



Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre

Masterarbeit

Entwicklung eines Prüfstandes für
Feststoffturbinen zur generatorischen
Energierückgewinnung und
Inbetriebnahme eines Förderkreislaufes zur
Implementierung des Prüfstandes

Manuel Seidl, BSc

Juni 2019



EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 03.06.2019

A handwritten signature in blue ink that reads 'Manuel Seidl'.

Unterschrift Verfasser/in
Manuel, Seidl
Matrikelnummer: 00935089

Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Dr. Michael Prenner, der mich als Betreuer bei dieser Arbeit stets mit Wohlwollen unterstützt hat.

Ein großer Dank gebührt meiner Familie besonders meiner Schwester sowie meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Freundin, welche mich das ganze Studium hindurch unterstützt und mir in schweren Zeiten Mut zugesprochen hat, bedanken.

Danke auch an meinen Studienkollegen Josef, der mein Leidensgefährte während des Studiums war und oft für Aufheiterung und unterhaltsame Freizeit sorgte.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen, welche stets ein offenes Ohr für diverse Fragen hatten und mich immer unterstützt haben.

GLÜCK AUF!

Kurzfassung

Weltweit werden sehr große Mengen an unterschiedlichsten Schüttgut durch stetige Fördersysteme bewegt. Dabei wird das Schüttgut an der Aufgabestelle auf eine vorgegebene Geschwindigkeit beschleunigt und oft auch das Höhenniveau bis zur Abgabestelle des Fördergutes erhöht. Dies führt zu einem Anstieg der potentiellen und kinetischen Energie des geförderten Schüttgutes. Bei der Abgabe bzw. dem Abwurf des Materials bleiben diese Energien ungenutzt und gehen für eine weitere Verwendung verloren. Um einen Teil dieser Energie zu nutzen, wurde von Herrn Dr. Prenner eine sogenannte Feststoffturbine entwickelt, welche durch das abzugebende Fördergut angetrieben wird. Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die Inbetriebnahme eines Förderkreislaufes, bestehend aus Gurtförderanlagen, um in diesen eine Feststoffturbine zu implementieren, damit das Verhalten dieser Turbine in Kombination mit einer elektrischen Energierückgewinnung untersucht werden kann. Dazu soll die an der Turbinenwelle mechanisch abgreifbare Leistung durch ein geeignetes System in elektrische Energie umgewandelt werden. Um die Turbine in den Förderkreislauf zu integrieren, wird ein Turbinenprüfstand entwickelt, konstruiert und gebaut. Des Weiteren werden für die Steuerung und den Betrieb der Förderanlage die Grundlagen von elektrischen Anlagen und deren Steuerungsmöglichkeiten erörtert. Für die Umwandlung der mechanischen Energie der Turbine in elektrische Energie wird auf diverse Generatoren sowie deren Steuerung eingegangen. Anschließend werden die Möglichkeiten der elektrischen Leistungsmessung beschrieben. In weiterer Folge wird für den Betrieb der Anlage ein Steuerungskonzept entworfen. Um die nötigen Daten für die Auslegung und Konstruktion des Turbinenprüfstandes zu erhalten, werden Diskrete-Elemente-Simulationen durchgeführt. Anhand der daraus gewonnenen Daten wird ein Turbinenprüfstand entwickelt. Der Förderkreislauf sowie der Turbinenprüfstand werden im Anschluss daran in Betrieb genommen und erste Versuche durchgeführt. Zum Abschluss werden die durchgeführten Versuche der Simulation gegenübergestellt und die Ergebnisse verglichen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, anhand der Versuchsergebnisse eine Abschätzung über den möglichen Wirkungsgrad der Turbine bei generatorischer Energieumwandlung zu treffen.

Abstract

Very large quantities of the most varied bulk material are moved by continuous conveying systems worldwide. At the feeding point the bulk material is accelerated to a specified speed and often the height level up to the discharge point of the conveyed material is also increased. This leads to an increase in the potential and kinetic energy of the conveyed bulk material. When the material is discharged, these energies remain unused and are lost for further use. In order to use part of this energy, Dr. Prenner developed a so-called solid state material driven turbine, which is driven by the bulk material to be conveyed. The present master's thesis deals with the commissioning of a conveyor circuit consisting of belt conveyors in order to implement a solid state material driven turbine at a transfer point between two conveyers, so that the behaviour of this turbine in combination with electrical energy recovery can be investigated. In addition, the power that can be tapped mechanically at the turbine shaft should be converted into electrical energy by a suitable energy conversion system. In order to integrate the turbine into the conveying circuit, a turbine test stand will be designed and built. In addition, the fundamentals of electrical systems and their control options for the operation and control of the conveyor system are discussed. For the energy conversion of the mechanical energy of the turbine into electrical energy, various generators and their control are discussed. Subsequently, the possibilities of electrical power measurement are described. Afterwards, a control concept for the operation of the plant will be developed. In order to obtain data for the design and construction of the turbine test stand, discrete element simulations are carried out. A turbine test stand on the basis of the resulting data is developed. The conveyor system and the turbine test stand are then put into operation and the first tests are carried out. The aim of this master's thesis is to estimate the possible efficiency of the turbine in combination with regenerative energy conversion on the basis of the test results.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Anwendungsmöglichkeiten von Feststoffturbinen	4
2.2 Elektromotoren und Generatoren	10
2.2.1 Grundlagen Drehstrommaschinen.....	10
2.2.2 Asynchronmaschine	13
2.2.3 Synchronmaschine.....	16
2.2.4 Gleichstrommaschine.....	21
2.2.5 Asynchrongenerator	26
2.2.6 Synchrongenerator.....	29
2.2.7 Gleichstromgenerator.....	32
2.3 Steuerung von Elektromotoren.....	36
2.3.1 Drehzahlsteuerung von Asynchronmaschinen	36
2.3.2 Drehzahlsteuerung von Asynchron- und Synchronmaschinen.....	41
2.3.3 Drehzahlsteuerung von Gleichstrommaschinen	44
2.3.4 Frequenzumrichter	48
2.4 Elektrische Leistungsmessung.....	49
2.4.1 Allgemeine Leistungsmessung.....	49
2.4.2 Leistungsmessung bei Wechselstrom	51
2.4.3 Leistungsmessung in Drehstromsystemen.....	53
2.5 Sicherheitseinrichtungen bei Gurtförderanlagen	57
2.5.1 Anlagensicherheit.....	57
2.5.2 Personensicherheit.....	60
3 Voraussetzungen und Bestand	61
3.1 Voraussetzungen	61
3.2 Bestand	61
3.2.1 Gurtförderanlagen	61
3.2.2 Feststoffturbine.....	64

4	Anlagensteuerung	65
4.1	Anforderungen an die Steuerung	65
4.2	Steuerungskonzept	65
4.3	Elektrischer Aufbau	67
5	Beschaltung des Generators und Aufbau des Schaltschranks	69
5.1	Elektrische Schaltung.....	71
5.1.1	Leistungsstromkreis	71
5.1.2	Steuerstromkreis	73
6	Prüfstand.....	76
6.1	Anforderungen an den Prüfstand	76
6.2	Diskrete-Elemente-Simulation	77
6.2.1	Simulationsaufbau.....	77
6.2.2	Simulationsergebnisse	80
6.3	Rahmen des Prüfstandes.....	90
6.3.1	Anforderungen an den Rahmen	90
6.3.2	Aufbau des Rahmens.....	90
6.4	Mechanische Komponenten des Prüfstandes	92
6.4.1	Lagerung der Turbine.....	92
6.4.2	Getriebe	93
6.4.3	Getriebemotor	95
6.5	Übergabeschurre.....	96
6.5.1	Anforderungen an die Schurre	96
6.5.2	Aufbau der Schurre	96
7	Versuchsbetrieb	100
7.1	Versuchsaufbau	100
7.2	Versuchsdurchführung	103
7.3	Versuchserkenntnisse	104
8	Gegenüberstellung von Versuch und Simulation	109
9	Ausblick.....	111
9.1	Maßnahmen zur Optimierung des Prüfstandes	111
9.2	Weiterführende Versuche.....	112
	Literaturverzeichnis	113
	Abbildungsverzeichnis.....	114
	Tabellenverzeichnis.....	120
	Formelzeichen.....	121

Anhang Inhaltsverzeichnis.....	I
Anhang 1: Datenblatt Lenze Getriebemotor	II
Anhang 2: Kettentrieberrechnung.....	IV
Anhang 3: Lagerberechnung.....	VIII
Anhang 4: Schaltplan Steuerungskonzept	X
Anhang 5: Schaltplan Generator-Motor Steuerung	XXXII
Anhang 6: Übersichtsplan Turbinenprüfstand	XXXV

1 Einleitung

Stetige Fördermittel werden in vielen Bereichen eingesetzt. Zum einen werden sie beim Abbau von Rohstoffen sowie deren Förderung verwendet. Zum anderen werden sie für den Güterumschlag und zum Transport von Halbzeugen und Fertigprodukten eingesetzt. In den meisten Fällen treten bei der stetigen Förderung, insbesondere bei Schüttgütern, große Massenströme auf. Durch den hohen Massenstrom weist das Fördergut einen hohen Energieinhalt auf. Zusätzlich kommt es bei vielen Anwendungen zu einer Übergabe zwischen Fördersystemen bzw. am Ende der Förderstrecke zum Abwurf des Materials. Überwindet das Fördergut bei dieser Übergabe oder dem Abwurf eine Höhendifferenz, so steigt der Energieinhalt nochmals an. Diese Energie geht für die weitere Nutzung verloren. Hinzu kommt, dass an den Übergabestellen ein Teil dieser Energie in Form von Verschleißenergie auftritt, was zu einem unerwünschten Verschleiß führt.

Um einen Teil der Energie zurückzugewinnen, wurde von Herrn Dr. Prenner eine sogenannte Feststoffturbine entwickelt und gebaut. Mittels einer solchen Turbine wurden bereits Versuche durchgeführt. Dabei wurde die mechanische Leistung an der Turbinenwelle genutzt, um den Antrieb des zubringenden Förderbandes zu unterstützen. Die Übertragung der Leistung erfolgte über einen Kettentrieb, was einige Nachteile mit sich bringt. Zum einen stehen die Turbine und die Antriebsrolle in einem fixen Drehzahlverhältnis zueinander, welches während des Betriebs nicht geändert werden kann. Zum anderen führt diese Art der Drehmomentübertragung zu einem erhöhten Platzbedarf und darüber hinaus wird der Achsabstand durch das verwendete Zugtriebmittel begrenzt.

In dieser Arbeit soll eine Lösung entwickelt werden, bei welcher die mechanische Leistung in Form von elektrischer Leistung abgenommen werden kann. Dazu soll Schüttgut mit unterschiedlichen Massenströmen kontinuierlich durch einen Förderkreislauf, bestehend aus vier einzelnen Gurtförderern, im Kreis transportiert werden. Dafür ist eine Steuerung für die Antriebe der einzelnen bereits bestehenden Gurtförderer zu entwickeln. In diesem Kreislauf soll anschließend eine Feststoffturbine in Kombination mit einem Generator integriert werden, um das generatorische Energierückgewinnungsverhalten zu untersuchen. Dafür muss eine Konstruktion entwickelt werden, welche in der Lage ist, die Turbine sowie den Generator aufzunehmen und in den Förderkreislauf einzubinden. Die generierbare Leistung soll gemessen und eine Abschätzung des Wirkungsgrades getroffen werden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen, welche für die Erstellung der Arbeit erforderlich sind, erörtert. Zu Beginn wird auf die Anwendungsmöglichkeiten von Feststoffturbinen eingegangen, da dies für die Erstellung eines Konzeptes für einen Turbinenprüfstand von Nöten ist. Für die Erstellung eines Steuerungskonzeptes werden die Merkmale und Eigenschaften von elektrischen Antriebsmaschinen beschrieben. Da eine Energieumwandlung von mechanischer in elektrische Energie mittels Generatoren notwendig ist, wird die Funktionsweise von Generatoren erläutert. Um ein Verständnis für die Steuerung von Motoren und Generatoren zu bekommen, wird auf die Steuerung dieser elektrischen Maschinen eingegangen. Zusätzlich wird die Funktionsweise von Frequenzumrichtern beschrieben. Anschließend werden diverse Varianten der Leistungsmessung verdeutlicht, da die vom Generator abgegebene Leistung gemessen werden soll. Als Letztes werden die nötigen Sicherheitseinrichtungen für den Betrieb von Gurtförderanlagen aufgezählt.

2.1 Anwendungsmöglichkeiten von Feststoffturbinen

Feststoffturbinen werden verwendet, um einen Teil der Energie des Fördergutes bei der Auf- und Abgabe bzw. der Übergabe an weitere Fördereinheiten zurück zu gewinnen. Bei der Förderung von Gütern beinhalten diese aufgrund ihrer Masse und ihrer Geschwindigkeit eine gewisse kinetische Energie. Hinzu kommt ein potentieller Anteil, welcher an Ab- und Übergabestellen aufgrund von Höhendifferenzen generiert wird. (Prenner 2015) (Prenner, Grübler und Zeiler 2018) (Prenner 2019)

Feststoffturbinen können in Kombination mit vielen stetigen Fördersystemen eingesetzt werden. Dabei kann es sich sowohl um Schüttgüter als auch Stückgüter handeln. Mögliche Fördersysteme können Gurtförderanlagen, Becherwerke, Kratzerförderer, Schneckenförderer, Schwingrinnen oder pneumatische Förderer sein. Wobei Gurtförderanlagen als am besten geeignet angesehen werden. Die Vorteile der Turbine ergeben sich zum einen an den hohen Massenströmen und zum anderen aus den hohen Fördergeschwindigkeiten. (Prenner 2015) (Prenner, Grübler und Zeiler 2018) (Prenner 2019)

Die Anströmung der Turbine kann unterschlächtig, mittelschlächtig oder obereschlächtig erfolgen. Der Vorteil bei der unterschlächtigen Anströmung liegt in der platzsparenden Anordnung der Turbine, der Nachteil darin, dass nur die kinetische Energie des Fördergutes genutzt werden kann. Eine Durchströmturbine hätte den Vorteil, dass es zu keinem frühzeitigen Austreten des Fördergutes kommt und somit das gesamte Fördergut an der gewünschten Position austritt. Bei dieser Variante kommt es zu einer erheblichen Umlenkung des Förderstromes, was in weiterer Folge zu erhöhtem Verschleiß führt. Wird die Turbine obereschlächtig angeströmt, kann sowohl die kinetische als auch die potentielle Energie des Fördergutes genutzt werden. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass die Drehzahl der Turbine aufgrund der Zentrifugalkraft, welche auf das Fördergut wirkt, begrenzt ist. Übersteigt die Drehzahl einen kritischen Wert, so kommt es zum frühzeitigen Austritt des Fördergutes, wodurch die Abgabe des Fördergutes nicht mehr an der gewünschten Stelle erfolgt und nicht der gesamte Energieinhalt genutzt werden kann. Hinzu kommt, dass es leichter zum Anbacken von Material kommt, wodurch die resultierende Energie reduziert wird. Ein weiterer Nachteil ist der größere Abstand zwischen Turbinenachse und Abwurfpunkt. Dieser Abstand resultiert aus

der Wurfparabel und führt zu einem größeren Bauraum bzw. zu einer separaten Anordnung der Turbine. In Abbildung 1 bis Abbildung 4 sind die vier Anströmungsvarianten dargestellt. (Prenner 2015) (Prenner, Grüber und Zeiler 2018) (Prenner 2019)

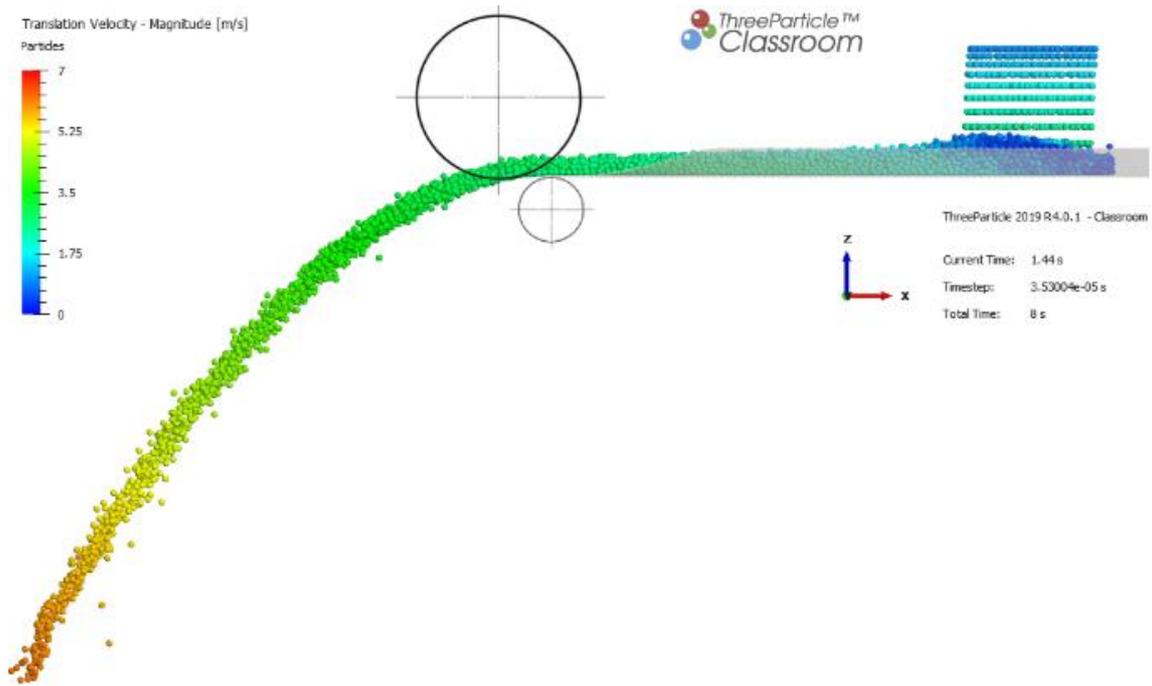


Abbildung 1: Unterschlächtige Anströmung



Abbildung 2: Oberschlächtige Anströmung

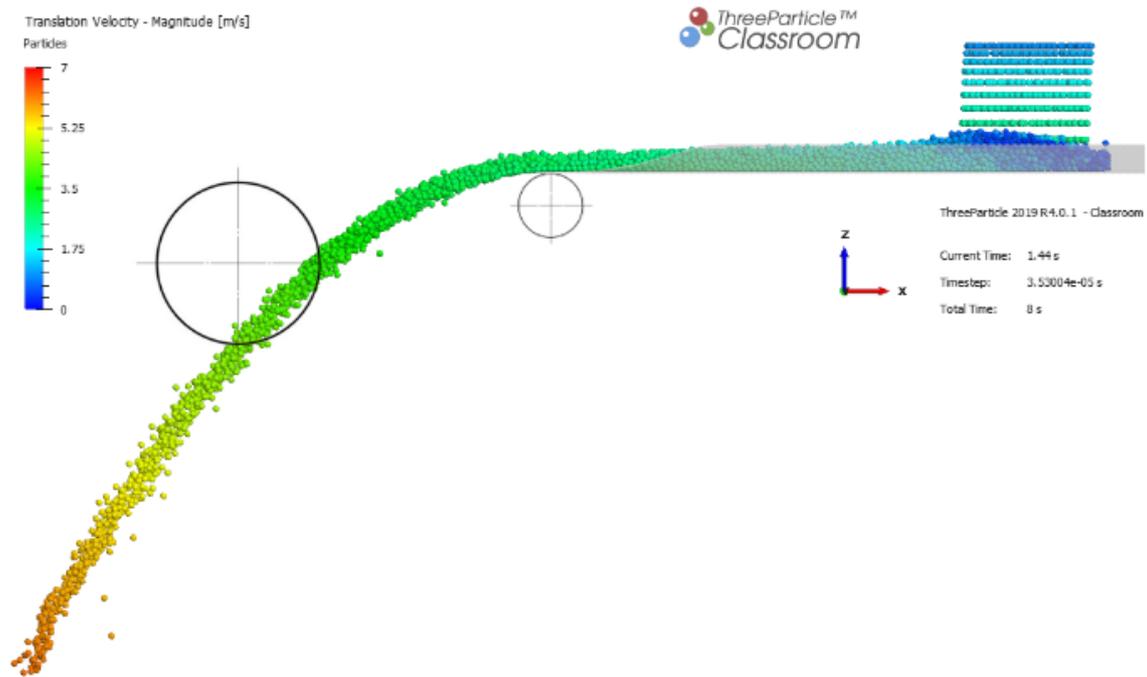


Abbildung 3: Mittelschlächtige Anströmung

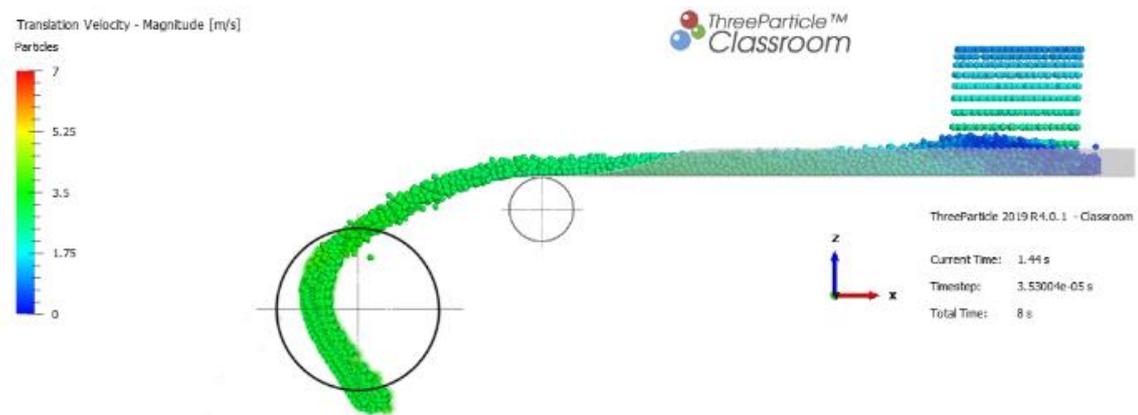


Abbildung 4: Durchströmturbine

Bei den soeben beschriebenen Varianten befindet sich die Drehachse der Turbine in horizontaler Lage. Würde man ein Stoßrad, ein horizontales Löffelrad bzw. ein Zuppinger Tangentialrad verwenden, könnte die Drehachse vertikal angeordnet werden. Das Stoßrad könnte entlang der Wurfparabel angeordnet werden, siehe Abbildung 5, wobei der optimale Fall jener wäre, bei welchem die Schaufeln in einem Winkel von 90° angeströmt werden. Dieser Fall liegt nur am Abwurfpunkt vor, was bei einer solchen Position wieder den Nachteil hätte, dass nur die kinetische Energie des Fördergutes zur Verfügung stünde. Wird das Stoßrad entlang der Wurfparabel verschoben, kann zwar ein Teil der potentiellen Energie verwertet werden, jedoch würde der Wirkungsgrad der Turbine sinken. Um die volle Energie nutzen zu können, müsste die Drehachse der Turbine normal zur Tangente an die Parabel im Anströmpunkt liegen. Ähnliches gilt für das Löffelrad und das Zuppinger Tangentialrad. (Prenner 2015) (Prenner, Grübler und Zeiler 2018) (Prenner 2019)

