 'Netz';
7 case 1
8     str = 'FU';
9 case 2
10    str = 'Netz_vs._FU';
11 end
12
13 switch lower(versuch)
14 case 'leerlauf'
15
16     %% Leerlaufkurve
17     figure
18     plot(eff.u_LL,eff.i_LL,'*b',grund.u_LL,grund.i_LL,
19          '*r')
20     hold on
21     plot(eff.u_ausgleich,eff.i_ausgleich,'--b',grund.
22          u_ausgleich,grund.i_ausgleich,'--r')
23     grid on
24     title(['Leerlaufkurve_',str])
25     ylabel('Leerlaufstrom_in_A')
26     xlabel('Leerlaufspannung_in_V')
27     legend('Effektivwerte', 'Grundschwingungswerte')
28
29     %% Pk über u_LL^2 - Kurve
30     figure
31     plot(eff.u_LL2_points./1000,eff.Pk_points,'b*',
32          grund.u_LL2_points./1000,grund.Pk_points,'r*')
33     hold on
34     plot(0,eff.Pfw,'g*')
35     plot(0,grund.Pfw,'m*')
```

```

34     plot(eff.u_LL2_line./1000,eff.Pk_line,'b--',grund.
        u_LL2_line./1000,grund.Pk_line,'r--')
35     grid on
36     title(['P_k_über_U_0^2_Kurve_-'],str])
37     xlabel('Leerlaufspannung^2_U_0^2_in_kV^2')
38     ylabel('konstante_Verluste_P_k_in_W')
39     legend('konstante_Verluste_P_k_-Effektivwerte',
        konstante_Verluste_P_k_-Grundschwingungswerte'
        , 'Reibungs- und Lüftungsverluste_P_{fw}_-
        Effektivwerte', 'Reibungs- und Lüftungsverluste
        _P_{fw}_-Grundschwingungswerte')
40
41
42     %% Pfe über u_LL - Kurve
43     figure
44     plot(eff.u_LL,eff.Pfe_points,'*b',grund.u_LL,grund
        .Pfe_points,'*r')
45     hold on
46     plot(eff.u_ausgleich,eff.Pfe_line,'b--',grund.
        u_ausgleich,grund.Pfe_line,'r--')
47     grid on
48     title(['P_{fe}_über_U_0_Kurve_-'],str])
49     xlabel('Leerlaufspannung_U_0_in_V')
50     ylabel('Eisenverluste_P_{fe}_in_W')
51     legend('Effekitivwerte', 'Grundschwingungswerte')
52
53
54
55     case 'belastung'
56
57     %% P_lr über M^2 - Zur Bestimmung der
        lastabhängigen Zusatzverluste

```

```

58
59     %mittels Subplot
60     figure
61     subplot(1,2,1)
62     plot(eff.M_sort_squared,eff.Plr_sort,'b*-', eff.
        M_squared,eff.Plr_reg,'r-', eff.M_squared,eff.
        Pl1,'g-')
63     grid on
64     title(['Effektivwerte_{Lr}_{Lr}',str])
65     xlabel('M^2_{in}_{Nm^2}')
66     ylabel('P_{Lr}_{in}_{W}')
67     legend('P_{Lr}_{Lr}Messpunkte', 'Funktion_von_P_{Lr}
        }=A*M^2_{Lr}+B', 'P_{LL}=A*M^2')
68
69     subplot(1,2,2)
70     plot(grund.M_sort_squared,grund.Plr_sort,'bx:',
        grund.M_squared,grund.Plr_reg,'r:', grund.
        M_squared,grund.Pl1,'g:')
71     grid on
72     set(gcf, 'PaperSize',[8.5 11])
73     title(['Grundschwingungswerte_{Lr}_{Lr}',str])
74     xlabel('M^2_{in}_{Nm^2}')
75     ylabel('P_{Lr}_{in}_{W}')
76     legend('P_{Lr}_{Lr}Messpunkte', 'Funktion_von_P_{Lr}
        }=A*M^2_{Lr}+B', 'P_{LL}=A*M^2')
77
78
79     %in einem Plot
80     figure
81     plot(eff.M_sort_squared,eff.Plr_sort,'b*-', eff.
        M_squared,eff.Plr_reg,'r-', eff.M_squared,eff.
        Pl1,'g-')

```

