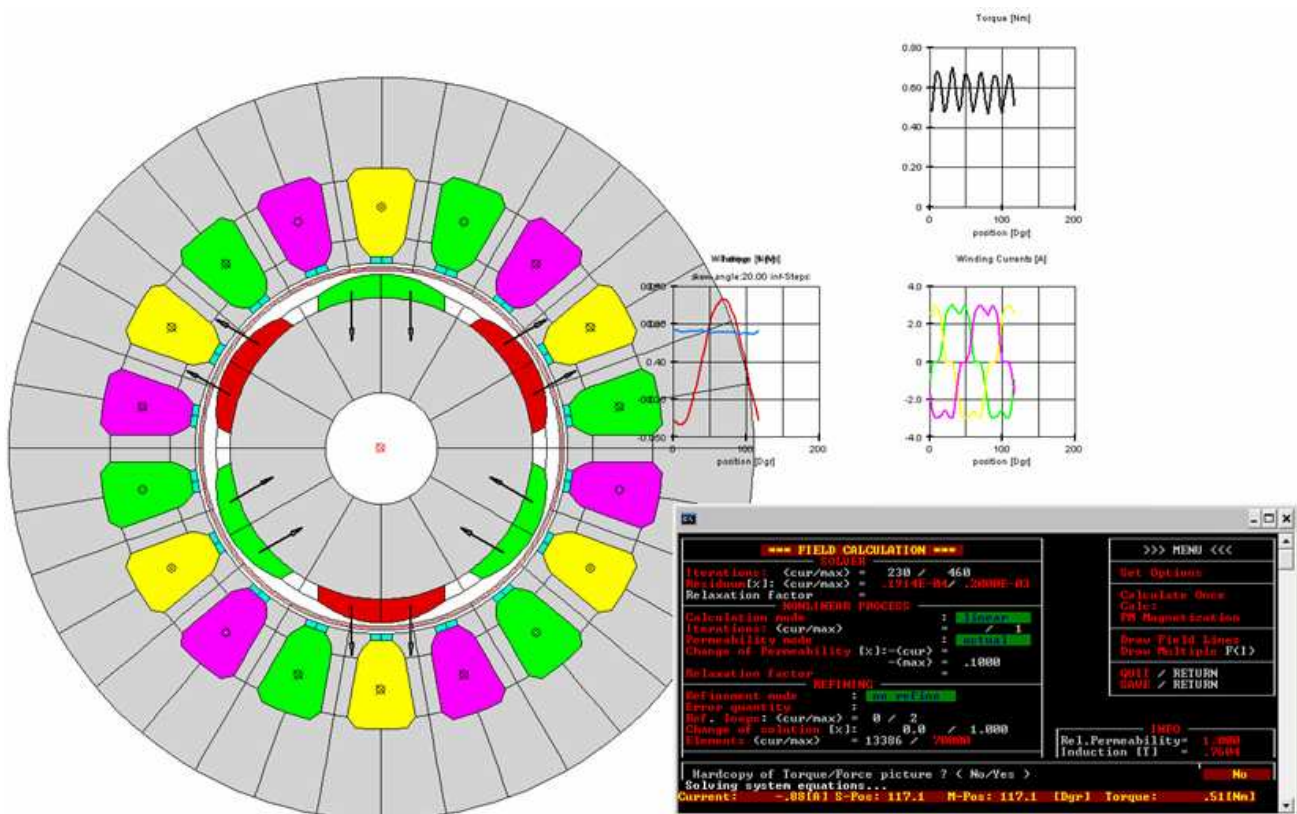


Permanent-Magnet-Maschine im Generatorbetrieb



Bachelor Diplomarbeit von Adrian Scherer und Pirmin Wicki

Bachelor Studiengang in Elektrotechnik 2006-2009

Permanent-Magnet-Maschine im Generatorbetrieb

Autoren:

Adrian Scherer
Obermatt
6182 Escholz matt

Pirmin Wicki
Staufen
6170 Schüpfheim

Tel: 041 486 12 63
Natel: 076 443 56 17

Tel: 041 484 19 75
Natel: 076 306 92 62

E-Mail: adrian.scherer@stud.hslu.ch

E-Mail: pirmin.wicki@stud.hslu.ch

Dozent:

Prof. Dr. Dominique Salathé, HSLU T&A

Industriepartner:

Markus Lindegger, Circle Motor AG, 3073 Gümligen

Experte:

Dr. Peter Frei, ABB

Bachelor Studiengang in Elektrotechnik 2006-2009

Horw, 17. Juni 2009

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet haben.

Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Horw, 17. Juni 2009

Adrian Scherer

Pirmin Wicki

Inhalt

Inhalt	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abstract	9
Management Summary	10
1. Einleitung	11
2. Aufgabenstellung	13
3. Maschinendaten des Generators	15
4. Messungen auf dem Generatorprüfstand	16
4.1 Aufbau des Prüfstandes	16
4.2 Messung des Generators am Brückengleichrichter mit 12 V-Akkumulator	19
4.2.1 Resultate	21
4.3 Messung des Generators am Brückengleichrichter mit 24 V-Akkumulator	24
4.3.1 Resultate	24
4.4 Erläuterungen zum Strangstrom des Generators im Brückengleichrichterbetrieb	28
4.5 Messung des Generators an der elektronischen Ladeschaltung 12 V	32
4.5.1 Resultate	34
4.6 Messung des Generators an der elektronischen Ladeschaltung 24 V	35
4.6.1 Resultate	35
4.7 Messdatenvergleich der Brückengleichrichterschaltung mit der elektronischen Ladeschaltung	37
4.7.1 12 V-Betrieb	37
4.7.2 24 V-Betrieb	39
5. Generatormodell im FEMAG	41
5.1 Aufbau des Generators im FEMAG	41
5.2 Definieren des Strangstromes im FEMAG	45
5.3 Simulation des Generators am Brückengleichrichter mit 12 V-Akkumulator	48
5.3.1 Resultate	52
5.4 Simulation des Generators am Brückengleichrichter mit 24 V-Akkumulator	53
5.4.1 Resultate	53
5.5 Simulation des Generators an der elektronischen Ladeschaltung 12 V	55
5.5.1 Resultate	56
5.6 Simulation des Generators an der elektronischen Ladeschaltung 24 V	57
5.6.1 Resultate	58
5.7 Simulationsdatenvergleich des Brückengleichrichterbetriebes mit der elektronischen Ladeschaltung	59
5.7.1 12 V-Betrieb	59
5.7.2 24 V-Betrieb	61
6. Vergleich der Messdaten auf dem Prüfstand mit den Simulationsdaten	63

6.1 Brückengleichrichter	64
6.1.1 12 V-Betrieb	64
6.1.2 24 V-Betrieb	66
6.2 Elektronische Ladeschaltung	67
6.2.1 12 V-Betrieb	67
6.2.2 24 V-Betrieb	69
7. Diskussion und Erkenntnisse	71
8. Schluss	77
9. Quellenverzeichnis	79
Anhang	80
A: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung (Schiebewiderstände) bei 12 V	80
B: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung (Schiebewiderstände) bei 24 V	81
C: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung bei 12 V	83
D: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V	84
E: Weitere Dokumente	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Brückengleichrichterschaltung. Aus: Salathé 2009, S. 2	13
Abbildung 2: Elektronische Ladeschaltung. Aus: Salathé 2009, S. 2	14
Abbildung 3: Generator PGM120. Aus: Maurer 2009	15
Abbildung 4: Motorenprüfstand	16
Abbildung 5: Federwaage am Generator zur Bestimmung des Drehmoments	17
Abbildung 6: Anschlussbrett des Generators	18
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Generators am Brückengleichrichter	18
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Generators an der elektronischen Ladeschaltung	19
Abbildung 9: Schematische Messanordnung im Brückengleichrichterbetrieb	20
Abbildung 10: Motorenprüfstand mit den Messeinrichtungen am 12 V-Akkumulator	20
Abbildung 11: Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltung mit 12 V-Akkumulator	22
Abbildung 12: Wirkungsgrad im Brückengleichrichterbetrieb mit 12 V-Akkumulator	22
Abbildung 13: Strangstrom des Generators bei 1.5 A Ladestrom	23
Abbildung 14: Strangstrom des Generators bei 3 A Ladestrom	23
Abbildung 15: Strangstrom des Generators bei 4 A Ladestrom	23
Abbildung 16: Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltung mit 24 V-Akkumulator	25
Abbildung 17: Wirkungsgrad im Brückengleichrichterbetrieb mit 24 V-Akkumulator	25
Abbildung 18: Strangstrom des Generators bei 1.5 A Ladestrom	26
Abbildung 19: Strangstrom des Generators bei 3 A Ladestrom	26
Abbildung 20: Strangstrom des Generators bei 4 A Ladestrom	26
Abbildung 21: Strangstrom des Generators bei 5 A Ladestrom	27
Abbildung 22: Strangstrom (grün) und Strangspannung (blau) eines Generators im Brückengleichrichterbetrieb bei idealer L-Glättung. Aus: Omlin 2008, S. 23	28
Abbildung 23: Ersatzschaltung eines Akkumulators	29
Abbildung 24: Ladestrom des Akkumulators im Brückengleichrichterbetrieb	29
Abbildung 25: Modell eines Generatorstrangstromes im Brückengleichrichterbetrieb ohne Glättung	30
Abbildung 26: Strangstrom (grün) und Strangspannung (blau) eines Generators im Brückengleichrichterbetrieb mit Kommutierung und idealer L-Glättung. Aus: Omlin 2008, S. 24	30
Abbildung 27: Strangstrom des Generators bei 1.5 A Ladestrom im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb	31
Abbildung 28: Spannung an einem Brückengleichrichterausgang (hellblau) mit Berücksichtigung der Kommutierung. Aus: Omlin 2008, S. 24	31
Abbildung 29: Strangstrom des Generators bei 4 A Ladestrom im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb	32
Abbildung 30: Schematische Messanordnung bei elektronischer Ladeschaltung (Schiebewiderstände)	32
Abbildung 31: Motorenprüfstand mit den Messeinrichtungen und den Schiebewiderständen	33
Abbildung 32: Abgabeleistungskurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 12 V	34
Abbildung 33: Wirkungsgradkurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 12 V	35
Abbildung 34: Abgabeleistungskurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 24 V	36
Abbildung 35: Wirkungsgradkurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 24 V	36
Abbildung 36: Vergleich der abgegebenen Leistung der Schaltungen im 12 V-Betrieb	38
Abbildung 37: Vergleich des Wirkungsgrades der Schaltungen im 12 V-Betrieb	38
Abbildung 38: Vergleich der abgegebenen Leistung der Schaltungen im 24 V-Betrieb	39
Abbildung 39: Vergleich des Wirkungsgrades der Schaltungen im 24 V-Betrieb	40
Abbildung 40: Menü-Graphik im FEMAG	41
Abbildung 41: Generator PMG120 als FEMAG Modell IEC56Gen	42
Abbildung 42: Entmagnetisierungskurven der B-Kurve und der J-Kurve. Aus: Salathé 2006, S. 8	42
Abbildung 43: Entmagnetisierungskurve des Magnetmaterials BMN-38H. Aus: Bomatec 2009	43
Abbildung 44: Eisenkennlinie M44050A	44
Abbildung 45: Strangstrom des Generators im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb bei 3 A Ladestrom	45
Abbildung 46: Strangstrom mit Raster	46
Abbildung 47: Erstelltes .poc-File des Strangstromes im FEMAG	47
Abbildung 48: Erzeugter Strangstrom im FEMAG	48
Abbildung 49: Eingabemaske im FEMAG	49
Abbildung 50: Vom FEMAG berechnete Stromharmonische (12 V-Brückengleichrichterbetrieb, 1320 U/min, 3 A Ladestrom)	49
Abbildung 51: Vom FEMAG berechnete Leistungen (12 V-Brückengleichrichterbetrieb, 1320 U/min, 3 A Ladestrom)	50

Abbildung 52: Berechnung der Eisenverluste (Statorring) im FEMAG (12 V-Brückengleichrichterbetrieb, 1320 U/min, 3 A Ladestrom)	51
Abbildung 53: Abgabeleistung des Generators im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation	52
Abbildung 54: Wirkungsgrad des Generators im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation	53
Abbildung 55: Abgabeleistung des Generators im 24 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation	54
Abbildung 56: Wirkungsgrad des Generators im 24 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation	54
Abbildung 57: Sinusförmiger Strangstrom im FEMAG	55
Abbildung 58: Abgabeleistungskurven des Generators mit elektronischer Ladeschaltung 12 V in der Simulation	56
Abbildung 59: Generatorwirkungsgrad mit elektronischer Ladeschaltung im 12 V-Betrieb in der Simulation	57
Abbildung 60: Abgabeleistungskurven des Generators mit elektronischer Ladeschaltung 24 V in der Simulation	58
Abbildung 61: Generatorwirkungsgrad mit elektronischer Ladeschaltung im 24 V-Betrieb in der Simulation	58
Abbildung 62: Vergleich der Generatorabgabeleistung der Schaltungen in der Simulation bei 12 V	60
Abbildung 63: Vergleich des Generatorwirkungsgrades der Schaltungen in der Simulation bei 12 V	60
Abbildung 64: Vergleich der Generatorabgabeleistung der Schaltungen in der Simulation bei 24 V	61
Abbildung 65: Vergleich des Generatorwirkungsgrades der Schaltungen in der Simulation bei 24 V	62
Abbildung 66: Vergleich der Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltungen bei 12 V	65
Abbildung 67: Vergleich des Wirkungsgrades der Brückengleichrichterschaltungen bei 12 V	65
Abbildung 68: Vergleich der Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltungen bei 24 V	66
Abbildung 69: Vergleich des Wirkungsgrades der Brückengleichrichterschaltungen bei 24 V	67
Abbildung 70: Vergleich der maximalen Abgabeleistung der elektronischen Ladeschaltungen bei 12 V	68
Abbildung 71: Vergleich des Wirkungsgrades der elektronischen Ladeschaltungen bei 12 V	68
Abbildung 72: Vergleich der maximalen Abgabeleistung der elektronischen Ladeschaltungen bei 24 V	69
Abbildung 73: Vergleich des Wirkungsgrades der elektronischen Ladeschaltungen bei 24 V	70
Abbildung 74: Energieeffizienz von Elektromotoren. Aus: Topmotors 2009	72
Abbildung 75: Vergleich der abgegebenen Leistung der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V	73
Abbildung 76: Vergleich des Wirkungsgrades der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V	74
Abbildung 77: Generatormodell mit veränderter Magnetform im FEMAG	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 12 V.....	21
Tabelle 2: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 24 V.....	24
Tabelle 3: Maximale Abgabeleistungen des Generators im 12 V-Widerstandsbetrieb.....	35
Tabelle 4: Maximale Abgabeleistungen des Generators im 24 V-Widerstandsbetrieb.....	37
Tabelle 5: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 12 V.....	37
Tabelle 6: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung im 12 V-Betrieb.....	37
Tabelle 7: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 24 V.....	39
Tabelle 8: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung im 24 V-Betrieb.....	39
Tabelle 9: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 12 V.....	52
Tabelle 10: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 24 V.....	53
Tabelle 11: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 12 V.....	57
Tabelle 12: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 24 V.....	59
Tabelle 13: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 12 V.....	59
Tabelle 14: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 12 V.....	59
Tabelle 15: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 24 V.....	61
Tabelle 16: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 24 V.....	61
Tabelle 17: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 12 V.....	64
Tabelle 18: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 12 V.....	64
Tabelle 19: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 24 V.....	66
Tabelle 20: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 24 V.....	66
Tabelle 21: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 12 V.....	67
Tabelle 22: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 12 V in der Simulation	68
Tabelle 23: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V.....	69
Tabelle 24: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V in der Simulation	69
Tabelle 25: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1113 U/min	80
Tabelle 26: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1320 U/min	80
Tabelle 27: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1455 U/min	80
Tabelle 28: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2005 U/min	81
Tabelle 29: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2300 U/min	81
Tabelle 30: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2477 U/min	81
Tabelle 31: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2650 U/min	81
Tabelle 32: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2820 U/min	82
Tabelle 33: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1113 U/min.....	83
Tabelle 34: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1320 U/min.....	83
Tabelle 35: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1455 U/min.....	83
Tabelle 36: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2005 U/min.....	84
Tabelle 37: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2300 U/min.....	84
Tabelle 38: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2477 U/min.....	84
Tabelle 39: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2650 U/min.....	85
Tabelle 40: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2820 U/min.....	85

Abstract

Electrical energy plays an important role in our life and energy consumption is on the increase. We assume that there will be an energy shortage in the near future. Therefore the issue of renewable energy and energy efficiency urgently needs more attention. Generators with permanent-magnets for charging accumulators are often used in small wind or water power stations.

The main focus of this bachelor diploma thesis is to find out whether it is energetically appropriate to use a diode rectifier or an electronic charging circuit for charging an accumulator. To achieve these aims the permanent-magnet generator first has to be measured by using both circuits - one after another - on a motor test stand. In a second step the generator with the different circuits has to be simulated in the finite elements program FEMAG. This is a program for calculating electromagnetic fields and to lay out the dimensions of electrical machines. For these simulations the phase current of a generator in bridge rectifying mode must be measured and emulated.

The results show that the emitted power of the electronic charging circuit is higher than the emitted power of the diode rectifier, primarily at lower drive. But the power efficiency of the diode rectifier is higher than the one of the electronic charging circuit. The power of the circuits in the simulations is matching quite well the power of the real measurement. The difference is mostly less than 10 %. The difference of the power efficiency between the simulations and the measuring data is higher than 10 %.

The permanent-magnet generator combined with an electronic charging circuit should be used in case of low or inconstant generator speed to gain the maximum output power. In case of high and constant generator speed the diode rectifier can be used too. The simulation models of the circuits reveal some good first details of the electrical machine.

Management Summary

Die elektrische Energie spielt in unserem Leben eine zentrale Rolle. Der Energieverbrauch der Menschen nimmt stetig zu. Es ist von Energieknappheit in naher Zukunft die Rede. Themen wie erneuerbare Energien und Energieeffizienz müssen zwingend mehr Beachtung geschenkt werden. Zu den erneuerbaren Energien zählen auch Wind- und Wasserkraftanlagen. Bei kleinen Wind- und Wasserkraftanlagen ist es oft nötig, Energie in einem Akkumulator zu speichern. Hierfür eignen sich kleine Permanent-Magnet-Generatoren sehr gut. Für die Ladung eines Akkumulators kann ein einfacher Dioden-Brückengleichrichter oder eine elektronische Ladeschaltung verwendet werden.

Diese Arbeit hat zwei Ziele. Zum einen die Erarbeitung einer Entscheidungsgrundlage zur Frage, ob es aus energetischer Sicht sinnvoller ist, den Generator an einem Brückengleichrichter oder an einer elektronischen Ladeschaltung für die Ladung eines Akkumulators zu betreiben. Zum anderen soll ein Simulationsmodell des Generators erstellt werden, damit in Zukunft abgeänderte Maschinen oder solche mit anderen Baugrössen getestet werden können, ohne sie zuerst bauen zu müssen.

Um ein solches Simulationsmodell erstellen zu können, muss der Strangstrom eines Generators im Brückengleichrichterbetrieb aufgenommen und nachgebildet werden. In enger Zusammenarbeit mit unserem Industriepartner Markus Lindegger von der Firma Circle Motor AG wurde die Erarbeitung dieses Themas in zwei Teilen vorgenommen. Im ersten Teil wurde der Generator in den beiden unterschiedlichen Betriebsarten auf einem Motorenprüfstand betrieben und ausgemessen. Im zweiten Teil wurde das Simulationsmodell des Generators im FEMAG für die beiden Betriebsarten erstellt. Das Finite Elemente Programm FEMAG eignet sich besonders zur Berechnung elektromagnetischer Felder und damit zur Auslegung und Optimierung der Geometrien von elektrischen Maschinen. Die Resultate zeigten, dass sich beim Betrieb des Generators an der elektronischen Ladeschaltung besonders im unteren Drehzahlbereich mehr Leistung aus der Schaltung entnehmen lässt, als im Betrieb mit dem Brückengleichrichter. Der Betrieb mit dem Brückengleichrichter weist jedoch den höheren Wirkungsgrad auf. Die Simulationsdaten der Abgabeleistungen stimmen gut mit den gemessenen Daten auf dem Prüfstand überein. Der Wirkungsgrad ist dagegen in den Simulationen um mindestens 10 % tiefer als in der realen Messung.

Die Messungen zeigen, dass die elektronische Ladeschaltung vor allem bei unregelmässigen oder tiefen Drehzahlen einzusetzen ist, um die volle Leistung aus dem Generator zu gewinnen. Herrschen dagegen konstante und hohe Drehzahlverhältnisse, könnte durchaus auch der Brückengleichrichter eingesetzt werden. Der Generatorwirkungsgrad von 70 bis 80 % ist für so eine kleine Maschine recht hoch. Er liesse sich aber durch einige Massnahmen, wie die Reduktion des Luftspaltes oder den Einsatz von stärkeren Magneten, noch um ein paar Prozente verbessern.

Das Simulationsmodell der beiden Schaltungen lässt sich verwenden, um erste Erkenntnisse über eine Maschine zu erhalten. In einem weiteren Schritt müsste abgeklärt werden, weshalb die Wirkungsgrade der Modelle, in einigen wenigen Fällen auch die Leistungen, so stark von der realen Messung abweichen.

1. Einleitung

In unserer heutigen Welt ist der Gebrauch von elektrischer Energie allgegenwärtig. Der Energieverbrauch der Industrieländer steigt stetig an. Es ist von Energieknappheit in naher Zukunft die Rede. Hinzu kommt die CO₂-Problematik, welche durch den Verbrauch von nicht-erneuerbaren Energien hervorgerufen wird. Aus diesen Gründen ist es wichtig, in erneuerbare Energien wie Wind- und Wasserkraft zu investieren und die Energie der Sonne zu nutzen. Genau so wichtig ist es aber, an der Verbesserung der Energieeffizienz zu arbeiten. Etwa die Hälfte des elektrischen Energieverbrauchs wird für elektrische Antriebe verwendet. Im Bereich der Effizienzverbesserung von elektrischen Motoren und Generatoren liegt also ein grosses Potenzial, um der Energieknappheit zusätzlich entgegen zu wirken.

Kleine Permanent-Magnet-Generatoren werden, im Zusammenhang mit Wasser- und Windkraftanwendungen, oft zum Laden eines Akkumulators verwendet. Als Ladeschaltung kann ein einfacher Diodengleichrichter verwendet werden. Dieser ist kostengünstig, hat aber den Nachteil, dass die Leistungsfähigkeit des Generators nicht voll ausgeschöpft wird. Durch den Gleichrichter fliesst nur der Strom, der durch die momentan höchste verkettete Phasenspannung induziert wird. Sinkt die Drehzahl des Generators, fliesst der Ladestrom nicht mehr kontinuierlich, da nur noch ein kleiner Teil der Generatorspannung die Akkuspannung überragt. Es kann aber auch eine elektronische Ladeschaltung verwendet werden. Diese ist teurer, wandelt aber die vom Generator abgegebene Energie in einen Gleichstrom mit dem Spannungswert des Akkumulators. Somit wird die volle Leistung des Generators genutzt. Eine elektronische Ladeschaltung hat einen Wirkungsgrad von 95 %.

In dieser Diplomarbeit wird nun untersucht, ob es aus energetischer Sicht sinnvoller ist, die Ladung eines Akkumulators durch einen Permanent-Magnet-Generator, mit einem kostengünstigen Dioden-Brückengleichrichter oder mit einer teureren elektronischen Ladeschaltung vorzunehmen. Dabei wird die Abgabeleistung des Generators auf einem Motorenprüfstand gemessen. Der Generator wird im Brückengleichrichterbetrieb mit einem 12 V- und einem 24 V-Bleiakkumulator bei unterschiedlichen Drehzahlen belastet. Anschliessend wird die Leistungsabgabe des Generators zum Vergleich mit einer elektronischen Ladeschaltung und den gleichen Drehzahlen ermittelt. Die elektronische Ladeschaltung wird durch eine Last mit drei in Stern geschalteten Schiebewiderständen substituiert. Damit für spätere Anwendungen auch Modifikationen an den bestehenden Generatordaten gemacht werden können, ist es wichtig, den Generatorbetrieb am Brückengleichrichter und an der elektronischen Ladeschaltung simulieren zu können. So können später auch grössere Maschinen getestet werden. Es lassen sich zudem einfach Anpassungen an der Geometrie der Maschine vornehmen und testen, ohne gleich eine neue Maschine bauen zu müssen. Die Messungen des Generators am

Brückengleichrichter und an der elektronischen Ladeschaltung werden deshalb im finiten Elemente Programm FEMAG wiederholt und mit den gesammelten Daten auf dem Prüfstand verglichen. Da der Strangstrom im Generator mit Brückengleichrichter, im Gegensatz zur elektronischen Ladeschaltung, nicht rein sinusförmig ist, wird der Strangstrom im Brückengleichrichterbetrieb aufgezeichnet. Dieser wird dann im Simulationsprogramm FEMAG nachgebildet, um damit den Brückengleichrichterbetrieb simulieren zu können.

Im ersten Teil dieser Diplomarbeit wird die genaue Aufgabenstellung erläutert. Es folgen die Beschreibungen der Maschinendaten des verwendeten Generators. Im nächsten Kapitel werden die Messungen auf dem Motorenprüfstand beschrieben. Zuerst wird der Aufbau des Prüfstandes erklärt. Es folgen die Messungen des Generators am Brückengleichrichter bei 12 V und bei 24 V. Es werden jeweils kurz der Messaufbau und das Messvorgehen beschrieben. Danach sind die Resultate der Messungen ersichtlich, welche kurz kommentiert werden. Die Entstehung der speziellen Stromform des Strangstromes des Generators wird ebenfalls kurz erläutert. Anschliessend folgen die Messungen an der elektronischen Ladeschaltung, welche nach dem gleichen Muster wie beim Brückengleichrichter abgehandelt werden. Ausserdem werden die Daten des Brückengleichrichterbetriebs mit denen der elektronischen Ladeschaltung verglichen.

Im anschliessenden Kapitel wird der theoretische Teil der Diplomarbeit abgehandelt. Die Simulation des Generators mit dem finiten Elemente Simulationsprogramm FEMAG. Als erstes wird das Programm FEMAG kurz erläutert. Es folgt die Beschreibung des Generatormodells im FEMAG Programm. Danach wird erklärt, wie der aufgenommene Strangstrom des Generators im Brückengleichrichterbetrieb, in ein FEMAG File zur Simulation übertragen wird. Es folgen die Simulationen für den Brückengleichrichterbetrieb und die elektronische Ladeschaltung, jeweils für 12 V und 24 V. Auch diese Resultate werden kurz kommentiert und miteinander verglichen. In den letzten Kapiteln dieser Arbeit erfolgt der Vergleich der Messungen am Prüfstand mit den simulierten Werten aus dem FEMAG. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Entscheidungsfindung. Weiter werden Optionen für die Verbesserung des Wirkungsgrades des Generators aufgezeigt. Die wichtigsten Erkenntnisse und Resultate werden zum Schluss nochmals wiedergegeben. Es wird beschrieben welche Möglichkeiten nun für die Zukunft vorhanden sind und wo allenfalls noch Verbesserungspotenzial und ungeklärte Fragen liegen.

2. Aufgabenstellung

Eine vorgegebene Permanent-Magnet-Maschine soll als Generator betrieben werden. Die abgegebene Leistung des Generators soll zur Ladung eines Akkumulators verwendet werden. Das Ziel dieser Arbeit ist nun die Erarbeitung der Entscheidungsgrundlage, ob aus energetischer Sicht eine kostengünstige Brückengleichrichterschaltung (B6, Diodengleichrichter) oder eine teurere elektronische Ladeschaltung zur Ladung des Akkumulators einzusetzen ist. Zudem ist ein FEMAG Modell des vorhandenen permanent erregten Synchrongenerators mit Diodengleichrichter zu erarbeiten, welches auch für zukünftige ähnliche Anwendungen gebraucht werden kann.

Die Arbeit besteht aus einem praktischen und einem theoretischen Teil. Auf einem Motorenprüfstand sollen, bei drei unterschiedlichen Akkumulator-Ladeströmen, die Drehzahlen und die Abgabeleistungen des bestehenden Generators mit einer Brückengleichrichterschaltung bestimmt werden.

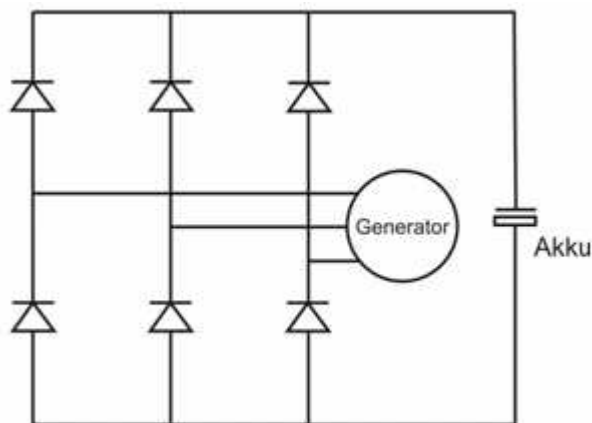


Abbildung 1: Brückengleichrichterschaltung. Aus: Salathé 2009, S. 2

Anschliessend wird der Generator bei den drei ermittelten Drehzahlen durch drei Schiebewiderstände, welche die elektronische Ladeschaltung ersetzen, dreiphasig belastet. Damit erfolgen die Messungen der maximalen Abgabeleistungen, welche für die Entscheidungsfindung miteinander zu vergleichen sind.

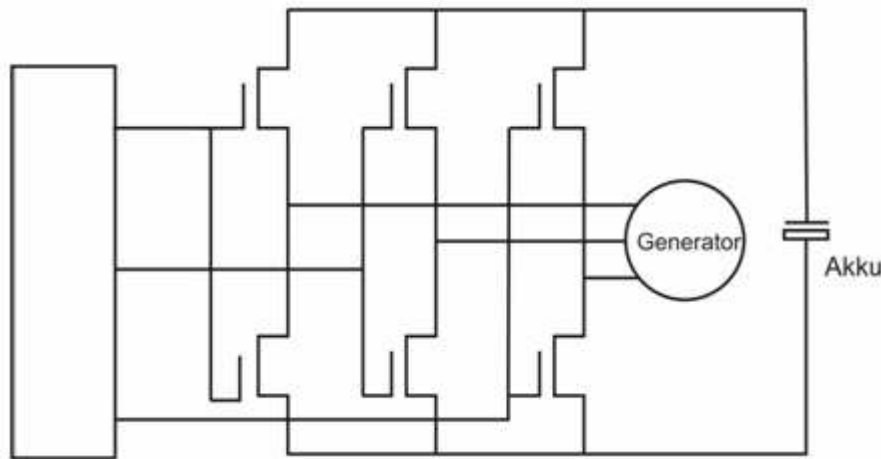


Abbildung 2: Elektronische Ladeschaltung. Aus: Salathé 2009, S. 2

Der zeitliche Verlauf des Stromes bei der Gleichrichterschaltung ist sehr schwer zu berechnen, da sich bei Belastung die elektrischen Vektoren des Synchrongenerators verschieben und zudem der Strom durch die Generatorinduktivität beeinflusst wird. Es ist deshalb die Form des Stromes bei den Messungen auf dem Prüfstand aufzunehmen und in einem FEMAG File (.poc-File) abzubilden (vgl. Salathé 2009).

Das finite Elemente Programm FEMAG ist ein Programm, zur Berechnung zweidimensionaler statisch oder zeitlich sinusförmig veränderlicher elektromagnetischer Felder. Es wurde seit 1982 am Institut für elektrische Maschinen der ETH Zürich entwickelt. Es besitzt ein Interface zu externen CAD-Systemen sowie ein eigenes CAD-System zur Darstellung der Basisgeometrie. Weiter besitzt FEMAG diverse Eingabemasken und Funktionen zur Berechnung und Analyse von elektrischen Maschinen sowie zur Modellbildung. Das Programm eignet sich daher bestens für die Analyse sowie für die optimale Auslegung und Gestaltung der Geometrien elektromagnetischer Produkte (vgl. FEMAG 2009). Mit der Abbildung des Stromes im Brückengleichrichterbetrieb ins FEMAG kann der Aufbau des Generators mit Diodengleichrichter simuliert werden. So lassen sich in Zukunft solche Schaltungen auch mit grösseren oder modifizierten Generatoren simulieren, ohne die entsprechenden Maschinen zuerst bauen zu müssen. Die abgegebenen Leistungen sind bei den drei ermittelten Drehzahlen im FEMAG für die Brückengleichrichterschaltung und die elektronische Ladeschaltung nachzurechnen und mit den Messungen auf dem Prüfstand zu vergleichen.

3. Maschinendaten des Generators

Der Generator PMG120 ist in einem IEC-56 Aluminium-Druckgussgehäuse eingebaut. Die maximal abgegebene Leistung des Generators beträgt 100 W bei einer Spannung von 12 V und 200 W bei 24 V. Er kann mit einer Drehzahl von 0 bis 3000 U/min betrieben werden und liefert maximal einen Strom von 7.5 A. Der interne Widerstand beträgt 1.6Ω , die Induktivität 2.4 mH (Phase-Phase). Der Generator hat ein Gewicht von 2.3 kg (vgl. Maurer 2009). Der Stator des Generators hat einen Aussendurchmesser von 80 mm. Der Innendurchmesser beträgt 40 mm. Der Rotor hat einen Durchmesser von 37.6 mm. Es entsteht damit ein Luftspalt zwischen Stator und Rotor von 1.2 mm. Die Länge des Rotors beträgt 40 mm. Der Rotor besitzt sechs halbmondförmige Seltenerd-magnete aus Neodym-Eisen-Bor (BMN-38H). Der 6-polige Generator wird in Sternschaltung betrieben.