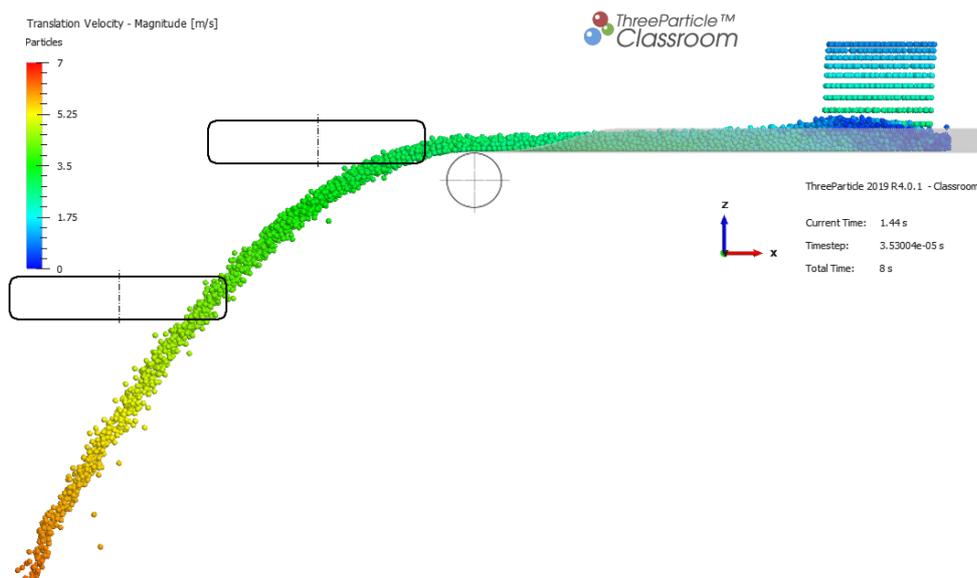


Abbildung 5: Stoßrad mit vertikaler Drehachse

Weiters kann die Turbinenachse auch schief im Raum liegen, wie in Abbildung 6 dargestellt. Dadurch könnte der Anströmwinkel auf die Schaufel optimiert werden, wodurch der Wirkungsgrad verbessert werden würde. Zusätzlich würde der Vorteil bestehen, dass bei Übergabe an eine weitere Fördereinrichtung das Fördergut bereits eine Geschwindigkeitskomponente in Förderrichtung aufweisen würde und somit das Fördergut nicht mehr so stark beschleunigt werden müsste, wodurch Energie eingespart und der Verschleiß minimiert werden könnte. (Prenner 2015) (Prenner, Grübler und Zeiler 2018) (Prenner 2019)

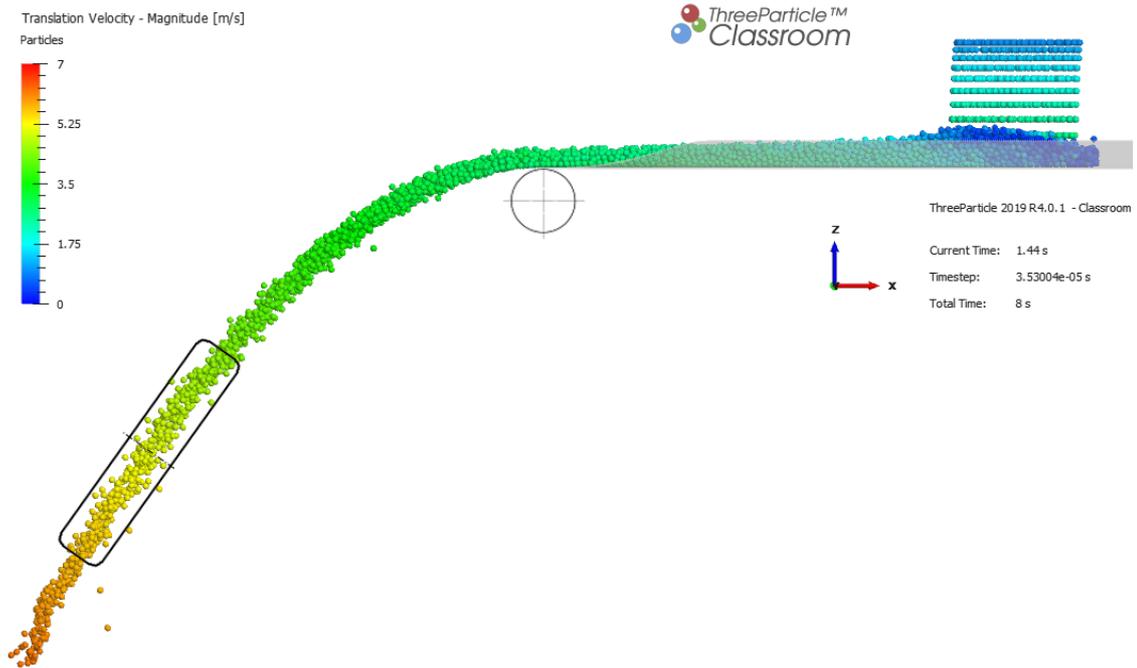


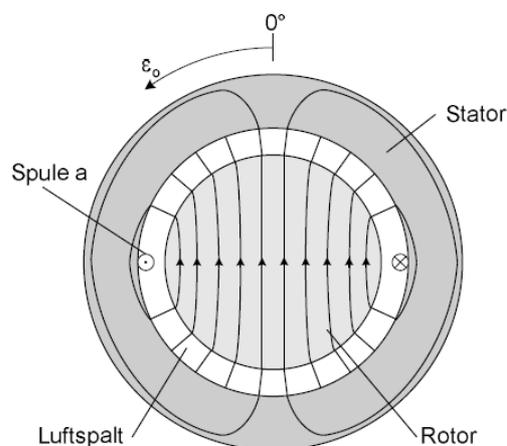
Abbildung 6: Schief im Raum liegende Turbinenachse

2.2 Elektromotoren und Generatoren

2.2.1 Grundlagen Drehstrommaschinen

Die Funktionsweise der Drehstrommaschine beruht auf dem magnetischen Drehfeld. Dieses wird durch Überlagerung von drei zeitlich veränderlichen Magnetfeldern gebildet. Diese drei Magnetfelder werden durch drei Spulen, welche sich am Stator befinden, erzeugt. (Schröder 2017, S. 199 f.)

Die Verteilung eines Magnetfeldes über den Querschnitt eines Motors ist in Abbildung 7 dargestellt. Dieses Magnetfeld wird von einer Spule, welche mit konstantem Strom gespeist wird, erzeugt. Es ist zu erkennen, dass sich aufgrund der Quellenfreiheit des magnetischen Feldes die Feldlinien über den Stator, den Rotor und den Luftspalt erstrecken und in sich geschlossen sind. Aufgrund des deutlich geringeren magnetischen Widerstandes von Rotor und Stator und durch den geringen Luftspalt, ist in diesem das Magnetfeld deutlich stärker. Im Luftspalt verlaufen die Feldlinien radial, da durch die hohe Permeabilität und das Brechungsgesetz die Feldlinien senkrecht aus dem Material austreten. In der Abbildung 7 sind die Wicklungen der Spule auf eine Stelle konzentriert. Werden die Wicklungen jedoch am Umfang verteilt, so erhält man eine annähernd sinusförmige Verteilung der Feldstärke im Luftspalt, siehe Abbildung 8. Diese Aufteilung der Wicklungen führt zu einer Glättung des Drehmomentes. (Schröder 2017, S. 201-211)



**Abbildung 7: Verteilung des Magnetfeldes über den Motorquerschnitt
(Schröder 2017, S. 201)**

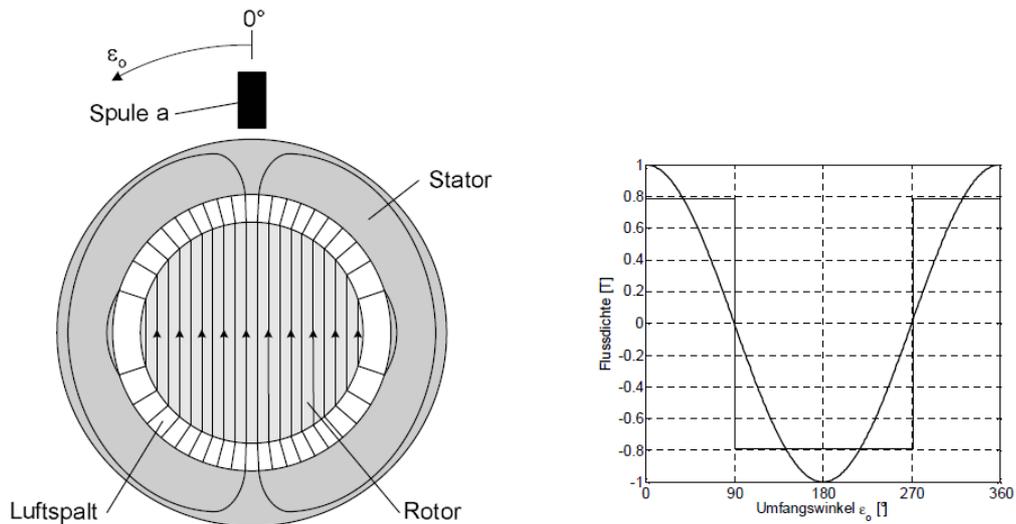


Abbildung 8: Verteilung der magnetischen Flussdichte über den Umfang (Schröder 2017, S. 203)

Wird nun diese Spule durch einen sinusförmigen Strom gespeist, kommt es zu einem zusätzlichen zeitlichen Einfluss der Feldstärke. Dabei stellt Ω die Phasenlage des Stromes dar. Es ist zu erkennen, dass sich lediglich die Amplitude der Feldstärke verändert und sowohl die Frequenz als auch die Nulldurchgänge erhalten bleiben, wie in Abbildung 9 ersichtlich ist. (Schröder 2017, S. 201-211)

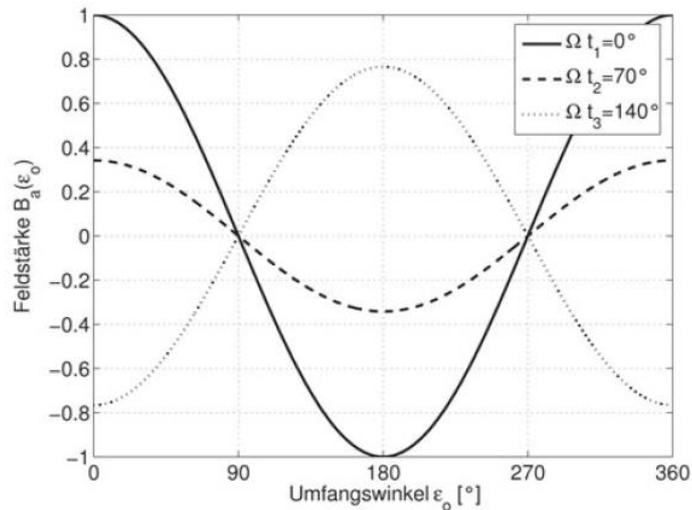


Abbildung 9: Verlauf der Feldstärke entlang des Umfanges (Schröder 2017, S. 206)

Wenn man am Stator, wie in Abbildung 10 abgebildet, drei Spulen räumlich um 120° versetzt anordnet und diese zusätzlich von Strömen durchflossen werden, welche um 120° phasenverschoben sind, so erhält man ein rotierendes Magnetfeld, das sogenannte Drehfeld. Dieses Feld rotiert mit der elektrischen Winkelfrequenz der Statorströme. Die Winkelfrequenz entspricht ohne zusätzliche Vorkehrungen der Frequenz des speisenden Netzes. Die Überlagerung der drei Grundwellen der einzelnen Spulen ergibt eine resultierende Feldverteilung im Luftspalt, wie sie in Abbildung 11 für den Zeitpunkt Ω gleich null dargestellt ist. Dadurch ergibt sich ein Feld mit einer Amplitude, welche dem 1,5-fachen Wert der Amplitude einer Grundschwingung entspricht. (Schröder 2017, S. 201-211)

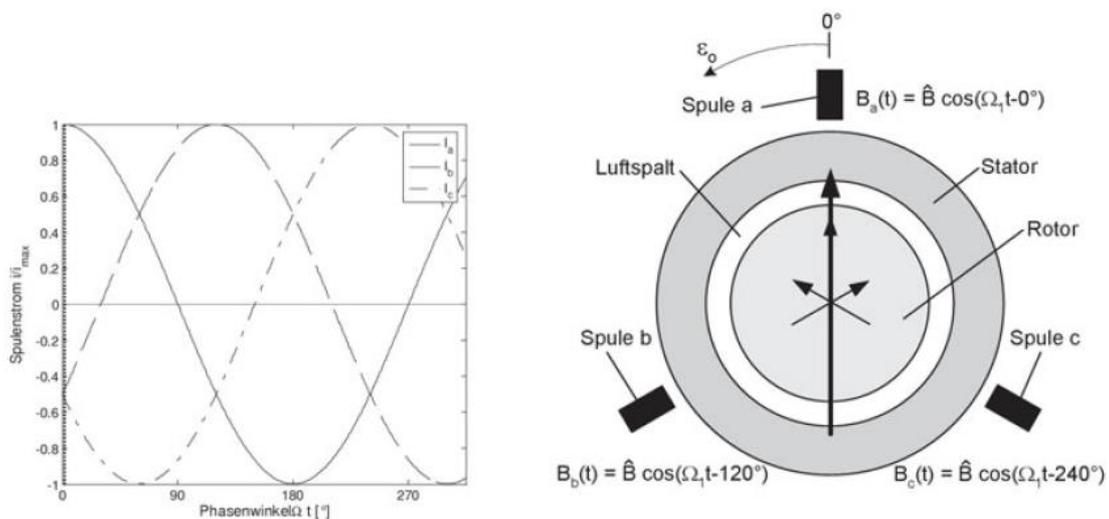


Abbildung 10: Stator mit drei stromdurchflossenen Spulen (Schröder 2017, S. 209)

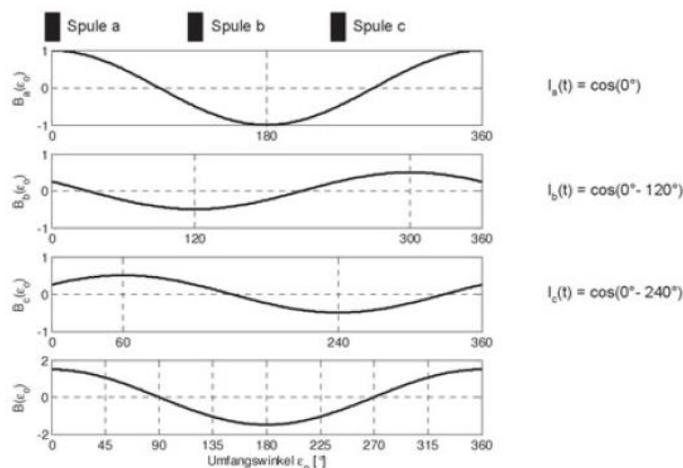


Abbildung 11: Grundwellen und deren Überlagerung zur resultierenden Feldverteilung (Schröder 2017, S. 210)

2.2.2 Asynchronmaschine

Für den Betrieb einer Asynchronmaschine benötigt man ein wie zuvor beschriebenes Drehfeld. Dieses Drehfeld induziert eine Spannung im Rotor, wodurch die Rotorströme ein Drehmoment erzeugen.

Der Rotor von Asynchronmaschinen kann in zwei unterschiedlichen Bauweisen ausgeführt sein. Zum einen gibt es den Kurzschlussläufer und zum anderen den Schleifringläufer. Beim Schleifringläufer sind Drehstromwicklungen in Nuten des Rotors eingelassen. Die Enden dieser Wicklungen werden intern verbunden und die Anfänge werden an Schleifringen geführt, welche über Schleifbürsten mit dem Klemmbrett verbunden sind. Dies dient dazu, während des Hochlaufs durch zusätzliche Widerstände an den Läuferwicklungen den Anlaufstrom zu senken und ein höheres Drehmoment zu erreichen. Nach dem Hochlauf werden die Wicklungen kurzgeschlossen und der Rotor arbeitet wie jener des Kurzschlussläufers. Bei diesem sind Aluminiumstäbe, welche als Leiter dienen, in Nuten am Rotor eingebracht. Diese Aluminiumstäbe sind an ihren Enden über einen Aluminiumring verbunden, wodurch sie kurzgeschlossen sind. Diesen Aufbau der Leiter nennt man Kurzschluss-Käfig, dieser ist in Abbildung 12 abgebildet. Anhand dieses Kurzschlussläufers wird folgend die Entstehung des Drehmomentes beschrieben. (Schröder 2017, S. 211-217) (Bernstein 2012, S. 309 f.)