```
82     hold on
83     plot(grund.M_sort_squared, grund.Plr_sort, 'bx:',
          grund.M_squared, grund.Plr_reg, 'r:', grund.
          M_squared, grund.Pl1, 'g:')
84     grid on
85     ylim([0 240])
86     xlabel('M^2_in_Nm^2')
87     ylabel('P_{Lr}_in_W\nP_{LL}_in_W')
88     title(['Effektivwerte_vvs._Grundschwingung_-_', str
          ])
89     legend('berechnete_Werte_von_P_{Lr}_-_'
          'Effektivwerte', 'geglättete_Restverluste_-_'
          'Effektivwerte', 'Funktion_von_P_{LL}_-_'
          'Effektivwerte', 'berechnete_Werte_von_P_{Lr}_-_'
          'Grundschwingungswerte', 'geglättete_'
          'Restverluste_-_' 'Grundschwingungswerte', '
          Funktion_von_P_{LL}_-_' 'Grundschwingungswerte')
90
91
92
93     case 'iauswertung'
94
95         %% indirekte Auswertung
96
97         %Überprüfung ob beide Versorgungen in einem Figure
          geplottet werden sollen
98         if wahl == 2 %beide Versorgungen in einem
          Figures
99             %Überprüfung ob Figure schon existiert
100             if findobj('type', 'figure', 'name', 'indirekt')
101                 figure(findobj('type', 'figure', 'name', '
                    indirekt'))
```

```
102         hold on
103
104         %Faben und Legendenbezeichnung festlegen
105         string1 = 'g';
106         string2 = 'm';
107         naming = 'FU';
108     else
109         figure('name','indirekt')
110
111         %Faben und Legendenbezeichnung festlegen
112         string1 = 'b';
113         string2 = 'r';
114         naming = 'Netz';
115     end
116
117     plot(eff.P_pu_points,eff.eta_points, [string1,
118         '*'], 'Displayname',[ 'Effektivwerte_-' ,
119         naming]) %Displayname erscheint später in
120         der Legende
121     hold on
122     plot(grund.P_pu_points,grund.eta_points, [
123         string2, '*'], 'Displayname', [ 'Werte_ der 1.
124         Harmonischen_-' , naming]) %Displayname
125         erscheint später in der Legende
126     plot(eff.P_Bel_line,eff.eta_line, [string1, '-
127         ']);
128     plot(grund.P_Bel_line,grund.eta_line, [string2
129         , '- ']);
130
131     %in legende nur die Messpunkte und nicht die
132     Verbindungslinien
133     % anzeigen
```

```
125     ph = findobj(gca, '-regexp', 'DisplayName', '^.+')
126         );
127     legend(flipud(ph))
128
129     grid on
130     hold off
131     xlim([0.4 1.6])
132     ylim([80 95])
133     xlabel('P_1/P_N_in_p.u.')
134     ylabel('\eta_in_%')
135     title(['indirekte_Wirkungsgradbestimmung_',
136           str])
137
138     else %beide Versorgungen in verschiedenen
139         Figures
140         figure
141         plot(eff.P_pu_points, eff.eta_points, 'b*')
142         hold on
143         plot(grund.P_pu_points, grund.eta_points, 'r*')
144         plot(eff.P_Bel_line, eff.eta_line, 'b-')
145         plot(grund.P_Bel_line, grund.eta_line, 'r-')
146         grid on
147         hold off
148         legend('Effektivwerte', 'Werte_der_1.
149               Harmonischen')
150         xlim([0.4 1.6])
151         ylim([80 95])
152         xlabel('P_1/P_N_in_p.u.')
153         ylabel('\eta_in_%')
154         title(['indirekte_Wirkungsgradbestimmung_',
155               str])
```

```
152     end
153
154
155     case 'dauswertung'
156
157         %% direkte Auswertung
158
159         %Überprüfung ob beide Versorgungen in einem Figure
160         %geplottet werden sollen
161         if wahl == 2 %beide Versorgungen in einem
162         %Figure
163         %Überprüfung ob Figure schon existiert
164         if findobj('type','figure','name','direkt')
165             figure(findobj('type','figure','name','
166             direkt'))
167             hold on
168
169             %Faben und Legendenbezeichnung festlegen
170             string1 = 'g';
171             string2 = 'm';
172             naming = 'FU';
173         else
174             figure('name','direkt')
175
176             %Faben und Legendenbezeichnung festlegen
177             string1 = 'b';
178             string2 = 'r';
179             naming = 'Netz';
180         end
181
182         plot(eff.P_pu_points,eff.eta_points, [string1,
183         '*'], 'Displayname',[ 'Effektivwerte_-' ],
```