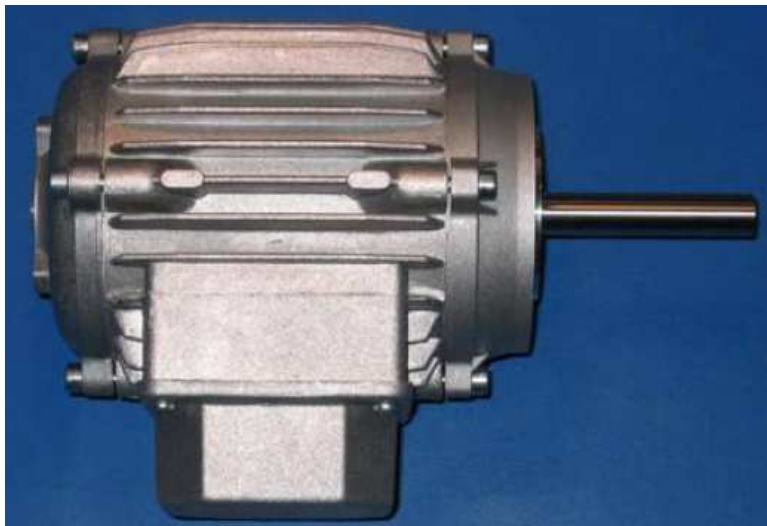


Abbildung 3: Generator PGM120. Aus: Maurer 2009

4. Messungen auf dem Generatorprüfstand

Um den Unterschied der Leistung und des Wirkungsgrades zwischen der Brückengleichrichterschaltung und der elektronischen Ladeschaltung nicht nur auf der Basis von Berechnungen und Simulationen zu ermitteln, werden auch eine Anzahl praktischer Tests durchgeführt. Hierzu wurde ein Motorenprüfstand der Firma Circle Motor AG verwendet.

4.1 Aufbau des Prüfstandes

Beim Motorenprüfstand handelt es sich um eine aufgebaute Motor-Generator-Gruppe, bestehend aus einer asynchronen Antriebsmaschine und dem zu prüfenden Generator.

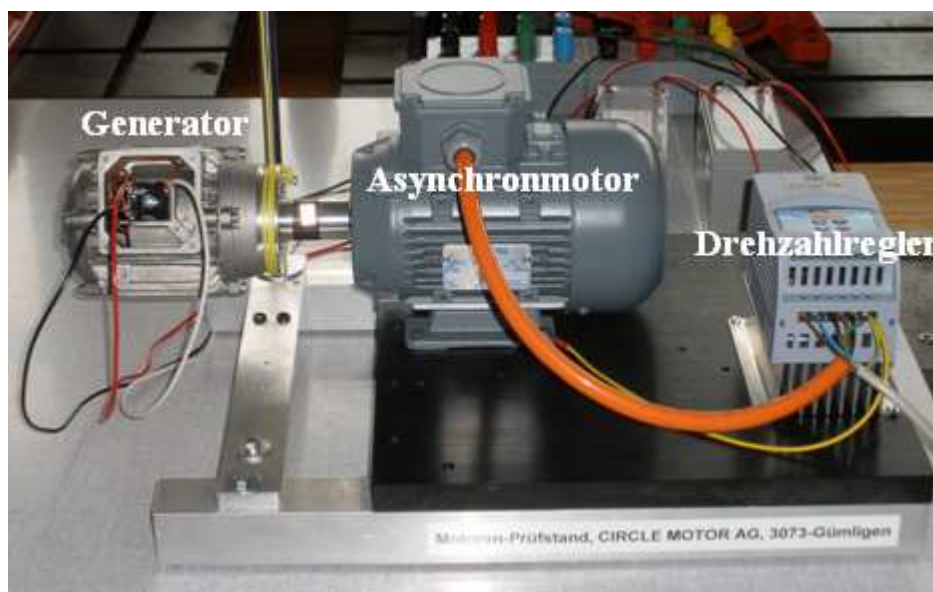


Abbildung 4: Motorenprüfstand

Über einen Drehzahlregler (CFW 10 Easydrive) wird die Frequenz für die Asynchronmaschine eingestellt. Die Asynchronmaschine treibt den auszumessenden Generator an. Es handelt sich um eine dreiphasige Asynchronmaschine (TEE Electric Motors, QS 71M2A-40 H), welche sich in einem IC41-Gehäuse befindet und 7 kg wiegt. Sie hat eine Abgabeleistung von 0.37 kW (bei 50 Hz), bei einer Nenndrehzahl von 2800 U/min. Die Asynchronmaschine ist in Dreieck geschaltet und hat eine Stromaufnahme von 1.68 A, bei einer Spannung von 220 V. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ beträgt 0.84.

An der von der Asynchronmaschine angetriebenen Welle ist der in Kapitel 3 beschriebene Generator befestigt. Mit einem digitalen Laser-Drehzahlmessgerät (Ono Sokki, HT-5100) wird die Drehzahl (n [U/min]) an der Welle ermittelt.

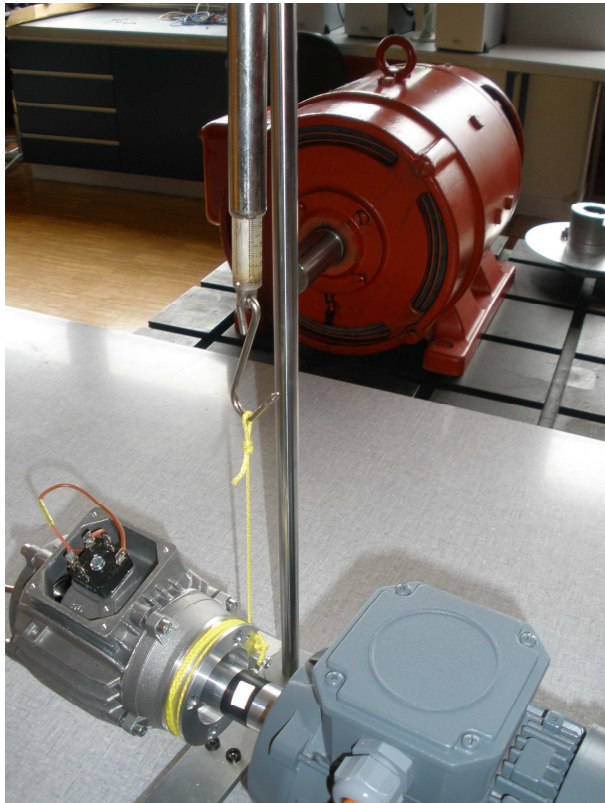


Abbildung 5: Federwaage am Generator zur Bestimmung des Drehmoments

Zur Bestimmung des Drehmoments ist eine Federwaage (bis 5 kg) über eine Schnur mit dem Generator gekoppelt. Die Kraft F wird aus der angezeigten Masse (m [gr.]) der Federwaage und der Erdbeschleunigung (g [m/s^2]) bestimmt.

$$F = \frac{m \cdot g}{1000}$$

Der Radius (r) des Generators an der Welle beträgt 0.0375 m. Daraus lässt sich das Drehmoment M des Generators bestimmen.

$$M = F \cdot r$$

Die aufgenommene Leistung des Generators kann dann folgendermassen berechnet werden:

$$P_{\text{auf_Gen}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M$$

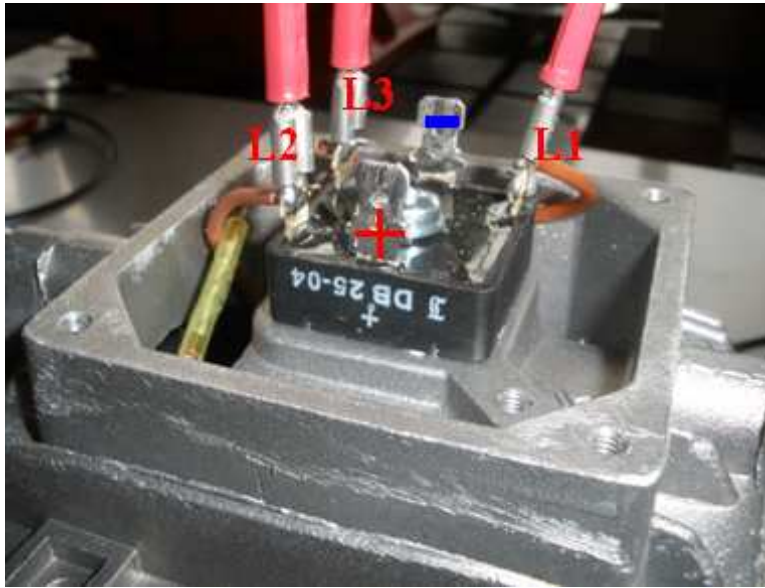


Abbildung 6: Anschlussbrett des Generators

Der Diodengleichrichter ist am Anschlussbrett des Generators integriert. Es sind somit für die Versuche fünf Abgangsklemmen vorhanden (vgl. Abb. 6). Die drei Abgänge der Statorwicklungen des Generators (L1, L2, L3), sowie (+) und (-) des Gleichrichterausgangs.

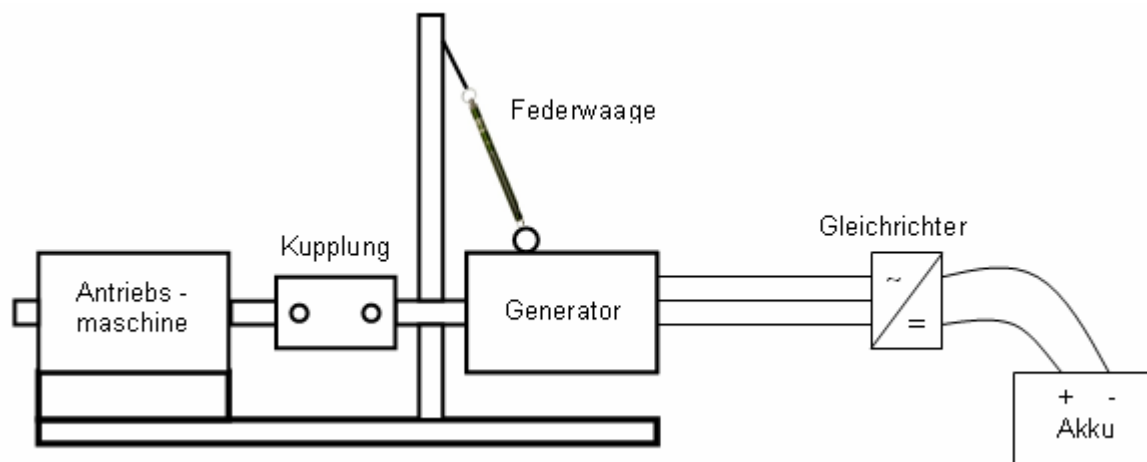


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Generators am Brückengleichrichter

Beim Generatorbetrieb am Brückengleichrichter wird als Last ein 12 V- bzw. 24 V-Bleiakkumulator, im weiteren Verlauf dieser Arbeit kurz als Akku bezeichnet, geladen (vgl. Abb. 7). Hierzu werden die beiden Gleichrichterabgänge des Generators benötigt. Die elektronische Ladeschaltung wird bei den Prüfstandsmessungen mit drei Lastwiderständen in Sternschaltung substituiert (vgl. Abb. 8), welche an den drei Statorabgängen des Generators angeschlossen werden.

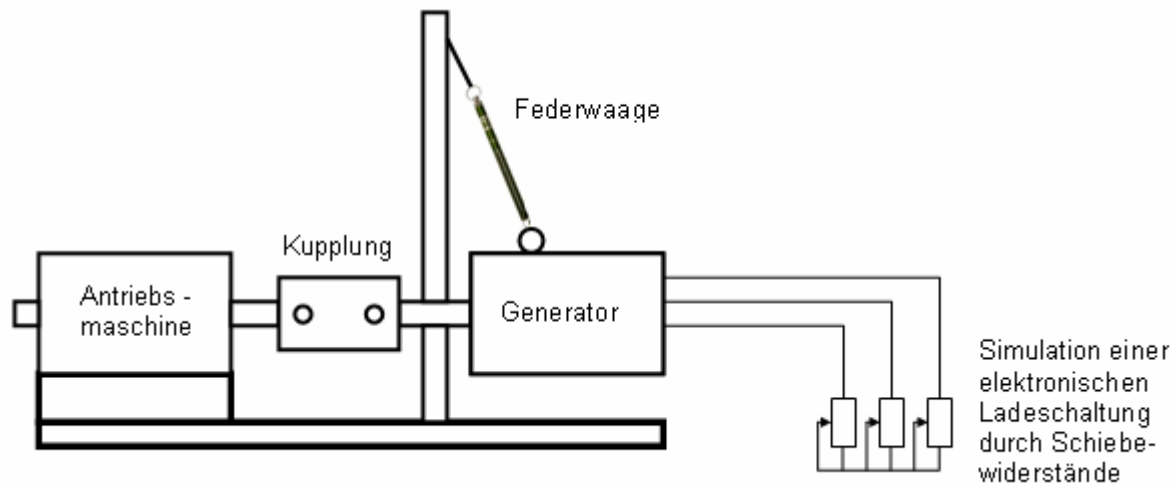


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Generators an der elektronischen Ladeschaltung

4.2 Messung des Generators am Brückengleichrichter mit 12 V-Akkumulator

Der Generator wird bei dieser Messung am Brückengleichrichter betrieben. Am Gleichrichterausgang wird ein 12 V-Bleiakku angeschlossen (Powerfit S312/7 S, 7 Ah). Bei drei verschiedenen Akku-Ladeströmen soll nun die Drehzahl an der Welle bestimmt werden. Mit unserem Industriepartner Markus Lindegger wurden die Ladestromwerte 1.5 A, 3 A und 4 A festgelegt. Die asynchrone Antriebsmaschine wurde nun mit dem Drehzahlregler hochgefahren, bis ein Ladestrom am Akku in der Grösse der vorher bestimmten Ladeströme floss. Die Drehzahl an der Welle in diesem Zustand wurde mit dem Lasermessgerät aufgenommen. Sie wird für die Messungen der elektronischen Ladeschaltung sowie für die Simulationen benötigt. Weiter wurden auch die abgegebene und aufgenommene Leistung sowie der Wirkungsgrad des Generators und des Diodengleichrichters berechnet. Diese Daten werden später mit den Messungen der elektronischen Ladeschaltung verglichen. Um die Gleichrichterschaltung auch im FEMAG simulieren zu können, wird jeweils ein Strangstrom des Generators mit dem Oszilloskop (Tektronix TPS 2014) aufgezeichnet. Die Ladespannung und der Ladestrom des Akkus wurden mit digitalen Multimetern vom Typ Fluke 87 gemessen. Die Umgebungstemperatur bei den Messungen betrug jeweils ca. 20 °C (Raumtemperatur).

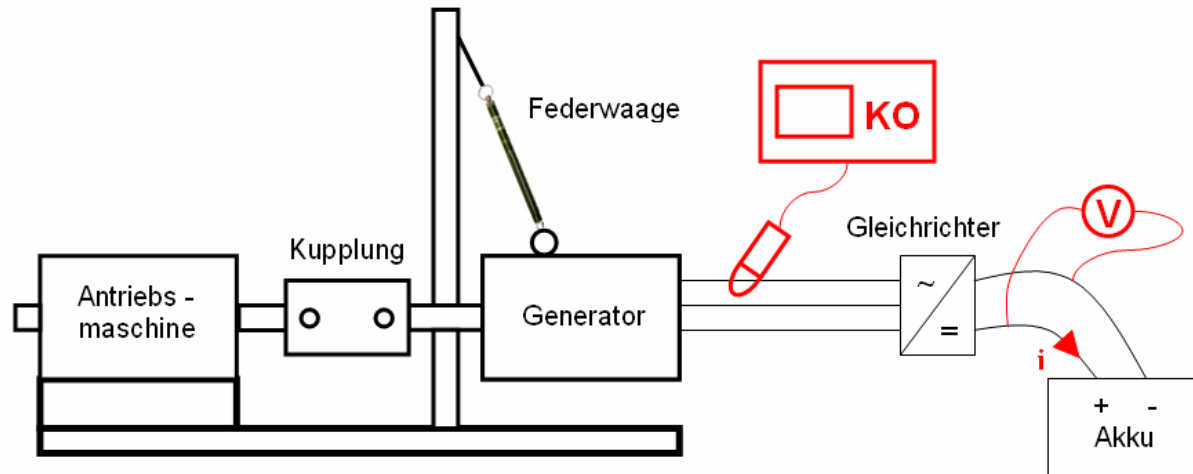


Abbildung 9: Schematische Messanordnung im Brückengleichrichterbetrieb

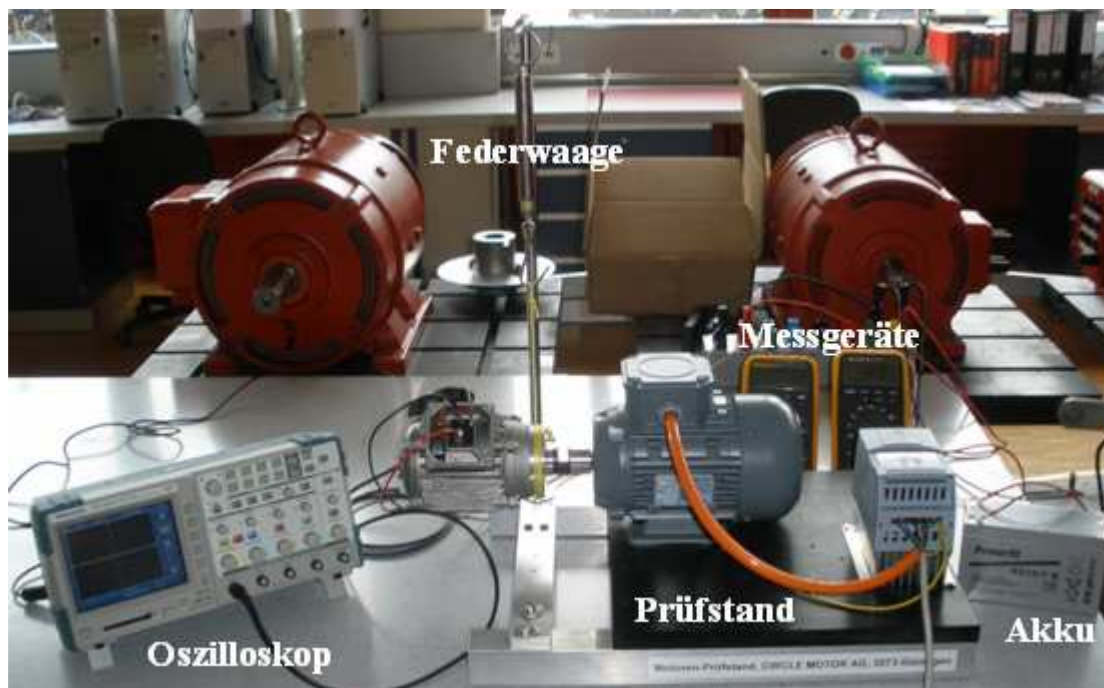


Abbildung 10: Motorenprüfstand mit den Messeinrichtungen am 12 V-Akkumulator

4.2.1 Resultate

Die Leistungen und Wirkungsgrade werden wie folgt berechnet:

$$P_{\text{auf_Gen}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot F \cdot r$$

$$P_{\text{ab_Gen}} = P_{\text{auf_B6}} = 3 \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

$$P_{\text{ab_B6}} = U_{\text{L_eff}} \cdot I_{\text{L_eff}}$$

$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{P_{\text{ab_Gen}}}{P_{\text{auf_Gen}}}$$

$$\eta_{\text{B6}} = \frac{P_{\text{ab_B6}}}{P_{\text{auf_B6}}}$$

$$\eta_{\text{Total}} = \eta_{\text{Gen}} \cdot \eta_{\text{B6}} = \frac{P_{\text{ab_B6}}}{P_{\text{auf_Gen}}}$$

n = Drehzahl an der Welle
F = Gewichtskraft (mit Waage ermittelt)
r = Radius des Generators an der Welle (37.5 mm)
U_{L_eff} = Ladespannung am Akku
I_{L_eff} = Ladestrom am Akku
U_{eff} = Strangspannung im Generator
I_{eff} = Strangstrom im Generator
P_{auf_Gen} = Aufgenommene Leistung des Generators
P_{ab_Gen} = Abgegebene Leistung des Generators
P_{auf_B6} = Aufgenommene Leistung des Gleichrichters (Brückenschaltung 6-pulsig)
P_{ab_B6} = Abgegebene Leistung des Gleichrichters
η_{Gen} = Wirkungsgrad des Generators
η_{B6} = Wirkungsgrad des Gleichrichters
η_{Total} = Gesamtwirkungsgrad

Bei den Ladespannungen und Ladeströmen sowie bei den Strangspannungen und Strangströmen handelt es sich um Effektivwerte. Folgende Daten wurden im Brückengleichrichterbetrieb mit dem 12 V Akku ermittelt:

n [U/min]	U _{L_eff} [V]	I _{L_eff} [A]	U _{eff} [V]	I _{eff} [A]	F [N]	P _{auf_Gen} [W]	P _{ab_Gen} = P _{auf_B6} [W]	P _{ab_B6} [W]	η _{Gen} [%]	η _{B6} [%]	η _{Total} [%]
1113	17.34	1.5	8.2	1.29	8.04	35.16	31.73	26.01	90.26	81.96	73.98
1320	18.22	3	8.57	2.47	14.72	76.27	63.50	54.66	83.26	86.07	71.66
1455	18.6	4	8.82	3.33	19.13	109.30	88.11	74.40	80.62	84.44	68.07

Tabelle 1: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 12 V

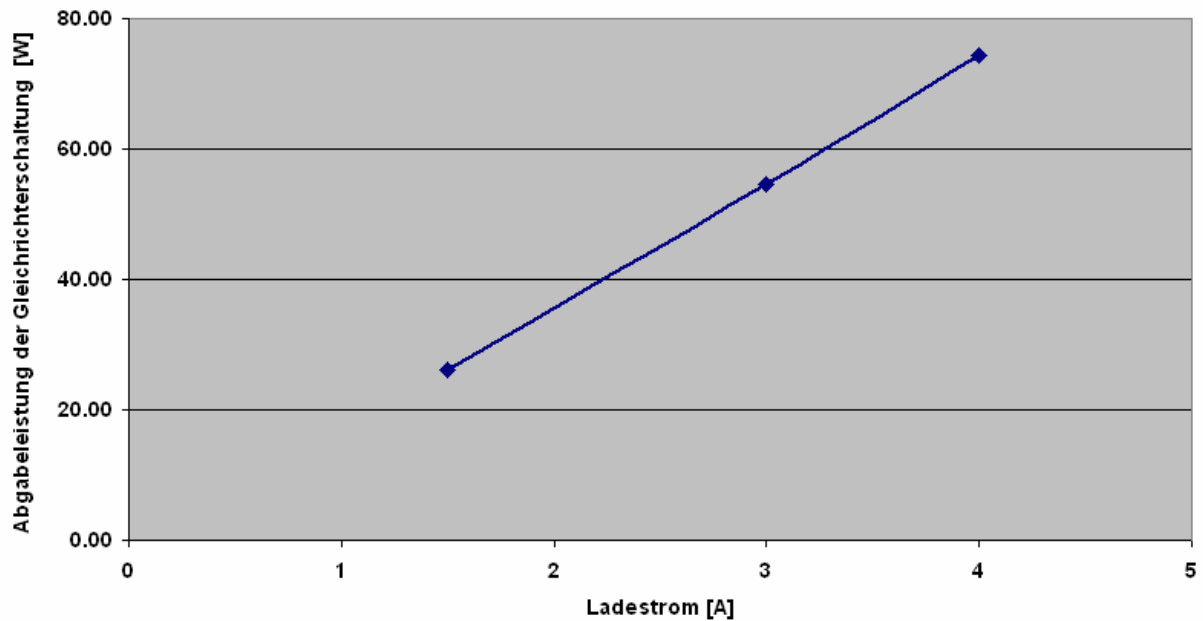


Abbildung 11: Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltung mit 12 V-Akkumulator

Die abgegebene Leistung des Generators am Diodengleichrichter mit 12 V-Akkumulator reicht mit den bestimmten Ladeströmen von 26 W bis 74 W. Der Gesamtwirkungsgrad sinkt dabei von 74 % auf 68 %.

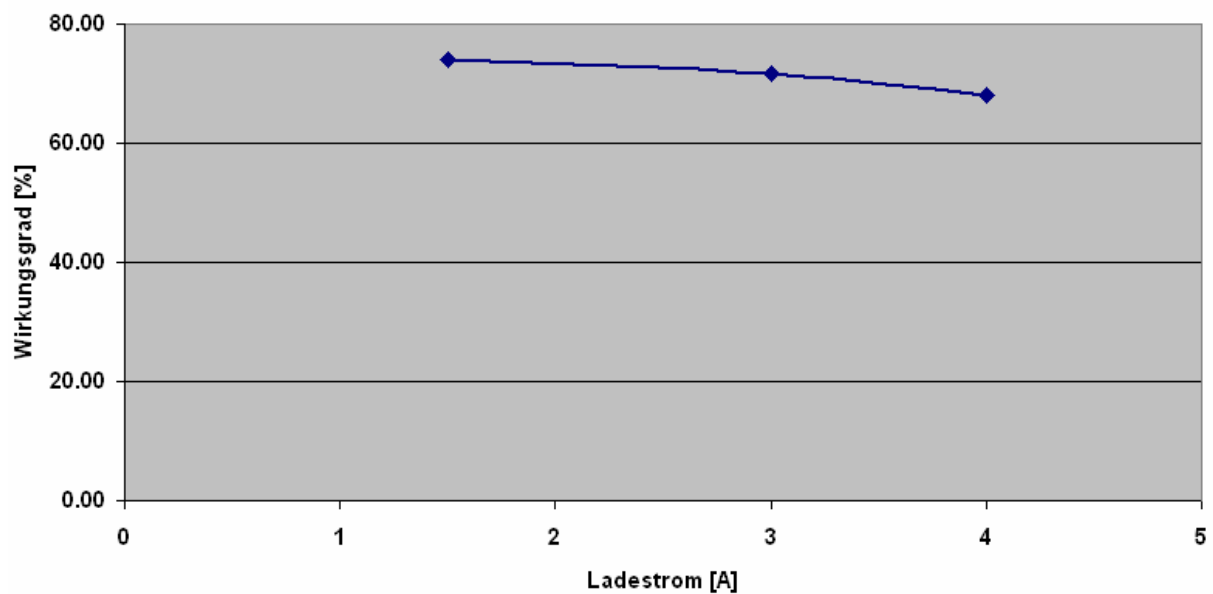


Abbildung 12: Wirkungsgrad im Brückengleichrichterbetrieb mit 12 V-Akkumulator

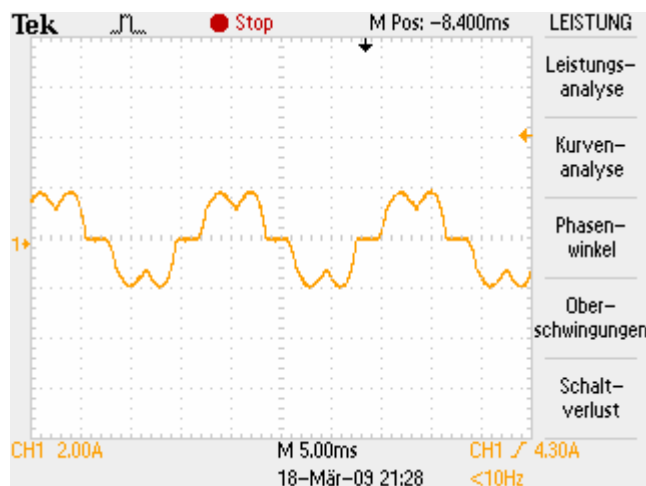


Abbildung 13: Strangstrom des Generators bei 1.5 A Ladestrom

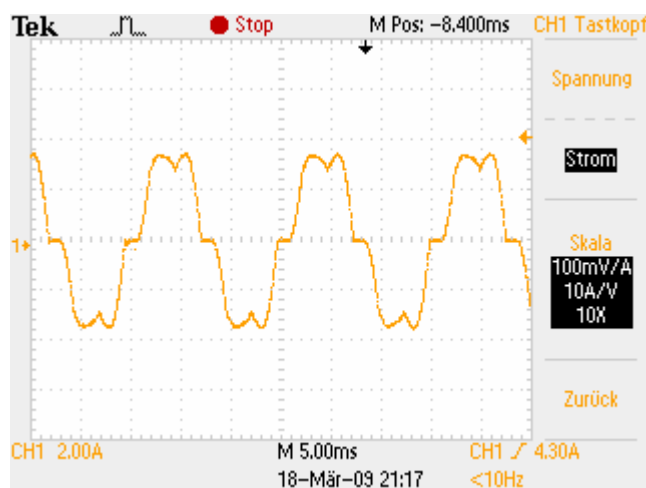


Abbildung 14: Strangstrom des Generators bei 3 A Ladestrom

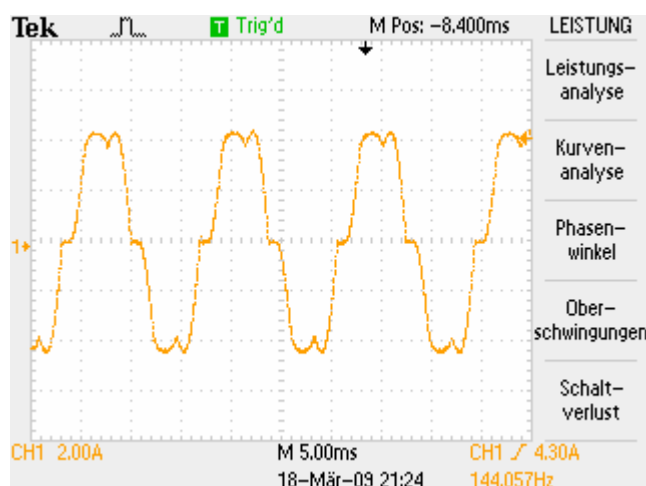


Abbildung 15: Strangstrom des Generators bei 4 A Ladestrom

Die Stromform der drei aufgenommenen Strangströme ist fast identisch. Es lassen sich Lade- und Entladevorgänge in der Stromform entdecken. Die spezielle Stromform, welche wie er-

wartet nicht mehr sinusförmig ist, entsteht durch die Kommutierungsvorgänge der Dioden im Brückengleichrichter. Bei genauerer Betrachtung erkennt man, dass der zweite Buckel gegenüber dem ersten Buckel mit zunehmendem Ladestrom schmaler wird. Die genaue Entstehung der Stromform wird in Kapitel 4.4 erklärt. Die Stromamplituden der Oberschwingungen sind in den drei Fällen unterschiedlich hoch. Bei den Ladeströmen von 3 A und 4 A fallen vor allem die 5. und die 7. harmonische Schwingung ins Gewicht. Bei einem Ladestrom von 1.5 A werden zusätzlich die 11. und 13. harmonische Schwingung grösser als 2 % der Grundschwingung und damit nicht mehr vernachlässigbar.

4.3 Messung des Generators am Brückengleichrichter mit 24 V-Akkumulator

Die im Kapitel 4.2 erläuterten Messungen werden hier wiederholt. Diesmal werden aber zwei 12 V-Akkus in Serie geschaltet. Damit können Messungen für 24 V durchgeführt werden. Weiter werden zusätzlich die Drehzahlen an der Welle bei 5 A und 6 A Ladestrom aufgenommen.