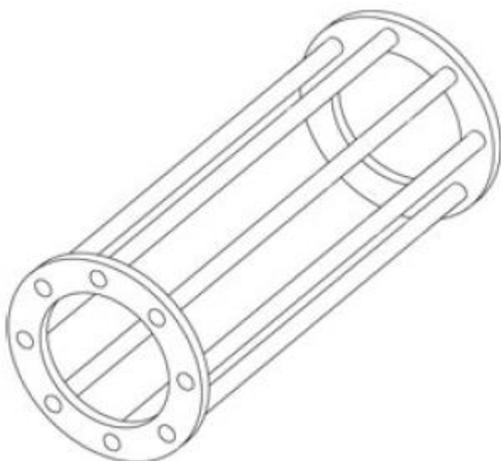


Abbildung 12: Kurzschlusskäfig
(Schröder 2017, S. 212)

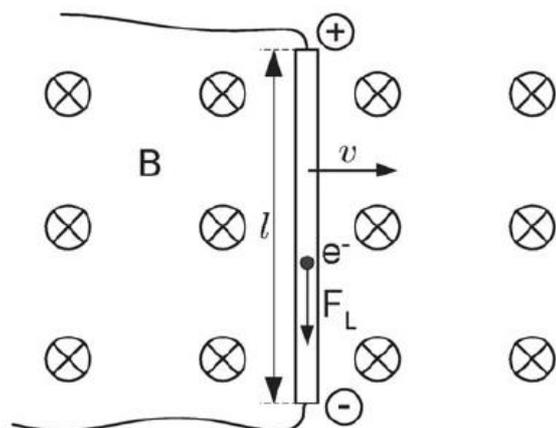


Abbildung 13: Bewegter Leiter im Magnetfeld
(Schröder 2017, S. 212)

Da sich die Leiter des Käfigs sehr nahe am Luftspalt befinden, kann für die Beschreibung angenommen werden, dass sich die Leiter verhalten, als ob sie sich im Luftspalt befinden würden. Nach dem Lorentz-Gesetz wirkt auf die Ladung q eine Kraft F_L , wenn diese mit der Geschwindigkeit v durch ein homogenes Magnetfeld mit der Feldstärke B bewegt wird. Dadurch kommt es zur Ladungstrennung im Leiter, was einer induzierten Spannung entspricht, siehe Abbildung 13. Da die einzelnen Leiter kurzgeschlossen sind, kann ein Strom im Leiter fließen. Die benötigte Geschwindigkeit kann durch die Bewegung des Leiters im Magnetfeld, durch ein bewegtes Magnetfeld um den Leiter oder durch eine Kombination von bewegtem Leiter und Magnetfeld entstehen. Bei Letzterem ergibt sich eine Relativgeschwindigkeit zwischen Magnetfeld und Leiter, welche für die Höhe der induzierten Spannung und somit für die Höhe der Ströme verantwortlich ist. Diese Relativgeschwindigkeit bei der Asynchronmaschine ergibt sich durch die unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten von Drehfeld und Rotor und wird als Schlupf s bezeichnet. Wird ein stromdurchflossener Leiter durch ein Magnetfeld bewegt, wirkt auf diesen eine Kraft. Diese Kraft bildet über den radialen Abstand des Leiters ein Drehmoment. Die Summe der Drehmomente, die auf die einzelnen Leiter wirken, ergeben das gesamte Drehmoment des Elektromotors. Bewegen sich der Rotor und das Drehfeld mit derselben Winkelgeschwindigkeit, das heißt der Schlupf s ist gleich 0, wird kein Drehmoment erzeugt. Damit ein Drehmoment erzeugt werden kann, muss der Rotor sich also mit einer geringeren oder höheren Winkelgeschwindigkeit bewegen als das Drehfeld. In diesem Fall sind die beiden Drehzahlen asynchron, wodurch die Asynchronmaschine ihren Namen erhält. Weiters ergibt sich aus diesem Zusammenhang die charakteristische Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie, wie sie in Abbildung 14 dargestellt ist. Darin ist zu erkennen, dass, wie bereits erwähnt, bei einem Schlupf von $s=0$ kein Drehmoment gebildet wird. Erhöht sich der Schlupf, steigt auch das Drehmoment bis zu einem maximalen Wert, welcher Kippmoment genannt wird. Der Grund für den Abfall des Drehmomentes ab dem Schlupf s_k kann auf den Anstieg des induktiven Widerstandes zurückgeführt werden. Mit steigendem induktivem Widerstand steigt der Phasenwinkel zwischen der induzierten Spannung und dem im Käfig fließenden Strom. Dies hat zur Folge, dass der Strom sein Maximum nicht mehr im Bereich der maximalen magnetischen Feldstärke hat und somit die auf den Leiter wirkenden Lorentzkraft mit steigendem Phasenwinkel abnimmt. Dazu kommt, dass der

induktive Widerstand nicht nur den Phasenwinkel beeinflusst, sondern auch die maximale Stromstärke verringert.

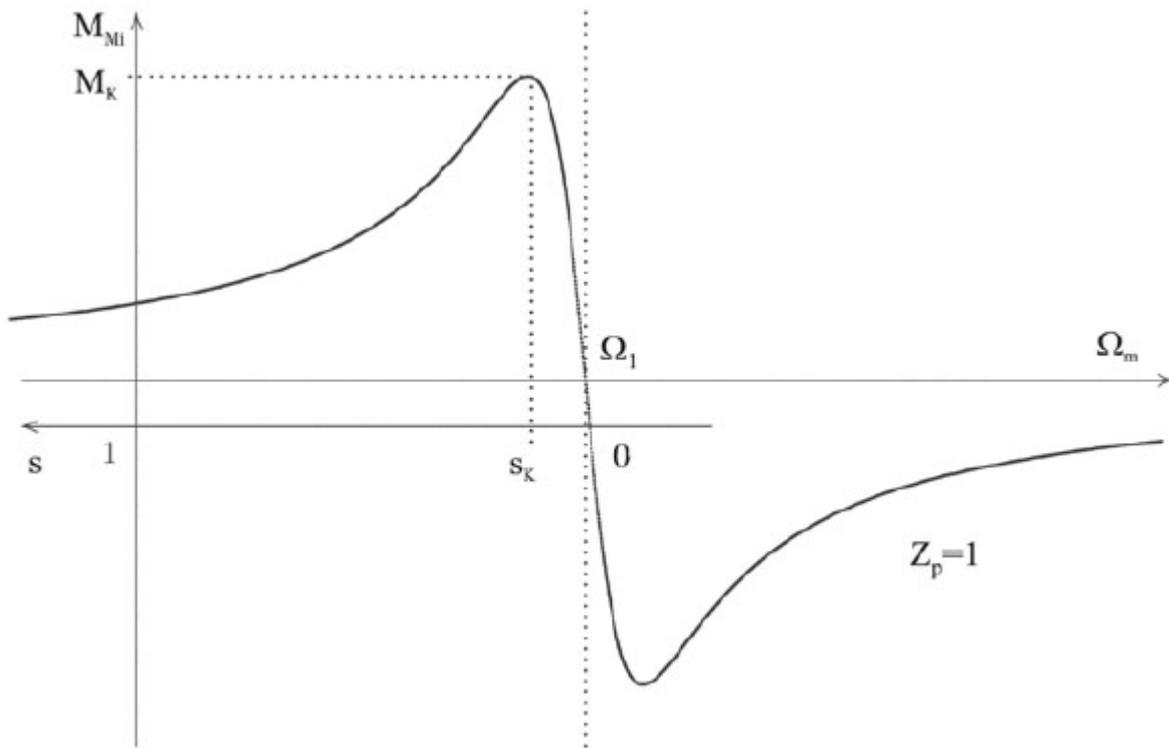


Abbildung 14: Drehmomentencharakteristik Asynchronmaschine (Schröder 2017, S. 219)

Einen weiteren großen Einfluss auf die Drehzahl hat die Polpaarzahl. Diese gibt an, wie viele Spulenpaare am Stator angeordnet sind. Dabei versteht man unter einem Spulenpaar die drei zuvor beschriebenen Wicklungen zur Drehfelderzeugung. Durch die Erhöhung der Polpaarzahl steigt die Anzahl der magnetischen Feldmaxima entlang des Umfangs. Das heißt, bei einer Polpaarzahl von $z_p=4$ befinden sich am Stator 4 mal 3, also 12, Spulen, wodurch 4 Maxima über den Statorumfang verteilt auftreten. Durch diese Erhöhung durchläuft die Cosinusschwingung einer Periode nicht den gesamten Umfang, sondern nur jenen Teil, in welchem die Wicklungen angeordnet sind. Dieser Bereich wird umso kleiner, je größer die Polpaarzahl wird. Dadurch reduziert sich jedoch auch die Rotationsfrequenz des Drehfeldes, was eine Senkung der Drehzahl zufolge hat. Somit führt eine Erhöhung der Polpaarzahl zu einer Steigerung des Drehmomentes und zugleich zu einer Verringerung der Drehzahl. (Schröder 2017, S. 218-222) (Bernstein 2012, S. 310-314)

2.2.3 Synchronmaschine

2.2.3.1 Bauformen von Synchronmaschinen

Der Aufbau des Synchronmotors ist ähnlich einer Asynchronmaschine. Wie auch die Asynchronmaschine benötigt die Synchronmaschine ein Drehfeld. Dieses Drehfeld wird über symmetrisch angeordnete Drehstromwicklungen erzeugt. Zusätzlich verfügt die Synchronmaschine über eine Erregerspule. Die Erregerwicklungen können sich am Stator oder am Rotor befinden. Liegen die Erregerwicklungen am Stator, spricht man von Außenpolmaschinen, wie in Abbildung 15 dargestellt, befindet sie sich jedoch am Rotor, spricht man von einer Innenpolmaschine. (Fischer 2017, S. 341-344)

Zusätzlich kann bei den Innenpolmaschinen zwischen Schenkelpolmaschinen und Vollpolmaschinen unterschieden werden. Bei der Schenkelpolmaschine wird der Rotor als Schenkelpolläufer bezeichnet und ist mit Schenkeln, wie in Abbildung 16 dargestellt, ausgeführt. Darauf befindet sich eine Spule, welche Erregerspule genannt wird. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 17 eine Synchronmaschine in der Ausführung als Vollpolmaschine. Dabei sind im Läufer Nuten eingefräst, welche die Erregerwicklungen aufnehmen. Diese Bauform wird bei Motoren mit hoher Leistung angewandt, da die Fliehkräfte der Schenkelpolläufer bei einer größeren Bauweise zu groß werden würden. (Fischer 2017, S. 341-344)

Anstatt der Erregerspule kann die Erzeugung des magnetischen Feldes des Rotors auch durch Permanentmagnete erfolgen. In diesem Fall spricht man von permanenterregten Synchronmaschinen. (Fischer 2017, S. 341-344)

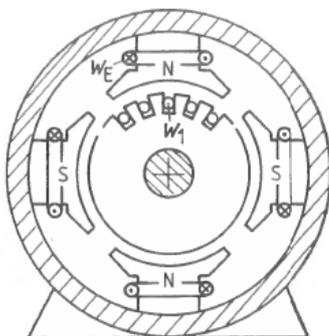


Abbildung 15:
Außenpolmaschine
(Fischer 2017, S. 341)

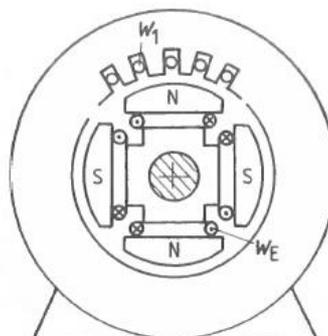


Abbildung 16:
Schenkelpolmaschine
(Fischer 2017, S. 341)

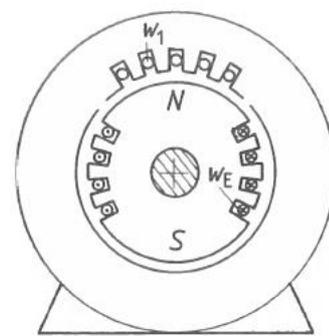


Abbildung 17:
Vollpolmaschine
(Fischer 2017, S. 341)

2.2.3.2 Funktionsweise der Synchronmaschine

Die Funktionsweise des Synchronmotors basiert, wie bei einem Asynchronmotor, auf einem Drehfeld und wird folgend anhand einer Schenkelpolmaschine und der Abbildung 18 erläutert. Das durch die Drehstromspulen entstehende magnetische Feld rotiert mit der Frequenz des Netzes, von welchem aus die Wicklungen gespeist werden. Die Erregerspule hingegen wird mit Gleichstrom gespeist, wodurch die Wicklungen ein magnetisches Gleichfeld hervorrufen. Das von der Erregerwicklung erzeugte Feld bei Schenkelpollläufern ruft im Schenkel des Rotors einen Oberflächenstrom hervor und ist in Abbildung 19 angedeutet. (Schröder 2017, S. 284-288)

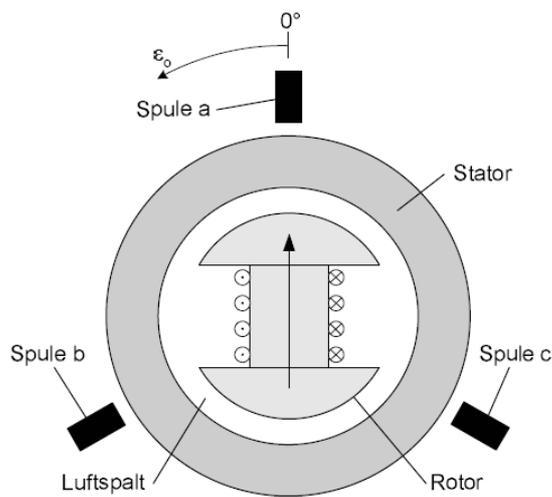


Abbildung 18: Aufbau Schenkelpolmaschine (Schröder 2017, S. 285)

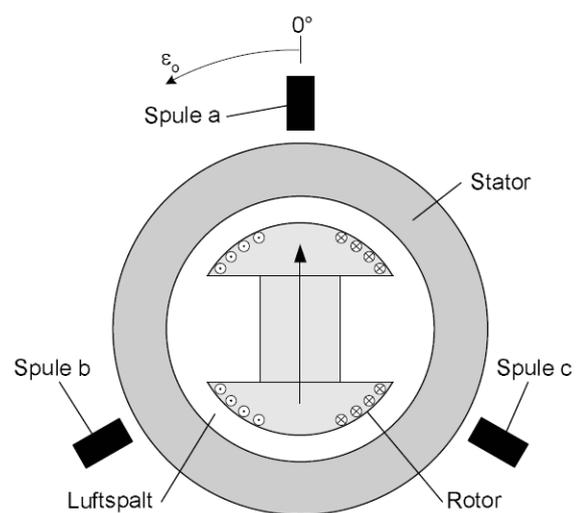


Abbildung 19: Rotor mit Oberflächenstrom (Schröder 2017, S. 386)

Kommt dieser Bereich des Rotors in den Bereich des Drehfeldes, so wirken auf den stromdurchflossenen Teil Lorentzkräfte. Befindet sich der stromdurchflossene Schenkel symmetrisch im Bereich der maximalen Feldstärke des Drehfeldes, heben sich die Kräfte auf. Damit man eine resultierende Kraft ungleich null erhält, müssen die magnetischen Felder von Rotor und Stator einen Phasenwinkel zueinander aufweisen. Dieser Phasenwinkel wird Polradwinkel ϑ genannt. Durch diesen Winkel verschiebt sich ein Teil des Polschenkels in einen Bereich des Drehfeldes mit höherer Feldstärke, wodurch eine unsymmetrische Verteilung der Lorentzkräfte auftritt. Dadurch erhält man eine resultierende Kraft ungleich null, womit sich über den Radius ein Drehmoment ergibt. In Abbildung 20 sind die soeben beschriebenen Fälle mit unterschiedlichen Polradwinkeln dargestellt. Dabei gibt die Größe der Pfeile die Stärke des magnetischen Feldes an. (Schröder 2017, S. 284-288)

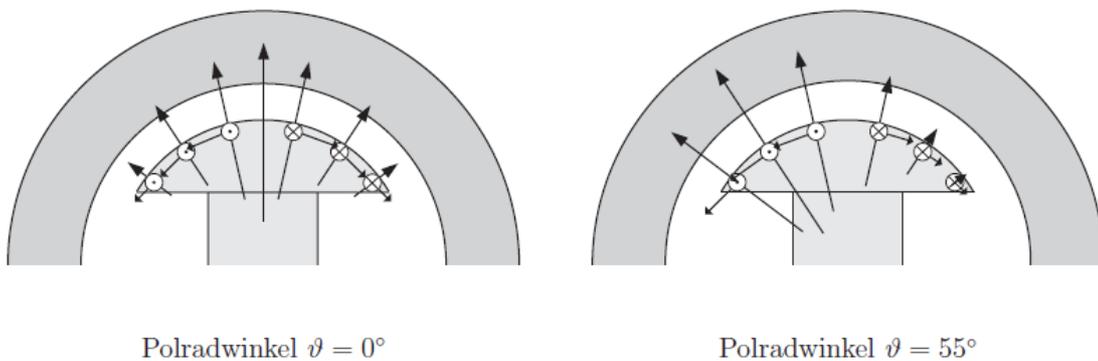


Abbildung 20: Verteilung Lorentzkräfte bei unterschiedlichen Polradwinkel (Schröder 2013, S. 363)

Wenn nun der Polradwinkel auf 90° erhöht wird, befinden sich die entgegengesetzten Ströme im Polschenkel jeweils für einen Teil im positiven und einen Teil im negativen Bereich der sinusförmigen Feldverteilung des Drehfeldes. Somit wirken, wie in Abbildung 21 ersichtlich, alle tangentialen Kräfte gleichsinnig, womit ein maximales Drehmoment erreicht wird. (Schröder 2017, S. 284-288)

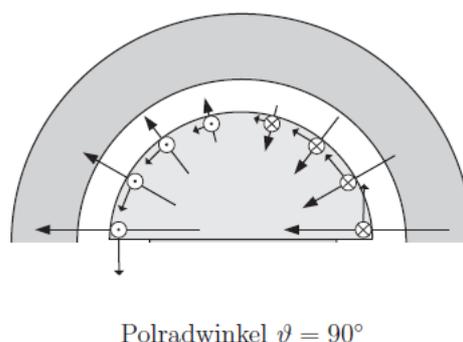


Abbildung 21: Lorentzkräfte bei einem Polradwinkel von 90° (Schröder 2013, S. 363)

2.2.3.3 Betriebsverhalten von Synchronmotoren

Beim Anlauf des Synchronmotors reicht es nicht aus, den Ständer an ein Drehstromnetz anzuschließen und das Polrad mit einem Erregergleichstrom zu erregen, da das umlaufende Drehfeld nicht in der Lage ist, den Läufer zu beschleunigen. Der Läufer muss zuerst auf eine Drehzahl in der Nähe der Synchrondrehzahl beschleunigt werden. Erst ab dieser Drehzahl ist das Drehfeld in der Lage, den Läufer mitzuschleppen. Um den Läufer zu beschleunigen, gibt es folgende Methoden. Bei der gekuppelten Antriebsmaschine ist ein zusätzlicher Anwurfmotor auf der Welle angebracht. Diese Variante macht jedoch nur Sinn, wenn der Motor ohne Last hochgefahren werden kann, da ansonsten die Baugröße des Anwurfmotors zu große Dimensionen annehmen würde. Bei der Variante des asynchronen Hochlaufs wird der Synchronmotor zum Hochlaufen als Asynchronmotor betrieben. Hierfür wird ein zusätzlicher Kurzschlusskäfig auf das Polrad aufgebracht. Eine weitere Möglichkeit bietet der Frequenzanlauf. Dabei wird ein geeigneter Frequenzumrichter vorgeschaltet, dieser erhöht langsam die Frequenz der speisenden Spannung. Dadurch wird die Betriebsdrehzahl langsam durch definierte Beschleunigung erreicht. Diese Art der Steuerung fällt unter den Begriff Leistungselektronik, welche im Anschluss noch genauer erläutert wird. (Fischer 2017, S. 385-389).