```
        naming]) %Displayname erscheint später in
        der Legende
180 hold on
181 plot(grund.P_pu_points,grund.eta_points, [
        string2,'*'], 'Displayname', ['Werte_der_1.
        Harmonischen_-' , naming]) %Displayname
        erscheint später in der Legende
182 plot(eff.P_Bel_line,eff.eta_line, [string1,'-'
        ]);
183 plot(grund.P_Bel_line,grund.eta_line, [string2
        ,'-']);
184
185 %in Legende nur die Messpunkte und nicht die
        Verbindungslinien
186 % anzeigen
187 ph = findobj(gca, '-regex', 'DisplayName', '^.+
        ');
188 legend(flipud(ph))
189
190 grid on
191 hold off
192 xlim([0.4 1.6])
193 ylim([80 95])
194 xlabel('P_1/P_N_in_p.u.')
195 ylabel('\eta_in%')
196 title(['direkte_Wirkungsgradbestimmung_-' ,str
        ])
197
198
199 else %beide Versorgungen in verschiedenen
        Figures
200 figure
```

```
201     plot(eff.P_pu_points,eff.eta_points, 'b*')
202     hold on
203     plot(grund.P_pu_points,grund.eta_points, 'r*')
204     plot(eff.P_Bel_line,eff.eta_line, 'b-')
205     plot(grund.P_Bel_line,grund.eta_line, 'r-')
206     grid on
207     hold off
208     legend('Effektivwerte', 'Werte_der_1._
        Harmonischen')
209     xlim([0.4 1.6])
210     ylim([80 95])
211     xlabel('P_1/P_N_in_p.u.')
212     ylabel('\eta_in_%')
213     title(['direkte_Wirkungsgradbestimmung_-' ,str
        ])
214     end
215
216
217     case 'kurzschluss50'
218
219         %% Kurzschlusskurve
220
221         figure
222         plot(eff.i_KS_points,eff.u_KS_points,'*b',grund.
            i_KS_points,grund.u_KS_points,'*r')
223         hold on
224         plot(eff.i_KS_line,eff.u_KS_line,'--b',grund.
            i_KS_line,grund.u_KS_line,'--r')
225         hold off
226         grid on
227         title(['Kurzschlusskennlinie_-' ,str])
228         xlabel('Kurzschlussstrom_in_A')
```

```
229     ylabel('Kurzschlussspannung_in_V')
230     legend('Effektivwerte', 'Werte_der_1._Harmonischen
231           ')
232
233     case 'kurzschlussfvar'
234
235         %% Kurzschlusspunkte bei verschiedenen Frequenzen
236
237         figure
238         for a=1:4
239             subplot(2,2,a)
240             plot(eff.i_KS(a),eff.u_KS(a),'*b',grund.i_KS(a)
241                 ,grund.u_KS(a),'*r')
242             grid on
243             title(['f_=', num2str(eff.freq(a)), '_-', str])
244             xlabel('Kurzschlussstrom_in_A')
245             ylabel('Kurzschlussspannung_in_V')
246             legend('Effektivwerte', 'Wert_der_1._
247                   Harmonischen')
248         end
249
250     case 'esb'
251
252         %% Läuferwiderstand über Frequenz
253
254         figure
255         plot(eff.f_points,eff.Rr_lr_k,'*b',grund.f_points,
256             grund.Rr_lr_k,'*r')
257         hold on
258         plot(0,eff.Rr,'*m',0,grund.Rr,'*g')
```

```
257     plot(eff.f_line_Rr, eff.Rr_lr_line, '--b', grund.  
        f_line_Rr, grund.Rr_lr_line, '--r')  
258     hold off  
259     grid on  
260     title(['Läuferwiderstand_über_Frequenz_-'], str])  
261     xlabel('f_{lr}_in_Hz')  
262     ylabel('R"_{r,lr}_in_\Omega')  
263     legend('berechnete_Werte_von_R"_{r,lr}_-  
        Effektivwerte', 'berechnete_Werte_von_R"_{r,lr}_-  
        Grundschiwingungswerte', 'auf_den_Ständer_  
        bezogene_Läuferwiderstand_R'_'_r_-Effektivwerte'  
        , 'auf_den_Ständer_bezogene_Läuferwiderstand_R'  
        ' '_r_-Grundschiwingungswerte')  
264  
265  
266     %% Wirkungsgrad aus ESB  
267  
268     figure  
269     plot(eff.P_pu, eff.eta, 'b*')  
270     hold on  
271     plot(grund.P_pu, grund.eta, 'r*')  
272     plot(eff.P_ESB_line, eff.eta_line, 'b-')  
273     plot(grund.P_ESB_line, grund.eta_line, 'r-')  
274     grid on  
275     xlim([0.3 1.4])  
276     ylim([75 95])  
277     legend('Effektivwerte', 'Werte_der_1._Harmonischen'  
        ')  
278     xlabel('P_1/P_N_in_p.u.')  
279     ylabel('\eta_in_%')  
280     title(['Wirkungsgradbestimmung_aus_ESB_-'], str])  
281
```

B. Matlab-Code

282 `end`