4.3.1 Resultate

Bei den Ladespannungen und Ladeströmen sowie den Strangspannungen und Strangströmen handelt es sich um Effektivwerte. Folgende Daten wurden im Brückengleichrichterbetrieb mit dem 24 V Akku ermittelt:

n [U/min]	U_{L_eff} [V]	I_{L_eff} [A]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} = P_{auf_B6} [W]	P_{ab_B6} [W]	η_{Gen} [%]	η_{B6} [%]	η_{Total} [%]
2005	34.28	1.5	15.4	1.26	7.55	59.47	58.21	51.42	97.88	88.33	86.46
2300	36	3	16.54	2.51	14.72	132.90	124.55	108.00	93.71	86.71	81.26
2477	36.8	4	16.85	3.31	18.84	183.21	167.32	147.20	91.33	87.97	80.35
2650	37.3	5	17.1	4.1	23.05	239.90	210.33	186.50	87.67	88.67	77.74
2820	38.08	6	17.31	4.93	27.47	304.17	256.01	228.48	84.17	89.24	75.11

Tabelle 2: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 24 V

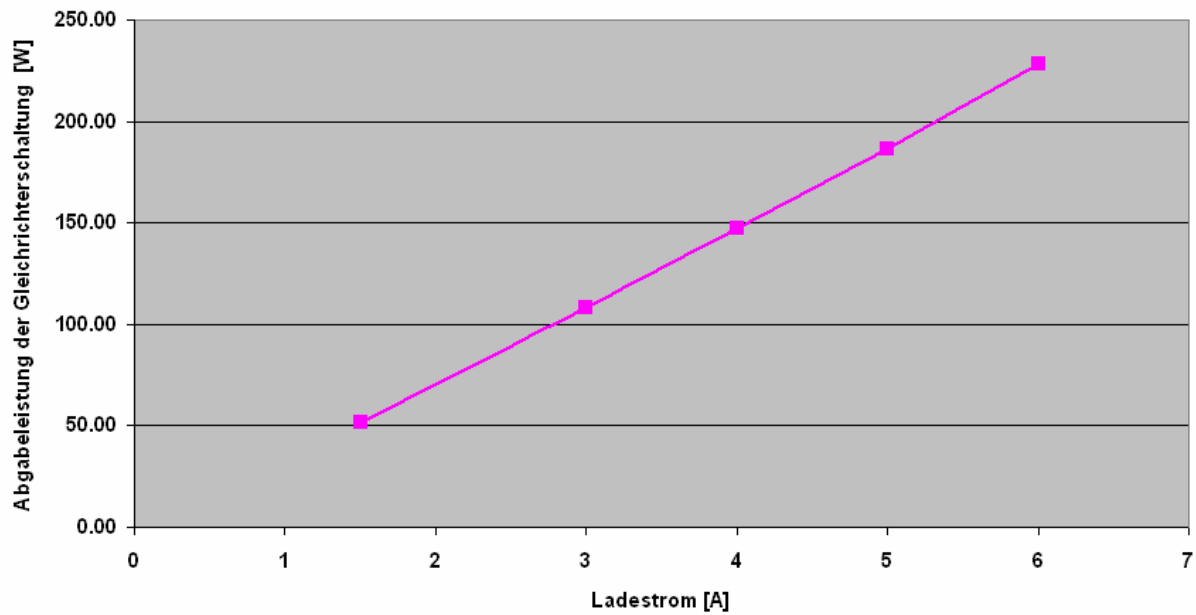


Abbildung 16: Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltung mit 24 V-Akkumulator

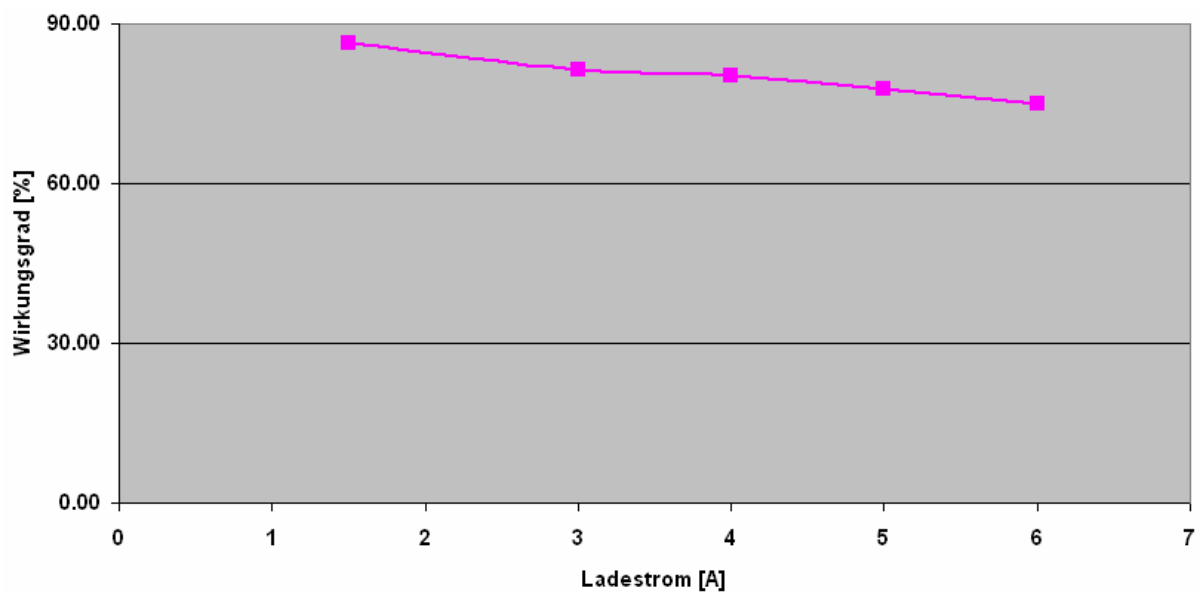


Abbildung 17: Wirkungsgrad im Brückengleichrichterbetrieb mit 24 V-Akkumulator

Die abgegebene Leistung des Generators am Diodengleichrichter mit 24 V-Akkumulator reicht mit den bestimmten Ladeströmen von 51 W bis 228 W. Der Gesamtwirkungsgrad sinkt dabei von 86 % auf 75 %.

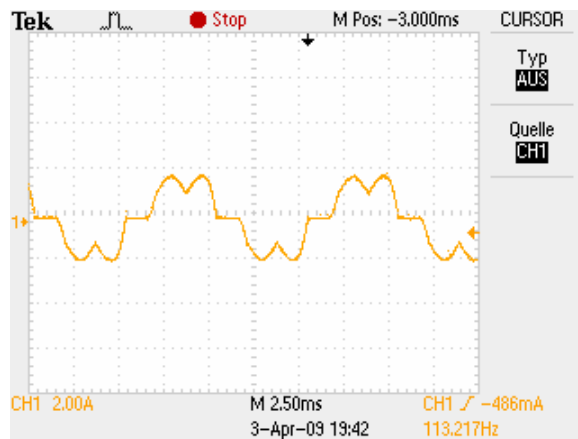


Abbildung 18: Strangstrom des Generators bei 1.5 A Ladestrom

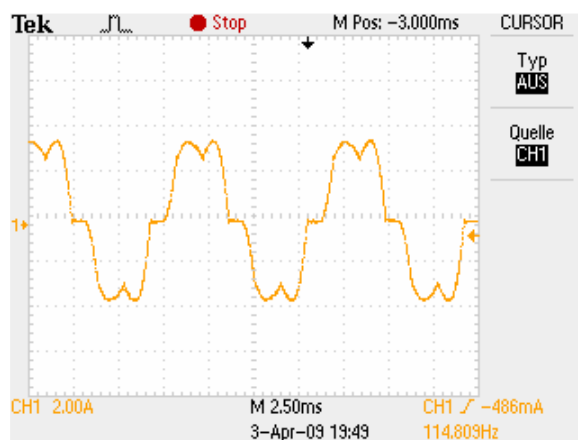


Abbildung 19: Strangstrom des Generators bei 3 A Ladestrom

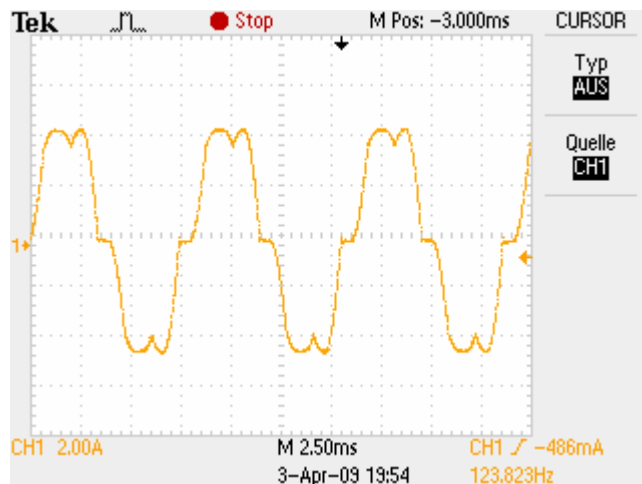


Abbildung 20: Strangstrom des Generators bei 4 A Ladestrom

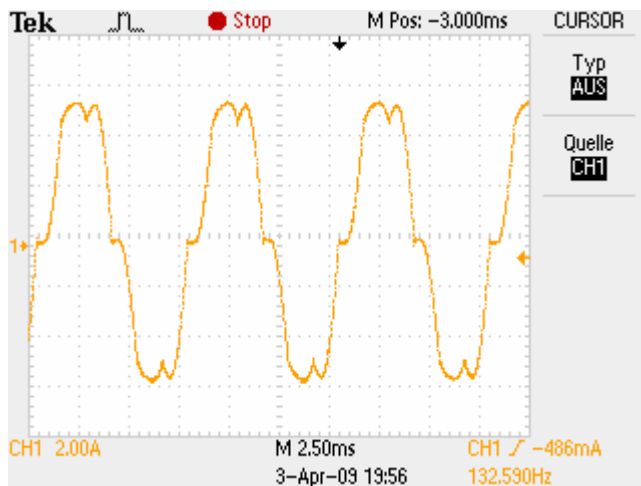


Abbildung 21: Strangstrom des Generators bei 5 A Ladestrom

Im Brückengleichrichterbetrieb bei 24 V zeigt sich, wie im 12 V-Betriebsfall, bei zunehmendem Ladestrom eine grössere Unsymmetrie zwischen dem ersten und dem zweiten Strombukel des Strangstromes. Wie bei der 12 V-Messung sind auch hier die Amplituden der Oberwellen in den verschiedenen Strangströmen unterschiedlich gewichtet. Es ist wiederum die 5. und 7. harmonische Schwingung welche dominant ist. Hinzu kommen die 11. und 13. harmonische Schwingung bei 1.5 A Ladestrom, welche auch hier wieder grösser als 2 % der Grundschwingung werden.

4.4 Erläuterungen zum Strangstrom des Generators im Brückengleichrichterbetrieb

Wie in den Kapiteln 4.2 und 4.3 gesehen, ist der Strangstrom des Generators im Brückengleichrichterbetrieb nicht mehr sinusförmig. Ausserdem verändert sich die Stromform des Strangstromes mit zunehmendem Ladestrom des Akkumulators. Die Buckel des Strangstromes werden unsymmetrisch.

Der Ladestrom des Akkumulators wäre mit idealer L-Glättung an der Last ein sauberer Gleichstrom. Die Stromform im Strang des Generators wäre dabei ein Rechteckstrom (vgl. Abb. 22).

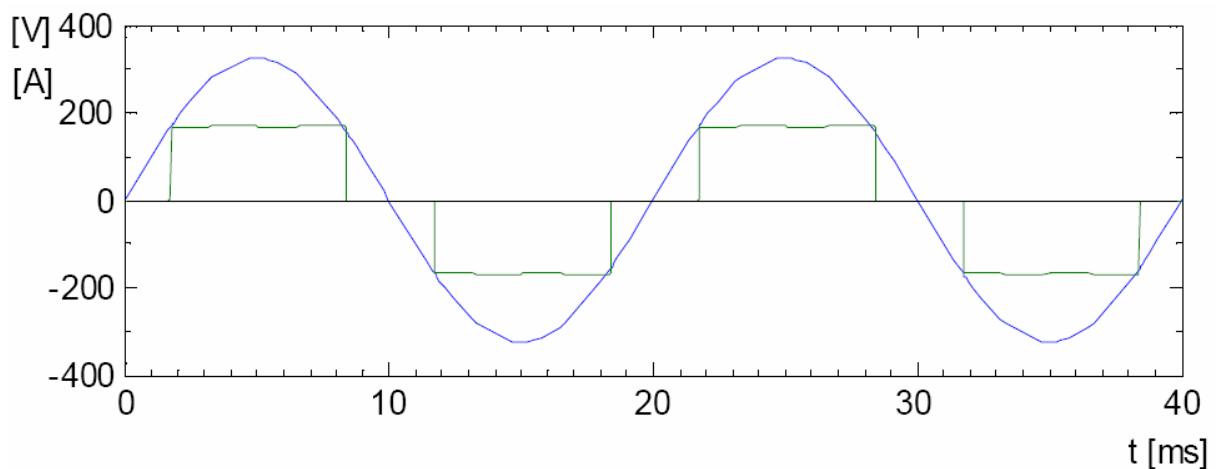


Abbildung 22: Strangstrom (grün) und Strangspannung (blau) eines Generators im Brückengleichrichterbetrieb bei idealer L-Glättung. Aus: Omlin 2008, S. 23

Diese ideale L-Glättung ist nun aber nicht vorhanden. Die Last ist im auszumessenden Fall ein Akkumulator. Dieser kann als Gegenspannungsquelle und ohmschen Widerstand dargestellt werden (vgl. Abb. 23). Seine Induktivität ist vernachlässigbar klein.

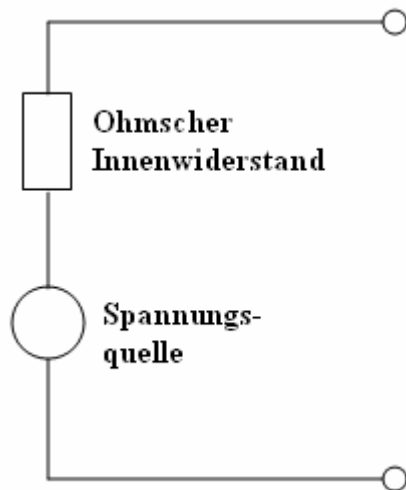


Abbildung 23: Ersatzschaltung eines Akkumulators

Der Ladestrom des Akkumulators enthält die Pulsformen der gerichteten Sinuswellen (vgl. Abb. 24).

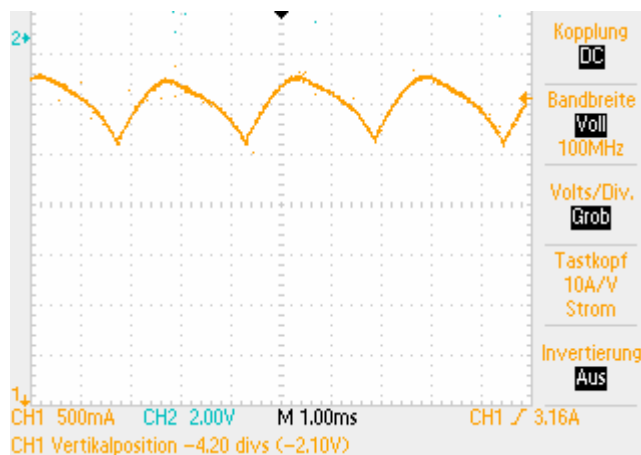


Abbildung 24: Ladestrom des Akkumulators im Brückengleichrichterbetrieb

Diese Pulsformen des Akkumulatorladestromes wirken sich auch auf den Strangstrom des Generators aus. So besitzt der Strangstrom nicht mehr eine reine Rechteckform, sondern enthält nun die entsprechenden Buckel des Akkumulatorladestromes (vgl. Abb. 25).

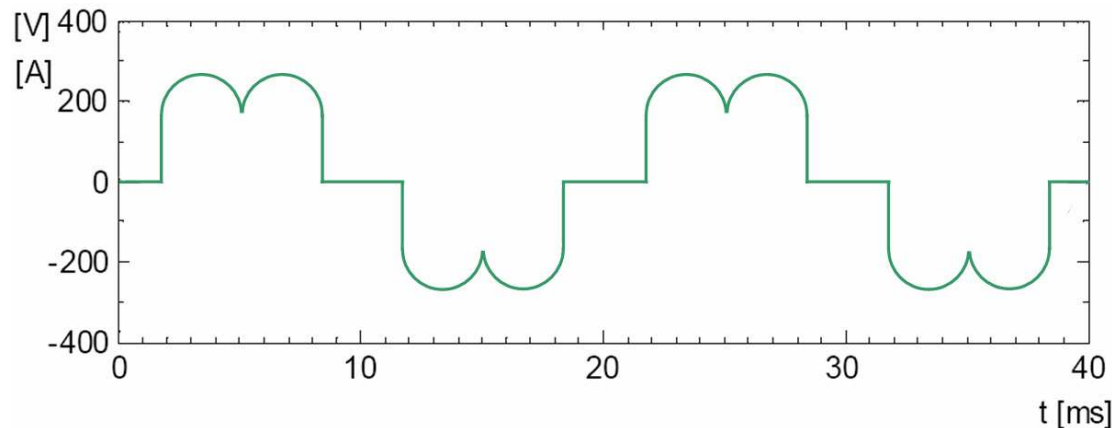


Abbildung 25: Modell eines Generatorstrangstromes im Brückengleichrichterbetrieb ohne Glättung

Hinzu kommt nun noch die Kommutierung der Dioden. Unter der Kommutierung versteht man den Wechsel des Stromes eines Halbleiterpaares auf ein anderes. Diese Kommutierung erfolgt bei Dioden ganz natürlich. Es entstehen pro Netzperiode sechs Kommutierungen bei einem B6-Brückengleichrichter, da 6 Dioden vorhanden sind. Der Strom durch einen Strang kann beim Wechsel von einem Halbleiter zum Nächsten, wegen der Induktivität des Generators, nicht sofort unterbrochen werden. Der Strom baut sich im einen Halbleiter verzögert ab, während sich der Strom im anderen Halbleiter verzögernd aufbaut (vgl. Omlin 2008, S. 18). Diese Lade- und Entladevorgänge sind im Strangstrom des Generators ersichtlich (vgl. Abb. 26).

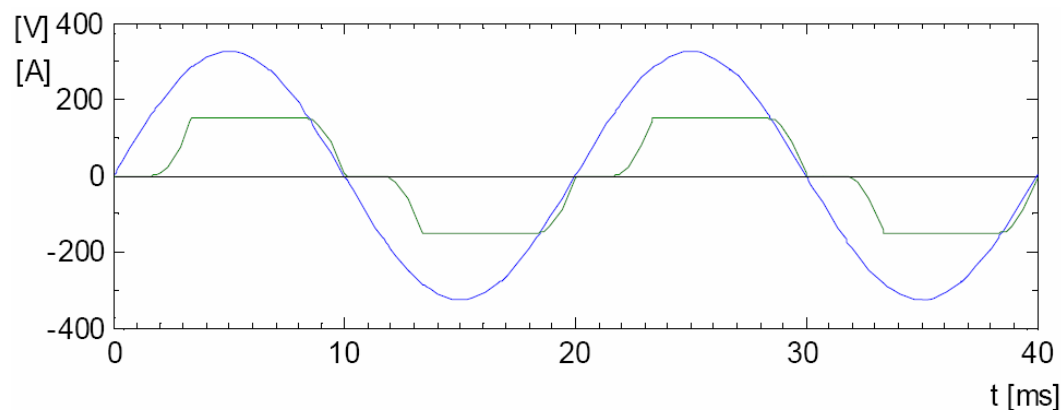


Abbildung 26: Strangstrom (grün) und Strangspannung (blau) eines Generators im Brückengleichrichterbetrieb mit Kommutierung und idealer L-Glättung. Aus: Omlin 2008, S. 24

Die Lade- und Entladevorgänge sind auch in den aufgezeichneten Strangströmen des ausgemessenen Generators im Brückengleichrichterbetrieb gut erkennbar (vgl. Abb. 27).

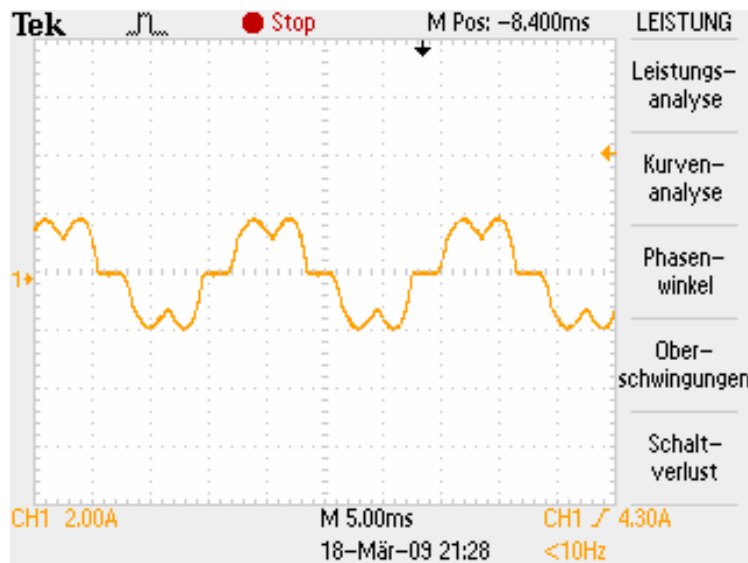


Abbildung 27: Strangstrom des Generators bei 1.5 A Ladestrom im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb

Weiter verläuft die ebenfalls pulsierende Spannung am Ausgang des Brückengleichrichters (Spannung am Akku) nicht mehr genau entlang der Netzspannung, sondern sie verläuft, bedingt durch die stetigen Stromwechsel an den Induktivitäten durch die Kommutierung der Dioden, dazwischen (vgl. Abb. 28).

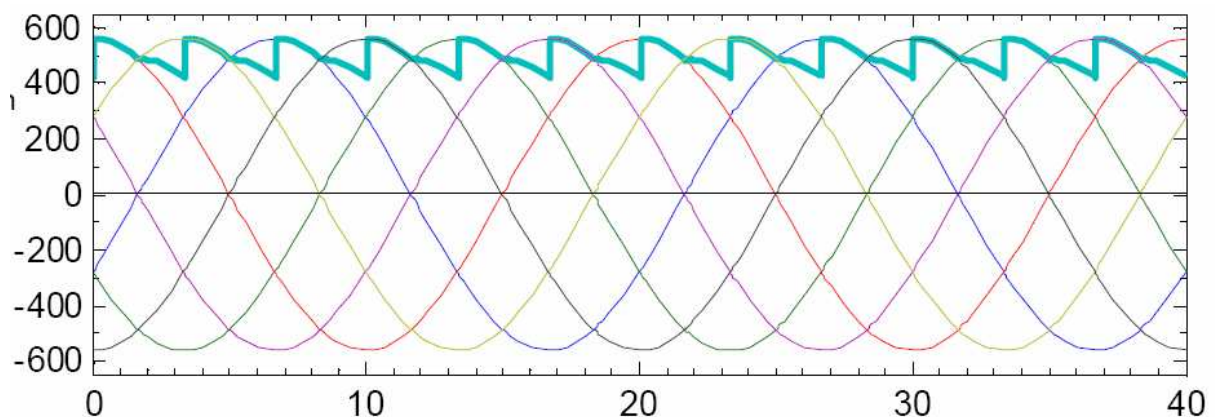


Abbildung 28: Spannung an einem Brückengleichrichterausgang (hellblau) mit Berücksichtigung der Kommutierung. Aus: Omlin 2008, S. 24

Mit zunehmendem Ladestrom wird auch der Kommutierungsvorgang verlängert. Der Spannungsverlauf der Ausgangsspannung des Brückengleichrichters zwischen dem Netzstrom wird länger. Die Verlängerung des Kommutierungsvorganges führt auch zu der Unsymmetrie der beiden Strombuckel des Strangstromes im Generator (vgl. Abb. 29). Der erste Buckel wird gegenüber dem zweiten Buckel breiter.

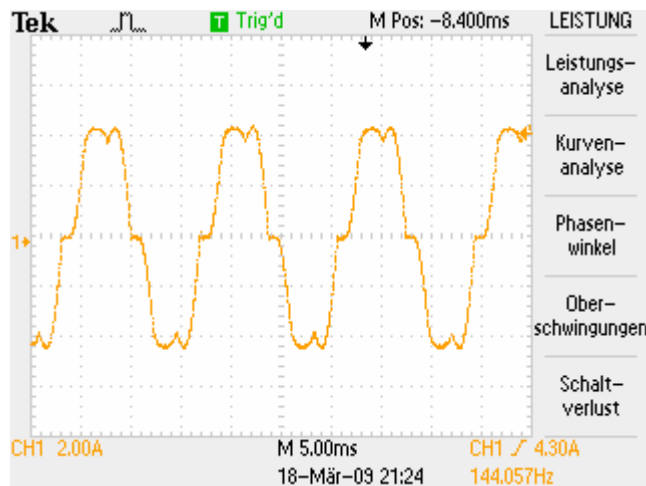


Abbildung 29: Strangstrom des Generators bei 4 A Ladestrom im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb

4.5 Messung des Generators an der elektronischen Ladeschaltung 12 V

Die Strangströme des Generators bei einer Akkuladung mit einer elektronischen Ladeschaltung sind sinusförmig. Die elektronische Ladeschaltung wird deshalb auf dem Motorenprüfstand mit Schiebewiderständen simuliert. Die drei Widerstände werden in Stern geschaltet.

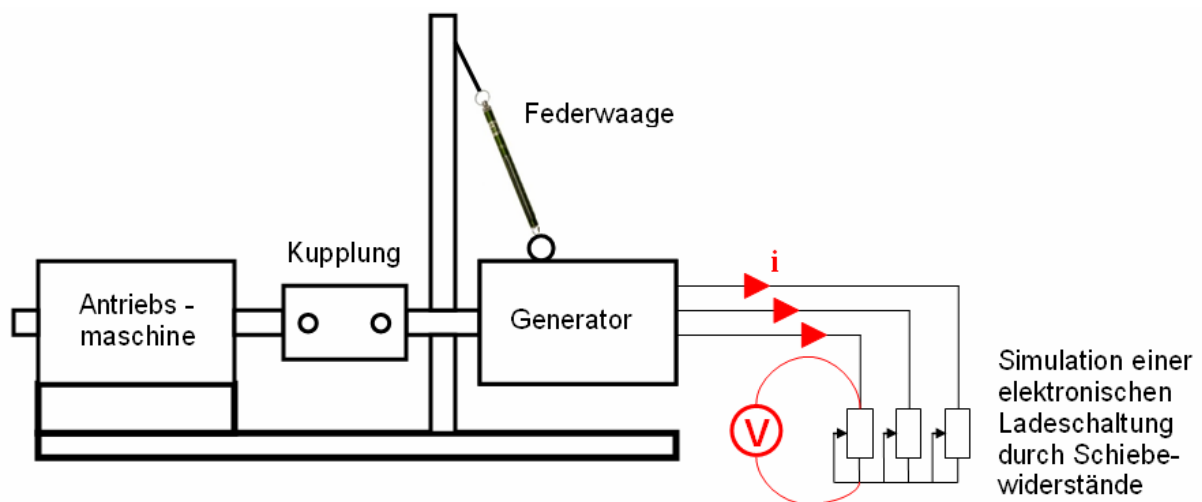


Abbildung 30: Schematische Messanordnung bei elektronischer Ladeschaltung (Schiebewiderstände)

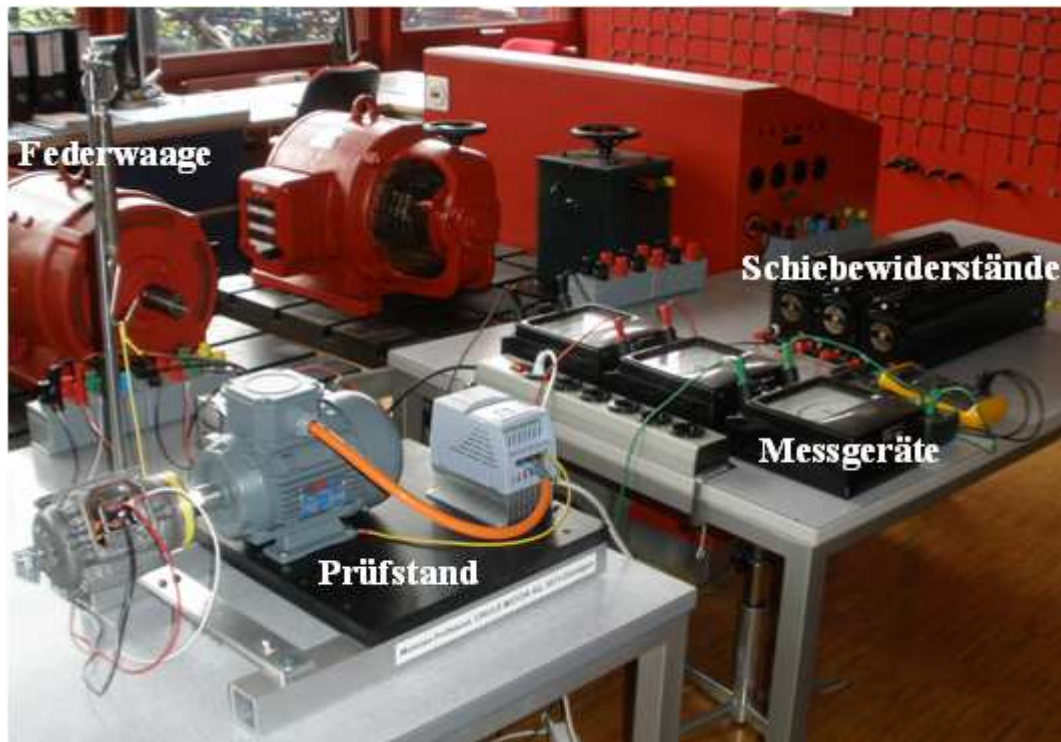


Abbildung 31: Motorenprüfstand mit den Messeinrichtungen und den Schiebewiderständen

Die Antriebsmaschine wird mit dem Drehzahlregler hochgefahren, bis an der Welle die im Brückengleichrichterbetrieb bei 12 V gemessene Drehzahl für einen bestimmten Ladestrom herrscht (z.B. 1455 U/min bei einem Ladestrom von 4 A). Die Widerstände werden nun gleichmässig so weit verstellt, dass die maximale Abgabeleistung des Generators erzielt wird. Die Drehzahl an der Welle wird dabei durch Nachregeln der Antriebsmaschine konstant gehalten. Die Spannung am Widerstand wurde mit einem digitalen Multimeter (Fluke 87) gemessen. Die Strangströme wurden mit drei im Labor vorhandenen analogen Dreheisenmessgeräten (Genauigkeitsklasse 0.5, max. Messwert 6 A bzw. 25 A) eingestellt. Der Effektivwert eines Strangstromes wurde für die Berechnungen zusätzlich mit einem digitalen Multimeter (Metra Hit 18s) gemessen. Die Umgebungstemperatur bei den Messungen betrug jeweils ca. 20 °C (Raumtemperatur).

4.5.1 Resultate

Die abgegebene und aufgenommene Leistung sowie der Wirkungsgrad des Generators lassen sich aus folgenden Grössen berechnen:

$$P_{auf_Gen} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot F \cdot r$$

$$P_{ab_Gen} = P_{auf_B6} = 3 \cdot U_{eff} \cdot I_{eff}$$

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{ab_Gen}}{P_{auf_Gen}}$$

n = Drehzahl an der Welle
F = Gewichtskraft (mit Waage ermittelt)
r = Radius des Generators an der Welle (37.5 mm)
U_{eff} = Strangspannung im Generator
I_{eff} = Strangstrom im Generator
I_{L_eff} = Akku-Ladestrom im Brückengleichrichterbetrieb
P_{auf_Gen} = Aufgenommene Leistung des Generators
P_{ab_Gen} = Abgegebene Leistung des Generators
η_{Gen} = Wirkungsgrad des Generators

Die Strangströme und Strangspannungen des Generators sind Effektivwerte. Die detaillierten Datentabellen der Messung sind im Anhang A ersichtlich. Folgende Messdaten wurden ermittelt:

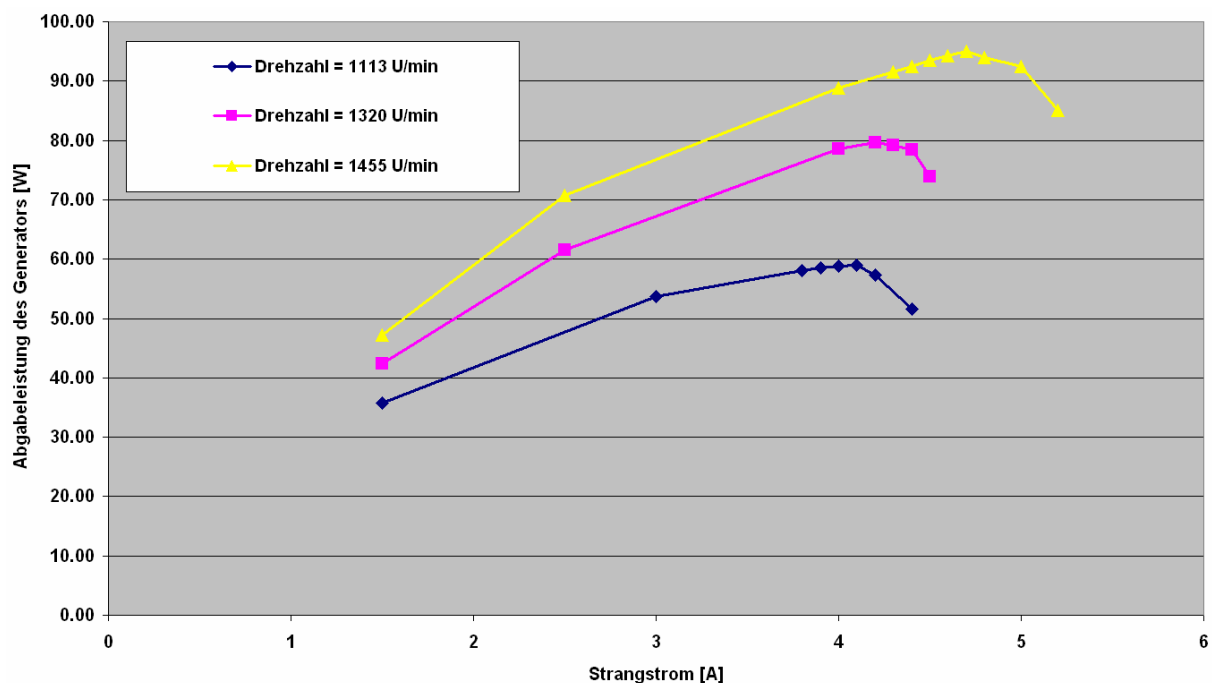


Abbildung 32: Abgabeleistungskurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 12 V

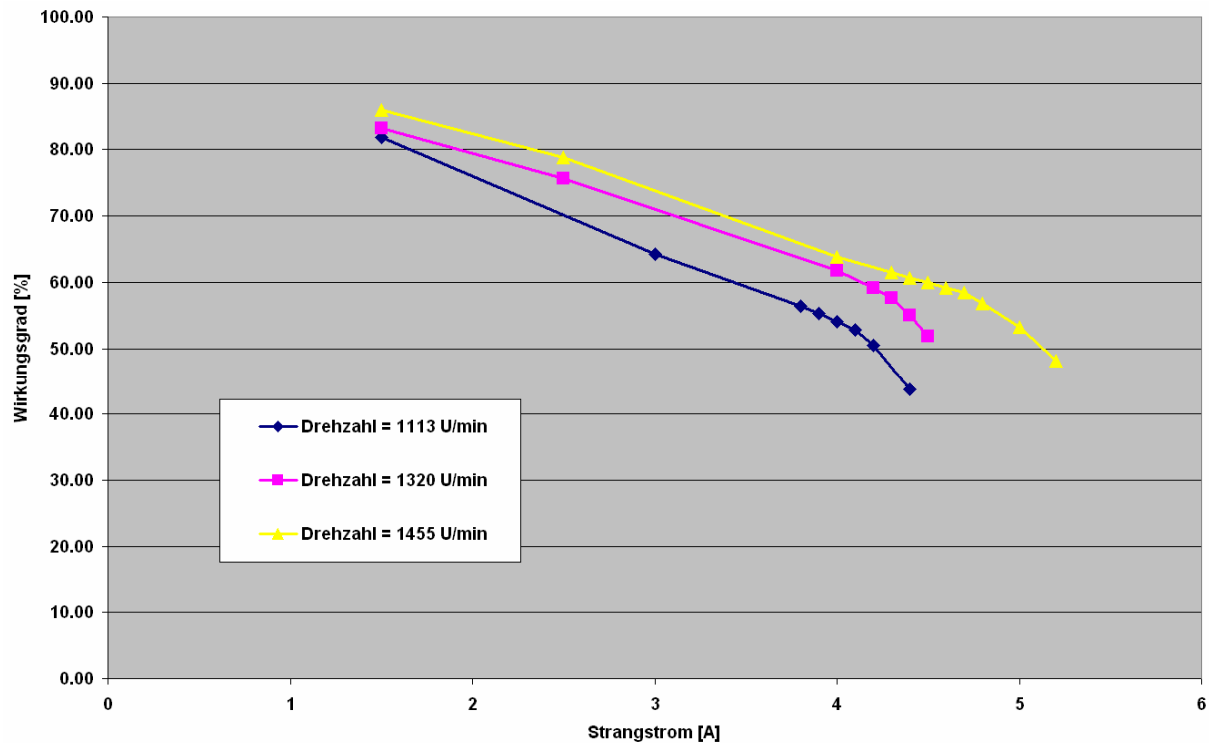


Abbildung 33: Wirkungsgradkurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 12 V

Die maximal möglichen Abgabeleistungen des Generators mit elektronischer Ladeschaltung (Schiebewiderständen) reichen bei den 12 V-Akku-Drehzahlen von 59 W bis 95 W. Der Wirkungsgrad des Generators beträgt bei den höchsten Abgabeleistungen 53 % bis 59 %.