Im Leerlauf wird das Polrad vom Ständerfeld mitgenommen, dabei ist der Winkel zwischen Polrad und Ständerfeld (Polradwinkel) gleich Null. Es gibt keine Relativbewegung zwischen Polrad und dem Drehfeld des Stators. (Fischer 2017, S. 385-389)

Wenn dem Motor eine Last aufgegeben wird, so ändert sich der Polradwinkel. Das Polradfeld eilt dem Ständerfeld hinterher. Die synchrone Drehzahl bleibt jedoch erhalten. Bei steigender Last nimmt der Polradwinkel bis zu einem Maximum von 90° zu. Wird die Belastung weiter erhöht, würde eine Verringerung der Drehzahl erzwungen werden: Dadurch würde eine Relativbewegung zwischen Polrad und Ständerfeld erfolgen und das Polrad würde abwechselnd angezogen und abgestoßen werden. Das resultierende Moment wäre dabei Null. Tritt dieser Fall ein, wird der Motor von der Last abgebremst und bleibt stehen. Der Punkt, an dem die magnetische Bindung zwischen Polrad und Ständerfeld abreißt, wird als Kippunkt bezeichnet. Daraus folgt, dass die Drehzahl bis zum Kippunkt lastunabhängig ist. Deshalb wird bei Synchronmotoren nicht wie üblich das Drehmoment über die Drehzahl aufgetragen, sondern über den Polradwinkel, welcher auch Lastwinkel genannt wird. (Fischer, Elektrische Maschinen 2017, S. 385-389)

2.2.4 Gleichstrommaschine

2.2.4.1 Aufbau von Gleichstrommaschinen

Die Gleichstrommaschine besteht aus einem stillstehenden Stator und dem Rotor. Wobei der Stator das Joch mit den beiden Hauptpolen bildet. Diese Hauptpole sind in Form von Polschuhen ausgeführt, um einen möglichst großen Teil des Rotors zu umschließen, und dadurch einen größeren Wirkungsbereich zu überdecken. Auf den Polschuhen befinden sich die Erregerwicklungen, welche über Gleichstrom gespeist werden und somit ein magnetisches Gleichfeld erzeugen. Der Aufbau einer Gleichstrommaschine wird in Abbildung 22 gezeigt, wobei der Rotor in der Abbildung als Anker bezeichnet wird. Anstelle der Polschuhe mitsamt Erregerwicklungen können auch Permanentmagnete für die Erzeugung des stationären Magnetfeldes verwendet werden. (Fischer 2017, S. 38-43) (Hofmann 2013, S. 147-160) (Fischer und Linse 2012, S. 265-270)

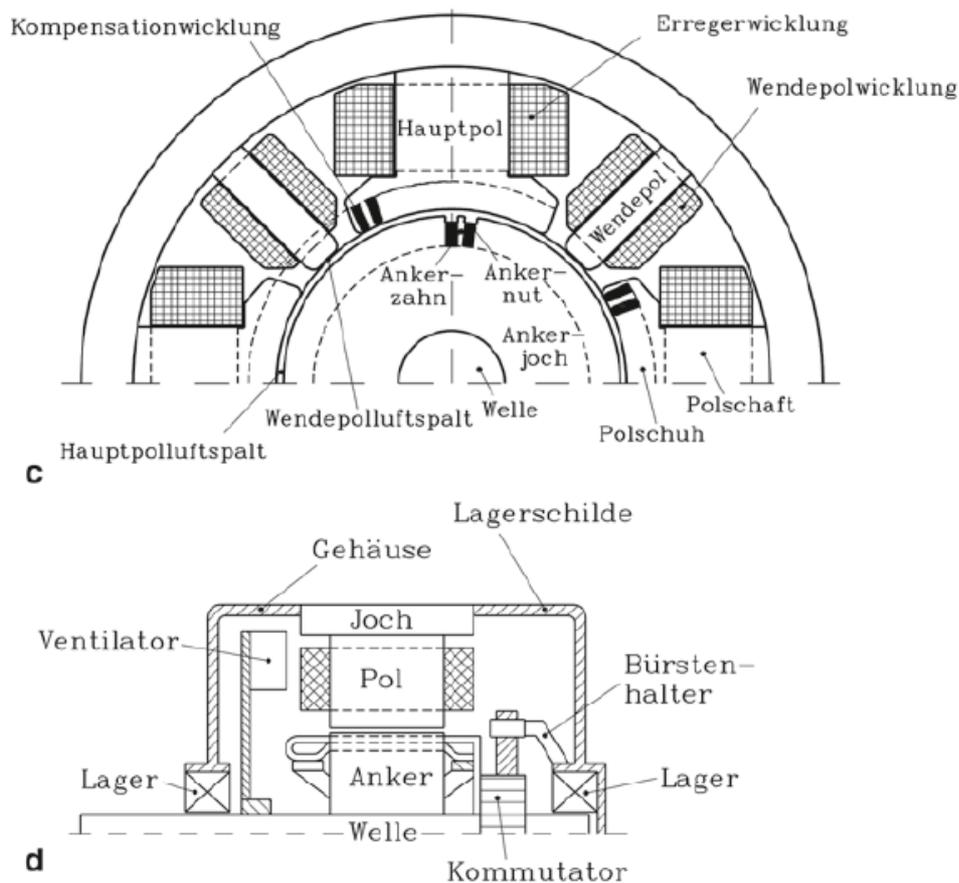


Abbildung 22: Aufbau einer Gleichstrommaschine (Vgl. Binder 2012, S. 849)

Der Rotor bildet den bewegten Teil der Maschine, an welchem das Drehmoment abgegriffen werden kann. Dieser verfügt über axiale Nuten, in welchen sich die Ankerwicklungen befinden, siehe Abbildung 22. Die Enden dieser Wicklungen sind mit dem Kommutator verbunden. Der Kommutator hat die Aufgabe des Umpolens der Wicklungen. Das heißt, er bewirkt den Richtungswechsel des Stromes in der Ankerwicklung, wodurch sich die Orientierung des Magnetfeldes umkehrt. Der Kommutator besteht aus zueinander isolierten Kupferlamellen, welche mit den Enden der Ankerwicklungen verbunden sind. Über Bürsten, welche meist über Federwirkung an diese Kupferlamellen gepresst werden und welche mit den Anschlussklemmen des Motors verbunden sind, wird die Ankerwicklungen gespeist. Der Kontakt zwischen Bürsten und Lamellen ist ein gleitender Kontakt. Dabei ist eine Bürste mit dem Pluspol und eine Bürste mit dem Minuspol verbunden. Die Drehung des Ankers bewirkt einen abwechselnden Kontakt der Kupferlamellen mit dem Plus- und dem Minuspol, wodurch sich laufend die Stromrichtung in den Ankerwicklungen ändert. (Fischer 2017, S. 38-43) (Hofmann 2013, S. 147 ff.) (Fischer und Linse 2012, S. 265-270)

2.2.4.2 Funktionsweise von Gleichstrommaschinen

Durch die Erregerwicklungen bildet sich ein ortsfestes und zeitlich konstantes Magnetfeld. Dieses Magnetfeld bildet sich von einem Hauptpol zum anderen aus und wird über das Joch, welches der restliche Stator bildet, geschlossen, wie in Abbildung 23 dargestellt.

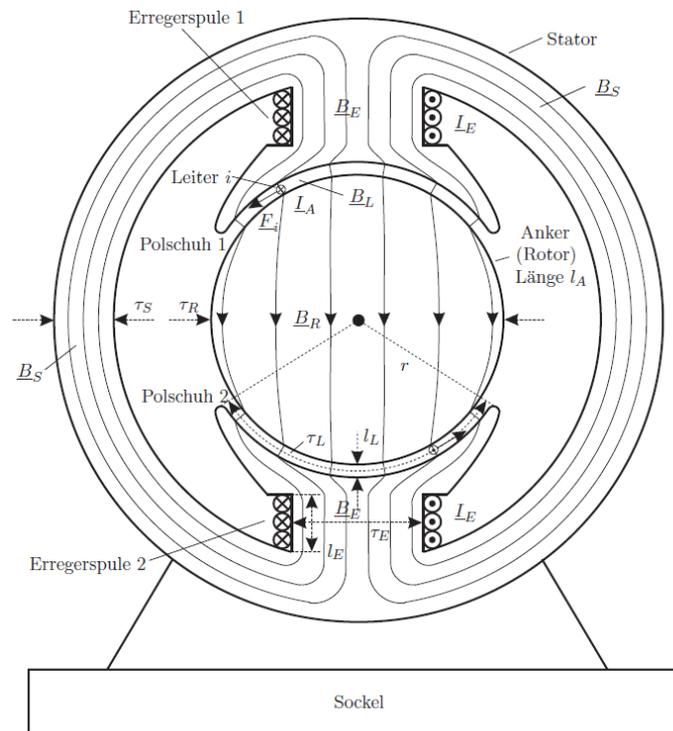


Abbildung 23: Ausbildung des Magnetfeldes einer Gleichstrommaschine (Schröder 2017, S. 72)

Aufgrund der Schaltung der Erregerwicklung kann zwischen Reihenschlussmotor, Nebenschlussmotor sowie fremderregtem Motor und Doppelschlussmotor unterschieden werden. Die Schaltungen dieser Varianten sind in Abbildung 24 dargestellt. Bei der Ausführung als Reihenschlussmotor wird die Erregerwicklung mit der Rotorwicklung in Reihe geschaltet. Dies führt zu einer zur Belastung proportionalen Erregung. Bei der Nebenschlussmaschine sind die Rotor- und Erregerwicklung parallel zu einander geschaltet, wodurch der Erregerstrom unabhängig von der Last ist und mit einer konstanten Spannung gespeist wird. Dasselbe gilt für die fremderregte Erregerwicklung, wobei diese eine vom Rotor unabhängige Spannungsversorgung besitzt. Wird zusätzlich zu einer Nebenschlusswicklung eine Reihenschlusswicklung ausgeführt, spricht man von einer Doppelschlussmaschine. Durch diese Schaltung kann die Schwächung des Hauptfeldes vermieden werden. (Fischer 2017, S. 75-85)

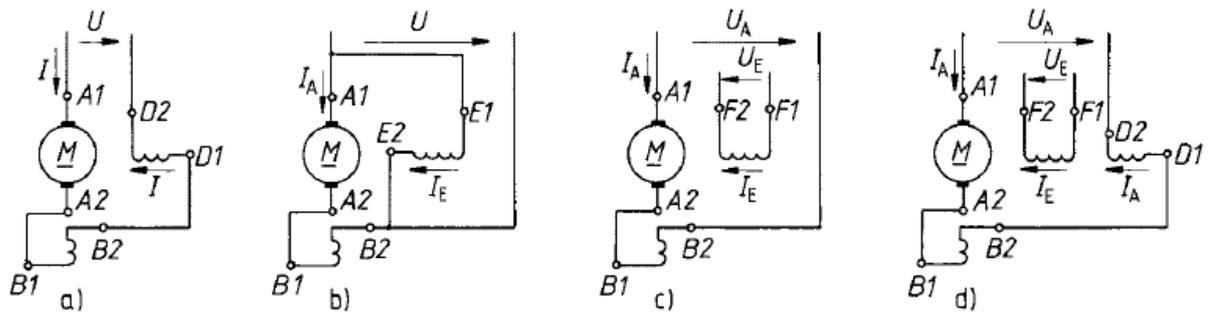


Abbildung 24: Beschaltungsmöglichkeiten von Gleichstrommaschine (Fischer 2017, S. 75)
 a) Reihenschlussmotor; b) Nebenschlussmotor; c) Fremderregter Motor;
 d) Doppelschlussmotor

Befindet sich nun ein stromdurchflossener elektrischer Leiter im Luftspalt zwischen Stator und Rotor, wirkt auf diesen die Lorentzkraft. Diese Kraft wirkt in tangentialer Richtung des Rotors und führt zu einem Drehmoment. Diesen stromdurchflossenen elektrischen Leiter stellt die Ankerwicklung dar, welche aus vielen Leitern besteht. Würden nun die gesamten Ankerwicklungen in derselben Richtung durchflossen werden, würde sich eine resultierende Kraft beziehungsweise ein daraus resultierendes Drehmoment von Null ergeben. Das heißt, jener Teil der Wicklungen, welcher sich im Bereich des einen Polschuhes befindet, muss im Vergleich zu jenem Teil, welcher sich im Bereich des anderen Polschuhes befindet, eine entgegengesetzte Stromrichtung aufweisen. Bewegt sich nun jener Teil der Wicklung, welcher im Bereich des ersten Hauptpoles lag, zum gegenüberliegenden Pol, muss eine Änderung der Stromrichtung erfolgen, um eine gleichbleibende Krafrichtung zu erreichen. Diese Änderung der Stromrichtung ist, wie bereits erwähnt, die Aufgabe des Kommutators. Ein solcher Kommutator ist in Abbildung 25 dargestellt. (Schröder 2017, S. 645-649)

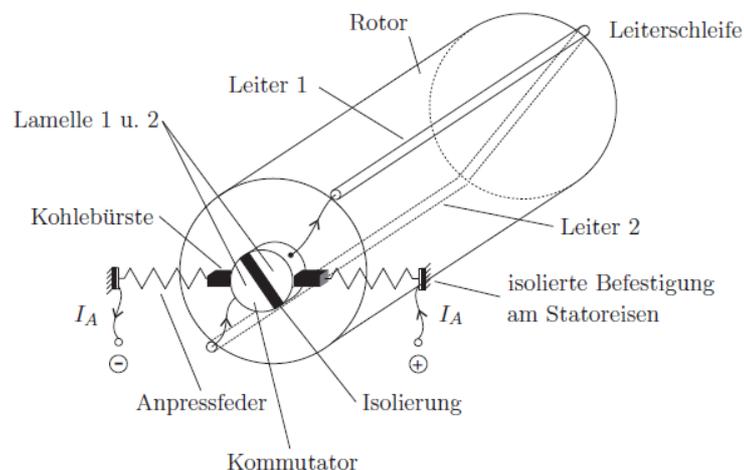


Abbildung 25: Aufbau eines Kommutators (Schröder 2017, S. 646)

An den Bürsten des Kommutators kommt es aufgrund des in diesem Bereich wirkenden Ankerfeldes zu Bürstenfeuer. Um dies zu minimieren, sind in qualitativ hochwertigeren Motoren Wendepole verbaut. Diese Wendepole bestehen aus Spulen, welche nahe an den Bürsten des Kommutators angebracht sind. Die Wicklungen dieser Spulen werden vom Ankerstrom, jedoch mit entgegengesetzter Polung, durchflossen. Dies führt zu einer Aufhebung des Ankerquerfeldes im Bereich der Bürsten. In derselben Art und Weise werden bei großen Maschinen Kompensationswicklungen verwendet, um die durch das Ankerquerfeld auftretende Feldverzerrung im Bereich der Hauptpole zu kompensieren. Diese sind in Nuten in den Polschuhen der Hauptpole angeordnet und werden ebenfalls in entgegengesetzter Richtung vom Ankerstrom durchflossen. (Fischer 2017, S. 65-74) (Schröder 2017, S.645-649) (Fischer und Linse 2012, S. 265-270)

2.2.5 Asynchrongenerator

Um eine Asynchronmaschine als Generator zu verwenden, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Eine Variante ist es, die Asynchronmaschine am Netz als Motor zu betreiben und den Rotor auf eine höhere Drehzahl als die Synchrondrehzahl zu beschleunigen. Diese Drehzahlerhöhung bewirkt, dass der Schlupf kleiner null wird, was bedeutet, dass der Rotor schneller läuft als das Statorfeld. Dadurch wird in der Statorwicklung eine Spannung induziert, welche in das Netz gespeist wird. Bei der zweiten Möglichkeit kann die Asynchronmaschine ohne Anschluss an das Netz als Generator betrieben werden. Für die Erregung der Rotorwicklung benötigt die Asynchronmaschine jedoch induktive Ströme, welche sie in diesem Fall nicht aus dem Netz beziehen kann und auch nicht selbst erzeugen kann. Aus diesem Grund benötigt die Asynchronmaschine eine Kondensatorbatterie, welche in der Lage ist, den Blindanteil zu liefern. Diese Kondensatorbatterie besteht aus drei Kondensatoren, welche jeweils zwischen den drei Phasen der Asynchronmaschine geschaltet werden. Abbildung 26 zeigt die Beschaltung der Asynchronmaschine mit den Kondensatoren. Die benötigte Kapazität der Kondensatoren lässt sich mittels Gleichung 1 und Gleichung 2 berechnen. (Fischer 2017, S. 310 ff.)

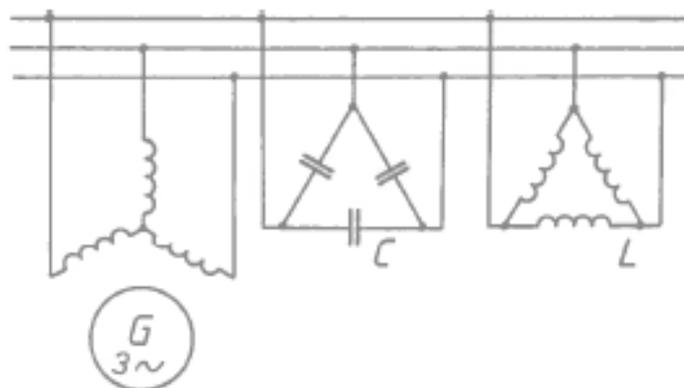


Abbildung 26: Beschaltung der Asynchronmaschine für den Betrieb als Generator
(Fischer 2017, S. 310)

$$X_c = \frac{U_0}{I_c}$$

Gleichung 1
(Fischer 2017, S. 312)

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f_1 * X_c}$$

Gleichung 2
(Fischer 2017, S. 312)

Die Kondensatoren bilden gemeinsam mit den Wicklungen der Maschine einen Schwingkreis, welcher sich aufgrund der Restremanenz bei Bewegung des Läufers aufzuschwingen beginnt. Da die Kondensatoren kapazitive Blindleistung benötigen, können sie die induktive Blindleistung, welche für die Erregung des Rotorfeldes nötig ist, zur Verfügung stellen. Die sich einstellende Leerlaufspannung ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Leerlaufkennlinie des Generators mit der Kondensatorgeraden, wie in Abbildung 27 dargestellt. Somit lässt sich über die Kapazität der Kondensatoren die Leerlaufspannung einstellen. Wird der Generator belastet, ist eine größere Magnetisierung notwendig. Der daraus resultierende höhere Blindstrombedarf führt zu einem Abfall der Spannung. Dieser Spannungsabfall ist in Abbildung 24 zu erkennen. (Fischer 2017, S. 310 ff.)

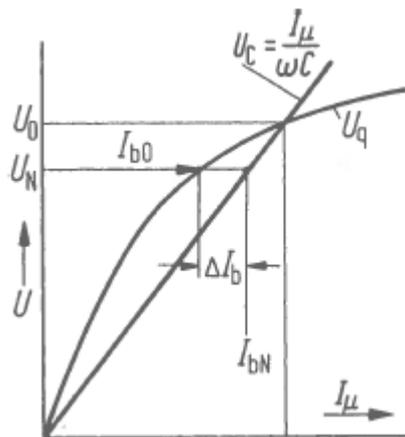


Abbildung 27: Betriebspunkt der Asynchronmaschine (Fischer 2017, S. 311)

Um einen solchen Spannungsabfall zu vermeiden, können parallel zu den Kondensatoren Drosselspulen geschaltet werden. Diese Spulen sind in der Lage den zusätzlichen Blindstrombedarf beim Absinken der Spannung zur Verfügung zu stellen. Dadurch kommt es nur zu einem geringen Spannungsabfall bei Belastung des Generators. In Abbildung 28 sind die Blindstromkennlinien des Kondensators als auch der Spule und deren Kombination dargestellt. Bei Verwendung solcher Kombination aus Kondensator und Drosselspule stellt sich eine Leerlaufspannung ein, welche niedriger ist als bei einem reinen Betrieb mit Kondensatoren. Unter Last fällt die Spannung in diesem Fall deutlich weniger ab. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 29 dargestellt. (Fischer 2017, S. 310 ff.)

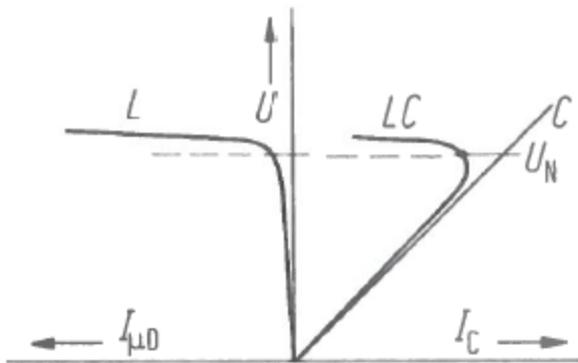


Abbildung 28: Blindstromkennlinie von Kondensator und Spule (Fischer 2017, S. 311)

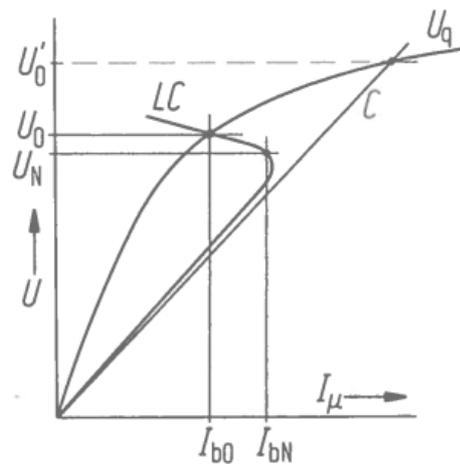


Abbildung 29: Betriebspunkt bei Verwendung von Drosselspulen (Fischer 2017, S. 312)

Der größte Nachteil bei Verwendung einer Asynchronmaschine als Generator liegt darin, dass die Spannung nur durch Änderung der Drehzahl oder durch Änderung der Kapazität der Kondensatoren eingestellt werden kann. In vielen Fällen ist es aber nicht möglich die Drehzahl zu ändern und ein Schalten zwischen Kondensatoren mit unterschiedlichen Kapazitäten, führt bei größeren Asynchronmaschinen zu Spannungsspitzen. In Abbildung 30 ist die Einstellmöglichkeit der Spannung durch die beiden erwähnten Varianten dargestellt. (Fischer 2017, S. 310 ff.)