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
1.5	1113	4.79	4.1	25.51	111.48	58.92	52.85
3	1320	6.32	4.2	26.00	134.75	79.63	59.10
4	1455	6.74	4.7	28.45	162.55	95.03	58.47

Tabelle 3: Maximale Abgabeleistungen des Generators im 12 V-Widerstandsbetrieb

4.6 Messung des Generators an der elektronischen Ladeschaltung 24 V

Die Messungen aus dem Kapitel 4.5 werden hier wiederholt. Diesmal werden an der Welle die Drehzahlen des Brückengleichrichterbetriebs mit 24 V eingestellt und konstant gehalten.

4.6.1 Resultate

Die Strangströme und Strangspannungen des Generators sind Effektivwerte. Die detaillierten Datentabellen der Messung sind im Anhang B ersichtlich. Folgende Messdaten wurden ermittelt:

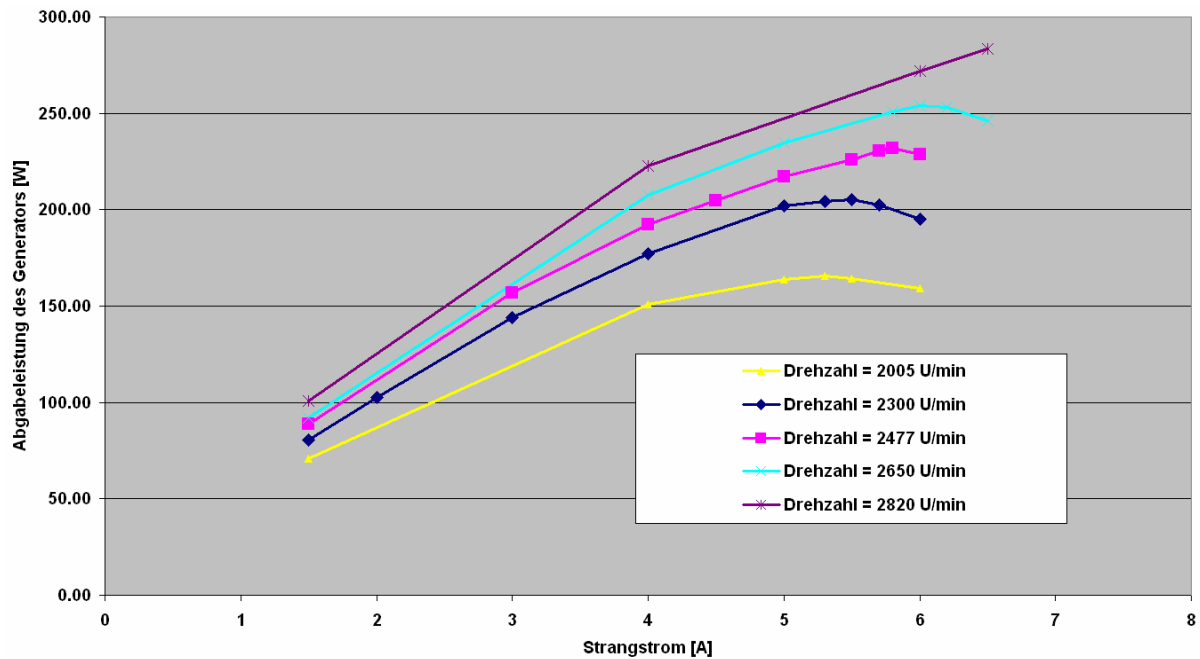


Abbildung 34: Abgabeleistungskurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 24 V

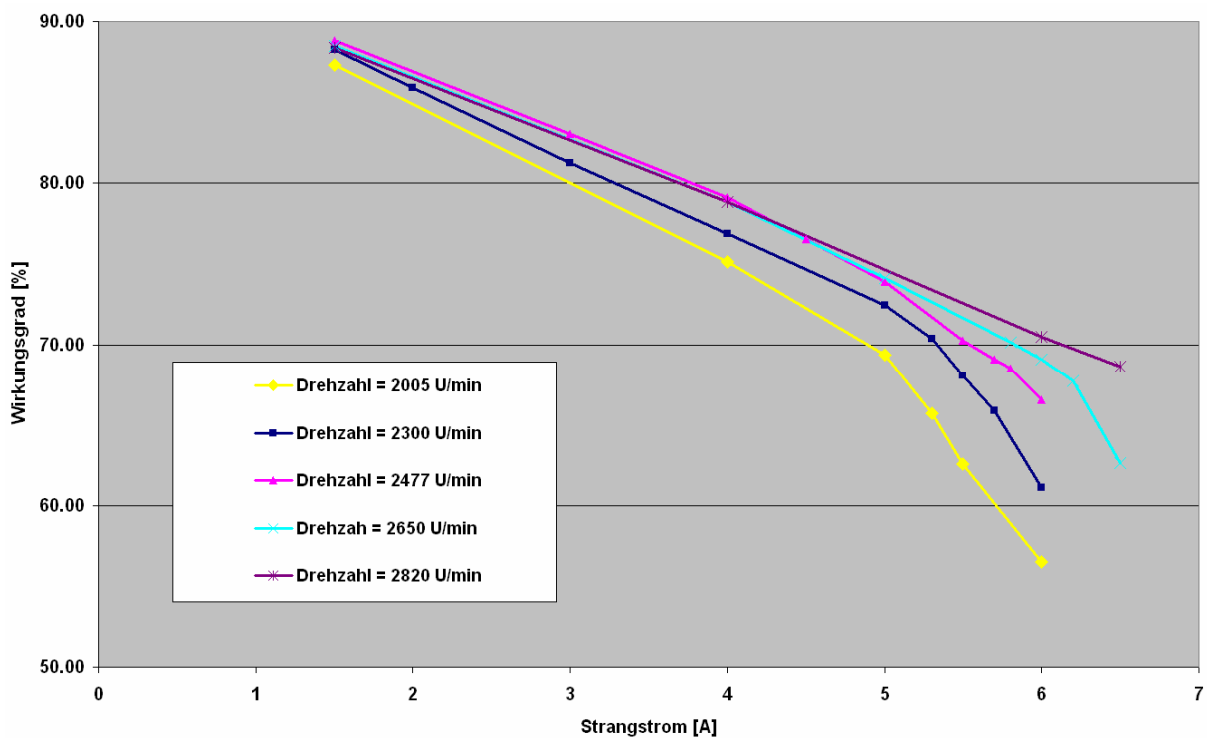


Abbildung 35: Wirkungsgradkurven des Generators mit den Schiebewiderständen bei 24 V

Wie in Abbildung 34 ersichtlich ist, steigt die Leistungskurve bei 2820 U/min immer noch an. Es könnte bei dieser Drehzahl noch etwas mehr Leistung aus dem Generator gewonnen werden. Bei einem Strangstrom von über 6.5 A fällt die Drehzahl an der Welle sehr rasch ab. Die Antriebsmaschine hat eine zu kleine Abgabeleistung. Sie kann deshalb mit dem Drehzahlreg-

ler nicht mehr genügend hochgefahren werden, um die gewünschte Drehzahl von 2820 U/min für eine saubere Messung genügend lang konstant zu halten.

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	2005	10.41	5.3	31.98	251.80	165.52	65.74
3	2300	12.43	5.5	33.35	301.25	205.10	68.08
4	2477	13.43	5.8	34.83	338.74	233.68	68.99
5	2650	14.1	6	35.32	367.51	253.80	69.06
6	2820	14.53	6.5	37.28	412.81	283.34	68.64

Tabelle 4: Maximale Abgabeleistungen des Generators im 24 V-Widerstandsbetrieb

Die maximal möglichen Abgabeleistungen des Generators mit elektronischer Ladeschaltung (Schiebewiderständen) reichen bei den 24 V-Akku-Drehzahlen von 165 W bis 283 W. Der Wirkungsgrad des Generators beträgt bei den höchsten Abgabeleistungen 66 % bis 69 %.

4.7 Messdatenvergleich der Brückengleichrichterschaltung mit der elektronischen Ladeschaltung

Die auf dem Prüfstand ermittelten Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb und bei der elektronischen Ladeschaltung werden hier sowohl für den 12 V- als auch für den 24 V-Betrieb miteinander verglichen. Der Wirkungsgrad des Brückengleichrichters wurde mit den Messungen bestimmt. Der Wirkungsgrad der elektronischen Ladeschaltung beträgt 95 % (vgl. Lindegger 2008, S. 23).

4.7.1 12 V-Betrieb

n [U/min]	U_{L_eff} [V]	I_{L_eff} [A]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	$P_{ab_Gen} = P_{auf_B6}$ [W]	P_{ab_B6} [W]	η_{Gen} [%]	η_{B6} [%]	η_{Total} [%]
1113	17.34	1.5	8.2	1.29	8.04	35.16	31.73	26.01	90.26	81.96	73.98
1320	18.22	3	8.57	2.47	14.72	76.27	63.50	54.66	83.26	86.07	71.66
1455	18.6	4	8.82	3.33	19.13	109.30	88.11	74.40	80.62	84.44	68.07

Tabelle 5: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 12 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{ab_EL} [W]	η_{Gen} [%]	η_{EL} [%]	η_{Total} [%]
1.5	1113	4.79	4.1	25.51	111.48	58.92	55.97	52.85	95	50.21
3	1320	6.32	4.2	26.00	134.75	79.63	75.65	59.1	95	56.15
4	1455	6.74	4.7	28.45	162.55	95.03	90.28	58.47	95	55.55

Tabelle 6: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung im 12 V-Betrieb

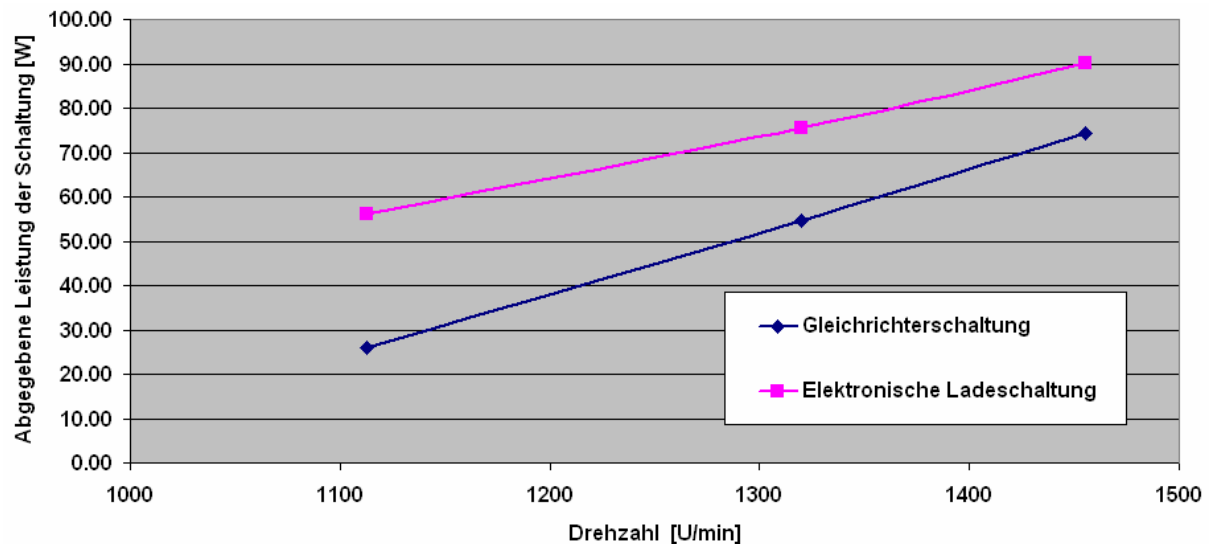


Abbildung 36: Vergleich der abgegebenen Leistung der Schaltungen im 12 V-Betrieb

Die Leistungsdifferenz der elektronischen Ladeschaltung gegenüber dem Brückengleichrichterbetrieb geht von 16 W bis 30 W. Mit der elektronischen Ladeschaltung lässt sich mehr Leistung entnehmen als mit dem Diodengleichrichter bei 12 V.

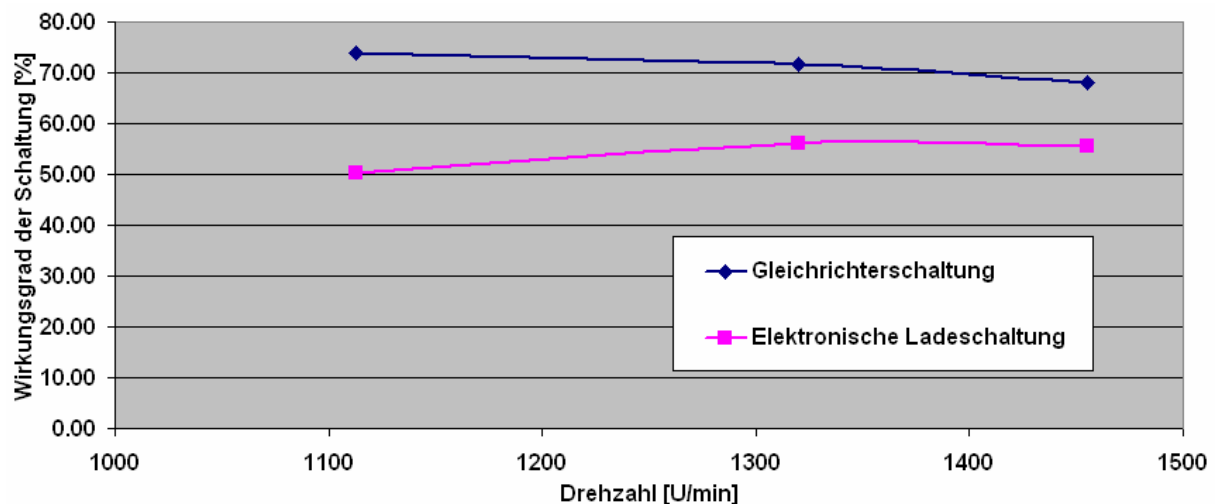


Abbildung 37: Vergleich des Wirkungsgrades der Schaltungen im 12 V-Betrieb

Der Gesamtwirkungsgrad bei der Brückengleichrichterschaltung ist dafür bei den entsprechenden Abgabeleistungen gegenüber der elektronischen Ladeschaltung um 12 % bis 24 % höher.

4.7.2 24 V-Betrieb

n [U/min]	U_{L_eff} [V]	I_{L_eff} [A]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} = P_{auf_B6} [W]	P_{ab_B6} [W]	η_{Gen} [%]	η_{B6} [%]	η_{Total} [%]
2005	34.28	1.5	15.4	1.26	7.55	59.47	58.21	51.42	97.88	88.33	86.46
2300	36	3	16.54	2.51	14.72	132.90	124.55	108.00	93.71	86.71	81.26
2477	36.8	4	16.85	3.31	18.84	183.21	167.32	147.20	91.33	87.97	80.35
2650	37.3	5	17.1	4.1	23.05	239.90	210.33	186.50	87.67	88.67	77.74
2820	38.08	6	17.31	4.93	27.47	304.17	256.01	228.48	84.17	89.24	75.11

Tabelle 7: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 24 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{ab_EL} [W]	η_{Gen} [%]	η_{EL} [%]	η_{Total} [%]
1.5	2005	10.41	5.3	31.98	251.80	165.52	157.24	65.74	95	62.45
3	2300	12.43	5.5	33.35	301.25	205.10	194.85	68.08	95	64.68
4	2477	13.43	5.8	34.83	338.74	233.68	222.00	68.99	95	65.54
5	2650	14.1	6	35.32	367.51	253.80	241.11	69.06	95	65.61
6	2820	14.53	6.5	37.28	412.81	283.34	269.17	68.64	95	65.21

Tabelle 8: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung im 24 V-Betrieb

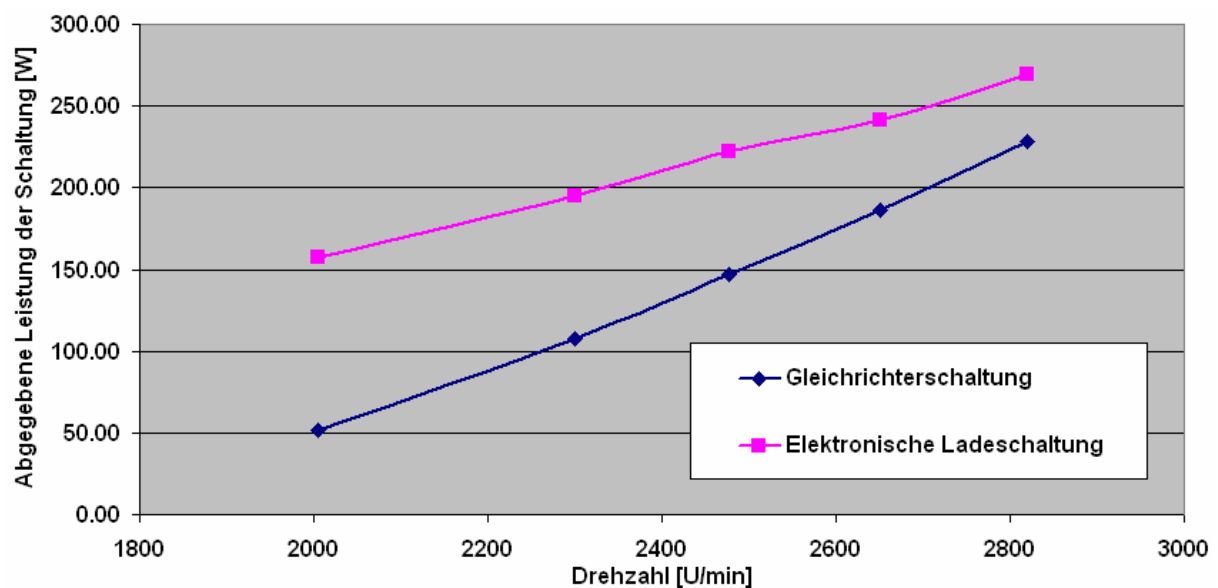


Abbildung 38: Vergleich der abgegebenen Leistung der Schaltungen im 24 V-Betrieb

Auch im 24 V-Betrieb lässt sich aus der elektronischen Ladeschaltung mehr Leistung beziehen als mit dem Diodengleichrichter. Hier beträgt die Leistungs Differenz je nach Drehzahl 41 W bis 106 W.

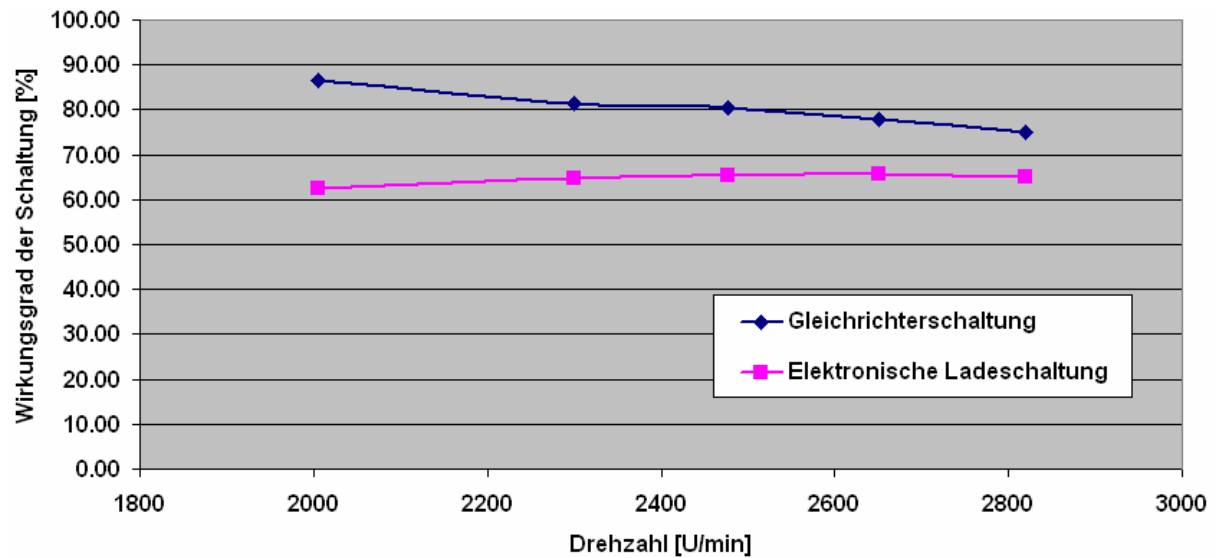


Abbildung 39: Vergleich des Wirkungsgrades der Schaltungen im 24 V-Betrieb

Wie schon im 12 V-Vergleich ist auch bei 24 V der Gesamtwirkungsgrad der Brückengleichrichterschaltung grösser als der Wirkungsgrad der elektronischen Ladeschaltung. Dies um 10 % bis 24 %.

5. Generatormodell im FEMAG

Das finite Elemente Programm FEMAG berechnet zweidimensionale statische oder zeitlich sinusförmig veränderliche magnetische Felder. Damit lassen sich Analysen und Optimierungen der Geometrien von elektrischen Maschinen sehr gut vornehmen. Die unter Kapitel 4 durchgeführten Messungen auf dem Motorenprüfstand werden nun im FEMAG simuliert. Damit können die Messresultate mit den Simulationsdaten verglichen werden. Durch die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich allfällige Änderungen am Simulationsmodell des Generators vornehmen. Damit können Verbesserungen bei der Leistungsabgabe oder der Effizienz erreicht werden. Die Simulationen können zukünftig auch für Maschinen mit einer anderen Baugrösse verwendet werden. Diese Maschinen müssen dann nicht zuerst hergestellt werden, um Erkenntnisse über ihr Verhalten zu gewinnen oder um Optimierungen an der Geometrie vorzunehmen.

5.1 Aufbau des Generators im FEMAG

Die Simulationen im FEMAG werden mit dem vorhandenen Modell des Generators PMG120 durchgeführt. Die wichtigsten Daten bezüglich Abmessungen des Generators wurden im Kapitel 3 beschrieben.



Abbildung 40: Menü-Graphik im FEMAG

Unter dem Menüpunkt → *Select Input File* → *Open File* kann das Simulationsmodell *IEC56Gen* des Generators PGM120 ausgewählt und geladen werden.

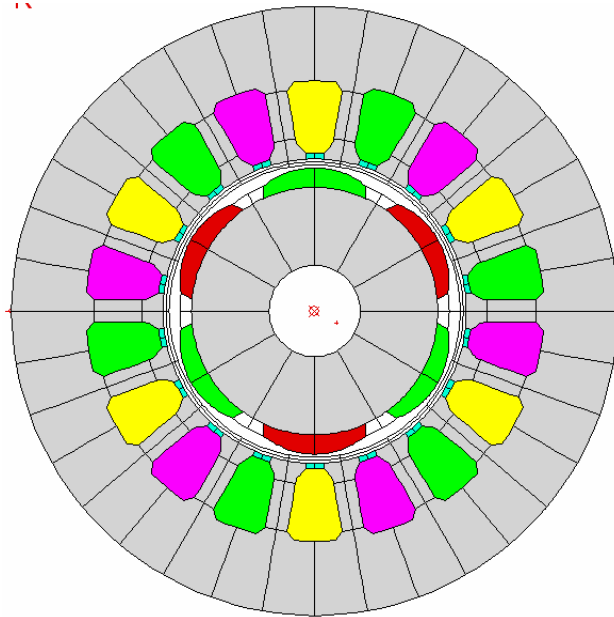


Abbildung 41: Generator PMG120 als FEMAG Modell IEC56Gen

Die sechs halbmondförmigen Magnete (BMN-38H) des Generators haben eine Länge von 20 mm, eine Breite von 13.96 mm und ihre Höhe beträgt 2.55 mm an der höchsten bzw. 1.64 mm an der niedrigsten Stelle.

In Abbildung 43 der Entmagnetisierungskurve des Magnetmaterials BMN-38H sind zwei verschiedene Kurvenformen ersichtlich. Die Diagonalen sind dabei die Kennlinien der B-Kurve, die waagrechten Kurven die der J-Kurve (vgl. Abb. 42).

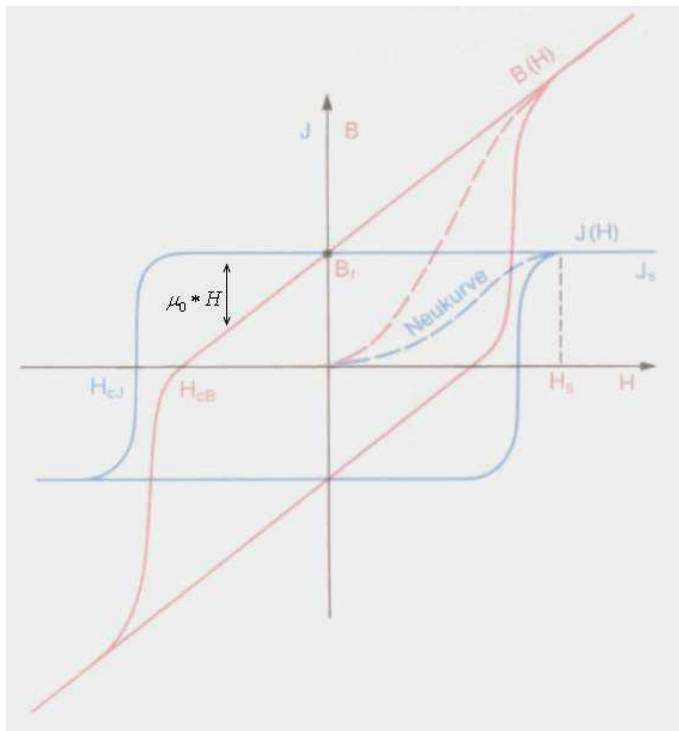


Abbildung 42: Entmagnetisierungskurven der B-Kurve und der J-Kurve. Aus: Salathé 2006, S. 8

Die B-Kurve stellt den Verlauf der magnetischen Flussdichte B als Funktion der magnetischen Feldstärke H dar. Die J-Kurve zeigt den Verlauf der magnetischen Polarisation J als Funktion der magnetischen Feldstärke H. Die magnetische Polarisation J beschreibt den Beitrag des Magnetmaterials zur magnetischen Flussdichte B und ist abhängig von der magnetischen Feldstärke H. Über folgende Beziehung sind die magnetische Polarisation J und die magnetische Flussdichte B miteinander verknüpft:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J}$$

Für die Eingabe der Magnetdaten ins FEMAG wird die diagonale Kurve, also die B-Kurve benötigt. Die Eingabemaske verlangt die Remanenz B_r der Magnete, auch als Restmagnetismus bezeichnet, sowie die Koerzitivfeldstärke und die relative Permeabilität. Die Koerzitivfeldstärke H_c bezeichnet die magnetische Feldstärke welche notwendig ist, um einen vorher in Sättigung gewesenen Magneten vollständig zu entmagnetisieren. Dabei wird bei der Koerzitivfeldstärke unterschieden, ob bei der Entmagnetisierung die magnetische Flussdichte B auf null zurückgeht (H_{cB}) oder ob die magnetische Polarisation J null wird (H_{cJ}) (vgl. Salathé 2006, S. 7-9). Die relative Permeabilität μ_r ist eine Verhältniszahl. Sie gibt an, mit welchem Faktor die magnetische Feldkonstante μ_0 multipliziert wird, um die magnetische Leitfähigkeit μ eines Stoffes zu erhalten. Die relative Permeabilität im Vakuum ist $\mu_r = 1$.

BMN-38H

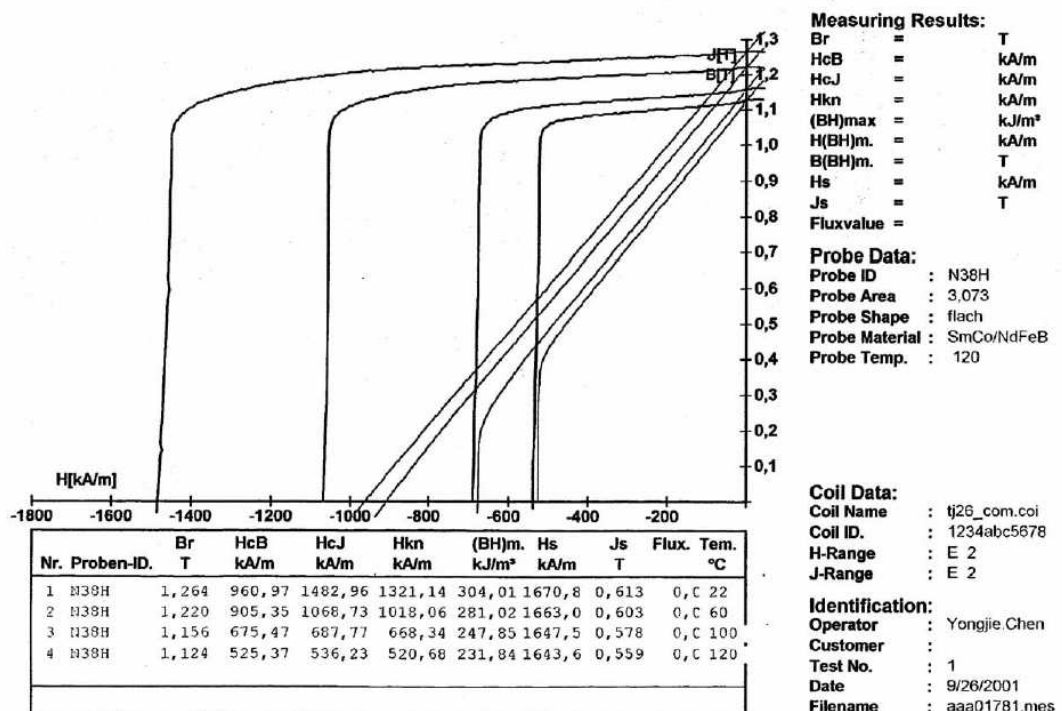


Abbildung 43: Entmagnetisierungskurve des Magnetmaterials BMN-38H. Aus: Bomatec 2009

Die Remanenz B_r (magnetische Feldstärke $H = 0 \text{ A/m}$) des Magnetmaterials BMN-38H lässt sich aus dessen Entmagnetisierungskurve (vgl. Abb. 43) ablesen und beträgt 1.264 Tesla. Die Koerzitivfeldstärke H_{cB} (magnetischer Fluss $B = 0 \text{ Tesla}$) beträgt 960'970 A/m und ist auch in der Entmagnetisierungskurve ersichtlich. Die relative Permeabilität μ_r des Magnetmaterials berechnet sich wie folgt:

$$\mu_r = \frac{B_r}{\frac{H_{cB} B}{\mu_0}} = \frac{1.264}{\frac{960'970}{1.257 \cdot 10^{-6}}} = \underline{\underline{1.05}}$$

Die Magnetdaten können im FEMAG unter dem Menüpunkt $\rightarrow$ *Material Constants* $\rightarrow$ *Permanent Magnet* den Magneten zugeordnet werden.

Für das Eisen wurde die Materialkennlinie M44050A verwendet.