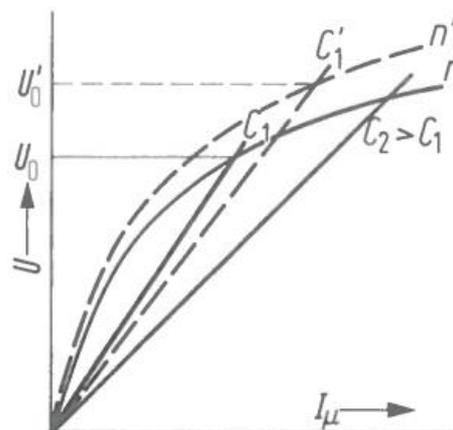


Abbildung 30: Einstellmöglichkeiten der Spannung über die Drehzahl oder über die Kapazität der Kondensatoren (Fischer 2017, S. 312)

2.2.6 Synchrongenerator

Bei der generatorischen Verwendung von Synchronmaschinen kommen sowohl permanent erregte Synchronmaschinen als auch elektrisch erregte Synchronmaschinen zum Einsatz. Permanent erregte Synchrongeneratoren werden überwiegend für kleinere Leistungen im Kilowattbereich eingesetzt. Bei den elektrisch erregten Generatoren befindet sich am Rotor, gleich wie bei den Synchronmotoren, eine Erregerwicklung. Diese Wicklung wird über Gleichstrom gespeist und erzeugt ein zeitlich konstantes Magnetfeld. Dieser Gleichstrom kann aus dem Netz entnommen und gleichgerichtet werden oder durch den Generator selbst erzeugt werden. Im zuletzt genannten Fall befindet sich auf dem Rotor ein permanent erregter Hilfsgenerator. Wird der Rotor mechanisch angetrieben, beginnt sich das Magnetfeld mit dem Rotor zu drehen und es entsteht ein Drehfeld. Durch das rotierende Magnetfeld wird in den am Umfang verteilten Statorwicklungen eine Spannung induziert. Die Höhe der Spannung ist abhängig von der Höhe des Erregerstromes und der Drehzahl. (Schwab 2012, S. 293-298) (Teigelkötter 2013, S. 101 f.)

Bei Belastung des Generators fließen in den drei um 120° versetzten Ständerwicklungen Wechselströme. Diese Ströme ergeben zusammen einen Drehstrom, welcher einen magnetischen Fluss bewirkt. Dieser magnetische Fluss kann in einen Hauptfluss und einen Streufluss unterteilt werden. Der Hauptfluss erstreckt sich über alle Windungen der Statorwicklung und den Luftspalt, wohingegen sich der Streufluss ausschließlich über die einzelnen Windungen der Wicklungen erstreckt. Abbildung 31 zeigt die Ausbildung des Haupt- und Streuflusses. Darin ist der Hauptfluss mit ϕ_h und der Streufluss mit ϕ_σ bezeichnet. Die Hauptflüsse der drei Ständerwicklungen überlagern sich im Luftspalt zu einem Ständerdrehfeld, welches zur Selbstinduktion in der Ständerwicklung führt. Das Streufeld ist nur von der Zeit abhängig und ortsfest, wodurch sich kein Drehfeld ausbildet. Jedoch induziert auch dieses eine Streuspannung in die Statorwicklungen. Somit bilden sich bei Belastung drei magnetische Felder aus, welche drei Spannungen in den Wicklungen induzieren. Diese drei Spannungen sind die Polradspannung E_p , welche durch das Rotorfeld im Leerlauf induziert wird, die bei Belastung durch den Hauptfluss induzierte Spannung E_h und die Spannung des Streuflusses E_σ . Die zur Verfügung stehende Klemmspannung ergibt sich aus

der geometrischen Summe dieser drei Spannungen. Sie ist in Abbildung 32 veranschaulicht. In Abbildung 33 ist das Ersatzschaltbild des Synchrongenerators dargestellt. (Schwab 2012, S. 293-298)

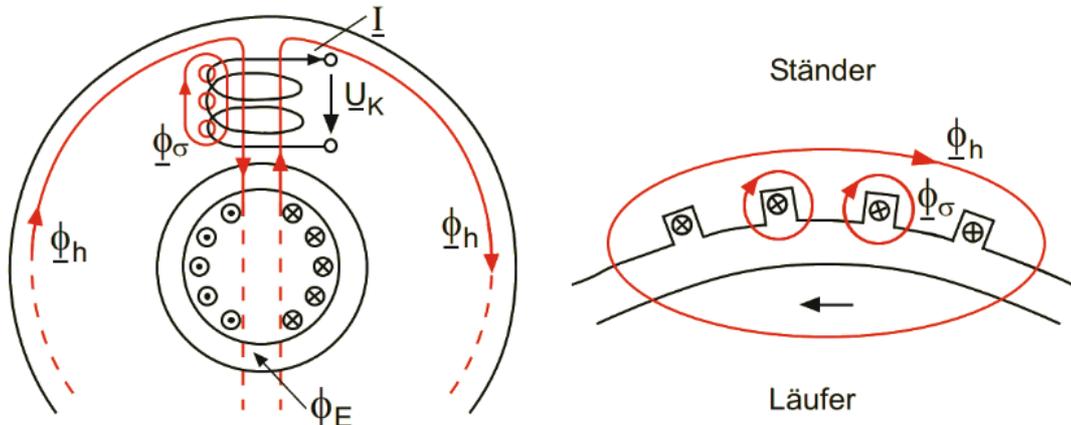


Abbildung 31: Ausbildung des Haupt- und Streuflusses (Schwab 2012, S. 293)

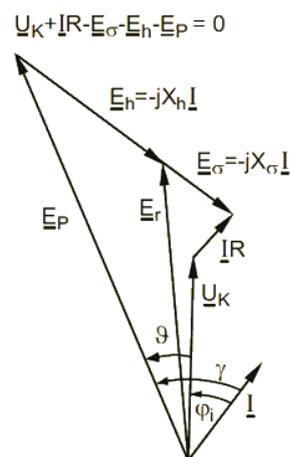


Abbildung 32: Zusammensetzung der Polradspannung (Vgl. Schwab 2012, S. 295)

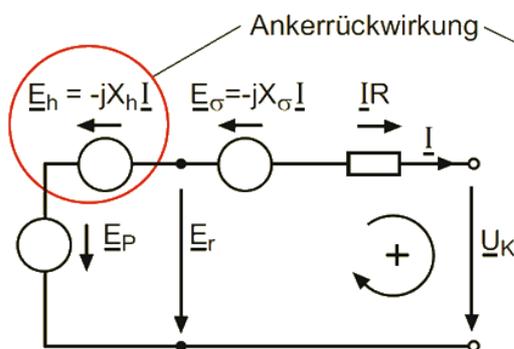


Abbildung 33: Ersatzschaltbild des Synchrongenerators (Vgl. Schwab 2012, S. 294)

Die beiden sich überlagernden Drehfelder können auch als ein resultierendes Drehfeld betrachtet werden, wodurch sich eine von diesem Feld induzierte Nettospannung ergibt. Die Art der Belastung, entweder induktive oder kapazitive Last, beeinflusst die Feldstärke des resultierenden Feldes. Bei induktiver Last schwächt das Ständerdrehfeld das Läuferdrehfeld und bei kapazitiver Last verstärkt das Ständerdrehfeld das Läuferdrehfeld. Somit kommt es bei einer induktiven Last zu einem Abfall der Klemmspannung und bei einer kapazitiven Last zu einer Erhöhung der Klemmspannung. Abbildung 34 zeigt das vereinfachte Schaltbild eines Synchrongenerator, bei welchem die Widerstände zu einer Impedanz zusammengefasst wurden. (Schwab 2012, S. 293-298)

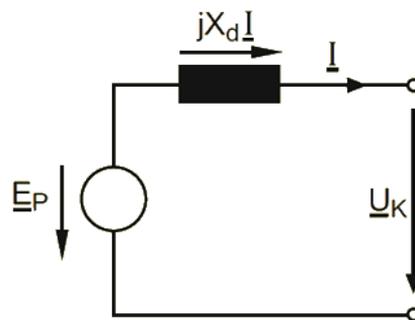


Abbildung 34: Vereinfachtes Ersatzschaltbild (Vgl. Schwab 2012, S. 297)

Um die Klemmspannung konstant zu halten, ist es notwendig den Erregerstrom anzupassen. So muss dieser, wie in Abbildung 35 ersichtlich, bei induktiver Belastung erhöht und bei kapazitiver Last verringert werden. (Schwab 2012, S. 293-298)

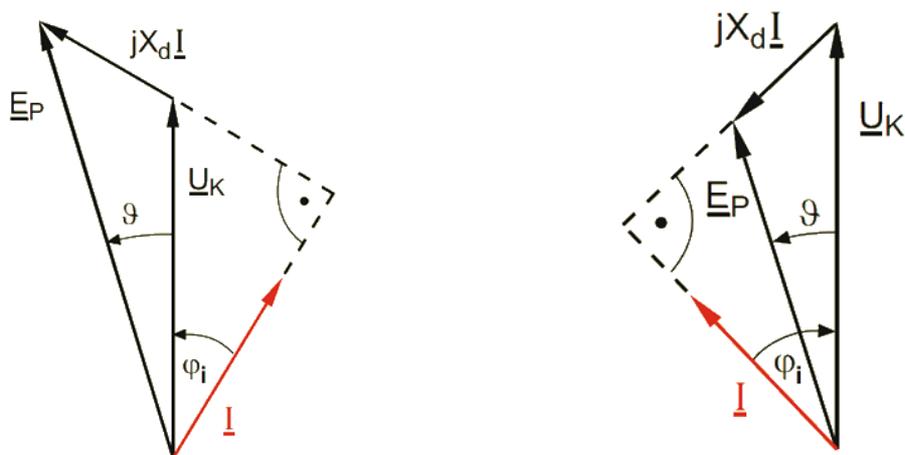


Abbildung 35: Regelung der Klemmspannung durch den Erregerstrom (Vgl. Schwab 2012, S. 297)

2.2.7 Gleichstromgenerator

Wie beim Gleichstrommotor wird auch im Generatorbetrieb zwischen Nebenschlussgenerator und Reihenschlussgenerator unterschieden. Des Weiteren kann durch die Art der Versorgung der Erregerspule eine Unterscheidung zwischen fremd- oder selbsterregt getroffen werden. Erfolgt die Erregung mit Hilfe einer externen Stromquelle spricht man von Fremderregung. Bei Selbsterregung wird die Erregerwicklung durch den selbst erzeugten Strom gespeist. Als eigenerregt wird der Generator bezeichnet, wenn der Strom von einer gekoppelten Gleichstromerregemaschine bezogen wird. (Bernstein 2012, S. 291-296)

2.2.7.1 Fremderregter Generator

Am einfachsten ist die Spannungsregelung bei Fremderregung, da der Strom, mit welcher das Erregerfeld aufgebaut wird, von einer externen Stromquelle kommt und dieser einfach geregelt werden kann. Die Schaltung eines solchen fremderregten Gleichstromgenerators ist in Abbildung 36 dargestellt. (Bernstein 2012, S. 293-296)

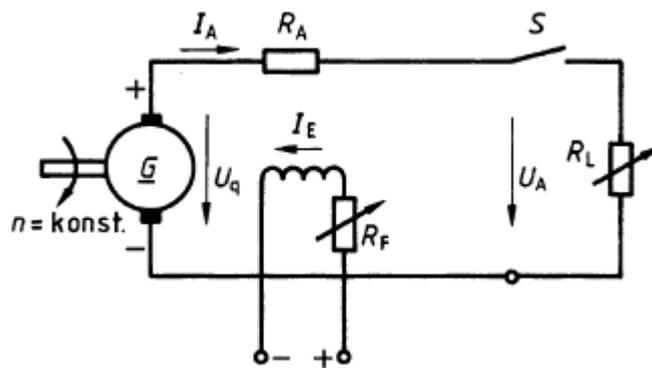


Abbildung 36: Schaltung des fremderregten Gleichstromgenerators
(Fischer und Linse 2012, S. 274)

2.2.7.2 Nebenschlussgenerator

Hier wird der Strom, welcher die Erregerwicklung speist, über ein Potentiometer gesteuert. Je höher der Strom der Erregerwicklung ist, umso stärker ist das magnetische Feld, welches sich ausbildet. Dies führt in weiterer Folge zu einer höheren induzierten Spannung im Stator. In Abbildung 37 ist die Schaltung der Wicklungen für einen Nebenschlussgenerator abgebildet. (Bernstein 2012, S. 293-296)

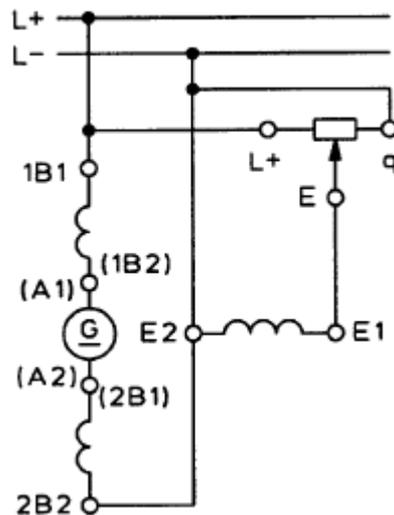


Abbildung 37: Schaltung des Nebenschlussgenerators (Vgl. Bernstein 2012, S. 295)

2.2.7.3 Reihenschlussgenerator

Wie auch beim Reihenschlussmotor werden auch beim Generator die Rotor- und Statorspulen vom selben Strom durchflossen. Wird der Generator also nicht belastet, so fließt kein Strom durch die Ankerwicklung und eine Spannung wird ausschließlich durch den Restmagnetismus induziert. Dies führt dazu, dass die Spannung von der Belastung abhängig ist und mit steigender Belastung ansteigt. Um die Spannung eines Reihenschlussgenerators steuern zu können, muss ein zusätzlicher verstellbarer Widerstand parallel zur Erregerwicklung geschlossen werden, um den Strom und somit die Stärke des Magnetfeldes zu begrenzen. Dieser Widerstand führt bei ungünstigen Verhältnissen zu erhöhten Verlusten und verursacht somit eine Reduzierung des Wirkungsgrades. Aus diesem Grund werden Reihenschlussgeneratoren praktisch kaum verwendet. Abbildung 38 zeigt das Schaltbild des Reihenschlussgenerators, worin die Reihenschaltung der Rotor- und Statorwicklungen zu erkennen ist. (Bernstein 2012, S. 293-296)

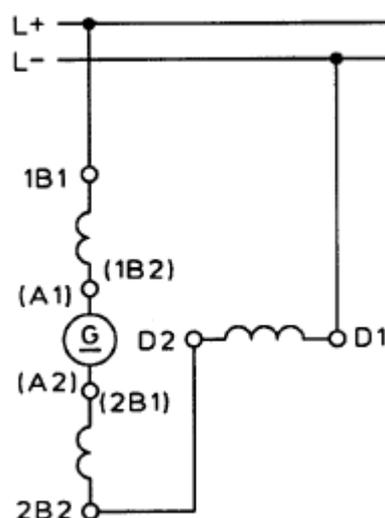


Abbildung 38: Schaltung des Reihenschlussgenerators (Vgl. Bernstein 2012, S. 295)

2.2.7.4 Doppelschlussläufer

Der Doppelschlussläufer ist eine Kombination aus Reihenschluss- und Nebenschlussgenerator. Dabei befinden sich zwei Wicklungen auf dem Läufer, wobei eine Wicklung in Reihe mit der Statorwicklung und die zweite parallel, also im Nebenschluss, zur Statorwicklung geschlossen ist. Der Vorteil dieser Kombination liegt im Verhalten der Spannung bei Leerlauf und Belastung. Im Leerlauf fließt nur jener Strom der Reihenschlusswicklung, welcher für die Aufrechterhaltung des Magnetfeldes der Nebenschlusswicklung erforderlich ist. Dadurch ist die Spannung nur von der Stärke des Magnetfeldes der Nebenschlusswicklung abhängig und kann über den Verstellwiderstand gesteuert werden. Bei Belastung muss die Feldstärke der Nebenschlusswicklung durch Erhöhung des Stromes vergrößert werden, um die Spannung aufrecht zu erhalten. Dieser höhere Strom fließt auch durch die Reihenschlusswicklung, wodurch auch in dieser die Feldstärke zunimmt. Dadurch wird das Feld der Nebenschlusswicklung durch jenes der Reihenschlusswicklung verstärkt und die Spannung kann gehalten werden. In Abbildung 39 ist die Schaltung eines Doppelschlussgenerators dargestellt. Abbildung 40 zeigt die Anordnung der Wicklungen am Rotor. Um die Spannung bei Belastung möglichst konstant zu halten, müssen die Wicklungen über die Anzahl der Windungen an die Belastung angepasst werden. (Bernstein 2012, S. 293-296)

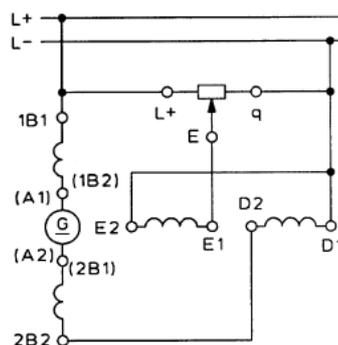


Abbildung 39: Schaltung des Doppelschlussgenerators (Vgl. Bernstein 2012, S. 295)

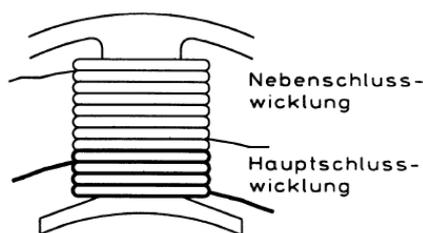


Abbildung 40: Anordnung der Wicklungen am Rotor (Vgl. Bernstein 2012, S. 296)

2.3 Steuerung von Elektromotoren

2.3.1 Drehzahlsteuerung von Asynchronmaschinen

Bei der Betrachtung der Gleichung für die Drehzahl der Asynchronmaschine sind die Möglichkeiten der Drehzahlbeeinflussung bereits ersichtlich, siehe Gleichung 3. Die erste Möglichkeit ist dabei die Vergrößerung des Schlupfes s durch Vorwiderstände, Absenkung der Klemmspannung oder durch Energierückspeisung aus dem Rotor in das Netz. Eine weitere Variante stellt die Änderung der Polzahl dar. Dies kann durch polumschaltbare Wicklungen oder durch getrennte Ständerwicklungen mit unterschiedlicher Polzahl erfolgen. Als letzte Möglichkeit bleibt laut Gleichung 3 die Änderung der Frequenz durch geeignete Frequenzumrichterschaltungen. Diese drei Möglichkeiten werden anschließend genauer beschrieben. (Fischer 2017, S. 245) (Hofmann 2013, S. 260)

$$n = \frac{f_1}{p} * (1 - s) \qquad \text{Gleichung 3 (Fischer 2017, S.245)}$$

2.3.1.1 Vorwiderstand im Rotor

Um den Widerstand im Rotor zu erhöhen, wird ein einstellbarer Drehstromwiderstand R_{2v} , wie Abbildung 41 zeigt, vor die Rotorwicklung geschaltet. Dieser Widerstand bewirkt einen zusätzlichen Spannungsabfall, wodurch die Maschine eine höhere Spannung induzieren muss. Dies führt zu einer Vergrößerung des Schlupfes, was in weiterer Folge zu einer Reduktion der Drehzahl führt. Ein Vorteil dieser Steuerung ist es, dass das Kippmoment, wie in Abbildung 42 erkennbar, unabhängig von der Größe des Vorwiderstandes ist und somit unverändert bleibt. Der Nachteil dieser Variante ist aus Abbildung 43, welche die Leistungsbilanz zeigt, ersichtlich. Durch das Senken der Drehzahl bei konstantem Drehmoment nimmt nach Gleichung 4 die mechanische Leistung ab. Die aufgenommene elektrische Leistung bleibt jedoch konstant. Aus Abbildung 43 ist zu erkennen, dass die Differenz der Leistung in Form von Wärmeverlusten am Vorwiderstand verloren geht. Da aufgrund der zusätzlichen Wärmeverluste der Wirkungsgrad herabgesetzt wird und die zusätzlich anfallende Wärme abgeführt werden muss, werden solche Vorwiderstände nur für kurzfristige

Drehzahlensenkungen verwendet. Ein weiterer Nachteil ist es, dass Vorwiderstände aus konstruktiven Gründen nur bei Schleifringläufer verwendet werden können. (Schröder 2017, S. 251) (Fischer 2017, S. 246-248)

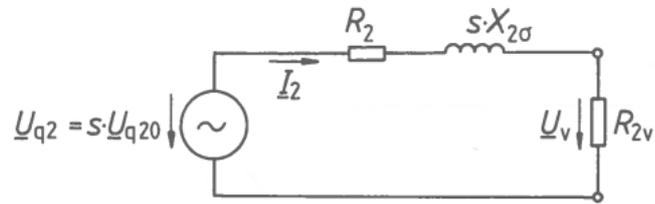


Abbildung 41: Rotorschaltung mit einstellbarem Vorwiderstand (Fischer 2017, S. 246)

$$P = M * \omega = M * 2 * \pi * n$$

Gleichung 4

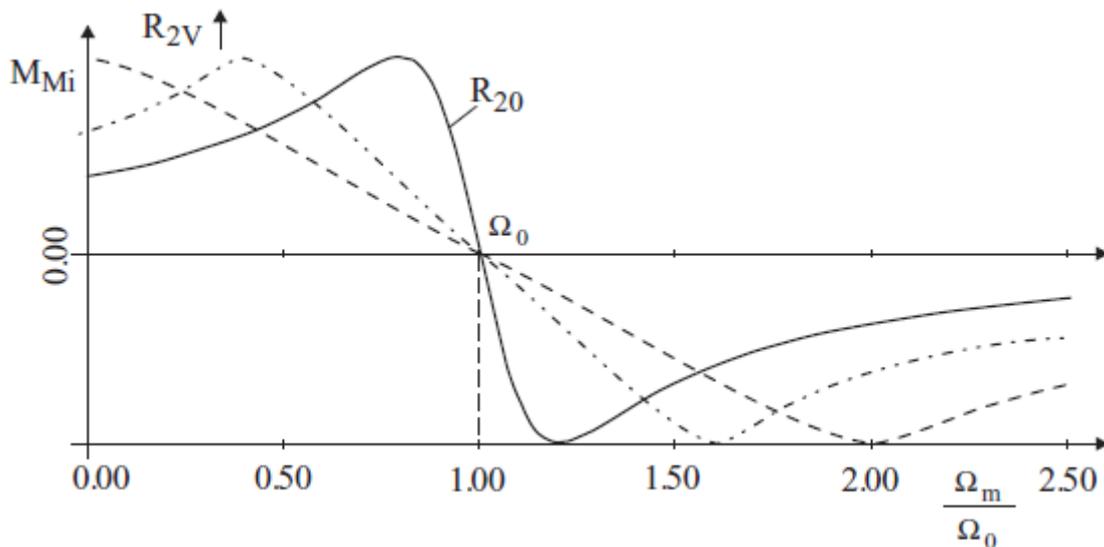


Abbildung 42: Änderung der Drehmomentenkennlinie in Abhängigkeit des Vorwiderstandes (Schröder 2017, S. 251)

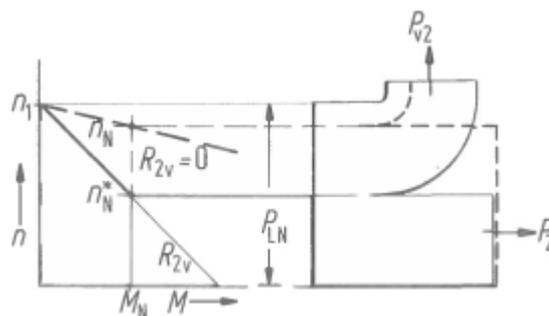


Abbildung 43: Leistungsbilanz bei Verwendung eines Vorwiderstandes (Fischer 2017, S. 248)

2.3.1.2 Senkung der Klemmspannung

Mit dieser Variante kann ausschließlich eine Reduzierung, nicht aber eine Erhöhung der Drehzahl realisiert werden, da die Statorspannung nur reduziert werden kann. Würde die Statorspannung erhöht werden, würde dies zu einer Sättigung der Maschine führen. Durch Senkung der Klemmspannung wird der Magnetisierungsstrom gesenkt, was eine Schwächung des Hauptflusses zur Folge hat. Die in den Rotor induzierte Spannung und damit auch der Rotorstrom werden dadurch reduziert, was ein Absinken des Drehmomentes bewirkt. Durch das Absinken des Drehmomentes kommt es zu einer Abnahme der Drehzahl und zu einer Vergrößerung des Schlupfes. Diese verursacht eine Abnahme des effektiven Ohm'schen Widerstandes des Rotorkreises, wodurch der Rotorstrom wieder zunehmen kann. Der Rotorstrom steigt solange an, bis dasselbe Drehmoment wie vor der Senkung der Klemmspannung erreicht ist. Damit steigt auch die im Rotor induzierte Spannung und es stellt sich ein neues Gleichgewicht bei einer niedrigeren Drehzahl und niedrigerem Moment ein. In Abbildung 44 ist die Änderung des Drehmomentverlaufes bei Senkung der Statorspannung abgebildet. (Fischer 2017, S. 250 f.) (Hofmann 2013, S. 266 ff.)

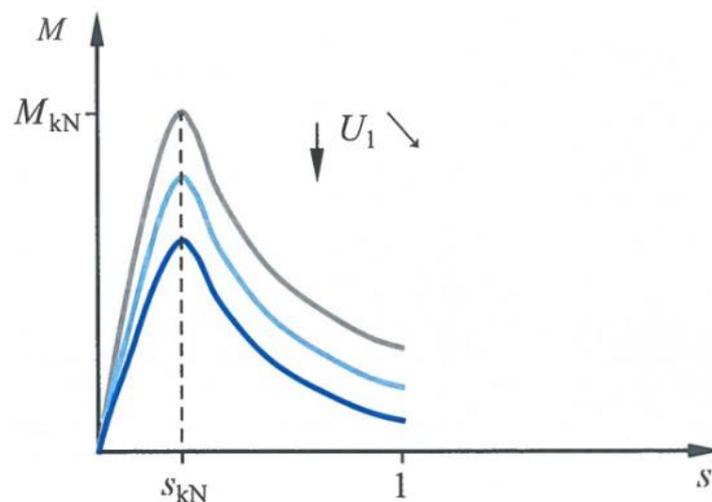


Abbildung 44: Drehmomentenkennlinien bei Senkung der Klemmspannung
(Hoffmann 2013, S. 267)

2.3.1.3 Polumschaltung

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert, ist die Drehzahl von der Anzahl der Polpaare abhängig. Ausgehend von einer minimalen Polzahl von zwei, bewirkt eine Erhöhung der Polzahl eine Senkung der Drehzahl. Mit jedem weiterem Polpaar halbiert sich die Drehzahl. Konstruktiv kann der Stator mit mehreren Wicklungen mit unterschiedlicher Polzahl oder aber auch mit nur einer Wicklung, welche in mehreren Spulengruppen unterteilt ist, ausgeführt werden. Zusätzlich ist auch noch eine Kombination von beiden möglich. Verwendet wird die Polumschaltung nur bei Motoren mit Käfigläufern, da bei Schleifringläufern auch die Läuferwicklungen umgeschaltet werden müssten, was zu einem sehr hohen Aufwand führen würde und somit nicht effizient wäre. Bei Verwendung von Wicklungen mit Spulengruppen müssen diese Gruppen ein Polpaarverhältnis von 1:2 aufweisen. Bei dieser Art der Polumschaltung spricht man von einer Dahlander- Schaltung. Je nach Schaltung der einzelnen Spulengruppen ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten. Diese Möglichkeiten sind in Abbildung 45 dargestellt. Abbildung 46 zeigt die Spannungs- und Scheinleistungsverhältnisse der einzelnen Schaltungsvarianten. In der Praxis wird je nach Anwendungsfall zwischen zwei der vier Möglichkeiten umgeschaltet, wodurch sich die Umschaltvarianten aus Abbildung 47 ergeben. (Hofmann 2013, S. 260-265) (Fischer 2017, S. 251 f.)

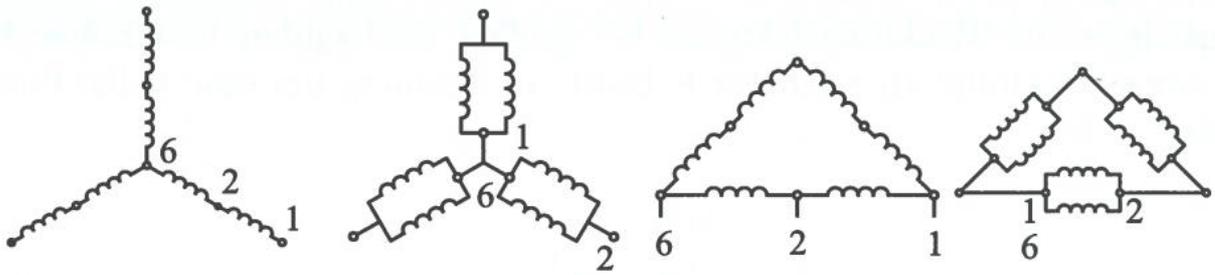


Abbildung 45: Schaltungsmöglichkeiten der Spulengruppen (Hoffmann 2013, S. 261)

				
Spulenspannung U_{Sp}	$\frac{U_{Ln}}{2\sqrt{3}}$	$\frac{U_{Ln}}{2}$	$\frac{U_{Ln}}{\sqrt{3}}$	U_{Ln}
Scheinleistung S	$\sqrt{3} U_{Ln} \cdot I_{Sp}$	$3 U_{Ln} \cdot I_{Sp}$	$2\sqrt{3} U_{Ln} \cdot I_{Sp}$	$6 U_{Ln} \cdot I_{Sp}$

Abbildung 46: Spannungs- und Leistungsverhältnisse der Schaltungsvarianten (Hoffmann 2013, S. 261)

Schaltungsversion					
p_2	p_1	$\frac{P_{M2}}{P_{M1}}$	$\frac{M_2}{M_1}$	$\frac{B_2}{B_1}$	M_w
		0,65	1,3	1,4	const
		0,85	1,7	1,9	$\sim \frac{1}{n}$
		0,4	0,75	0,8	$\sim n^2$

Abbildung 47: Umschaltvarianten zwischen den Spulengruppen (Hoffmann 2013, S. 261)

2.3.2 Drehzahlsteuerung von Asynchron- und Synchronmaschinen

2.3.2.1 Änderung der Frequenz

Die zuvor beschriebenen Möglichkeiten der Drehzahlsteuerung haben mit der Entwicklung der Leistungselektronik zunehmend an Bedeutung verloren. Durch den Einsatz von Frequenzumrichter kommt der Motor ohne zusätzlichen baulichen Aufwand aus, was die Kosten der Maschine niedrig hält. (Fischer 2017, S. 253)

Eine Änderung der Frequenz hat eine Änderung der Drehzahl des Drehfeldes zur Folge. Damit bei gleichbleibendem Strom das Drehmoment trotz sinkender Frequenz konstant bleibt, muss mit der Frequenz auch die speisende Spannung gesenkt werden, was aus den Gleichung 5 und Gleichung 6 folgt. Dieser Frequenzbereich wird als Proportionalbereich bezeichnet und ist in Abbildung 48 dargestellt. (Fischer 2017, S. 253-258) (Bernstein 2012, S. 328 ff.)

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{\sqrt{3} * U * I * \cos \varphi}{2 * \pi * f} = k * I * \frac{U}{f}$$

Gleichung 5
(Bernstein 2012, S.328)

$$M \approx I * \frac{U}{f}$$

Gleichung 6
(Bernstein 2012, S.328)

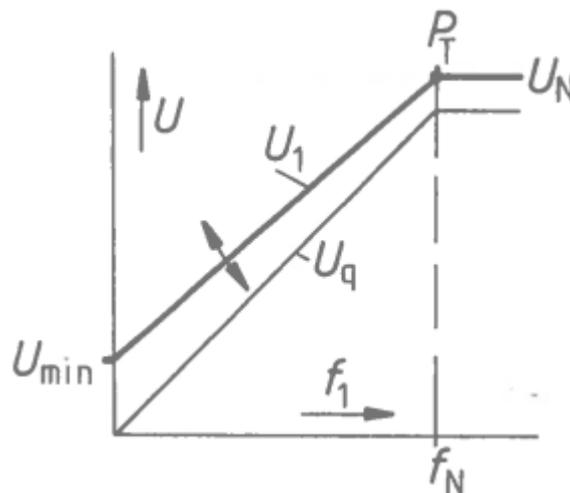


Abbildung 48: Steuerkennlinie bei Änderung der Frequenz (Fischer 2017, S. 256)

Mit sinkender Spannung vergrößert sich jedoch der Einfluss des Ständerwiderstandes. Das heißt, bei niedriger Spannung fällt bereits ein großer Teil der Klemmspannung am Ständerwiderstand ab, wodurch die Spannung für die Magnetisierung zu gering wird und der Statorfluss abnimmt. Dies würde zu einem Absinken des Kippmomentes führen. Um dem entgegen zu wirken, wird die Steuerkennlinie, wie in Abbildung 48 gezeigt, angehoben. Diese Kompensation sollte lastabhängig erfolgen, da diese ansonsten bei niedriger Frequenz und kleiner Belastung zu einer Übermagnetisierung führen würde, wodurch die Induktionsspannung angehoben werden würde. Diese Anhebung der Induktionsspannung erhöht den Blindstrom und führt zu einer erhöhten Temperaturentwicklung. Durch das Anheben der Steuerkennlinie, kann das Kippmoment im Proportionalbereich, wie Abbildung 49 zeigt, konstant gehalten werden. (Fischer 2017, S. 253-258) (Schröder 2017, S. 252 f.)

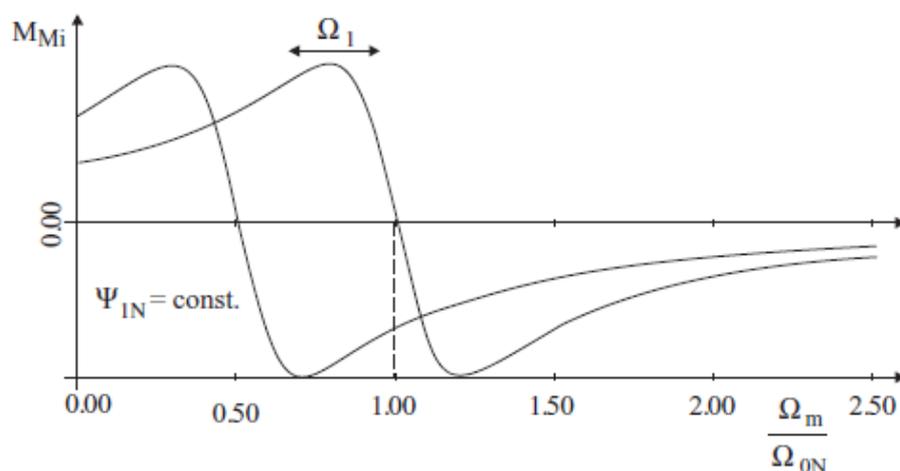


Abbildung 49: Drehmomentverlauf im Proportionalbereich (Schröder 2017, S. 332)

Für höhere Drehzahlbereiche kann die Statorspannung nicht weiter erhöht werden, da sie ansonsten die Bemessungsspannung der Maschine überschreiten würde. Somit kann in diesen Bereichen ausschließlich die Frequenz erhöht werden. Dies bewirkt mit steigender Frequenz eine Abnahme des Drehfeldflusses. Deshalb wird der Bereich oberhalb der Nennfrequenz als Feldschwächungsbereich bezeichnet. Durch Schwächung des Feldes nimmt in diesem Bereich mit steigender Frequenz das Kippmoment, wie in Abbildung 50 dargestellt, ab. (Fischer 2017, S. 253-258) (Schröder 2017, S. 252 f.)

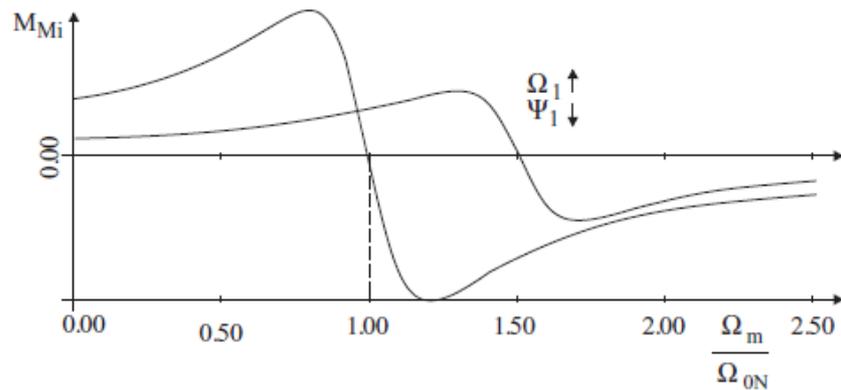


Abbildung 50: Drehmomentverlauf im Feldschwächungsbereich (Schröder 2013, S. 332)

Das beschriebene Verhalten der Asynchron- bzw. Synchronmaschine bei Änderung der Frequenz ist in Abbildung 51 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass im Proportionalbereich das Kippmoment konstant bleibt und über der Netzfrequenz das Kippmoment bei gleichbleibender Spannung abfällt. (Fischer 2017, S. 253-258) (Schröder 2017, S. 252 f.)

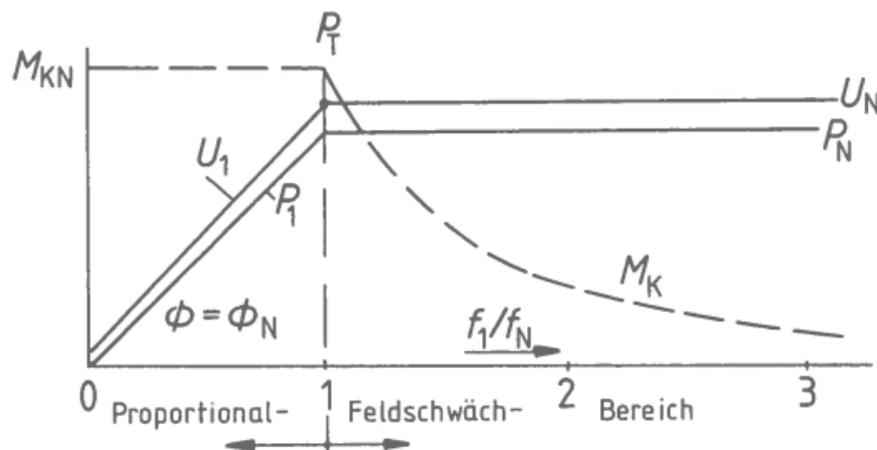


Abbildung 51: Verlauf des Kippmomentes über den Proportional- und Feldschwächungsbereich (Fischer 2017, S. 257)

2.3.3 Drehzahlsteuerung von Gleichstrommaschinen

Die Einstellung der Drehzahl von Gleichstrommaschinen kann über die Ankerspannung, die Feldschwächung oder aber auch durch einen Ankerwiderstand erfolgen. Gleichung 7 zeigt die Abhängigkeit der Drehzahl von den zuvor erwähnten Parametern. (Fischer 2017, S. 86)

$$n = n_0 - \Delta n = \frac{U_A}{c * \Phi} - \frac{2 * \pi * (R_A + R_V)}{(c * \Phi)^2} * M$$

Gleichung 7
(Vgl. Fischer 2017, S.86)

2.3.3.1 Ankervorwiderstand

Wie Abbildung 52 zeigt, kann dem Anker ein verstellbarer Widerstand vorgeschaltet werden. Dadurch bleibt die Leerlaufdrehzahl n_0 unverändert und die rechte Komponente der Gleichung 7 wird verändert. Das äußert sich in Form eines mit steigendem Widerstand und somit niedrigerer Drehzahl steiler werdenden Drehmomentenverlaufs. Abbildung 53 zeigt dieses Drehmomentverhalten in Abhängigkeit vom Vorwiderstand. Nachteil dieser Steuerung ist der mit steigendem Widerstand sinkende Wirkungsgrad, da ein Teil der zugeführten Leistung in Form von Wärme am Widerstand verloren geht. (Fischer 2017, S. 86 f.)

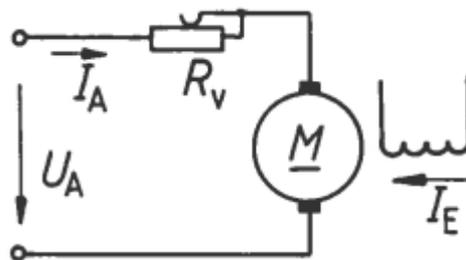


Abbildung 52: Schaltung einer Gleichstrommaschine mit Ankervorwiderstand (Fischer 2017, S. 86)

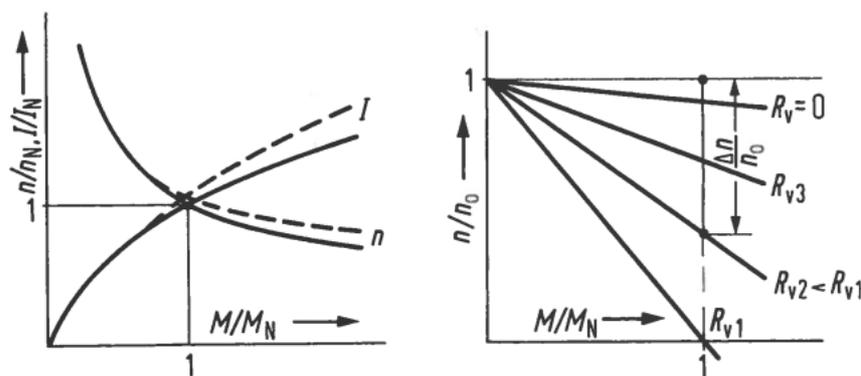


Abbildung 53: Änderung der Drehmomentenkennlinie bei Änderung des Vorwiderstandes (Fischer 2017, S. 87)

2.3.3.2 Senkung der Ankerspannung

Nach Gleichung 7 bewirkt eine Absenkung der Ankerspannung eine Reduzierung der Leerlaufdrehzahl. Da die Ankerspannung nicht die Nennspannung überschreiten darf, ist somit nur eine Senkung der Ankerspannung, und dadurch keine Erhöhung der Drehzahl möglich. In der Drehmomentkennlinie wird, wie in Abbildung 54 zu erkennen, dieser Bereich als Ankerstellbereich bezeichnet. (Fischer 2017, S. 87 f.)