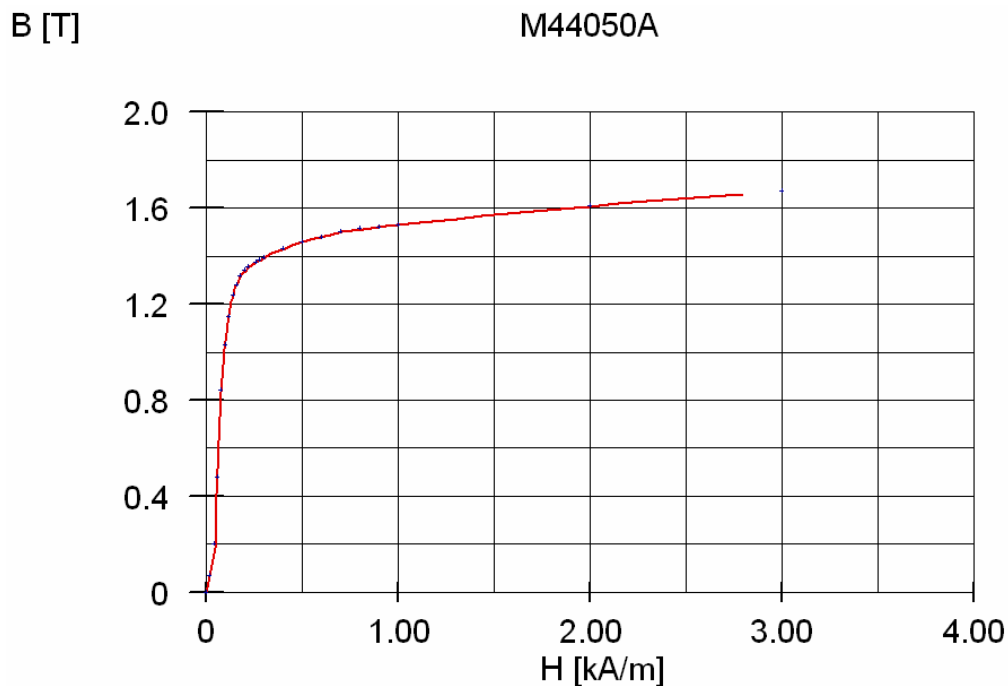


Abbildung 44: Eisenkennlinie M44050A

Diese Kennlinie kann den Eisenbereichen des Generatormodells unter dem Menüpunkt $\rightarrow$ *Material Constants* $\rightarrow$ *Ferro- / Diamagnetics* $\rightarrow$ *nonlinear* $\rightarrow$ *Open File* $\rightarrow$ *M44050A* zugeordnet werden.

Der Stator des Generators besitzt 18 Windungsnuten. Diese sind gegeneinander leicht versetzt, so dass ein Schrägungswinkel von 20° auf der Länge von 40 mm entsteht. Die Wicklungen besitzen 36 Windungen pro Nut. Die Wicklungsdetails des Generators werden im Menüpunkt $\rightarrow$ Windings $\rightarrow$ Read / Write / Gen. Wdg $\rightarrow$ Make from File $\rightarrow$ Open File $\rightarrow$ Wind_Gen geladen.

5.2 Definieren des Strangstromes im FEMAG

Die Simulation der elektronischen Ladeschaltung (Schiebewiderstände) ist im FEMAG ohne zusätzliche Konstruktionen möglich. Im FEMAG sind sinusförmige Stromkurven vorhanden. Da die Strangströme des Generators im Fall der elektronischen Ladeschaltung ebenfalls sinusförmig sind, können die vorhandenen Kurven verwendet werden. Es ist jeweils nur der Strompeak anzupassen. Bei der Brückengleichrichterschaltung sieht dies anders aus. Der Strangstrom des Generators ist, wie in den Kapiteln 4.2 und 4.3 gesehen, nicht mehr sinusförmig. Um die Messungen auf dem Prüfstand simulieren zu können, muss der mit dem Oszilloskop aufgezeichnete Strangstrom im FEMAG nachgebildet werden. Damit können zukünftig auch grössere oder modifizierte Generatoren am Brückengleichrichter simuliert werden. Die Stromform der Strangströme ist bei den verschiedenen Ladeströmen nicht exakt genau gleich. Gemeinsam mit unserem Industriepartner Markus Lindegger wurde vereinbart, nur einen dieser Strangströme ins FEMAG abzubilden und die Simulationen damit durchzuführen. Um nicht mit den Extremwerten zu simulieren, fiel der Entscheid auf einen Mittelwert, den Strangstrom bei 3 A Ladestrom in der 12 V-Brückengleichrichterschaltung (Drehzahl = 1320 U/min).

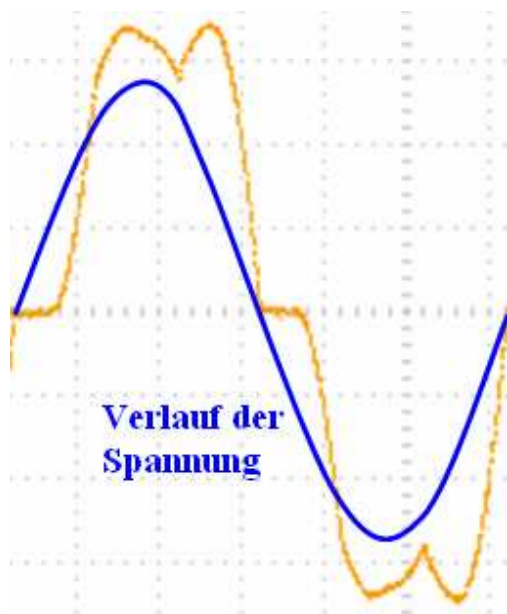


Abbildung 45: Strangstrom des Generators im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb bei 3 A Ladestrom

Um die Stromwerte aufnehmen zu können, wurde ein Raster über das Bild des Strangstromes gelegt (vgl. Abb. 46).

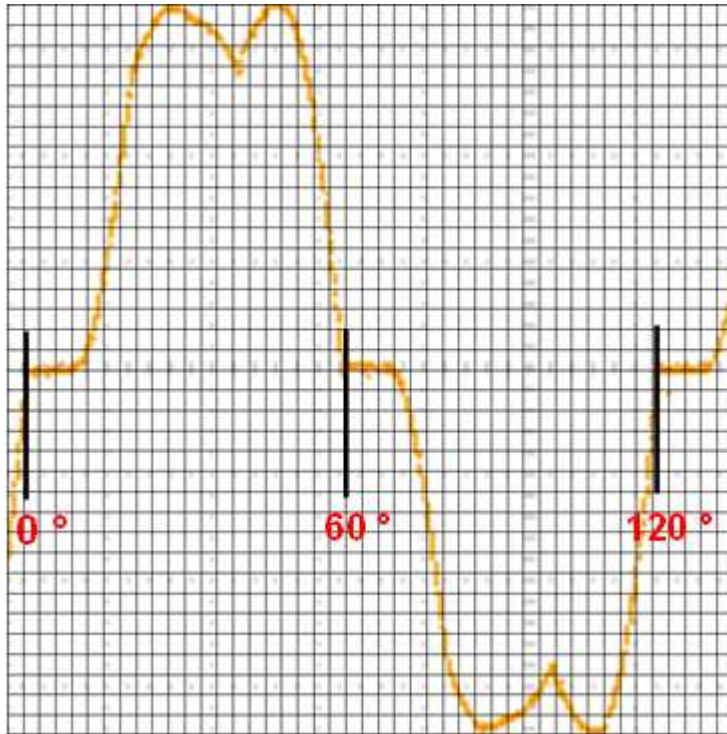


Abbildung 46: Strangstrom mit Raster

Insgesamt wurden 42 Werte der Stromkurve für die Darstellung im FEMAG aufgenommen. Dies bedeutet bei einer Periodendauer von 120° (da 6-polige Maschine), dass alle 3° ein Wert aufgenommen wurde. Das ergibt 40 Werte. Zwei zusätzliche Werte wurden nachträglich hinzugefügt, um die Kurve im FEMAG noch etwas zu verfeinern und möglichst deckungsgleich an das Originalbild des Oszilloskops heranzuführen. Die aufgenommenen Werte gehen dabei von -1 für den negativen Peakwert, bis auf +1 für das positive Maximum. Ein bestehendes .poc-File vom FEMAG wurde nun mit den aufgenommenen Werten angepasst.

```
3          ---Anzahl wicklungen
1          ---Reihenfolge der wicklungen
2          "
3          "
0.         ---Phasenstart der 1.wicklung [*]
120.       ---Phasenstart der 2.wicklung [*]
240.       ---Phasenstart der 3.wicklung [*]
120.       ---Periodendauer [*], 120° da 6-polig
fun        ---Funktion, damit eigene werte eingegeben werden können
42.        ---Anzahl Funktionswerte
0,         ---wertepunkte (Position [*], wert [1 = 100%])
3,         0.00
6,         0.00
9,         0.00
12,        0.03
15,        0.23
18,        0.51
21,        0.82
24,        0.93
27,        1.00
30,        1.00
33,        0.95
36,        0.92
39,        0.84
40,        0.80
42,        0.89
45,        0.97
46,        1.00
48,        1.00
51,        0.89
54,        0.67
57,        0.28
60,        0.00
63,        0.00
66,        0.00
69,        0.00
72,        -0.14
75,        -0.37
78,        -0.73
81,        -0.91
84,        -1.00
87,        -1.00
90,        -0.97
93,        -0.95
96,        -0.88
99,        -0.84
102,       -0.95
105,       -1.00
108,       -1.00
111,       -0.84
114,       -0.54
117,       -0.14
120,       0.00
```

Abbildung 47: Erstelltes .poc-File des Strangstromes im FEMAG

Das .poc-File (vgl. Abb. 47) erzeugt dann im FEMAG den gewünschten Strangstrom des Generators, wie er im Brückengleichrichterbetrieb herrscht.

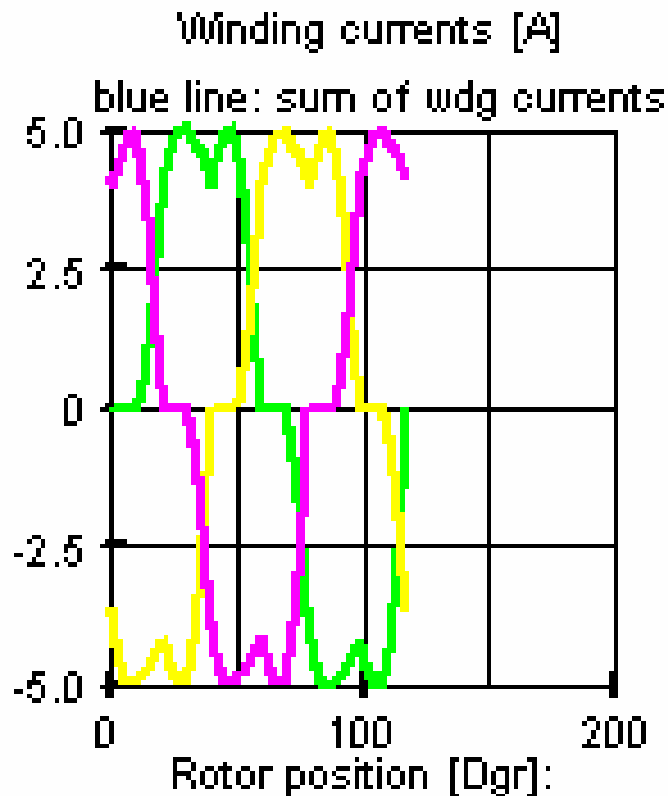


Abbildung 48: Erzeugter Strangstrom im FEMAG

Mit dem erzeugten Strangstrom können nun die Messungen des Generators am Brückengleichrichter simuliert werden. Dazu muss in der Eingabemaske vom FEMAG nur noch der Peakwert des Strangstromes eingegeben werden.

5.3 Simulation des Generators am Brückengleichrichter mit 12 V-Akkumulator

Der Generator am Brückengleichrichter wurde nun im FEMAG simuliert. Dazu waren die auf dem Prüfstand ermittelten Drehzahlen an der Welle bei 12 V nötig. Weiter wurde der aufgenommene Strangstrom im FEMAG Modell vorgegeben.

Unter dem Menüpunkt → *Field Calculation* → *Calc PM-Syn-Motor* lassen sich die Kennwerte des Generators für die Simulation wie Stromform (Auswahl des entsprechenden .poc-Files), Stromwert, Schrägungswinkel und Drehzahl in eine Eingabemaske eingeben.

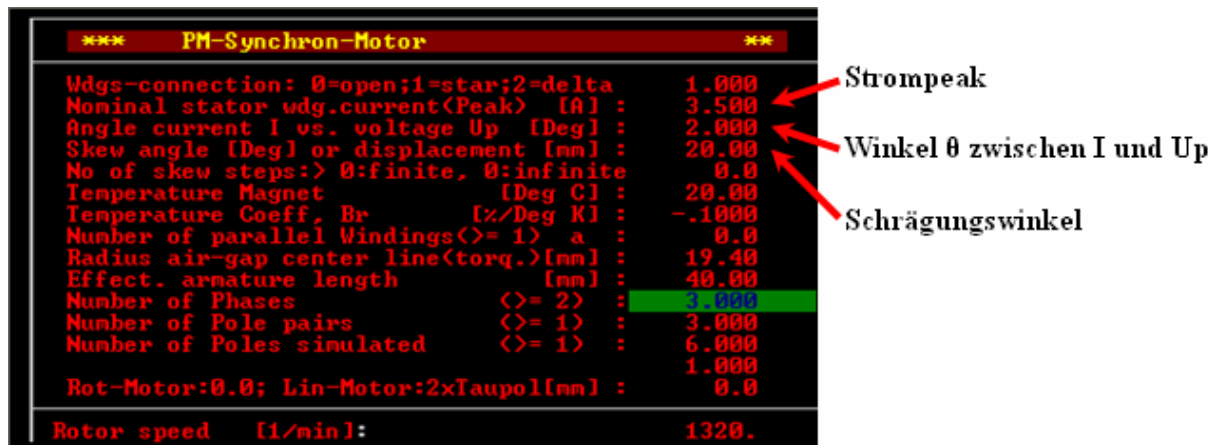
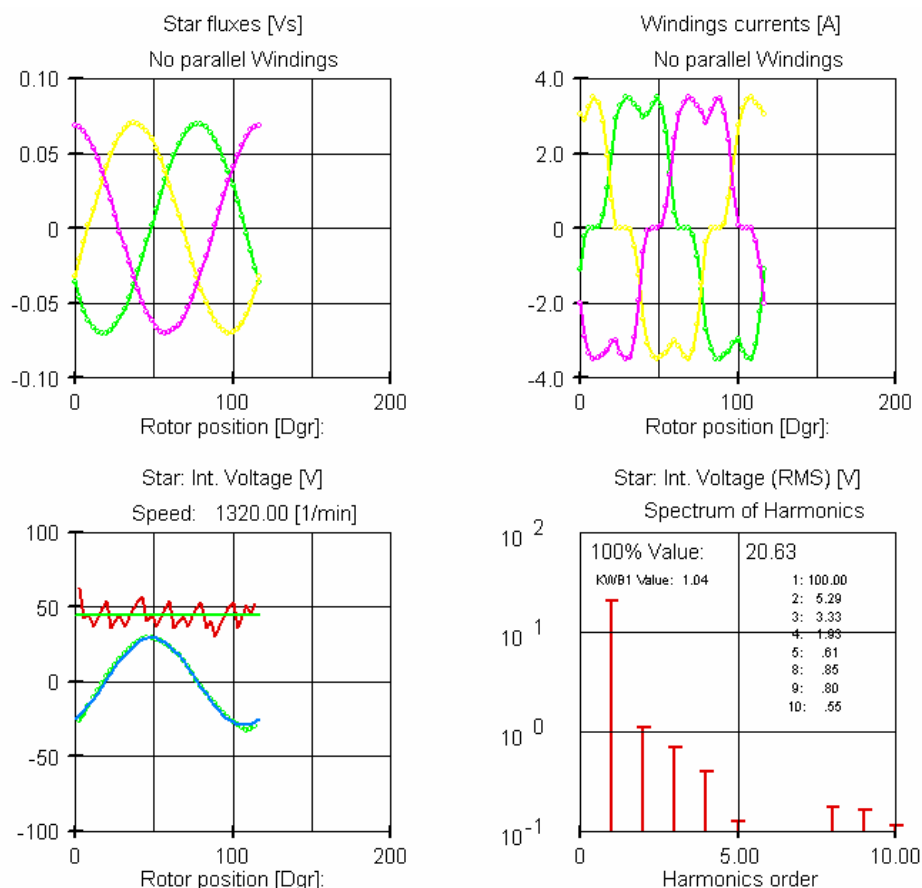


Abbildung 49: Eingabemaske im FEMAG

Die Simulationen der Permanent-Magnet-Maschine wurden mit einem Winkel θ von 180° zwischen Strom I und Spannung Up durchgeführt. Dies entspricht dem Generatorbetrieb. Danach simuliert das FEMAG Programm die Maschine anhand der eingegebenen Werte.



Angle I-Up: 2[Dgr];Sk-angle:20.0 [Dgr];Sk-steps:126 ;Length: 40 [mm]
13:04:2009/22:17 .NEC56Gen

Abbildung 50: Vom FEMAG berechnete Stromharmonische (12 V-Brückengleichrichterbetrieb, 1320 U/min, 3 A Ladestrom)

Nach der FEMAG Simulation lassen sich auch die harmonischen Komponenten des Stromes entnehmen. Weiter berechnet das FEMAG die aufgenommene und abgegebene Leistung der Maschine und zeigt ein Diagramm mit den Strom- und Spannungsvektoren an.

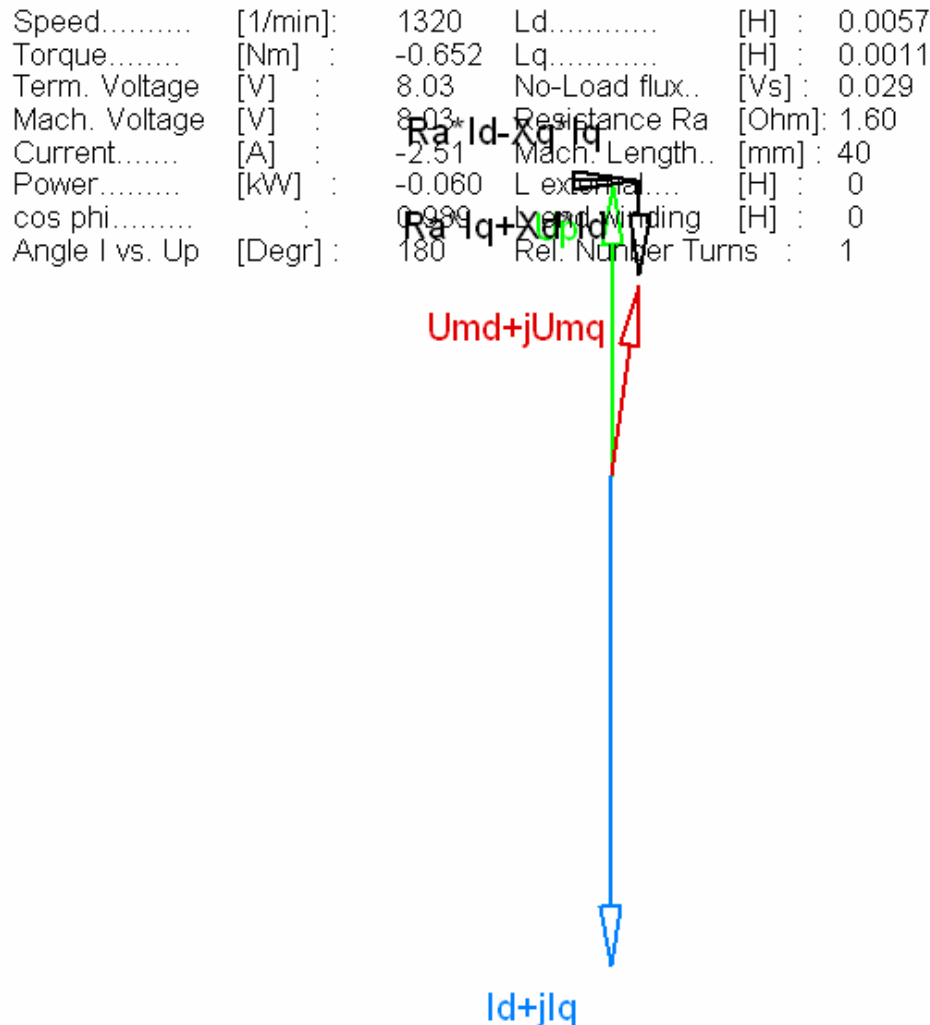


Abbildung 51: Vom FEMAG berechnete Leistungen (12 V-Brückengleichrichterbetrieb, 1320 U/min, 3 A Ladestrom)

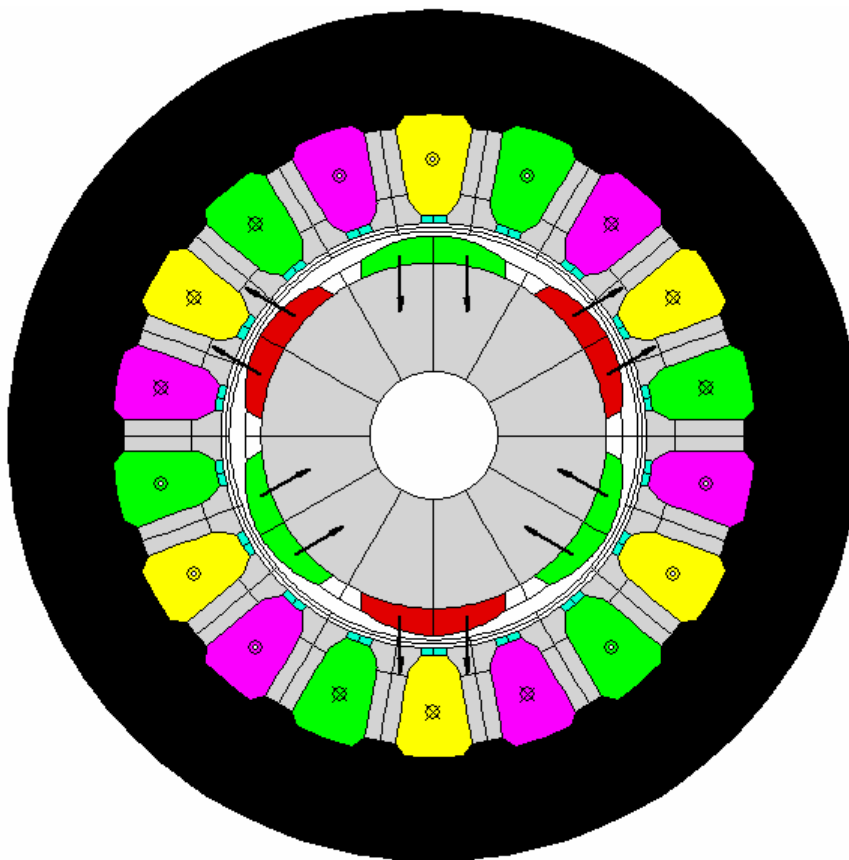
Die abgegebene Leistung (Power) kann auch aus dem Produkt von Strom I (Current), Spannung U (Voltage) und $\cos \varphi$ berechnet werden:

$$P_{ab_Gen} = 3 \cdot U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$$

Die aufgenommene Leistung kann wie folgt berechnet werden:

$$P_{auf_Gen} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M$$

Wobei n die Drehzahl (Speed) ist und M das Drehmoment (Torque). Die negativen Werte für den Strom, die Leistung und das Drehmoment ergeben sich durch die Berechnung als Generator (Winkel θ zwischen I und $U_p = 180^\circ$).



Fe-Losses iron [W/mm]: 0.026

Abbildung 52: Berechnung der Eisenverluste (Statorring) im FEMAG (12 V-Brückengleichrichterbetrieb, 1320 U/min, 3 A Ladestrom)

Im Menüpunkt $\rightarrow$ *Analysis* können unter *Losses* die Eisenverluste des Generators berechnet werden. Die Eisenverluste werden in Watt pro Millimeter angegeben. Um die gesamten Eisenverluste zu erhalten, muss die Summe aus den drei Verlustregionen (Statorring, Statornuten, Rotor) gebildet werden und mit der Armатурlänge von 40 mm multipliziert werden. Die Eisenverluste müssen zur Bestimmung des Wirkungsgrades noch zur aufgenommenen Leistung dazugezählt werden. Die Kupferverluste werden vom FEMAG hingegen schon in der Leistungsberechnung berücksichtigt.

5.3.1 Resultate

Der Wirkungsgrad des Generators sowie die aufgenommene und abgegebene Leistung werden nach folgenden Formeln berechnet:

$$P_{\text{auf_Gen}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M$$

$$P_{\text{ab_Gen}} = 3 \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$$

$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{P_{\text{ab_Gen}}}{P_{\text{auf_Gen}} + P_{\text{V_Eisen}}}$$

n = Drehzahl an der Welle
M = Drehmoment an der Welle
U_{eff} = Strangspannung im Generator
I_{eff} = Strangstrom im Generator
I_{L,eff} = Akku-Ladestrom im Brückengleichrichterbetrieb
P_{auf_Gen} = Aufgenommene Leistung des Generators
P_{ab_Gen} = Abgegebene Leistung des Generators
P_{V_Eisen} = Eisenverluste des Generators
η_{Gen} = Generatorwirkungsgrad

Bei den Strom und Spannungswerten handelt es sich um Effektivwerte. Folgende Daten wurden in der FEMAG Simulation ermittelt:

I _{L,eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	cos φ	M [Nm]	U _{eff} [V]	I _{eff} [A]	P _{auf_Gen} [W]	P _{ab_Gen} [W]	P _{V_Eisen} [W]	η _{Gen} [%]
1.5	1113	180	0.998	0.335	8.04	1.29	39.04	31.05	2.8	74.21
3	1320	180	0.99	0.641	8.09	2.47	88.60	59.35	3.68	64.31
4	1455	180	0.978	0.865	8.03	3.33	131.79	78.45	4.44	57.59

Tabelle 9: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 12 V

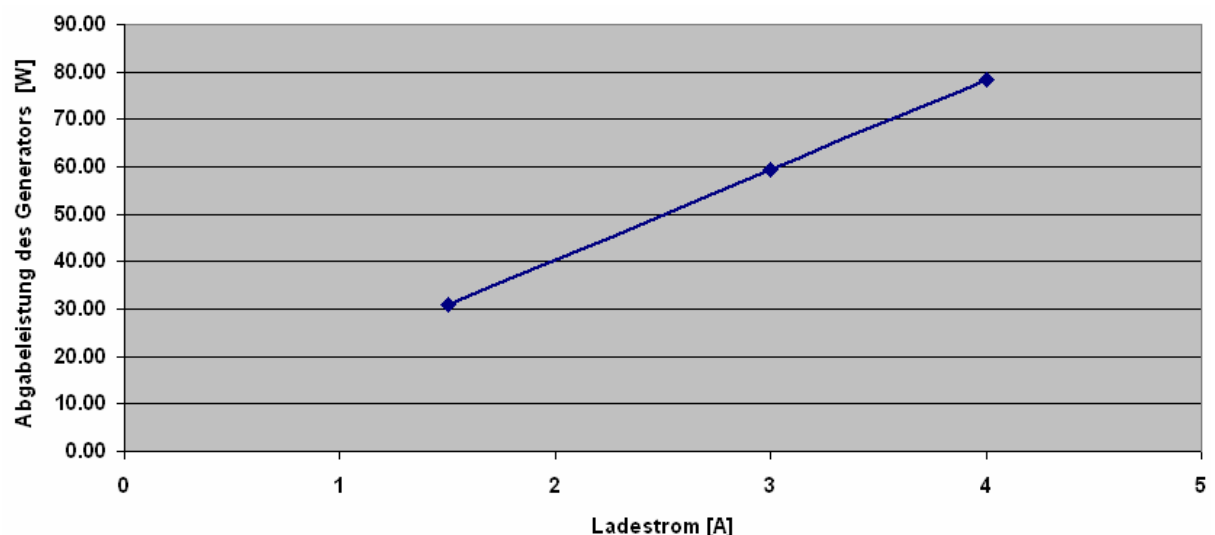


Abbildung 53: Abgabeleistung des Generators im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation

Die abgegebene Leistung des Generators am Diodengleichrichter mit 12 V-Akkumulator reicht in der Simulation von 31 W bis 79 W.

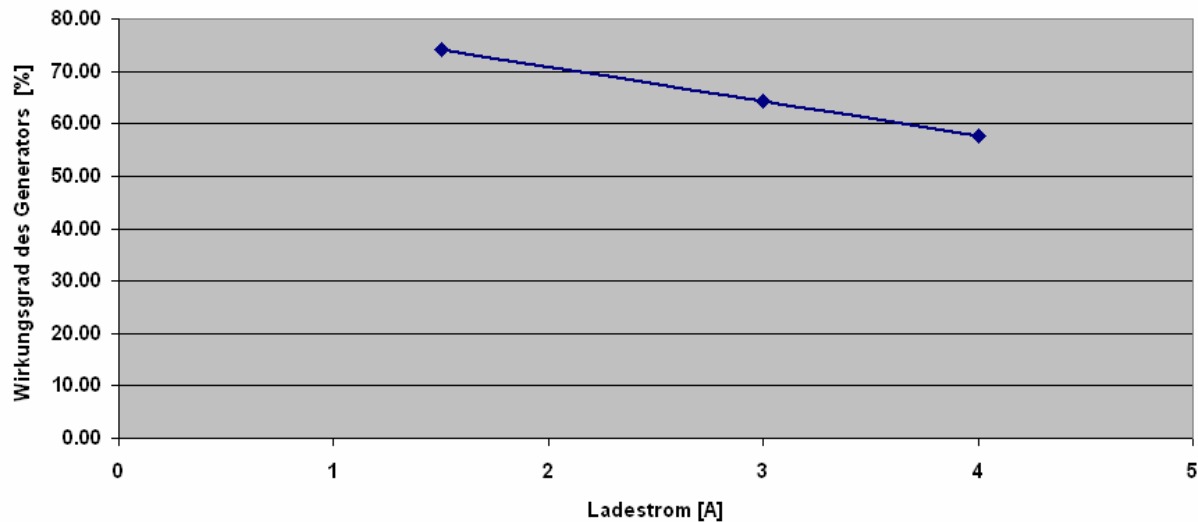


Abbildung 54: Wirkungsgrad des Generators im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation

Der Wirkungsgrad des Generators sinkt dabei von 74 % auf 58 %.

5.4 Simulation des Generators am Brückengleichrichter mit 24 V-Akkumulator

Die Simulationen des Generators am Brückengleichrichter wurde hier mit den aufgenommenen Drehzahlen im 24 V-Akkubetrieb durchgeführt. Auch hier wurde der aufgezeichnete Strangstrom vorgegeben.

5.4.1 Resultate

Bei den Strom und Spannungswerten handelt es sich um Effektivwerte. Folgende Daten wurden in der FEMAG Simulation ermittelt:

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	2005	180	0.999	0.327	16.18	1.26	68.66	61.10	7.04	80.72
3	2300	180	0.993	0.652	16.95	2.51	157.03	126.74	8.4	76.61
4	2477	180	0.987	0.859	17.38	3.31	222.81	170.34	9.76	73.24
5	2650	180	0.978	1.06	17.85	4.1	294.15	214.72	11.24	70.31
6	2820	180	0.965	1.28	18.3	4.93	377.99	261.18	12.96	66.81

Tabelle 10: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 24 V

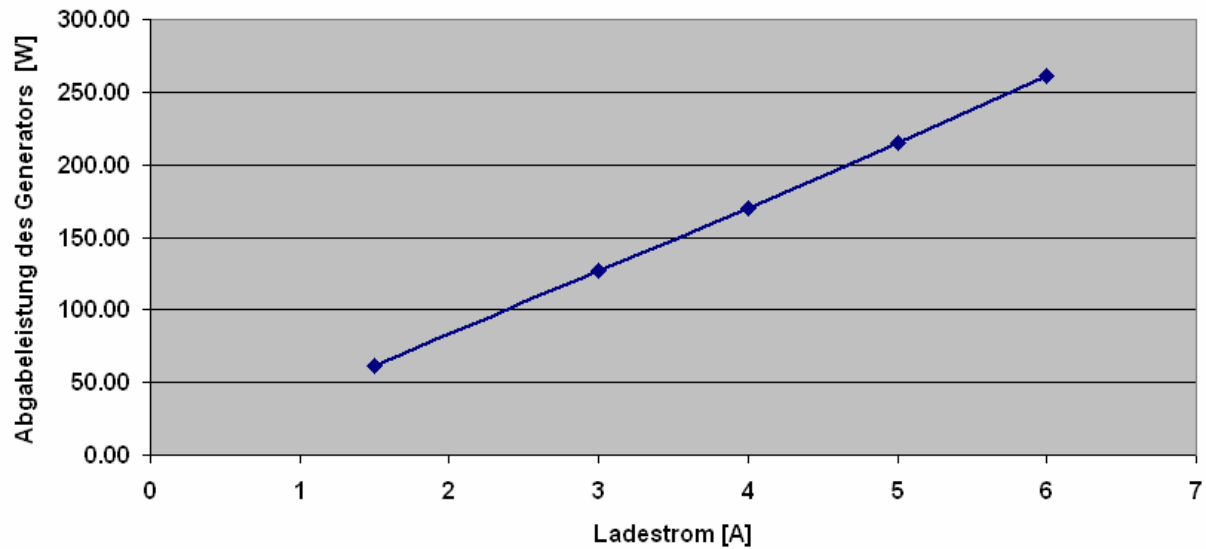


Abbildung 55: Abgabeleistung des Generators im 24 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation

Die abgegebene Leistung des Generators am Diodengleichrichter mit 24 V-Akkumulator reicht in der Simulation von 61 W bis 261 W.