2.3.3.3 Feldschwächung

Um die Drehzahl zu erhöhen, muss wie aus Gleichung 7 ersichtlich der magnetische Fluss reduziert werden. Damit in diesem Fall das Drehmoment konstant gehalten werden kann, müsste der Ankerstrom erhöht werden. Dieser ist aber auf den Nennstrom begrenzt, was zu einer Absenkung des Drehmomentes führt. Dieser Bereich der Drehzahlsteuerung wird Feldstellbereich genannt und ist im rechten Teil der Abbildung 54 zu erkennen. (Fischer 2017, S. 87 f.)

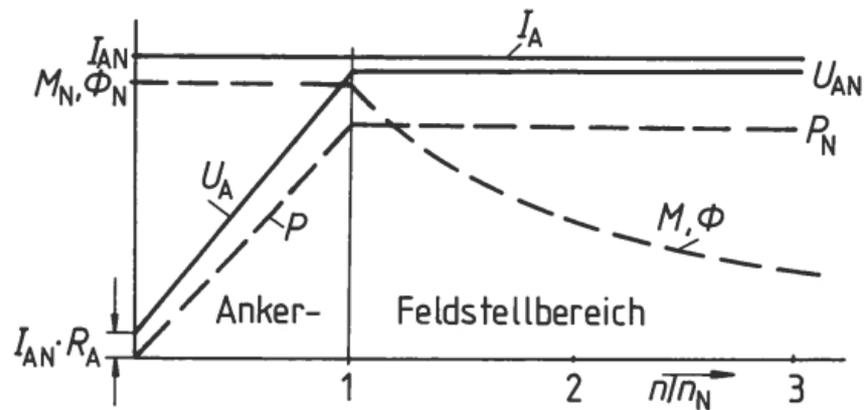


Abbildung 54: Anker- und Feldstellbereich (Fischer 2017, S. 88)

Durch Kombination aus Änderung der Ankerspannung und Änderung des magnetischen Flusses, kann eine Steuerung der Drehzahl unter bzw. über die Nenn Drehzahl erfolgen. Abbildung 55 zeigt für eine solche Kombination das Drehzahlkennlinienfeld. (Fischer 2017, S. 87 f.)

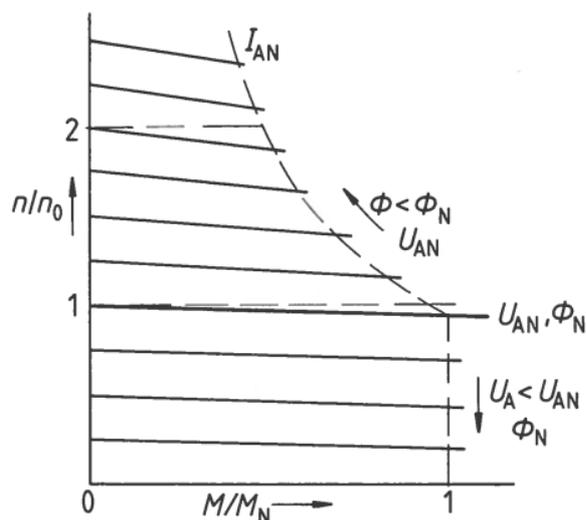


Abbildung 55: Drehzahlkennlinien im Anker- und Feldstellbereich (Fischer 2017, S. 88)

Bei der selbsterregten Gleichstrommaschine verwendet man für die Feldschwächung eine Erregerwicklung, welche unterteilt ist und stufenweise geschaltet werden kann. Dadurch ändert sich die Anzahl der durchflossenen Windungen und somit der magnetische Fluss. Abbildung 56 zeigt die Schaltung eines Reihenschlussmotors mit abgestufter Erregerwicklung. (Fischer 2017, S. 88 ff.)

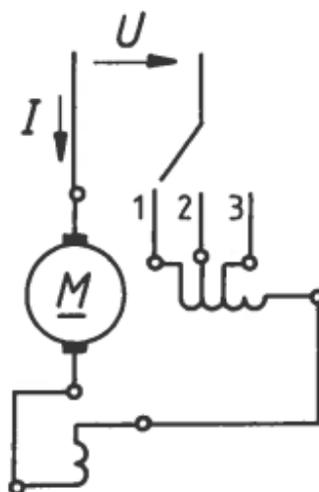


Abbildung 56: Schaltung eines Reihenschlussmotors mit abgestufter Erregerwicklung (Fischer 2017, S. 89)

2.3.4 Frequenzumrichter

Bei der Schaltung eines Frequenzumrichters handelt es sich um eine leistungselektronische Schaltung, welche, wie in Abbildung 57 gezeigt, aus den drei Teilen Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter aufgebaut ist. Der Frequenzumrichter besteht aus einem Gleichrichter, welcher über eine Gleichrichter-Brückenschaltung die eingehende dreiphasige Wechselspannung zu einer Gleichspannung richtet. Anschließend folgt ein Zwischenkreis, dieser besteht aus einem Pufferkondensator, welcher Überspannungen aufnimmt und die Spannung glättet. Um eventuell auftretende Stromschwankungen zu drosseln, ist im Zwischenkreis eine Spule verbaut. Zuletzt wird die Gleichspannung durch einen Wechselrichter zu einer pulsweiten modulierten Rechteckspannung umgewandelt. Als Ergebnis erhält man eine sinusförmige Grundschwingung mit der gewünschten Frequenz und Spannung. Bei Frequenzumrichtern, welche für einen Vierquadrantenbetrieb geeignet sind, wird die bei der Nutzbremung erzeugte Energie an den Zwischenkreis zurückgeführt und durch einen netzgeführten Wechselrichter in das Netz zurück gespeist. Wird diese Bremsenergie nicht in das Netz zurückgeführt, so muss sie in einen am Zwischenkreis angeschlossenen Bremswiderstand in Wärme umgewandelt werden, um einen Bremsvorgang zu ermöglichen. (Fischer und Linse 2012, S. 365 f.) (Binder 2012, S. 452 f.)

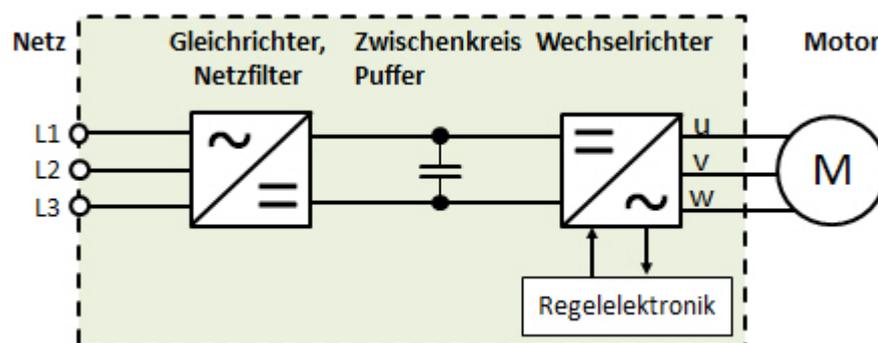


Abbildung 57: Leistungselektronische Schaltung eines Frequenzumrichters
(<https://www.precifast.de/frequenzumrichter-funktion/>)

2.4 Elektrische Leistungsmessung

2.4.1 Allgemeine Leistungsmessung

Damit Leistung gemessen werden kann, müssen zwei Spannungspotenziale vorhanden sein und zwischen diesen muss eine elektrisch leitfähige Verbindung bestehen, über welche ein Strom fließen kann. Dieser Strom ist abhängig vom Potentialunterschied und dem Widerstand der elektrischen Leitung nach dem Ohm'schen Gesetz, Gleichung 9. Bei Kenntnis der elektrischen Spannung und des fließenden Stromes kann die elektrische Leistung aus dem Produkt jener Größen laut Gleichung 8 ermittelt werden. Wird ein elektrischer Verbraucher mit einem Innenwiderstand R_L an zwei bekannte Spannungspotenziale angeschlossen, fließt ein Strom, welcher sich aus Gleichung 9 errechnen lässt. Durch Kombination der Gleichung 8 und Gleichung 9, kann die Gleichung 10 gebildet werden, aus welcher sich die Leistung bei bekanntem Innenwiderstand berechnen lässt. (Bernstein 2012, S. 16 f.)

$$P = U * I$$

Gleichung 8
(Bernstein 2012, S.17)

$$U = R * I$$

Gleichung 9
(Bernstein 2012, S.5)

$$P = \frac{U^2}{R_L}$$

Gleichung 10

Ist der Innenwiderstand nicht bekannt, müssen der Strom und die Differenz der Spannungspotentiale, welche in weiterer Folge nur als Spannungen bezeichnet werden, gemessen werden. Bei der Messung des Stromes wird die Spannung, abhängig vom verwendeten Messgerät, reduziert. Dasselbe zieht die Messung der Spannung mit sich, wobei hier für die Messung ein Teil des Stromes benötigt wird. Der Grund dafür liegt darin, dass die Messgeräte für die Ermittlung der Spannung bzw. des Stromes einen Innenwiderstand benötigen, welcher eine Änderung des Stromes bzw. der Spannung mit sich zieht. Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten für den Aufbau der Messschaltung. In Abbildung 58 ist die spannungsrichtige Messung, bezogen auf den Verbraucher, dargestellt. Hierbei wird bei der Messung der Spannung des Verbrauchers der Spannungsabfall am Messgerät für den Strom nicht mitgemessen. Das Strommessgerät hingegen misst den Strom, welcher durch das Spannungsmessgerät und den Verbraucher fließt. Bei der stromrichtigen Messung, welche in Abbildung 59 dargestellt ist, wird durch das Strommessgerät nur jener Strom gemessen, welcher durch den Verbraucher fließt und nicht jener, welcher durch das Spannungsmessgerät fließt. Das Spannungsmessgerät hingegen erfasst den Spannungsabfall des Verbrauchers und des Strommessgerätes. (Lerch 2016, S. 229 ff.)

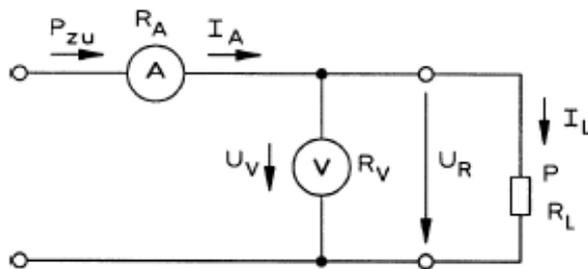


Abbildung 58: Spannungsrichtige Messung bezogen auf den Verbraucher (Vgl. Bernstein 2012, S. 140)

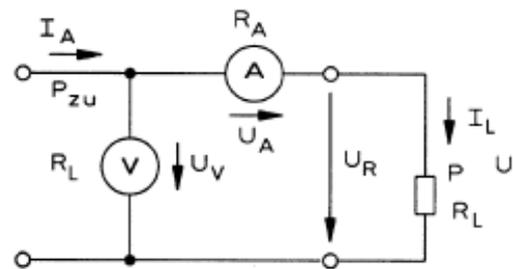


Abbildung 59: Stromrichtige Messung bezogen auf den Verbraucher (Vgl. Bernstein 2012, S. 140)

2.4.2 Leistungsmessung bei Wechselstrom

Bei Wechselstrom setzt sich die Leistung aus einem Wirkleistungsteil P und einem Blindleistungsanteil Q zu einer Scheinleistung S zusammen. Wobei der Anteil der Wirkleistung durch den Ohm'schen und jener der Blindleistung durch kapazitiven bzw. induktiven Widerstand zustande kommt. In Abbildung 60 ist das sich ergebende Leistungsdreieck für Wirk-, Blind- und Scheinleistung abgebildet. (Lerch 2016, S. 231 ff.) (Fischer und Linse 2012, S. 93-95)

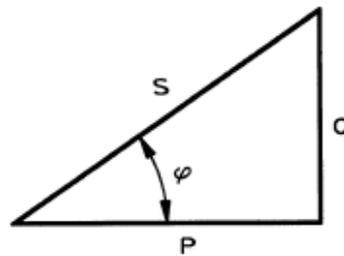


Abbildung 60: Leistungsdreieck für die Wirk-, Blind- und Scheinleistung
(Bernstein 2012, S. 109)

Diese kapazitiven und induktiven Widerstände führen zu einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Bei induktivem Widerstand, was einen negativen Phasenwinkel zufolge hat, eilt der Strom der Spannung nach, wohingegen bei kapazitivem Widerstand, was einen positiven Phasenwinkel zufolge hat, der Strom der Spannung voraus eilt. Diese Phasenverschiebungen sind in den Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt. (Lerch 2016, S. 231 ff.) (Fischer und Linse 2012, S. 93-95)

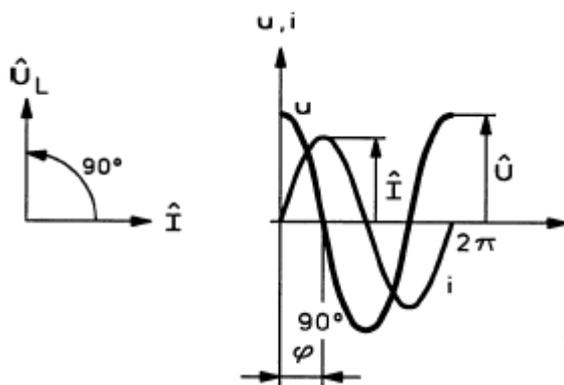


Abbildung 61: Phasenverschiebung bei induktivem Widerstand
(Bernstein 2012, S. 107)

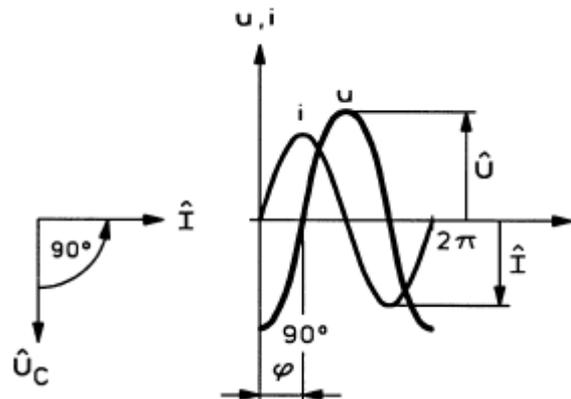


Abbildung 62: Phasenverschiebung bei kapazitivem Widerstand
(Bernstein 2012, S. 106)

Bei bekannter Phasenverschiebung kann durch Gleichung 11 die Wirkleistung und mittels Gleichung 12 die Blindleistung ermittelt werden. Die Scheinleistung kann durch geometrische Addition der Wirk- und Blindleistung nach Gleichung 13 errechnet werden. Der Anteil der Wirkleistung in Bezug auf die Scheinleistung wird, wie Gleichung 14 beschreibt, durch den Wirkleistungsfaktor angegeben. (Lerch 2016, S. 231 ff.) (Fischer und Linse 2012, S. 93-95)

$$P = U * I * \cos\varphi$$

Gleichung 11
(Fischer und Linse 2012, S.93)

$$Q = U * I * \sin\varphi$$

Gleichung 12
(Fischer und Linse 2012, S.93)

$$S = U * I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Gleichung 13
(Fischer und Linse 2012, S.94)

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

Gleichung 14
(Vgl. Fischer und Linse 2012, S.94)

2.4.3 Leistungsmessung in Drehstromsystemen

Im Gegensatz zu einem Wechselstromkreis besteht ein Drehstromsystem aus drei Phasen. Zusätzlich kann eine Unterteilung in Drehstromsysteme aufgrund des Schaltungsaufbaues getroffen werden. Sind in der Schaltung ausschließlich drei Phasen spricht man von einem 3-Leiter-System. Diese drei Phasen können entweder in Form einer Dreieck- oder einer Sternschaltung aufgebaut sein. In Abbildung 63 und Abbildung 64 ist ein solches 3-Leiter-System in Stern- und Dreieckschaltung abgebildet. (Lerch 2016, S. 233-241)

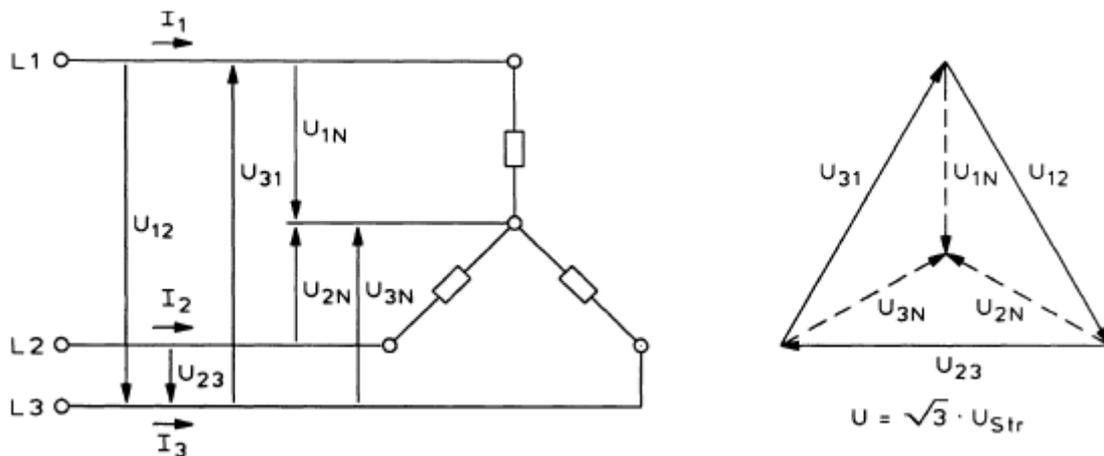


Abbildung 63: Sternschaltung (Vgl. Bernstein 2012, S. 94)

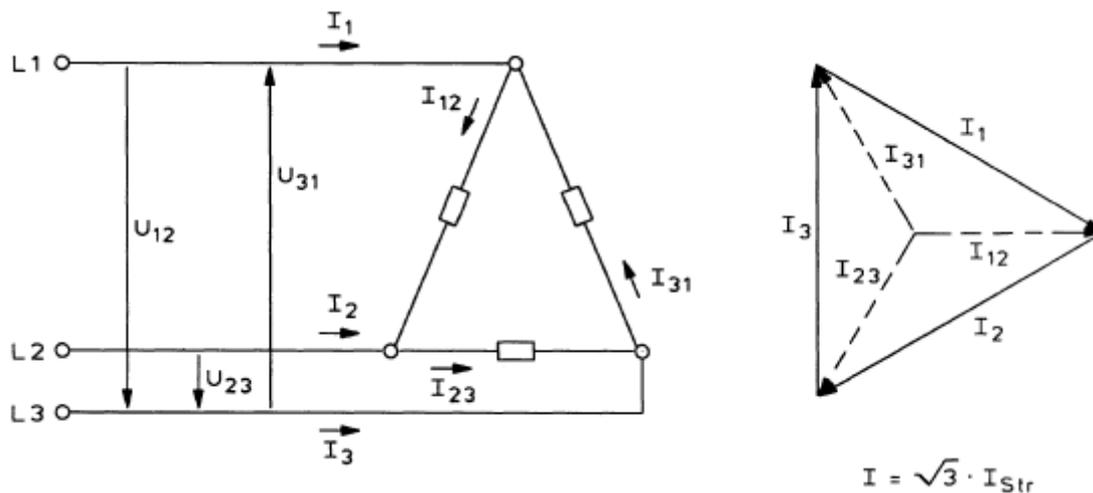


Abbildung 64: Dreieckschaltung (Vgl. Bernstein 2012, S. 94)