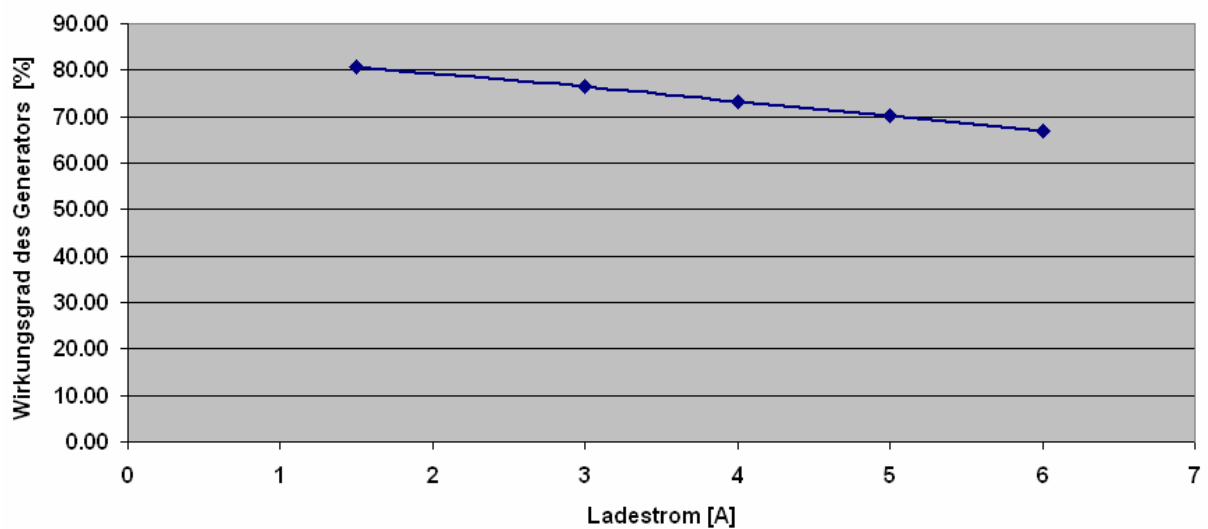


Abbildung 56: Wirkungsgrad des Generators im 24 V-Brückengleichrichterbetrieb in der Simulation

Der Wirkungsgrad des Generators sinkt dabei von 81 % auf 66 %.

5.5 Simulation des Generators an der elektronischen Ladeschaltung

12 V

Für die Generatorsimulationen mit elektronischer Ladeschaltung wurden die im 12 V-Brückengleichrichterbetrieb ermittelten Drehzahlen benötigt. Weiter wurde der Peakwert eines rein sinusförmigen Stromes vorgegeben.

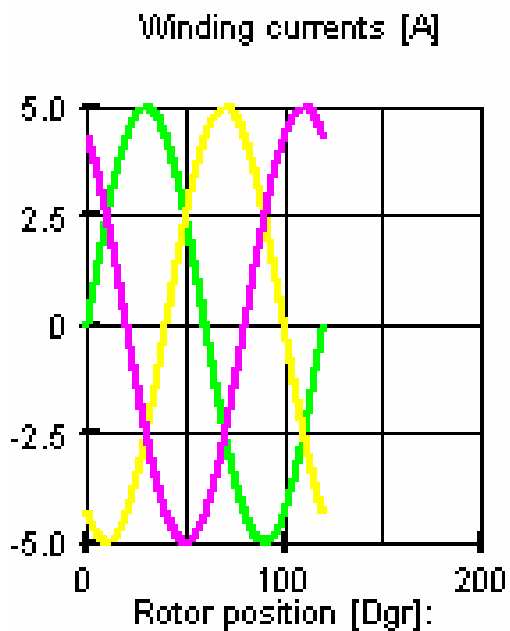


Abbildung 57: Sinusförmiger Strangstrom im FEMAG

Die Simulationen ergeben im Generatorbetrieb (Winkel θ zwischen I und $U_p = 180^\circ$) zum Teil einen Leistungsfaktor $\cos \varphi$ von weit unter 0.9. Da bei den realen Messungen der elektronischen Ladeschaltung mit Schiebewiderständen eine rein ohmsche Last vorliegt, liegt der Leistungsfaktor bei diesen Messungen bei nahezu 1. Um die Simulationen am Schluss mit den gemessenen Werten auf dem Motorenprüfstand vergleichen zu können, muss der $\cos \varphi$ in der Simulation angepasst werden. Dies geschieht im FEMAG indem der Winkel θ zwischen I und U_p in der Eingabemaske verändert wird. Alle Simulationen welche einen $\cos \varphi$ von unter 0.95 aufwiesen, erhielten eine Anpassung. Dabei wurde versucht, den Leistungsfaktor mit möglichst wenigen Winkelanpassungen nahe an 1 heran zu bringen.

5.5.1 Resultate

Der Wirkungsgrad des Generators sowie die aufgenommene und abgegebene Leistung werden nach folgenden Formeln berechnet:

$$P_{\text{auf_Gen}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M$$

$$P_{\text{ab_Gen}} = 3 \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$$

$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{P_{\text{ab_Gen}}}{P_{\text{auf_Gen}} + P_{\text{V_Eisen}}}$$

n = Drehzahl an der Welle
M = Drehmoment an der Welle
U_{eff} = Strangspannung im Generator
I_{eff} = Strangstrom im Generator
I_{L_eff} = Akku-Ladestrom im Brückengleichrichterbetrieb
P_{auf_Gen} = Aufgenommene Leistung des Generators
P_{ab_Gen} = Abgegebene Leistung des Generators
P_{V_Eisen} = Eisenverluste des Generators
η_{Gen} = Generatorwirkungsgrad

Bei den Strom und Spannungswerten handelt es sich um Effektivwerte. Die detaillierten Datentabellen der Simulation sind im Anhang C ersichtlich. Folgende Daten wurden in der FEMAG Simulation ermittelt:

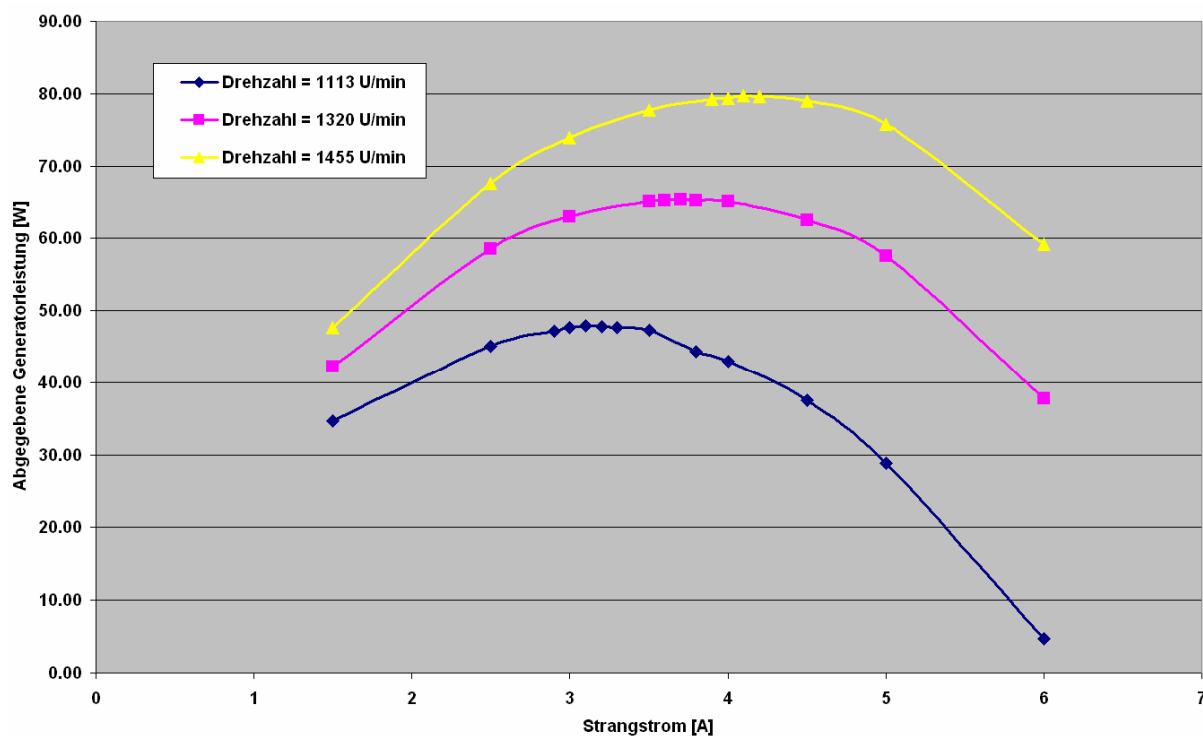


Abbildung 58: Abgabeleistungskurven des Generators mit elektronischer Ladeschaltung 12 V in der Simulation

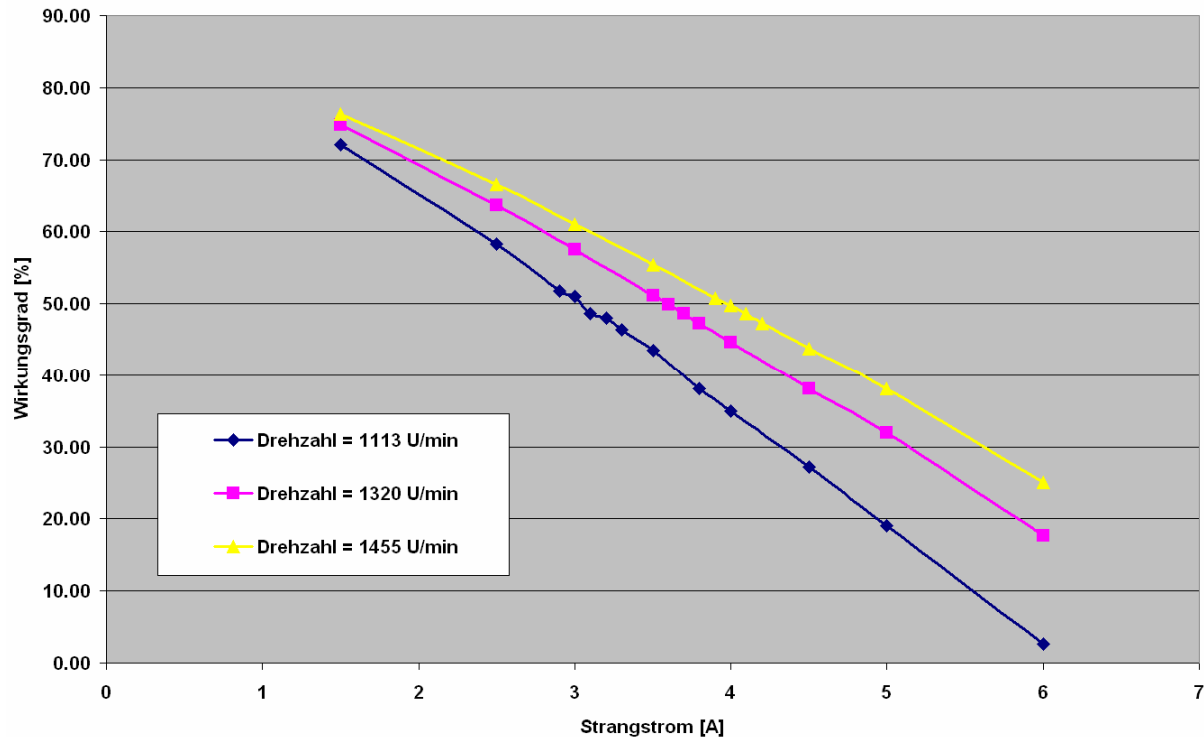


Abbildung 59: Generatorwirkungsgrad mit elektronischer Ladeschaltung im 12 V-Betrieb in der Simulation

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	1113	180	0.969	0.832	5.14	3.2	96.97	47.81	2.68	47.98
3	1320	180	0.96	0.947	6.13	3.7	130.90	65.32	3.48	48.61
4	1455	190	1	1.05	6.48	4.1	159.98	79.70	3.96	48.62

Tabelle 11: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 12 V

Die höchsten in der Simulation abgegebenen Leistungen des Generators mit elektronischer Ladeschaltung bei 12 V gehen von 48 W bis 80 W. Der Wirkungsgrad beträgt jeweils etwa 48 %.

5.6 Simulation des Generators an der elektronischen Ladeschaltung 24 V

Für die Generatorsimulationen mit elektronischer Ladeschaltung wurden hier die im 24 V-Brückengleichrichterbetrieb ermittelten Drehzahlen benötigt. Weiter wurde der Peakwert eines rein sinusförmigen Stromes vorgegeben. Auch hier wurde der Leistungsfaktor bei Bedarf gemäss Kapitel 5.5 angepasst.

5.6.1 Resultate

Bei den Strom und Spannungswerten handelt es sich um Effektivwerte. Die detaillierten Datentabellen der Simulation sind im Anhang D ersichtlich. Folgende Daten wurden in der FEMAG Simulation ermittelt:

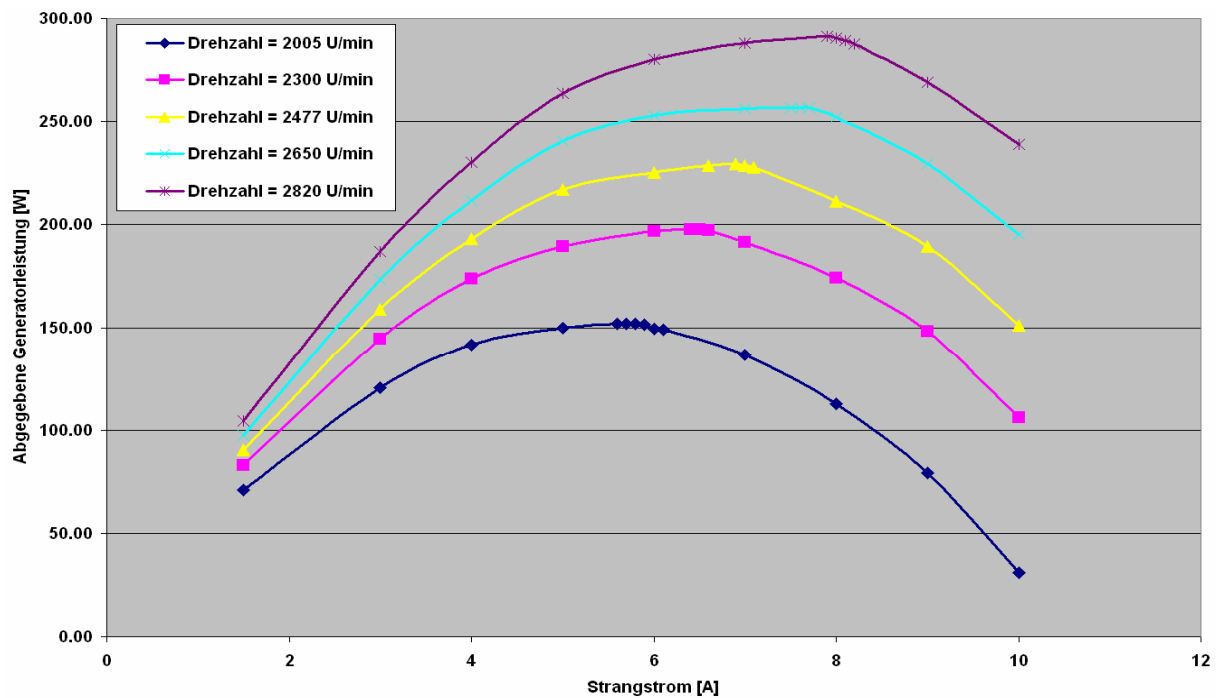


Abbildung 60: Abgabeleistungskurven des Generators mit elektronischer Ladeschaltung 24 V in der Simulation

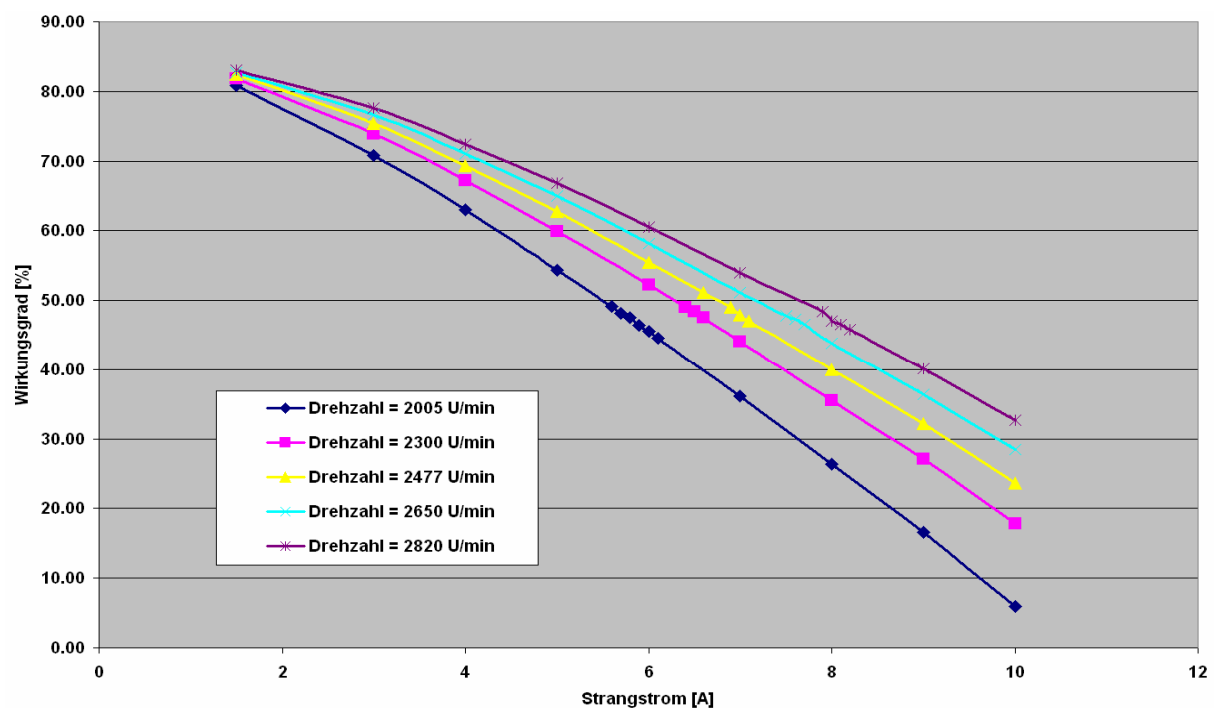


Abbildung 61: Generatorwirkungsgrad mit elektronischer Ladeschaltung im 24 V-Betrieb in der Simulation

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	2005	190	0.995	1.47	8.92	5.7	308.64	151.77	6.48	48.16
3	2300	192	0.996	1.64	10.33	6.4	394.99	197.54	8.08	49.01
4	2477	192	0.992	1.77	11.17	6.9	459.11	229.37	9.16	48.98
5	2650	195	0.997	1.92	11.3	7.6	532.80	256.87	10.32	47.29
6	2820	195	0.995	2	12.36	7.9	590.60	291.47	11.44	48.41

Tabelle 12: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 24 V

Die maximalen abgegebenen Leistungen des Generators mit elektronischer Ladeschaltung bei 24 V in der Simulation reichen von 152 W bis 291 W. Der Wirkungsgrad bewegt sich dabei um 47 % bis 49 %.

5.7 Simulationsdatenvergleich des Brückengleichrichterbetriebes mit der elektronischen Ladeschaltung

5.7.1 12 V-Betrieb

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	1113	180	0.998	0.335	8.04	1.29	39.04	31.05	2.8	74.21
3	1320	180	0.99	0.641	8.09	2.47	88.60	59.35	3.68	64.31
4	1455	180	0.978	0.865	8.03	3.33	131.79	78.45	4.44	57.59

Tabelle 13: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 12 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	1113	180	0.969	0.832	5.14	3.2	96.97	47.81	2.68	47.98
3	1320	180	0.96	0.947	6.13	3.7	130.90	65.32	3.48	48.61
4	1455	190	1	1.05	6.48	4.1	159.98	79.70	3.96	48.62

Tabelle 14: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 12 V

Die Leistungsdifferenz bei 12 V zwischen der Brückengleichrichterschaltung und der elektronischen Ladeschaltung beträgt in der Simulation im Maximum 17 W. Bei einem Ladestrom von 4 A beträgt die Differenz nur noch etwas über 1 W. Die elektronische Ladeschaltung bringt, wie bei den Messungen auf dem Prüfstand, auch in der Simulation mehr Leistung als die Brückengleichrichterschaltung.

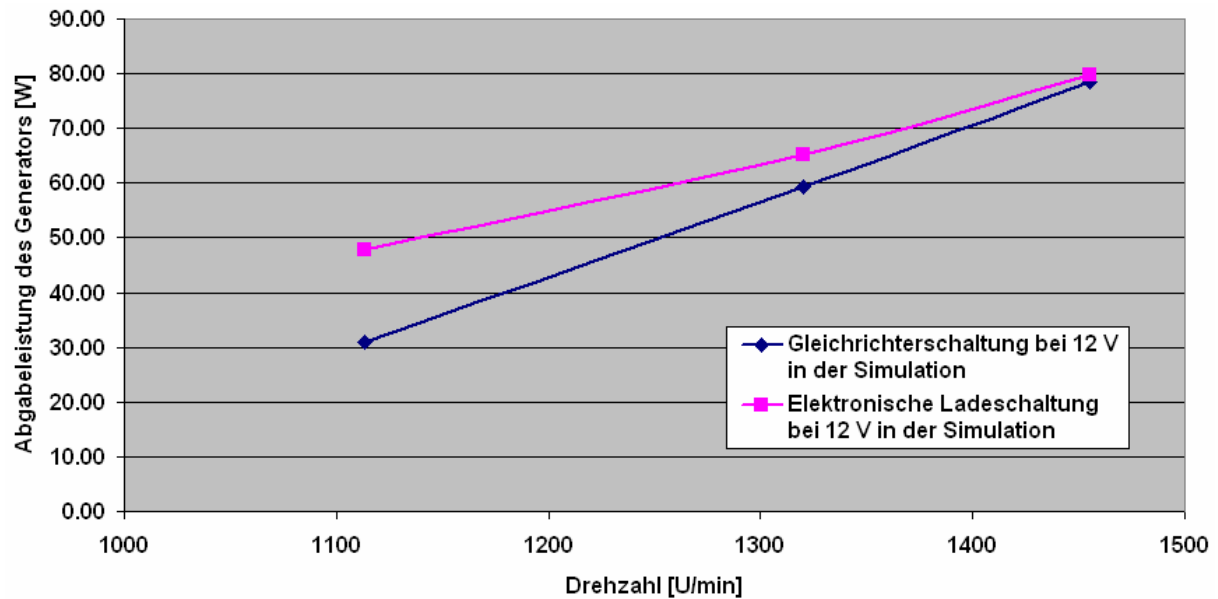


Abbildung 62: Vergleich der Generatorabgabeleistung der Schaltungen in der Simulation bei 12 V

Der Wirkungsgrad des Generators mit der elektronischen Ladeschaltung ist in der Simulation um 10 % bis 26 % geringer als beim Diodengleichrichter. Auch dies wurde bereits bei den Messungen auf dem Motorenprüfstand beobachtet.

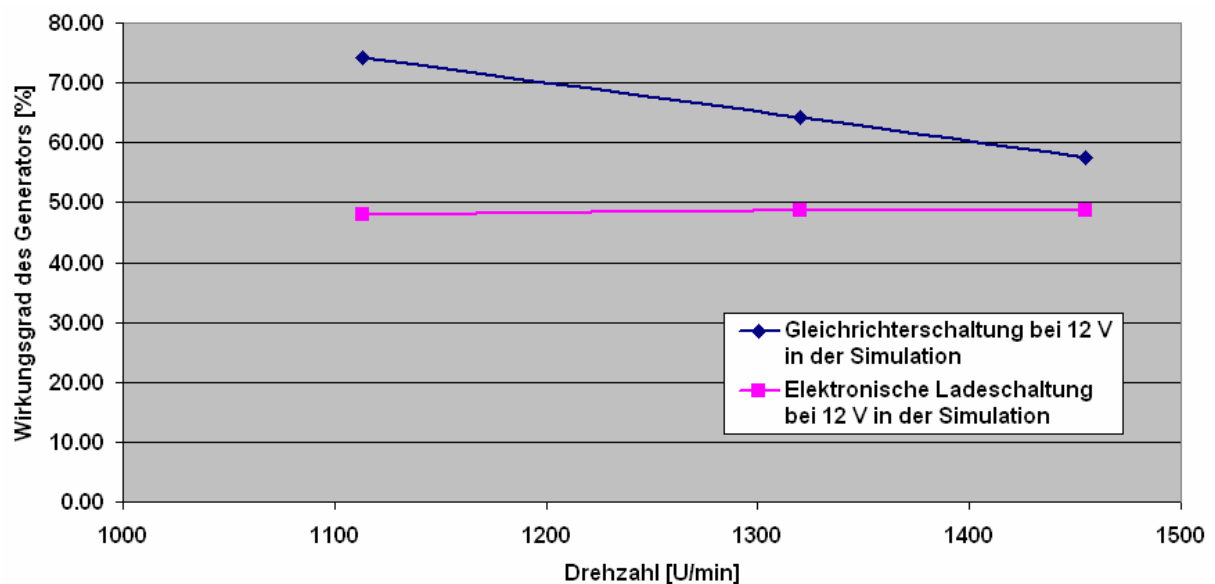


Abbildung 63: Vergleich des Generatorwirkungsgrades der Schaltungen in der Simulation bei 12 V

5.7.2 24 V-Betrieb

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	2005	180	0.999	0.327	16.18	1.26	68.66	61.10	7.04	80.72
3	2300	180	0.993	0.652	16.95	2.51	157.03	126.74	8.4	76.61
4	2477	180	0.987	0.859	17.38	3.31	222.81	170.34	9.76	73.24
5	2650	180	0.978	1.06	17.85	4.1	294.15	214.72	11.24	70.31
6	2820	180	0.965	1.28	18.3	4.93	377.99	261.18	12.96	66.81

Tabelle 15: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 24 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	2005	190	0.995	1.47	8.92	5.7	308.64	151.77	6.48	48.16
3	2300	192	0.996	1.64	10.33	6.4	394.99	197.54	8.08	49.01
4	2477	192	0.992	1.77	11.17	6.9	459.11	229.37	9.16	48.98
5	2650	195	0.997	1.92	11.3	7.6	532.80	256.87	10.32	47.29
6	2820	195	0.995	2	12.36	7.9	590.60	291.47	11.44	48.41

Tabelle 16: Maximale Abgabeleistungen des Generators in der Simulation der elektronischen Ladeschaltung 24 V

Die Leistungsdifferenz bei 24 V zwischen der Brückengleichrichterschaltung und der elektronischen Ladeschaltung reicht in der Simulation von 30 W bis 90 W. Auch bei 24 V gibt der Generatorbetrieb mit elektronischer Ladeschaltung mehr Leistung ab als die Brückengleichrichterschaltung.

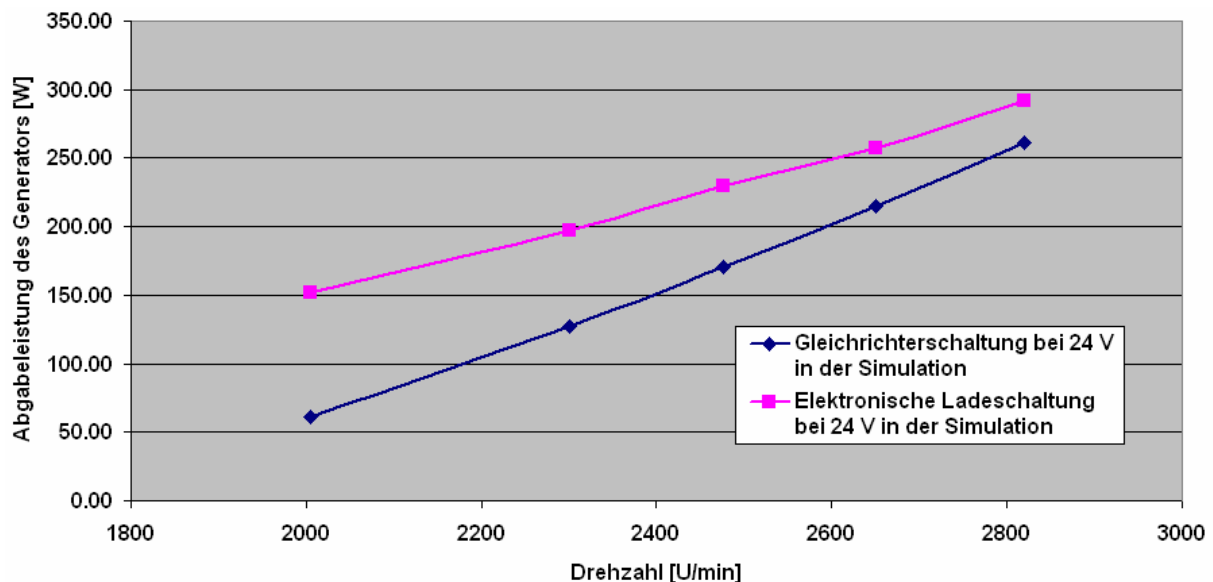


Abbildung 64: Vergleich der Generatorabgabeleistung der Schaltungen in der Simulation bei 24 V

Der Wirkungsgrad des Generators mit der elektronischen Ladeschaltung liegt in der 24 V-Simulation 18 % bis 32 % tiefer als beim Diodengleichrichter.

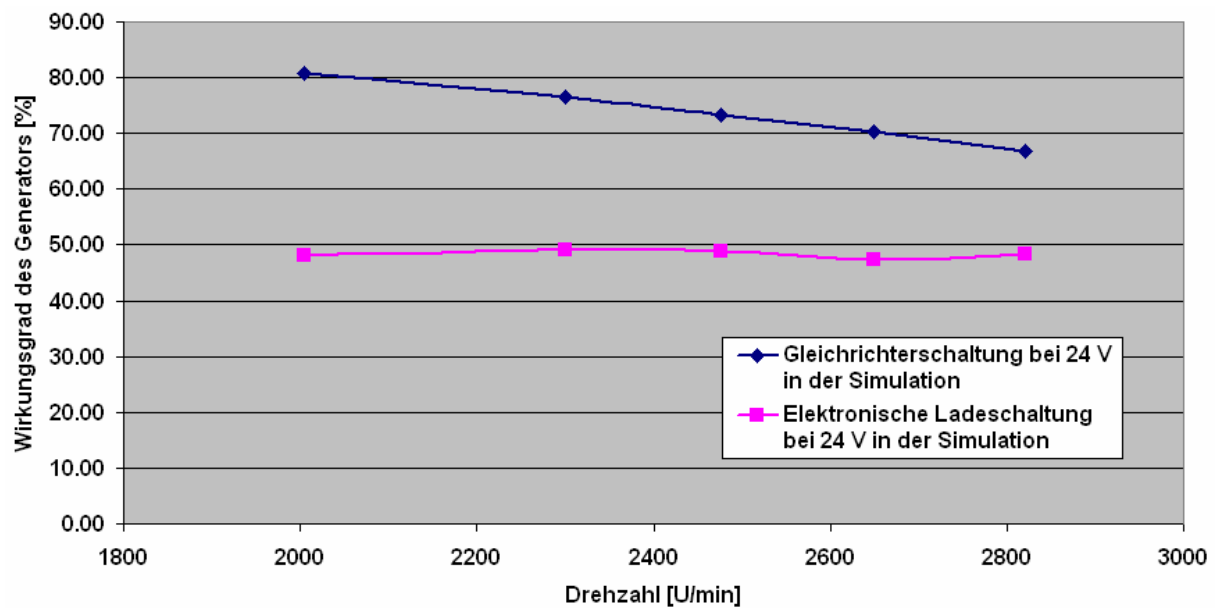


Abbildung 65: Vergleich des Generatorwirkungsgrades der Schaltungen in der Simulation bei 24 V

6. Vergleich der Messdaten auf dem Prüfstand mit den Simulationsdaten

Für die Messdaten gilt:

$$P_{auf_Gen} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot F \cdot r$$

$$P_{ab_Gen} = P_{auf_B6} = 3 \cdot U_{eff} \cdot I_{eff}$$

$$P_{ab_B6} = U_{L_eff} \cdot I_{L_eff}$$

$$P_{ab_EL} = P_{ab_Gen} \cdot \eta_{EL}$$

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{ab_Gen}}{P_{auf_Gen}}$$

$$\eta_{B6} = \frac{P_{ab_B6}}{P_{auf_B6}}$$

$$\eta_{Total} = \eta_{Gen} \cdot \eta_{B6} = \frac{P_{ab_B6}}{P_{auf_Gen}}$$

bzw.

$$\eta_{Total} = \eta_{Gen} \cdot \eta_{EL} = \frac{P_{ab_EL}}{P_{auf_Gen}}$$

n = Drehzahl an der Welle
F = Gewichtskraft (mit Waage ermittelt)
r = Radius des Generators an der Welle (37.5 mm)
M = Drehmoment an der Welle
U_{L_eff} = Ladespannung am Akku
I_{L_eff} = Ladestrom am Akku
U_{eff} = Strangspannung im Generator
I_{eff} = Strangstrom im Generator
P_{auf_Gen} = Aufgenommene Leistung des Generators
P_{ab_Gen} = Abgegebene Leistung des Generators
P_{auf_B6} = Aufgenommene Leistung des Gleichrichters (Brückenschaltung 6-pulsig)
P_{ab_B6} = Abgegebene Leistung des Gleichrichters
P_{ab_EL} = Abgegebene Leistung der elektronischen Ladeschaltung
P_{V_Eisen} = Eisenverluste des Generators
η_{Gen} = Wirkungsgrad des Generators
η_{B6} = Wirkungsgrad des Gleichrichters
η_{EL} = Wirkungsgrad der elektronischen Ladeschaltung
η_{Total} = Gesamtwirkungsgrad

Für die Simulationsdaten gilt:

$$P_{auf_Gen} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M$$

$$P_{ab_Gen} = 3 \cdot U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$$

$$P_{ab_B6} = P_{ab_Gen} \cdot \eta_{B6}$$

$$P_{ab_EL} = P_{ab_Gen} \cdot \eta_{EL}$$

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{ab_Gen}}{P_{auf_Gen} + P_{V_Eisen}}$$

$$\eta_{Total} = \eta_{Gen} \cdot \eta_{B6} = \frac{P_{ab_B6}}{P_{auf_Gen} + P_{V_Eisen}}$$

bzw.

$$\eta_{Total} = \eta_{Gen} \cdot \eta_{EL} = \frac{P_{ab_EL}}{P_{auf_Gen} + P_{V_Eisen}}$$

6.1 Brückengleichrichter

6.1.1 12 V-Betrieb

n [U/min]	U _{L_eff} [V]	I _{L_eff} [A]	U _{eff} [V]	I _{eff} [A]	F [N]	P _{auf_Gen} [W]	P _{ab_Gen} = P _{auf_B6} [W]	P _{ab_B6} [W]	η _{Gen} [%]	η _{B6} [%]	η _{Total} [%]
1113	17.34	1.5	8.2	1.29	8.04	35.16	31.73	26.01	90.26	81.96	73.98
1320	18.22	3	8.57	2.47	14.72	76.27	63.50	54.66	83.26	86.07	71.66
1455	18.6	4	8.82	3.33	19.13	109.30	88.11	74.40	80.62	84.44	68.07

Tabelle 17: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 12 V

I _{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	cos φ	M [Nm]	U _{eff} [V]	I _{eff} [A]	P _{auf_Gen} [W]	P _{ab_Gen} [W]	P _{V_Eisen} [W]	P _{ab_B6} [W]	η _{Gen} [%]	η _{B6} [%]	η _{Total} [%]
1.5	1113	180	0.998	0.335	8.04	1.29	39.04	31.05	2.8	25.45	74.21	81.96	60.82
3	1320	180	0.99	0.641	8.09	2.47	88.60	59.35	3.68	51.08	64.31	86.07	55.35
4	1455	180	0.978	0.865	8.03	3.33	131.79	78.45	4.44	66.24	57.59	84.44	48.63

Tabelle 18: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 12 V

Die abgegebenen Leistungen der 12 V-Brückengleichrichterschaltung sind in der Simulation leicht tiefer als auf dem Prüfstand ausgemessen. Die Differenzen gehen von knapp 0.6 W bis 8 W. Mit Ausnahme der Daten bei 4 A Akkuladestrom, ist der Abweichungsfehler der Simulationen kleiner als 10 %, bezogen auf die Messwerte des Prüfstandes.

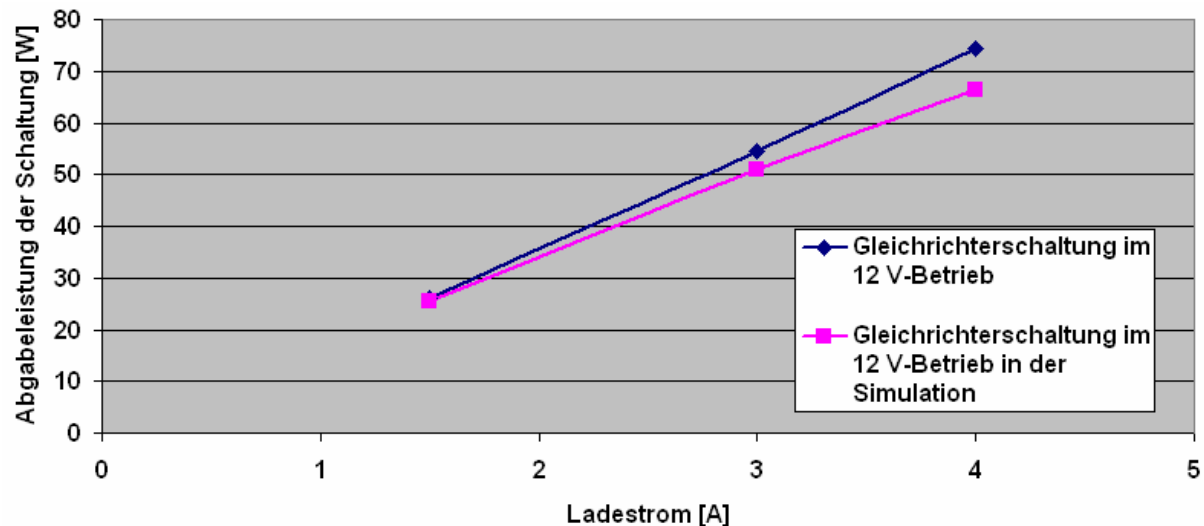


Abbildung 66: Vergleich der Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltungen bei 12 V

Der Wirkungsgrad der Brückengleichrichterschaltung bei 12 V ist auf dem Prüfstand höher ausgefallen als in der Simulation. Die Differenzen reichen von 13 % bis 19 %. Dabei wurden für den Wirkungsgrad des Diodengleichrichters in den Simulationen die berechneten Werte des Prüfstandes übernommen.

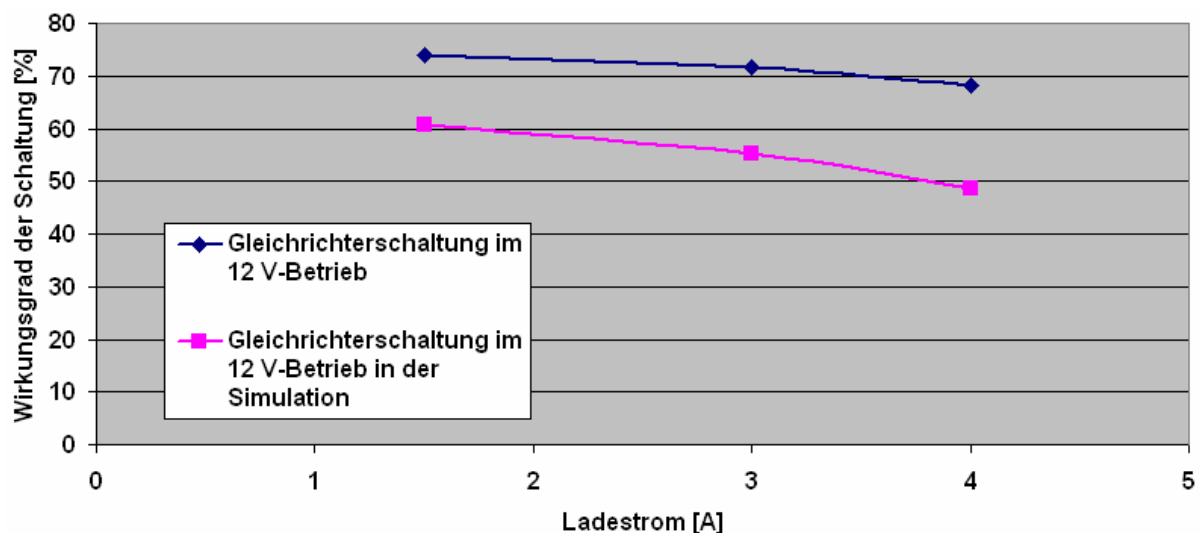


Abbildung 67: Vergleich des Wirkungsgrades der Brückengleichrichterschaltungen bei 12 V

6.1.2 24 V-Betrieb

n [U/min]	U_{L_eff} [V]	I_{L_eff} [A]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} = P_{auf_B6} [W]	P_{ab_B6} [W]	η_{Gen} [%]	η_{B6} [%]	η_{Total} [%]
2005	34.28	1.5	15.4	1.26	7.55	59.47	58.21	51.42	97.88	88.33	86.46
2300	36	3	16.54	2.51	14.72	132.90	124.55	108.00	93.71	86.71	81.26
2477	36.8	4	16.85	3.31	18.84	183.21	167.32	147.20	91.33	87.97	80.35
2650	37.3	5	17.1	4.1	23.05	239.90	210.33	186.50	87.67	88.67	77.74
2820	38.08	6	17.31	4.93	27.47	304.17	256.01	228.48	84.17	89.24	75.11

Tabelle 19: Messdaten im Brückengleichrichterbetrieb 24 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	P_{ab_B6} [W]	η_{Gen} [%]	η_{B6} [%]	η_{Total} [%]
1.5	2005	180	0.999	0.327	16.18	1.26	68.66	61.10	7.04	53.97	80.72	88.33	71.30
3	2300	180	0.993	0.652	16.95	2.51	157.03	126.74	8.4	109.90	76.61	86.71	66.43
4	2477	180	0.987	0.859	17.38	3.31	222.81	170.34	9.76	149.85	73.24	87.97	64.43
5	2650	180	0.978	1.06	17.85	4.1	294.15	214.72	11.24	190.39	70.31	88.67	62.34
6	2820	180	0.965	1.28	18.3	4.93	377.99	261.18	12.96	233.08	66.81	89.24	59.62

Tabelle 20: Simulationsdaten der Brückengleichrichterschaltung 24 V

Die abgegebenen Leistungen der 24 V-Brückengleichrichterschaltung sind in der Simulation, im Gegensatz zum 12 V-Betrieb, um knapp 2 W bis 4.6 W höher als die auf dem Prüfstand ausgemessenen Leistungen. Der Abweichungsfehler der Simulationen ist kleiner als 5 %, bezogen auf die Messwerte des Prüfstandes.

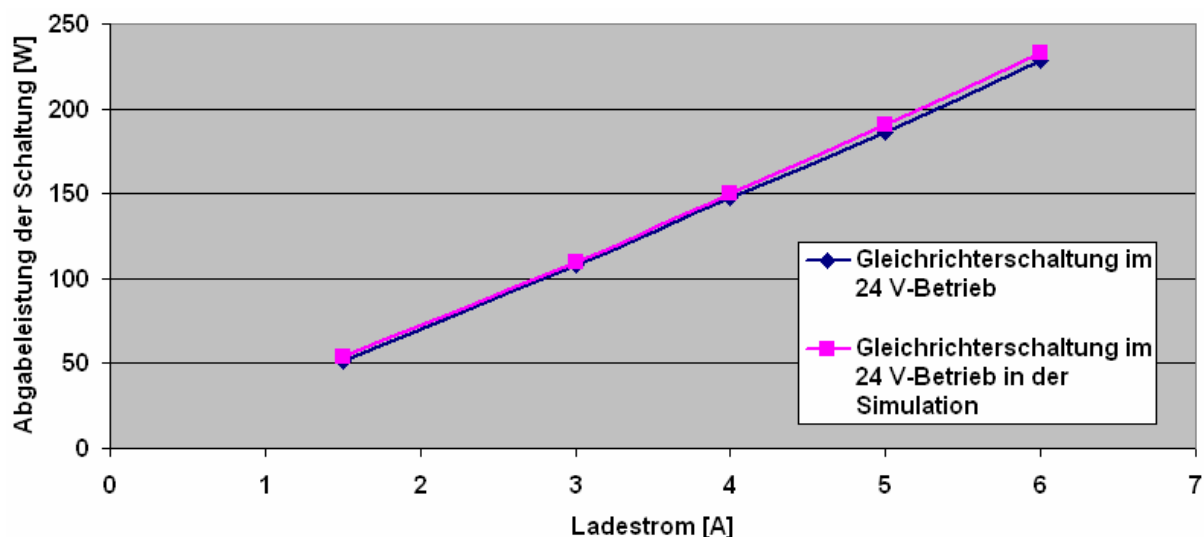


Abbildung 68: Vergleich der Abgabeleistung der Brückengleichrichterschaltungen bei 24 V

Der Wirkungsgrad der Brückengleichrichterschaltung bei 24 V ist auf dem Prüfstand höher ausgefallen als in der Simulation. Die Differenz liegt zwischen 15 % bis 16 %. Dabei wurden für den Wirkungsgrad des Diodengleichrichters in den Simulationen die berechneten Werte des Prüfstandes übernommen.

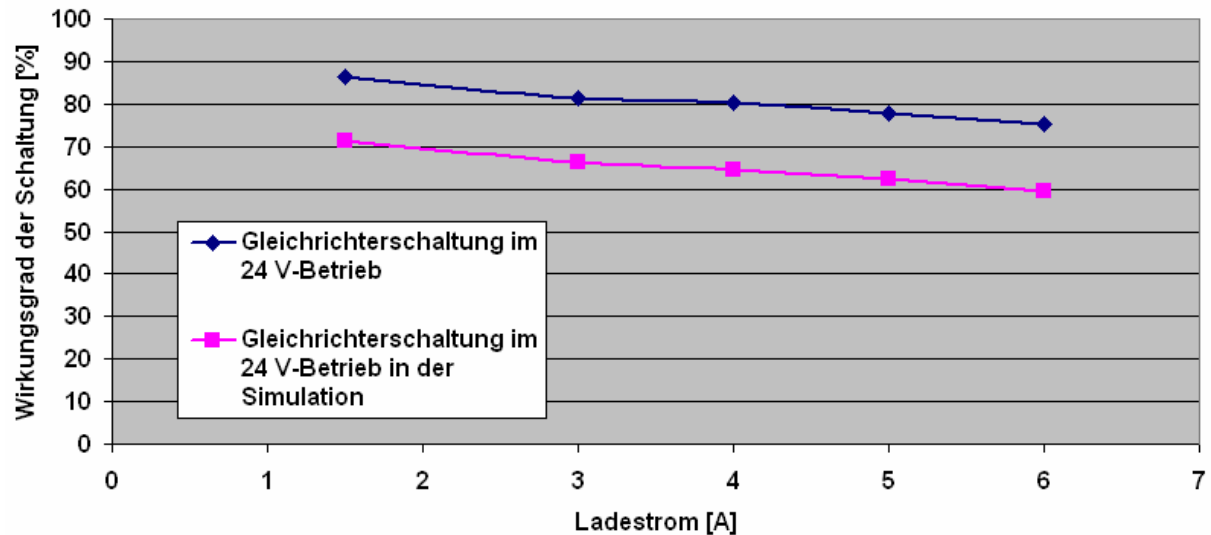


Abbildung 69: Vergleich des Wirkungsgrades der Brückengleichrichterschaltungen bei 24 V

Der Leistungsvergleich zwischen der realen und der simulierten Brückengleichrichterschaltung liefert brauchbare Resultate. Der Abweichungsfehler der Simulationen, in Bezug auf die Messungen auf dem Prüfstand, ist kleiner als 10 %. Im 24 V-Betriebsfall sogar kleiner als 5 %.

Der Wirkungsgrad der Brückengleichrichterschaltung ist in den Simulationen tiefer als in der realen Messung. Die Differenz des Wirkungsgrades ist in beiden Betriebsfällen grösser als 13 %. Der Grund für diese grosse Abweichung konnte nicht genau eruiert werden.

6.2 Elektronische Ladeschaltung

6.2.1 12 V-Betrieb

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{ab_EL} [W]	η_{Gen} [%]	η_{EL} [%]	η_{Total} [%]
1.5	1113	4.79	4.1	25.51	111.48	58.92	55.97	52.85	95	50.21
3	1320	6.32	4.2	26.00	134.75	79.63	75.65	59.1	95	56.15
4	1455	6.74	4.7	28.45	162.55	95.03	90.28	58.47	95	55.55

Tabelle 21: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 12 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	P_{ab_EL} [W]	η_{Gen} [%]	η_{EL} [%]	η_{Total} [%]
1.5	1113	180	0.969	0.832	5.14	3.2	96.97	47.81	2.68	45.42	47.98	95	45.58
3	1320	180	0.96	0.947	6.13	3.7	130.90	65.32	3.48	62.05	48.61	95	46.18
4	1455	190	1	1.05	6.48	4.1	159.98	79.70	3.96	75.72	48.62	95	46.19

Tabelle 22: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 12 V in der Simulation

Die maximal abgegebenen Leistungen der elektronischen Ladeschaltung sind in den Simulationen um 10.5 W bis 14.5 W tiefer als die entsprechenden Leistungen, welche auf dem Prüfstand mit den Schiebewiderständen bei 12 V ermittelt wurden. Der Abweichungsfehler der Abgabeleistung in den Simulationen, bezogen auf die realen Messwerte, beträgt 16 % bis 19 %.

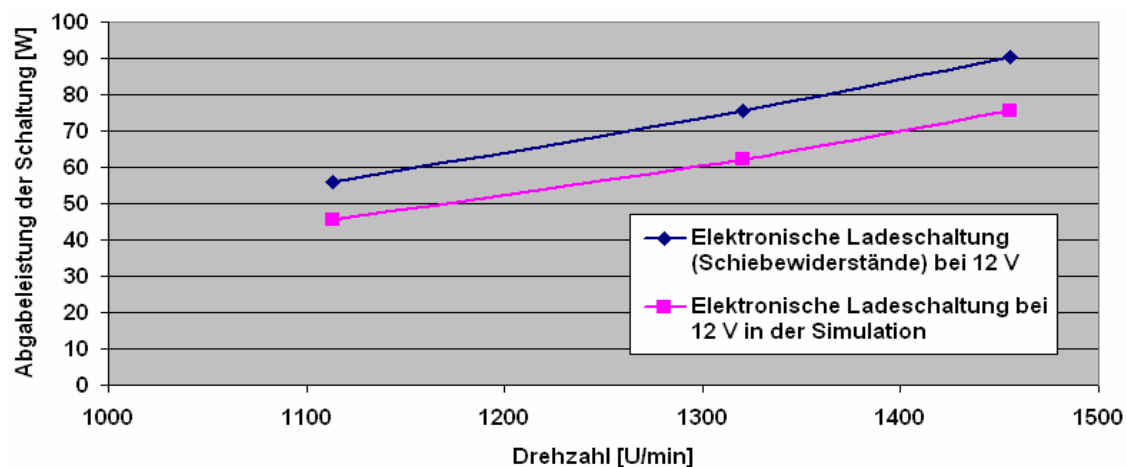


Abbildung 70: Vergleich der maximalen Abgabeleistung der elektronischen Ladeschaltungen bei 12 V

Der Wirkungsgrad der elektronischen Ladeschaltung beim Leistungsmaximum in den Simulationen ist wie die Abgabeleistung tiefer, als die entsprechenden Werte bei der realen Messung mit den Schiebewiderständen im 12 V-Betrieb. Die Differenz liegt zwischen 4.5 % bis 10 %.

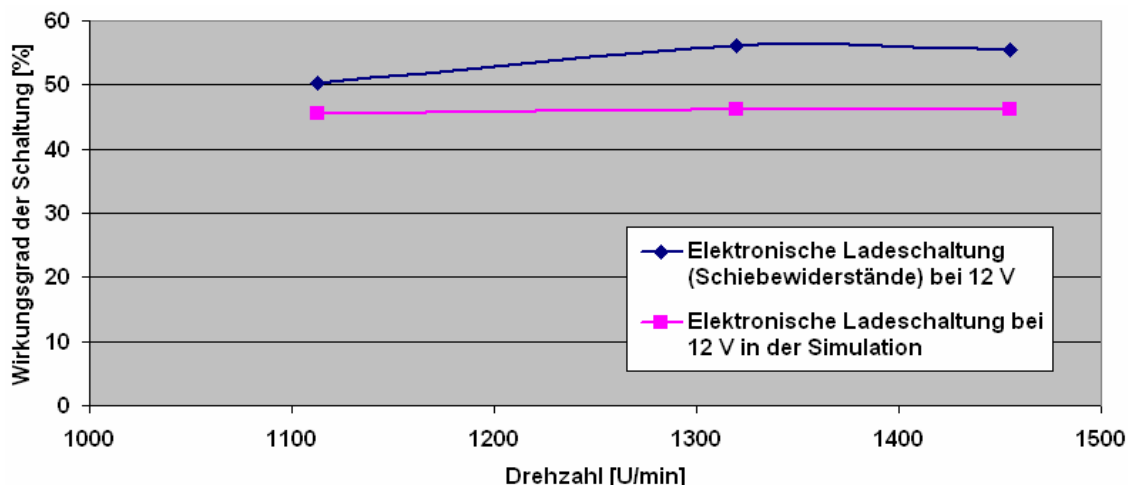


Abbildung 71: Vergleich des Wirkungsgrades der elektronischen Ladeschaltungen bei 12 V

6.2.2 24 V-Betrieb

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{ab_EL} [W]	η_{Gen} [%]	η_{EL} [%]	η_{Total} [%]
1.5	2005	10.41	5.3	31.98	251.80	165.52	157.24	65.74	95	62.45
3	2300	12.43	5.5	33.35	301.25	205.10	194.85	68.08	95	64.68
4	2477	13.43	5.8	34.83	338.74	233.68	222.00	68.99	95	65.54
5	2650	14.1	6	35.32	367.51	253.80	241.11	69.06	95	65.61
6	2820	14.53	6.5	37.28	412.81	283.34	269.17	68.64	95	65.21

Tabelle 23: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	P_{ab_EL} [W]	η_{Gen} [%]	η_{EL} [%]	η_{Total} [%]
1.5	2005	190	0.995	1.47	8.92	5.7	308.64	151.77	6.48	144.18	48.16	95	45.75
3	2300	192	0.996	1.64	10.33	6.4	394.99	197.54	8.08	187.66	49.01	95	46.56
4	2477	192	0.992	1.77	11.17	6.9	459.11	229.37	9.16	217.90	48.98	95	46.53
5	2650	195	0.997	1.92	11.3	7.6	532.80	256.87	10.32	244.03	47.29	95	44.93
6	2820	195	0.995	2	12.36	7.9	590.60	291.47	11.44	276.90	48.41	95	45.99

Tabelle 24: Maximale Abgabeleistungen der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V in der Simulation

Beim Vergleich der maximal abgegebenen Leistungen der elektronischen Ladeschaltungen bei 24 V ergibt sich ein zweigeteiltes Bild. Bei den Akkuladeströmen von 1.5 A bis 4 A sind die Abgabeleistungen in der Simulation um 4 W bis 13 W tiefer, als die entsprechenden Leistungen, welche auf dem Prüfstand mit den Schiebewiderständen ermittelt wurden. Bei den Ladeströmen von 5 A und 6 A sind die Abgabeleistungen in der Simulation um 3 W bis knapp 8 W höher, als die entsprechenden maximalen Abgabeleistungen auf dem Prüfstand. Der Abweichungsfehler der Abgabeleistung in den Simulationen, bezogen auf die realen Messwerte, liegt unter 5 %. Einzig die Leistungswerte bei einem Akkuladestrom von 1.5 A verursachen einen Abweichungsfehler von 8.3 %.

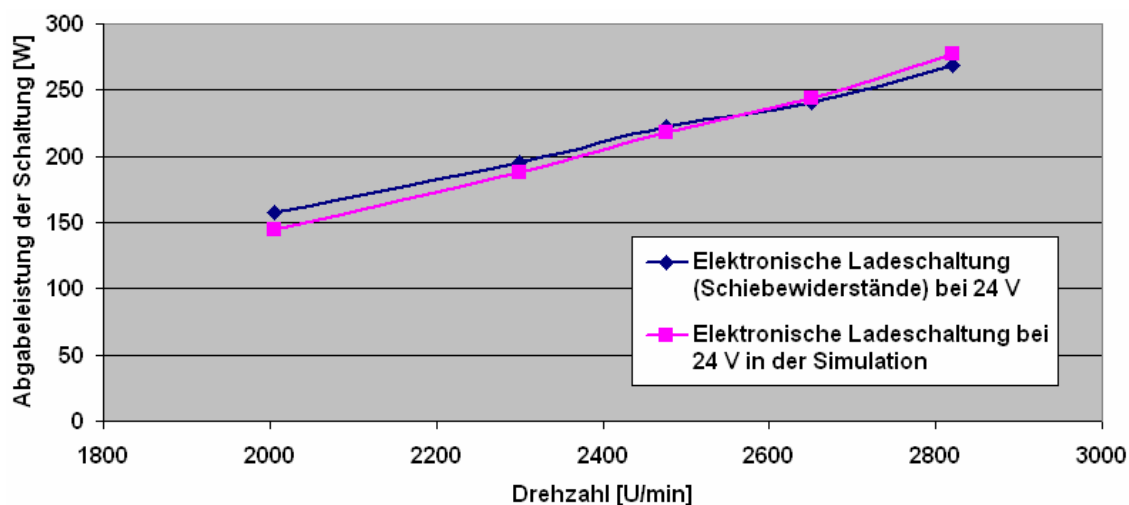


Abbildung 72: Vergleich der maximalen Abgabeleistung der elektronischen Ladeschaltungen bei 24 V

Der Wirkungsgrad der elektronischen Ladeschaltung beim Leistungsmaximum in den Simulationen ist tiefer, als bei der realen Messung mit den Schiebewiderständen im 24 V-Betrieb. Die Differenz liegt zwischen 16.5 % bis 20.5 %.

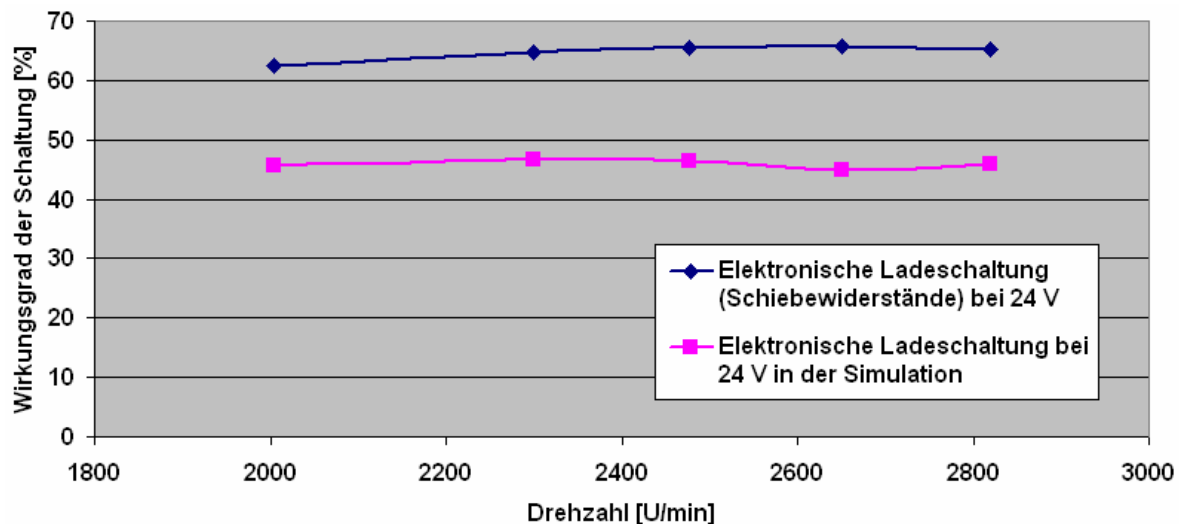


Abbildung 73: Vergleich des Wirkungsgrades der elektronischen Ladeschaltungen bei 24 V

Der Leistungsvergleich zwischen der realen und der simulierten elektronischen Ladeschaltung liefert unterschiedliche Resultate. Der Abweichungsfehler der Simulationen im 24 V-Betriebsfall, in Bezug auf die Messungen auf dem Prüfstand, ist bis auf eine Ausnahme kleiner als 5 %. Der Fehler im 12 V-Betriebsfall beträgt im Maximum fast 20 %. Dies ist überraschend und schwer zu erklären.

Der Wirkungsgrad der elektronischen Ladeschaltung ist in den Simulationen tiefer als in der realen Messung. Die Differenz des Wirkungsgrades ist im 12 V-Betriebsfall mit 10 % im Maximum geringer als im 24 V-Betrieb mit 20 %. Auch hier ist der Grund für die grosse Differenz nicht erkennbar.

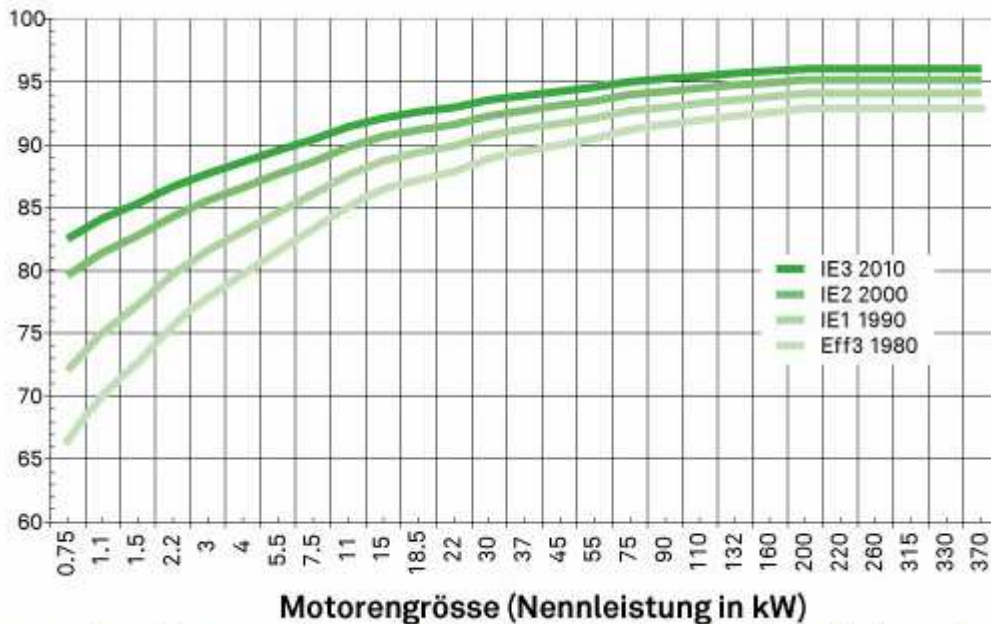
7. Diskussion und Erkenntnisse

Die Vergleiche der Messdaten auf dem Motorenprüfstand mit den Simulationsdaten haben gezeigt, dass sich mit den Simulationen im FEMAG gute Vorabschätzungen bezüglich der Abgabeleistung einer Schaltung machen lassen. Vor allem die Simulationen des Generators mit Diodengleichrichter ergaben gute Resultate. Dabei reichte es vollkommen aus, einen Mittelwert der Strangströme des Generators im Brückengleichrichterbetrieb auf dem Motorenprüfstand aufzunehmen und ins FEMAG abzubilden. Die Abweichungen der Abgabeleistung der Simulationen bezogen auf die reale Messung sind kleiner als 10 %, im 12 V-Betriebsfall sogar kleiner als 5 %. Mit diesen Werten können zukünftige Simulationen in Angriff genommen werden. Der Wirkungsgrad weist hingegen eine Differenz von 13 % bis 20 % auf die reale Messung auf. Ein Teil dieser Abweichung könnte durch die Toleranzen der verschiedenen Messgeräte in der realen Messung verursacht werden. Der Fehler sollte aber maximal 2 % bis 3 % ausmachen. Eine weitere Differenz könnte darin bestehen, dass nicht bekannt ist, wie stark FEMAG die Widerstandsänderung der Wicklungen, bei zunehmender Temperatur, berücksichtigt. Die Messungen auf dem Prüfstand wurden alle im warmen Zustand der Wicklungen durchgeführt. Eine weitere Fehlerquelle ist die Tatsache, dass alle Simulationen mit dem gleichen Strangstrom gemacht wurden, obwohl sich dieser Strom mit zunehmendem Ladestrom in seiner Form verändert. Die Abweichungen sind aber zu hoch, um den Grund für die Abweichung auf den einzigen aufgenommenen Strangstrom zu schieben. Ausserdem sind die Abweichungen der Leistung ja geringer.

Bei der elektronischen Ladeschaltung ergibt sich ein zweigeteiltes Bild. Während im 24 V-Betriebsfall die Abweichungen der Abgabeleistung der Simulationen (bei den maximalen Abgabeleistungen), bezogen auf die Messdaten auf dem Prüfstand, kleiner als 5 % sind, weicht der Wirkungsgrad in den Simulationen gegenüber der realen Messung um bis zu 20 % ab. Im 12 V-Betriebsfall ist es gerade umgekehrt. Die Wirkungsgrade in den Simulationen weichen gegenüber den Messungen auf dem Prüfstand maximal 10 % ab. Hingegen reichen die Abweichungen der Abgabeleistung der Simulationen (bei den maximalen Abgabeleistungen), bezogen auf die realen Messungen, von 16 % bis 19 %. Diese Diskrepanz zwischen den beiden Betriebsfällen der elektronischen Ladeschaltung müsste in einem weiteren Schritt noch genauer untersucht werden.

Die auf dem Motorenprüfstand gemessenen Wirkungsgrade des Generators, sowohl im Brückengleichrichterbetrieb wie auch im Betrieb mit den Schiebewiderständen, mögen mit durchschnittlich 70 % bis 80 % tief erscheinen. Dies ist aber eine Täuschung, denn für kleine Maschinen wie dieser Generator, ist der Wirkungsgrad sehr gut. Das ist auch in einem Diagramm von Topmotors ersichtlich (vgl. Abb. 74). Topmotors ist ein Projekt diverser Firmen, welche sich auf effiziente elektrische Antriebe spezialisiert haben.

Wirkungsgrad von Elektromotoren mit 4 Polen (%)



Bemerkung: Die unterste Kurve mit Eff3 (1980) stellt einen ungefähren Mittelwert dar.

Abbildung 74: Energieeffizienz von Elektromotoren. Aus: Topmotors 2009

Der Wirkungsgrad der besten Elektromotoren liegt bei 750 W noch bei 83 %. Der ausgemessene Generator mit nur 100 W bis 200 W, je nach Spannung, ist also mit 70 % bis 80 % Wirkungsgrad sehr gut. Der Wirkungsgrad des Generators lässt sich aber mit einigen Massnahmen noch verbessern. Mit der Verwendung eines besseren Eisenblechs für den Stator können die Eisenverluste des Generators noch minimiert werden. Weiter können stärkere Dauermagnete eingesetzt oder andere Magnetformen ausgetestet werden. Auch den Luftspalt von 1.2 mm kann noch verkleinert werden, um die Effizienz des Generators zu verbessern. All die erwähnten Massnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades haben aber auch Nachteile. Ein verlustarmes Eisenblech ist viel teurer als das verwendete Blech. Stärkere Dauermagnete lassen den Generator anfälliger auf Wärmeschwankungen werden. Ausserdem führt die grössere induzierte Spannung der Magnete auch wieder zu grösseren Verlusten. Die Minimierung des Luftspaltes ist auch nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Das Minimum ist mit etwa 0.25 mm durch die Herstellung begrenzt.

Zur Veranschaulichung wurden einige der beschriebenen Massnahmen am Generatormodell im FEMAG ausgetestet. Damit kann gezeigt werden, wie gross der Einfluss der einzelnen Massnahmen auf den Wirkungsgrad ist. Die verschiedenen Simulationen des veränderten Generatormodells wurden mit den Simulationen des unveränderten Generatormodells (vgl. Abb. 75 / 76, rote Kurve) sowie mit den Messungen auf dem Prüfstand (vgl. Abb. 75 / 76, blaue Kurve) verglichen. Unverändertes Generatormodell bedeutet in diesem Fall eine Remanenz

der Permanentmagnete von 1.26 Tesla, ein Luftspalt von 1.2 mm zwischen Stator und Rotor und halbmondförmige Permanentmagnete. Die Simulationen geben auch Aufschluss darüber, ob sich die relativ grossen Abweichungen des Wirkungsgrades zwischen den Messungen auf dem Prüfstand und den Simulationen auf Fertigungstoleranzen des Generators (Magnete, Luftspalt) zurückführen lassen.

Die Wirkungen der Massnahmen werden hier mit Simulationen des Generators an der elektronischen Ladeschaltung gezeigt. Die verwendeten Drehzahlen entsprechen den Drehzahlen, welche im Brückengleichrichterbetrieb mit 24 V-Akkumulator aufgenommen wurden. Die Simulationen des veränderten Generatormodells wurden nur mit den Daten der maximalen Abgabeleistung des unveränderten Generatormodells simuliert und verglichen.

Als erste Massnahme wurde die Remanenz der Permanentmagnete von 1.26 Tesla auf 1.3 Tesla erhöht. Die Leistung der elektronischen Ladeschaltung mit den verstärkten Permanentmagneten (vgl. Abb. 75 / 76, gelbe Kurve) steigt um 9 W bis 18 W gegenüber der Leistung des unveränderten Modells. Der Wirkungsgrad wird um 1 % bis 1.5 % grösser. Als nächstes wurde zusätzlich zur Verstärkung der Permanentmagnete auch der Luftspalt angepasst. Der Luftspalt wurde von 1.2 mm auf 1 mm reduziert (vgl. Abb. 75 / 76, grüne Kurve). Die Leistung der elektronischen Ladeschaltung steigert sich dadurch um 28 W bis 55 W, der Wirkungsgrad um 4 %, gegenüber der Simulation mit unverändertem Generatormodell.

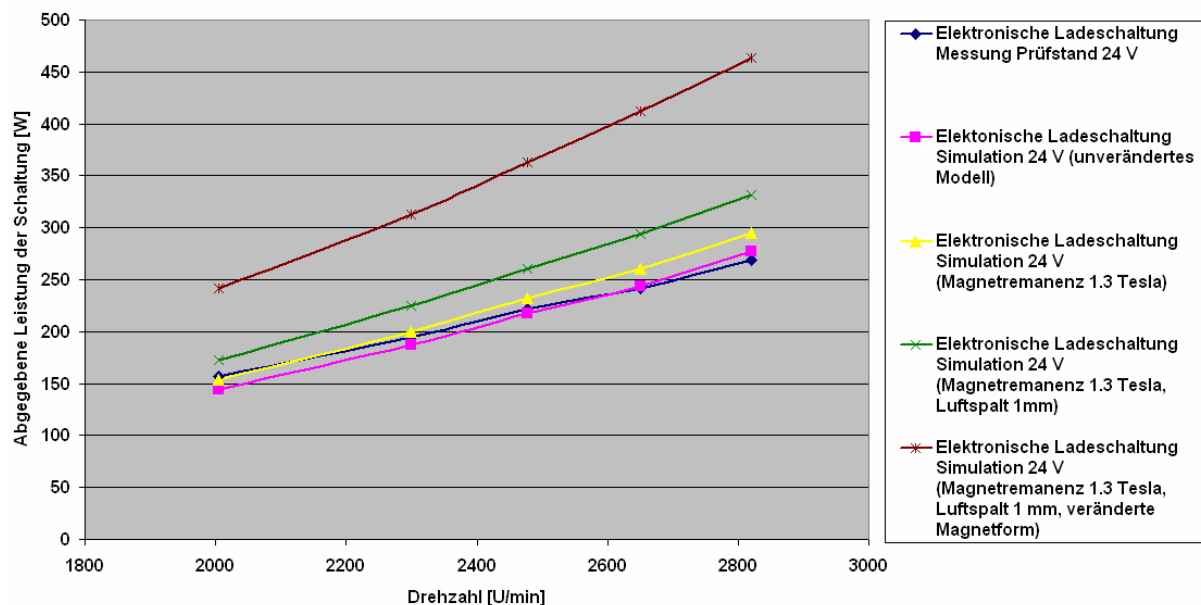


Abbildung 75: Vergleich der abgegebenen Leistung der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V

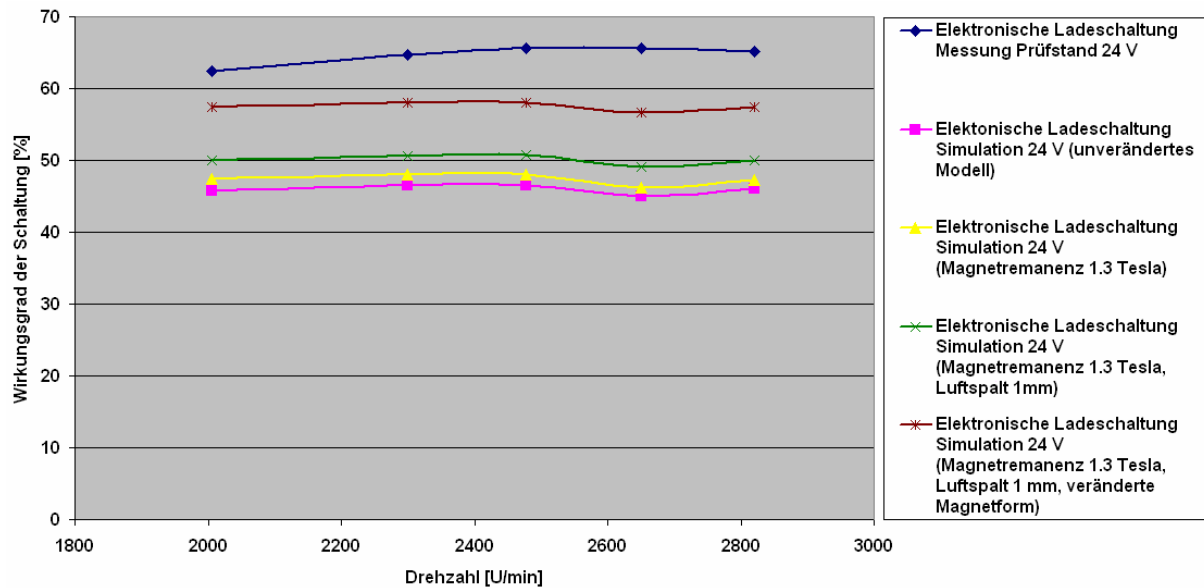


Abbildung 76: Vergleich des Wirkungsgrades der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V

Zum Schluss wurde die Magnetform der Permanentmagnete angepasst. Die Halbmondform wurde durch eine konstante Höhe der Magnete von 2.55 mm (vgl. Abb. 77) ersetzt. Diese Höhe entspricht der höchsten Stelle der Halbmondform. Es besteht weiter kein Zwischenraum zwischen den einzelnen Magneten mehr.

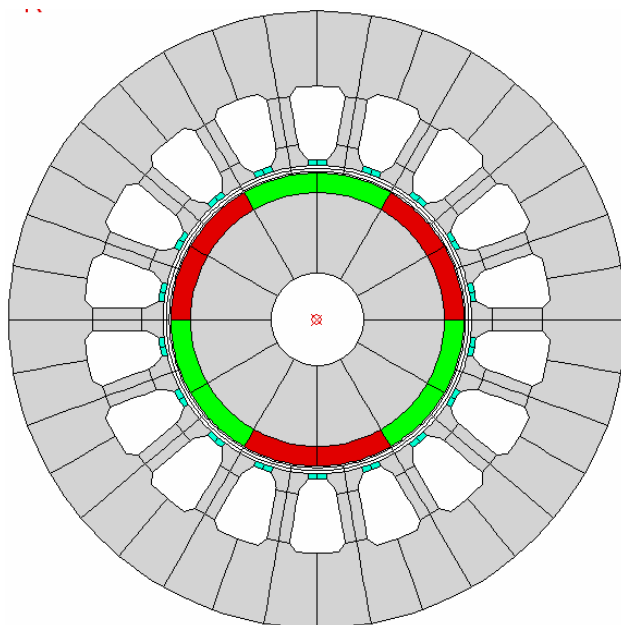


Abbildung 77: Generatormodell mit veränderter Magnetform im FEMAG

Die Magnetremanenz von 1.3 Tesla sowie der Luftspalt von 1 mm wurden beibehalten. Die Simulationen des Generatormodells mit der veränderten Magnetform (vgl. Abb. 75 / 76, braune Kurve) bewirkt noch einmal eine Leistungssteigerung der Abgabeleistung. Diese ist um 97 W bis 186 W höher als die entsprechende Abgabeleistung mit dem unveränderten Generatormodell. Der Wirkungsgrad der Simulationen mit der veränderten Magnetform ist um 11 % grösser als mit dem unveränderten Modell. Durch die erläuterten Massnahmen könnte der Wirkungsgrad des Generators also noch verbessert werden. Es lässt sich ausserdem noch mehr Leistung aus dem Generator gewinnen. Die Graphik zum Vergleich des Wirkungsgrades (vgl. Abb. 76) zeigt aber auch deutlich, dass die grossen Abweichungen des Wirkungsgrades zwischen den Messungen auf dem Motorenprüfstand und den Simulationen im FEMAG, nicht nur auf Fertigungstoleranzen des Generators zurück zu führen sind. Die Simulationen mit dem angepassten Luftspalt und den stärkeren Permanentmagneten liegen immer noch 15 % und mehr unter dem Wirkungsgrad der Prüfmessung. Selbst die Simulationen des Generators mit veränderter Magnetform, was im realen Generator ja nicht der Fall ist, sind noch 5 % bis 8 % tiefer im Wirkungsgrad als die reale Messung. Diese Differenz ist ein Punkt, welcher in einem weiteren Schritt noch genauer untersucht werden müsste. Es ist aber zu erwähnen, dass die Simulationen für grössere Maschinen (3 kW), in früheren Projekten, nur sehr geringe Abweichungen gegenüber den Messungen aufwiesen (vgl. Scherer, Wicki 2008).

Weiter lässt sich durch die diversen Messungen und Simulationen die Erkenntnis gewinnen, dass sich mit dem Generatorbetrieb an der elektronischen Ladeschaltung mehr Leistung gewinnen lässt, als in Kombination mit dem Diodengleichrichter. Die Schaltung Generator am Brückengleichrichter gibt je nach Art der Last, 12 V- oder 24 V-Akkumulator, im Maximum 74 W bis 228 W ab. Der Generator in Kombination mit der elektronischen Ladeschaltung erreicht im Maximum 90 W bis 269 W, je nach Last. Die Leistung hängt von der Drehzahl an der Welle ab. Die Leistungsdifferenz zwischen den beiden Schaltungen kann bis zu 100 W gehen. Vor allem bei den tiefen Drehzahlen übertrumpft die elektronische Ladeschaltung die Schaltung mit dem Brückengleichrichter bezüglich Abgabeleistung. Der Wirkungsgrad ist dagegen im Brückengleichrichterbetrieb um 10 % bis 20 % grösser als mit der elektronischen Ladeschaltung. Das Spektrum des Gesamtwirkungsgrades der Schaltung mit Brückengleichrichter reicht von 68 % bis 86 %.

Doch welche Schaltung sollte nun in der Praxis zusammen mit einem Generator betrieben werden? In kleinen Wind- und Wasseranlagen sollte an Orten mit unregelmässigen Windverhältnissen oder Wassermengen der Generator an der elektronischen Ladeschaltung betrieben werden. Es werden somit die maximalen Leistungen aus der Schaltung herausgeholt. Dazu wird gewährleistet, dass der Akkumulator während einer kurzen Windphase genügend geladen wird. Ausserdem ist die elektronische Ladeschaltung vor allem bei tiefen Drehzahlen dem Brückengleichrichter bezüglich abgegebener Leistung überlegen. In Einsatzgebieten mit aus-

reichenden und konstanten Wind- oder Wasserverhältnissen (konstante hohe Drehzahlen am Generator) könnte durchaus der herkömmliche Diodengleichrichter zum Einsatz kommen. Dieser ist etwa siebenmal günstiger als die elektronische Ladeschaltung und weist den besseren Wirkungsgrad auf. Beide Schaltungen haben also ihre Einsatzberechtigung.

Der ausgemessene Generator mit der elektronischen Ladeschaltung kostet ca. 600 Franken. Wie im Kapitel 4.6 gesehen, lässt sich damit etwa 200 W Leistung im 24 V-Betrieb erzeugen. Zum Vergleich: Die Kosten um eine elektrische Leistung von 200 W mit Solarpanels zu erreichen, belaufen sich dagegen auf ca. 2000 Franken. Der Generator mit der entsprechenden Akkumulator-Ladeschaltung ist demnach eine gute Investition für beispielsweise kleine Wind- und Wasserkraftwerke in abgelegenen Gebieten.

8. Schluss

Die getätigten Simulationen im FEMAG sowie die Messungen auf dem Motorenprüfstand haben gezeigt, dass der Generatorbetrieb an der elektronischen Ladeschaltung mehr Leistung abgibt, als dies mit dem Brückengleichrichter der Fall ist. Die Höhe der Leistungsdifferenz zwischen den beiden Schaltungen hängt von den Drehzahlen an der Welle des Generators ab. Die elektronische Ladeschaltung brilliert vor allem im tieferen Drehzahlbereich. Hier sind die abgegebenen Leistungen um bis zu 3-mal höher, als die Leistungen im Brückengleichrichterbetrieb. Die elektronische Ladeschaltung ist dem Brückengleichrichter bei tiefen oder unregelmässigen Drehzahlen vorzuziehen. Der Wirkungsgrad der Schaltung ist dagegen im Brückengleichrichterbetrieb um 10 % bis 20 % höher, als mit der elektronischen Ladeschaltung. Bei ausreichenden und konstanten Wind- oder Wassermengen einer Anlage, welche zu konstanten und hohen Drehzahlen des Generators führen, hat der Brückengleichrichter durchaus seine Einsatzberechtigung.

Die Simulationsmodelle im FEMAG ergeben gute Resultate. Die Leistungsabweichungen der Simulationen, bezogen auf die Messungen, sind bis auf wenige Ausnahmen unter 10 %. Zum Teil sind die Abweichungen sogar kleiner als 5 %. Dabei reicht es völlig aus, im Brückengleichrichterbetrieb nur einen mittleren Wert der Strangstromform des Generators aufzunehmen und abzubilden. Mit diesem Modell lassen sich zukünftige Maschinen, welche in ihrer Geometrie abgeändert wurden oder eine andere Baugrösse besitzen, an den beiden Schaltungstypen simulieren. Es lassen sich somit erste Erkenntnisse und Tendenzen über die Maschine gewinnen, ohne diese gleich bauen zu müssen. Leider weicht der Wirkungsgrad der Schaltungen in den Simulationen um 10 % und mehr gegenüber den Messungen auf dem Prüfstand ab. Obwohl die Messungen auf dem Prüfstand durch die Toleranzen der Messgeräte und die Fertigungstoleranzen des Generators gewisse Unsicherheiten aufweisen, lässt sich eine so grosse Differenz zwischen realer Messung und Simulation nicht erklären. In einem weiteren Schritt müsste an dieser Wirkungsgraddifferenz angesetzt werden. Um die Simulation bei der Auslegung und Gestaltung einer Maschine noch stärker einzubinden, müssten die genauen Gründe für die hohe Abweichung im Wirkungsgrad untersucht werden.

Der ausgemessene Generator besitzt bereits jetzt mit 70 % bis 80 % für seine Grösse einen guten Wirkungsgrad. Der Permanent-Magnet-Generator kann aber, für den Einsatz in kleinen Wind- und Wasserkraftwerken, in seiner Geometrie noch angepasst werden. Wie in den Simulationen bereits demonstriert, kann mit verschiedenen Massnahmen wie der Reduktion des Luftspaltes zwischen Stator und Rotor, stärkeren Permanent-Magneten oder einer anderen Form der Magnete, der Wirkungsgrad noch um ein paar Prozente angehoben werden. Dabei

ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis dieser Modifizierungen in Zusammenhang mit der jeweiligen Anwendung des Generators abzuwägen.

Der ausgemessene Permanent-Magnet-Generator eignet sich vorzüglich für kleine Wind- und Wasserkraftanlagen. Es lassen sich mit der entsprechenden Ladeschaltung sehr gute Leistungen preiswert erzielen. Eine gleich hohe Leistung mit Solarpanels zu erreichen kostet mehr als das Dreifache. Diese Permanent-Magnet-Maschine im Generatorbetrieb leistet an der passenden Ladeschaltung angeschlossen sowie an der richtigen Stelle eingesetzt, einen Beitrag für die erneuerbaren Energien in unserer Landschaft.

Es bleibt zu hoffen, dass auch weiterhin intensiv an Projekten zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienz von elektrischen Maschinen geforscht wird.

An dieser Stelle möchten wir uns noch bei allen bedanken, welche uns bei unserer Diplomarbeit unterstützt haben. Speziell sind dies unser Industriepartner Herr Markus Lindegger von der Firma Circle Motor AG sowie unser betreuender Dozent Herr Dominique Salathé, die uns bei Schwierigkeiten stets weiter geholfen haben.

Wir hoffen unsere Arbeit hat Ihnen gefallen und bedanken uns für Ihr Interesse.

9. Quellenverzeichnis

Bomatec, Magnetkennlinien, <http://www.bomatec.ch/angebot/magnettechnik/seltenerd-magnete.php>, Stand [29.04.2009]

FEMAG, Finite Elemente Programm, <http://www.ial.uni-hannover.de/femag.html>, Stand [15.03.2009]

Lindegger, Markus u.a., Effizienter IEC Permanent Magnet Motor (3 kW), Auftrag des Bundesamts für Energie, Hochschulen Luzern und Wallis, Circle Motor AG, 2008

Maurer Elektromaschinen, Generator PGM120, <http://www.maurelma.ch/shop/index.php?cat=WG08&product=400017>, Stand [21.05.2009]

Omlin, Adrian, Leistungselektronik und elektrische Antriebe, Fremdgeführte Stromrichter, Skript Kapitel 3, Hochschule Luzern T & A, Horw, 2008

Salathé, Dominique; Lindegger, Markus, Diplomarbeit im Fachbereich elektrische Energietechnik, Aufgabenstellung, Hochschule Luzern T & A, Horw, 2009

Salathé, Dominique u.a., Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren, Anhang A: Magnetwerkstoff-Technologie, Hochschule Luzern T & A, Horw, 2006

Scherer, Adrian; Wicki, Pirmin, Hocheffizienter IEC 3 kW Permanent-Magnet-Motor, Industrieprojekt, Hochschule Luzern T & A, Horw, 2008

Topmotors, Effizienzklassen, http://www.topmotors.ch/IEC_Effizienzklassen/, Stand [20.04.2009]

Anhang

A: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung (Schiebewiderstände) bei 12 V

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
1.5	1113	7.96	1.5	10.01	43.73	35.82	81.91
1.5	1113	5.97	3	19.13	83.61	53.73	64.26
1.5	1113	5.09	3.8	23.54	102.90	58.03	56.39
1.5	1113	5	3.9	24.23	105.90	58.50	55.24
1.5	1113	4.9	4	24.92	108.90	58.80	53.99
1.5	1113	4.79	4.1	25.51	111.48	58.92	52.85
1.5	1113	4.55	4.2	26.00	113.62	57.33	50.46
1.5	1113	3.91	4.4	26.98	117.91	51.61	43.77

Tabelle 25: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1113 U/min

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
3	1320	9.41	1.5	9.81	50.85	42.35	83.27
3	1320	8.2	2.5	15.70	81.36	61.50	75.59
3	1320	6.55	4	24.53	127.12	78.60	61.83
3	1320	6.32	4.2	26.00	134.75	79.63	59.10
3	1320	6.14	4.3	26.49	137.29	79.21	57.69
3	1320	5.94	4.4	27.47	142.38	78.41	55.07
3	1320	5.47	4.5	27.47	142.38	73.85	51.86

Tabelle 26: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1320 U/min

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
4	1455	10.5	1.5	9.61	54.93	47.25	86.02
4	1455	9.43	2.5	15.70	89.68	70.73	78.86
4	1455	7.4	4	24.33	139.01	88.80	63.88
4	1455	7.1	4.3	26.09	149.09	91.59	61.43
4	1455	7	4.4	26.68	152.46	92.40	60.61
4	1455	6.93	4.5	27.27	155.82	93.56	60.04
4	1455	6.83	4.6	27.86	159.18	94.25	59.21
4	1455	6.74	4.7	28.45	162.55	95.03	58.47
4	1455	6.53	4.8	28.94	165.35	94.03	56.87
4	1455	6.16	5	30.41	173.76	92.40	53.18
4	1455	5.45	5.2	30.90	176.56	85.02	48.15

Tabelle 27: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1455 U/min

B: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung (Schiebewiderstände) bei 24 V

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
1.5	2005	15.73	1.5	10.30	81.10	70.79	87.28
1.5	2005	12.57	4	25.51	200.82	150.84	75.11
1.5	2005	10.93	5	30.02	236.35	163.95	69.37
1.5	2005	10.41	5.3	31.98	251.80	165.52	65.74
1.5	2005	9.96	5.5	33.35	262.61	164.34	62.58
1.5	2005	8.85	6	35.81	281.92	159.30	56.51

Tabelle 28: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2005 U/min

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
3	2300	17.9	1.5	10.10	91.26	80.55	88.26
3	2300	17.12	2	13.24	119.61	102.72	85.88
3	2300	16	3	19.62	177.20	144.00	81.26
3	2300	14.76	4	25.51	230.37	177.12	76.89
3	2300	13.48	5	30.90	279.10	202.20	72.45
3	2300	12.86	5.3	32.18	290.61	204.47	70.36
3	2300	12.43	5.5	33.35	301.25	205.10	68.08
3	2300	11.84	5.7	34.04	307.45	202.46	65.85
3	2300	10.83	6	35.32	318.97	194.94	61.12

Tabelle 29: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2300 U/min

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
4	2477	19.78	1.5	10.30	100.19	89.01	88.84
4	2477	17.43	3	19.42	188.93	156.87	83.03
4	2477	16.04	4	25.02	243.32	192.48	79.10
4	2477	15.15	4.5	27.47	267.18	204.53	76.55
4	2477	14.48	5	30.21	293.90	217.20	73.90
4	2477	13.69	5.5	33.06	321.57	225.89	70.24
4	2477	13.49	5.7	34.34	333.97	230.68	69.07
4	2477	13.43	5.8	34.83	338.74	233.68	68.99
4	2477	12.7	6	35.32	343.51	228.60	66.55

Tabelle 30: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2477 U/min

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
5	2650	20.48	1.5	10.01	104.13	92.16	88.51
5	2650	17.3	4	25.31	263.38	207.60	78.82
5	2650	15.64	5	30.41	316.46	234.60	74.13
5	2650	14.4	5.8	34.34	357.30	250.56	70.13
5	2650	14.1	6	35.32	367.51	253.80	69.06
5	2650	13.6	6.2	35.90	373.63	252.96	67.70
5	2650	12.62	6.5	37.77	393.03	246.09	62.61

Tabelle 31: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2650 U/min

$I_{L\text{ eff}}$ [A]	n [U/min]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	F [N]	$P_{\text{auf Gen}}$ [W]	$P_{\text{ab Gen}}$ [W]	η_{Gen} [%]
6	2820	22.4	1.5	10.30	114.07	100.80	88.37
6	2820	18.56	4	25.51	282.45	222.72	78.85
6	2820	15.1	6	34.83	385.65	271.80	70.48
6	2820	14.53	6.5	37.28	412.81	283.34	68.64

Tabelle 32: Messdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2820 U/min

C: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung bei 12 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	1113	180	0.997	0.39	7.72	1.5	45.45	34.64	2.64	72.02
1.5	1113	180	0.997	0.64	6.03	2.5	74.59	45.09	2.72	58.32
1.5	1113	180	0.978	0.742	5.43	2.9	86.48	46.20	2.72	51.80
1.5	1113	180	0.976	0.779	5.43	3	90.79	47.70	2.68	51.03
1.5	1113	180	0.972	0.794	5.13	3.1	92.54	46.37	2.76	48.66
1.5	1113	180	0.969	0.832	5.14	3.2	96.97	47.81	2.68	47.98
1.5	1113	180	0.965	0.858	4.99	3.3	100.00	47.67	2.68	46.43
1.5	1113	180	0.955	0.91	4.71	3.5	106.06	47.23	2.68	43.43
1.5	1113	190	0.998	0.975	3.9	3.8	113.64	44.37	2.72	38.13
1.5	1113	190	0.999	1.03	3.58	4	120.05	42.92	2.72	34.96
1.5	1113	190	1	1.16	2.78	4.5	135.20	37.53	2.76	27.20
1.5	1113	192	0.998	1.28	1.93	5	149.18	28.89	2.76	19.02
1.5	1113	194	0.966	1.52	0.27	6	177.16	4.69	2.84	2.61

Tabelle 33: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1113 U/min

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
3	1320	180	0.997	0.384	9.42	1.5	53.08	42.26	3.44	74.78
3	1320	180	0.989	0.64	7.89	2.5	88.46	58.52	3.44	63.68
3	1320	180	0.981	0.768	7.14	3	106.16	63.04	3.44	57.52
3	1320	180	0.967	0.896	6.41	3.5	123.85	65.08	3.48	51.11
3	1320	180	0.964	0.922	6.27	3.6	127.44	65.28	3.48	49.86
3	1320	180	0.96	0.947	6.13	3.7	130.90	65.32	3.48	48.61
3	1320	180	0.955	0.973	5.99	3.8	134.49	65.21	3.48	47.26
3	1320	190	0.999	1.03	5.43	4	142.37	65.09	3.48	44.63
3	1320	190	1	1.16	4.63	4.5	160.34	62.51	3.48	38.15
3	1320	190	0.997	1.28	3.85	5	176.93	57.58	3.48	31.91
3	1320	194	0.999	1.52	2.1	6	210.10	37.76	3.56	17.67

Tabelle 34: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1320 U/min

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
4	1455	180	0.997	0.384	10.63	1.5	58.51	47.69	3.92	76.40
4	1455	180	0.99	0.64	9.1	2.5	97.51	67.57	3.92	66.61
4	1455	180	0.983	0.768	8.35	3	117.01	73.87	3.96	61.06
4	1455	180	0.972	0.896	7.62	3.5	136.52	77.77	3.96	55.36
4	1455	180	0.959	0.999	7.06	3.9	152.21	79.22	3.96	50.72
4	1455	180	0.955	1.02	6.92	4	155.41	79.30	3.96	49.76
4	1455	190	1	1.05	6.48	4.1	159.98	79.70	3.96	48.62
4	1455	190	1	1.08	6.32	4.2	164.55	79.63	3.96	47.26
4	1455	190	1	1.16	5.85	4.5	176.74	78.98	3.96	43.70
4	1455	190	0.998	1.28	5.06	5	195.02	75.75	4.04	38.05
4	1455	194	1	1.52	3.29	6	231.59	59.22	4.08	25.13

Tabelle 35: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 12 V bei 1455 U/min

D: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung bei 24 V

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
1.5	2005	180	0.998	0.39	15.83	1.5	81.88	71.09	6.12	80.78
1.5	2005	180	0.987	0.78	13.56	3	163.77	120.45	6.24	70.85
1.5	2005	180	0.972	1.04	12.13	4	218.36	141.48	6.32	62.97
1.5	2005	190	0.999	1.28	9.99	5	268.74	149.70	6.4	54.41
1.5	2005	190	0.996	1.44	9.07	5.6	302.34	151.77	6.44	49.15
1.5	2005	190	0.995	1.47	8.92	5.7	308.64	151.77	6.48	48.16
1.5	2005	190	0.994	1.49	8.77	5.8	312.84	151.68	6.52	47.50
1.5	2005	190	0.992	1.52	8.62	5.9	319.13	151.35	6.52	46.48
1.5	2005	192	0.998	1.53	8.31	6	321.23	149.28	6.52	45.55
1.5	2005	192	0.998	1.56	8.15	6.1	327.53	148.85	6.52	44.56
1.5	2005	195	0.999	1.77	6.52	7	371.62	136.78	6.64	36.16
1.5	2005	198	1	2	4.69	8	419.91	112.56	6.8	26.38
1.5	2005	200	0.999	2.23	2.93	9	468.20	79.03	6.92	16.63
1.5	2005	203	0.998	2.43	1.03	10	510.20	30.84	7.12	5.96

Tabelle 36: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2005 U/min

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
3	2300	180	0.998	0.39	18.51	1.5	93.93	83.13	7.6	81.88
3	2300	180	0.988	0.78	16.26	3	187.86	144.58	7.72	73.93
3	2300	180	0.975	1.04	14.84	4	250.48	173.63	7.8	67.22
3	2300	190	0.999	1.28	12.64	5	308.29	189.41	7.88	59.91
3	2300	192	0.999	1.53	10.94	6	368.50	196.72	8	52.25
3	2300	192	0.996	1.64	10.33	6.4	394.99	197.54	8.08	49.01
3	2300	192	0.995	1.66	10.18	6.5	399.81	197.52	8.08	48.42
3	2300	192	0.994	1.69	10.03	6.6	407.03	197.40	8.08	47.55
3	2300	195	0.999	1.77	9.12	7	426.30	191.33	8.16	44.04
3	2300	198	1	2	7.26	8	481.70	174.24	8.32	35.56
3	2300	200	1	2.23	5.48	9	537.09	147.96	8.56	27.12
3	2300	203	1	2.43	3.54	10	585.26	106.20	8.8	17.88

Tabelle 37: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2300 U/min

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
4	2477	180	0.998	0.39	20.12	1.5	101.16	90.36	8.48	82.41
4	2477	180	0.989	0.78	17.87	3	202.32	159.06	8.6	75.41
4	2477	180	0.977	1.04	16.46	4	269.76	192.98	8.72	69.30
4	2477	180	0.956	1.3	15.14	5	337.20	217.11	8.84	62.74
4	2477	192	0.999	1.53	12.52	6	396.86	225.13	9	55.47
4	2477	192	0.995	1.69	11.61	6.6	438.36	228.73	9.08	51.12
4	2477	192	0.992	1.77	11.17	6.9	459.11	229.37	9.16	48.98
4	2477	195	0.999	1.77	10.69	7	459.11	224.27	9.16	47.89
4	2477	195	0.999	1.8	10.53	7.1	466.89	224.06	9.16	47.07
4	2477	198	1	2	8.81	8	518.77	211.44	9.36	40.04
4	2477	200	1	2.23	7.01	9	578.42	189.27	9.6	32.19
4	2477	203	1	2.43	5.04	10	630.30	151.20	9.8	23.62

Tabelle 38: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2477 U/min

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
5	2650	180	0.998	0.39	21.69	1.5	108.22	97.41	9.48	82.76
5	2650	180	0.989	0.78	19.45	3	216.45	173.12	9.6	76.59
5	2650	180	0.978	1.04	18.05	4	288.60	211.83	9.68	71.02
5	2650	180	0.959	1.3	16.73	5	360.75	240.66	9.8	64.95
5	2650	192	0.999	1.53	14.06	6	424.57	252.83	9.96	58.18
5	2650	195	1	1.77	12.21	7	491.17	256.41	10.16	51.15
5	2650	195	0.997	1.9	11.45	7.5	527.25	256.85	10.32	47.78
5	2650	195	0.997	1.92	11.3	7.6	532.80	256.87	10.32	47.29
5	2650	195	0.996	1.95	11.15	7.7	541.12	256.53	10.36	46.52
5	2650	198	1	2	10.32	8	555.00	247.68	10.4	43.81
5	2650	200	1	2.23	8.5	9	618.82	229.50	10.68	36.46
5	2650	203	1	2.43	6.51	10	674.32	195.30	10.88	28.50

Tabelle 39: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2650 U/min

I_{L_eff} [A]	n [U/min]	Winkel θ [°]	$\cos \varphi$	M [Nm]	U_{eff} [V]	I_{eff} [A]	P_{auf_Gen} [W]	P_{ab_Gen} [W]	P_{V_Eisen} [W]	η_{Gen} [%]
6	2820	180	0.998	0.39	23.23	1.5	115.17	104.33	10.4	83.08
6	2820	180	0.99	0.78	21	3	230.33	187.11	10.56	77.67
6	2820	180	0.979	1.04	19.6	4	307.11	230.26	10.68	72.46
6	2820	180	0.961	1.3	18.29	5	383.89	263.65	10.84	66.79
6	2820	192	0.999	1.53	15.58	6	451.81	280.16	10.96	60.54
6	2820	195	1	1.77	13.72	7	522.68	288.12	11.24	53.96
6	2820	195	0.995	2	12.36	7.9	590.60	291.47	11.44	48.41
6	2820	198	1	2	11.8	8	590.60	283.20	11.48	47.04
6	2820	198	1	2.02	11.64	8.1	596.51	282.85	11.48	46.52
6	2820	198	1	2.05	11.49	8.2	605.37	282.65	11.56	45.82
6	2820	200	1	2.23	9.97	9	658.52	269.19	11.76	40.16
6	2820	203	1	2.43	7.96	10	717.58	238.80	12.08	32.73

Tabelle 40: Simulationsdaten der elektronischen Ladeschaltung 24 V bei 2820 U/min

E: Weitere Dokumente

Der restliche Anhang zu diesem Dokument ist auf der beigelegten CD enthalten.