Hingegen spricht man von einem 4-Leiter-System, wenn zusätzlich zu den drei Phasen ein Neutraleiter vorhanden ist. Bei Sternschaltung wird dieser Neutraleiter an den Sternpunkt, wie in Abbildung 65 ersichtlich, angeschlossen. Dieser Neutraleiter, auch Nullleiter genannt, führt zu einem Nullpotential im Sternpunkt. Werden alle drei Phasen gleichmäßig belastet, das heißt die Lastimpedanzen, welche sich aus Ohm'schem, kapazitivem und induktivem Widerstand zusammensetzen können, haben denselben Betrag, spricht man von einer symmetrischen Belastung. Tritt solch eine symmetrische Belastung auf, sind die Spannungen und Ströme in allen drei Phasen gleich und es fließt kein Strom über den Neutraleiter. Somit kann bei symmetrischer Belastung das Drehstromsystem ohne Neutraleiter aufgebaut werden. Weisen jedoch die Lastimpedanzen unterschiedlich hohe Werte auf, wird dies als unsymmetrische Belastung bezeichnet. In diesem Fall haben die Ströme und Spannungen in den drei Phasen unterschiedliche Beträge. Für ein solches unsymmetrisches System in Sternschaltung wird ein Nullleiter, über welchen die Ströme abfließen können, benötigt. Wäre dieser Nullleiter nicht vorhanden, würde es zu einer sogenannten Nullpunktverschiebung kommen. Dies führt dazu, dass es zwischen den einzelnen Phasen und dem verschobenen Nullpunkt zu einem kritischen Spannungspotenzialunterschied kommen kann, wodurch der Verbraucher beschädigt werden kann. (Lerch 2016, S. 233-241)

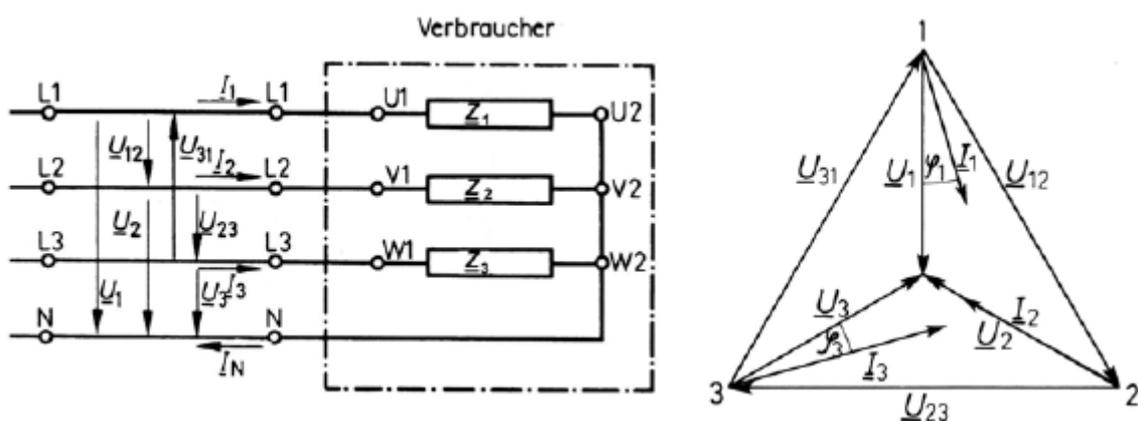
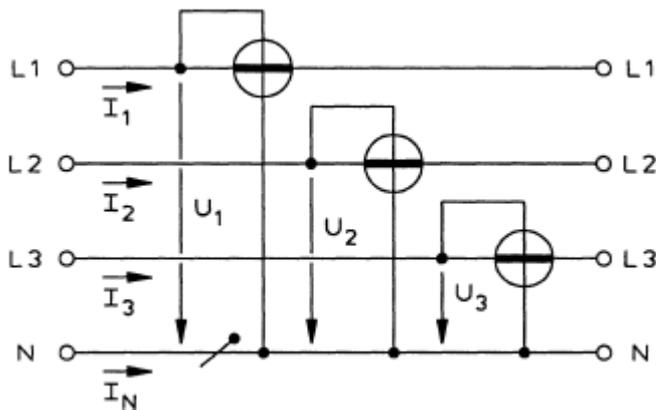


Abbildung 65: Sternschaltung im 4-Leiter-System (Vgl. Steffen und Bausch 2007, S. 265)

Liegt nun ein asymmetrisch belastetes Vierleitersystem vor, erhält man die Gesamtleistung aus der Summe der einzelnen Phasenleistungen nach Gleichung 15. Um die Gesamtleistung zu ermitteln, muss die Leistung in den einzelnen Phasen gemessen werden. In Abbildung 66 ist eine solche Messschaltung im Vierleitersystem mit asymmetrischer Belastung dargestellt. (Lerch 2016, S. 233-241)

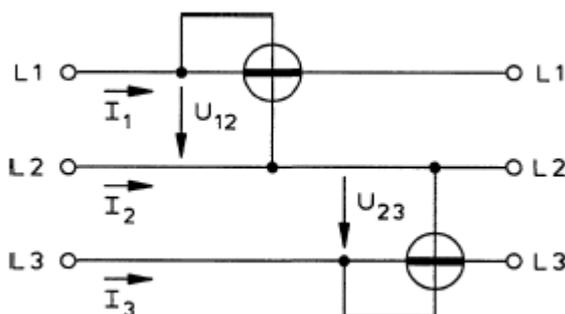


$$P_{ges} = P_{Str1} + P_{Str2} + P_{Str3}$$

Gleichung 15
(Bernstein 2012, S. 146)

Abbildung 66: Leistungsmessung bei 4-Leiter-System bei unsymmetrischer Belastung
(Bernstein 2012, S. 146)

Im Dreileitersystem mit unsymmetrischer Belastung kann die Messung der Wirkleistung auf zwei Phasen reduziert werden, wodurch sich eine Messschaltung, welche Aronschaltung genannt wird, ergibt. Dieser Messaufbau ist in Abbildung 67 dargestellt. Die Leistung wird in diesem Fall nach Gleichung 16 berechnet. (Lerch 2016, S. 233-241)

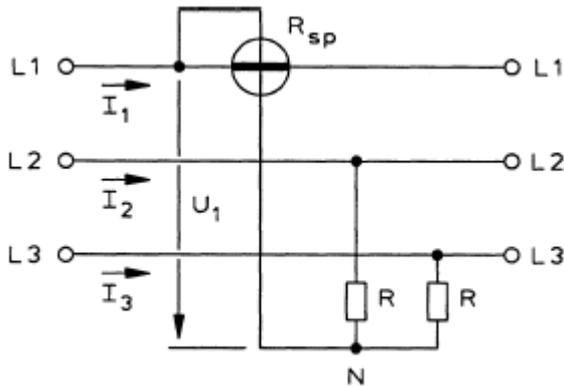


$$P_{ges} = U_{12} * I_1 * \cos\varphi + U_{32} * I_3 * \cos\varphi$$

Gleichung 16
(Bernstein 2012, S. 147)

Abbildung 67: Leistungsmessung mittels Aronschaltung
(Bernstein 2012, S. 148)

Liegt hingegen ein symmetrisch belastetes System vor, reduziert sich die Wirkleistungsmessung auf eine Phase. Der Grund dafür liegt, wie bereits oben erwähnt, darin, dass die Ströme und Spannungen in den drei Phasen dieselben Beträge haben. Daraus ergibt sich eine Messschaltung, wie in Abbildung 68 gezeigt. Die Leistung lässt sich aus Gleichung 17 errechnen. (Lerch 2016, S. 233-241)



$$P_{ges} = 3 * P_{Str}$$

Gleichung 17
(Bernstein 2012, S. 147)

Abbildung 68: Leistungsmessung bei symmetrischer Belastung (Bernstein 2012, S. 147)

2.5 Sicherheitseinrichtungen bei Gurtförderanlagen

In diesem Kapitel soll eine Übersicht über die Möglichkeiten der Sicherheitseinrichtungen von Gurtförderanlagen gegeben werden. Dazu wird zwischen Anlagensicherheit und Personensicherheit unterschieden. Wobei die Einrichtungen für die Anlagensicherheit die Aufgaben haben, den Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Dieser Betrieb sollte möglichst störungsfrei und über einen langen Zeitraum erfolgen. Dabei gilt es bei der Anlagensicherheit durch Überwachen von kritischen Komponenten den Betrieb sicherzustellen. Die Personensicherheit dient dem Schutz der Personen, welche die Anlage bedienen beziehungsweise an der Anlage Arbeiten durchführen. Nachfolgend werden die häufigsten Problemstellungen und deren Möglichkeiten zur Erkennung bzw. Vermeidung aufgezählt. Dabei wird jedoch nicht näher auf deren Funktionsweise oder deren Vor- und Nachteile eingegangen.

2.5.1 Anlagensicherheit

Um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten werden, wie bereits erwähnt, kritische Komponenten der Anlage überwacht. Eine dieser Komponenten stellt der Antriebsmotor dar. Dieser wird über einen Motorschutzschalter, welche den maximalen Strom begrenzt, geschützt und mittels Temperaturfühler überwacht. Ebenso wird das Öl des Getriebes mit einem Temperaturfühler überwacht. Zusätzlich wird das Öl in regelmäßigen Abständen oder laufend auf Partikel, Wassergehalt und Gesamtzustand untersucht. Die Überwachung der Förderbandtrommeln und der Tragrollen erfolgt durch optische Begutachtung auf Verschleiß der Beläge. An den Trommeln können zusätzlich die Drehzahl und das Drehmoment gemessen werden. Bei den Tragrollen wird darauf geachtet, ob diese feststecken oder Verformungen aufweisen. Des Weiteren kann durch erhöhten Geräuschpegel oder Wärmeentwicklung auf einen Defekt der Tragrollen bzw. deren Lager geschlossen werden. Die Überwachung der Wälzlager in den unterschiedlichen Komponenten kann durch Schwingungsaufnehmer erfolgen, welche bei einem Schaden am Lager entstehende Stoßsignale detektieren. (Lanthaler 2011, S. 24-44)

Beim Fördergurt werden die Gurtspannung, der Schlupf, die Position, die Geschwindigkeit sowie eventuelle Beschädigungen und die Gurtreinigung überwacht. Zusätzlich kann die Beladung des Gurtes kontrolliert werden. Die Gurtposition kann mittels Magneteinlagen, welche im Gurt eingebracht sind, mittels RFID-System oder videoüberwacht verfolgt werden. Dadurch kann ein Schiefelauf erkannt werden, welcher zu Schäden am Gurt als auch am Stahlbau und zu erhöhtem Verschleiß an den Tragrollen führt. Um den Schiefelauf während des Betriebs zu korrigieren, können Zentriervorrichtungen verwendet werden. Ansonsten kann der Schiefelauf des Gurtes durch auf Sturz stellen der Tragrollen verhindert werden. Kommt es trotz dieser Maßnahmen zu einem kritischen Schiefelauf, kann die Anlage durch die zuvor erwähnten elektronischen Hilfsmittel oder durch mechanische Schalter, welche durch den Gurt betätigt werden, abgestellt werden. Die Geschwindigkeit des Gurtes wird einerseits gemessen, um den Volumenstrom zu ermitteln und andererseits, um einen möglichen Schlupf zu erkennen. Um den Schlupf zu bestimmen, muss zusätzlich die Umfangsgeschwindigkeit der Antriebstrommel gemessen werden. Die Differenz zwischen Umfangsgeschwindigkeit der Trommel und der Geschwindigkeit des Gurtes ergibt den Schlupf. Um den Massenstrom bestimmen zu können, muss der Volumenstrom bekannt sein. Dieser kann durch Radarsysteme, Laserscanner und seltener durch radioaktive Verfahren gemessen werden. Eine direkte Massenstrommessung kann mit Hilfe von Bandwaagen erfolgen. Die Gurtspannung kann mit Magneteinlagen, RFID-Sensoren oder durch Messen der Position der Spanngewichte bzw. durch Messen des Spannweges erfolgen. Dadurch kann auch gleichzeitig auf die Gurtdehnung rückgeschlossen werden. Einen sehr wichtigen Punkt bei der Gurtüberwachung stellt die Überprüfung auf Schäden dar, da eine nicht rechtzeitig erkannte Beschädigung des Gurtes sehr schnell zu einem größeren Gurtschaden führen kann, wodurch die Reparaturkosten stark ansteigen. Bei der Überwachung auf Schäden werden die Deckplatte sowie die Drahtkarkasse kontrolliert. Um Schäden an der Deckplatte zu detektieren, können wiederum RFID-Sensoren oder Magneteinlagen verwendet werden. Kommt es zum Verschleiß der Deckplatte, fallen diese Einlagen aus, wodurch der Verschleiß bestimmt werden kann. Des Öfteren kommen Laserkameras zum Einsatz, um die Gurtstärke zu messen und ein Oberflächenprofil zu erstellen. In seltenen Fällen werden auch Systeme mit Röntgenstrahlen verwendet, jedoch sind diese Systeme sehr

kostenintensiv und kommen somit nur bei sehr großen Anlagen zum Einsatz. Der Vorteil des Röntgensystems ist, dass auch die Gurteinlage kontrolliert werden kann. Als weitere Möglichkeiten die Gurteinlage zu kontrollieren, kommen magnetinduktive bzw. kapazitive Methoden zum Einsatz, bei denen eine Veränderung des magnetischen Flusses detektiert wird. Letztere funktionieren jedoch nur bei Gurten mit Metalleinlagen. Um Risse im Gurt zu finden, kann wieder das RFID- System Anwendung finden. Alternativ dazu können im Gurt Leiterschleifen eingearbeitet sein, welche bei Bruch die betroffene Stelle anzeigen. Für oberflächliche Risse kann auch zusätzlich ein Lasersystem verwendet werden. (Lanthaler 2011, S. 45-78)

2.5.2 Personensicherheit

Die Personensicherheit kann durch konstruktive Maßnahmen oder durch zusätzlich installierte Sicherheitseinrichtungen gewährleistet bzw. erhöht werden. Bei der Konstruktion von Gurtförderanlagen sind die allgemeinen Sicherheitsbestimmungen der Norm EN 620:2011 einzuhalten. Nach dieser Norm müssen die Anlagen so ausgeführt werden, dass eine Schutzvorrichtung gegen Einzug von Körperteilen als auch von Werkzeug, welches in weiterer Folge umherschlagen könnte, an kritischen Stellen vorhanden ist. Diese kritischen Stellen sind besonders jene, an welchen der Gurt gespannt ist und nicht ausweichen kann. Dies ist der Fall an der Aufgabeschurre, den Umlenktrommeln, den Tragrollen sowie bei den Bandabstreifern. Um ein Einziehen zu verhindern, können Füllstücke, welche in Form von Keilen vor den sich drehenden Teilen montiert werden, verwendet werden oder die Stellen mit geeigneten Einhausungen abgedeckt werden. Ist es erforderlich, die Anlage im Betrieb zu übersteigen bzw. unterhalb zu queren, muss die Anlage so abgedeckt sein, dass es bei einem Sturz zu keinem Kontakt mit beweglichen Teilen kommen kann. Des Weiteren muss die Anlage über einen Schutz gegen herabfallendes Schüttgut verfügen. Dies können Einhausungen sein, welche den Vorteil mit sich bringen, dass das Fördergut vor Umwelteinflüssen als auch die Umwelt vor Emissionen geschützt ist. Einen großen Nachteil stellen diverse Abdeckungen bei Wartungs- oder Reparaturarbeiten dar, da sie zumeist abmontiert werden müssen. Hinzu kommt, dass die Sicht auf die mechanischen Komponenten stark eingeschränkt wird, wodurch Kontrollen erschwert werden. (Lanthaler 2011, S. 89-93)

Als zusätzliche Signaleinrichtungen kommen akustische und optische Signale zum Einsatz. So wird beim Anfahren der Anlage ein akustisches Signal gegeben, um Personen, welche sich nahe der Anlage befinden, auf den Anlauf aufmerksam zu machen. Zusätzlich kann über Ampeln der Betriebsstatus der Förderanlage signalisiert werden. Die Anlagen müssen auch über eine Not-Befehlseinrichtung verfügen, womit ein Abstellen der Anlage bei Störung oder einem Unfall an jeder Stelle entlang der Förderanlage möglich ist, sofern diese frei zugänglich ist. In den meisten Fällen werden dafür Reißleinen, welche entlang der gesamten Förderstrecke gespannt sind, verwendet. Ein Bruch dieser Reißleinen muss ebenfalls zum Abstellen des Förderbandes führen. (Lanthaler 2011, S. 93-95)

3 Voraussetzungen und Bestand

3.1 Voraussetzungen

Am Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre stehen vier Förderbänder zur Verfügung. Diese Förderbänder sollen in einer vom Lehrstuhl gemieteten Halle zu Versuchszwecken so angeordnet werden, dass Fördergut im Kreis gefördert werden kann. Der Antrieb der Förderbänder erfolgt über vier Asynchronmotoren. Für den Förderkreislauf soll eine Steuerung konzipiert werden, um Versuche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Massenströmen durchführen zu können. Um das Verhalten einer Feststoffturbine untersuchen zu können, soll für diese ein Prüfstand entwickelt und anschließend gefertigt werden. Der Prüfstand soll in den Förderkreislauf integriert werden können und über die Möglichkeit verfügen, Energie zu rekuperieren.

3.2 Bestand

3.2.1 Gurtförderanlagen

Die Gurtförderer haben eine Länge von jeweils 5,6 m und eine Gurtbreite von 400 mm. Die Muldung des Gurtes kann bis zu einem Muldungswinkel von 45° eingestellt werden. Die Neigung der Förderbänder kann in einem Stellbereich von $\pm 20^\circ$ stufenlos über elektrische Seilwinden verstellt werden. In Abbildung 69 ist eines der vier identen Förderbänder abgebildet.

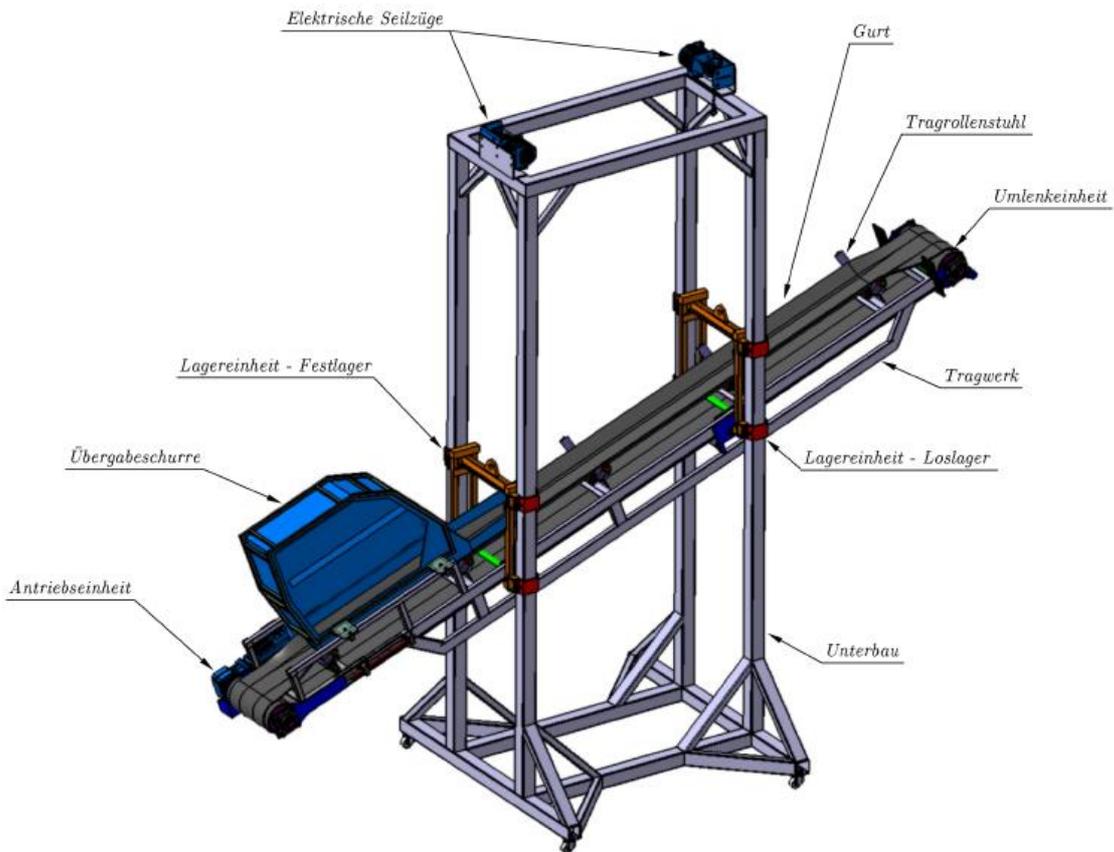


Abbildung 69: Vorhandener Gurtförderer (Golob und Schäfer 2014, S. 104)

Als Antrieb verfügen die Förderbänder über einen Asynchronmotor von Siemens mit Kegelradgetriebe und einer Leistung von 2,2 kW. Die Nenndrehzahl des Getriebemotors liegt bei 228 U/min. In Abbildung 70 ist das Typenschild des Getriebemotors abgebildet. Mit diesem Antrieb ist ein maximaler Massenstrom von 265 t/h bei einer maximalen Geschwindigkeit von 2,5 m/s möglich. Diese Förderbänder werden, wie in Abbildung 71 gezeigt, zu einem Förderkreislauf verbunden.



Abbildung 70: Typenschild des Getriebemotors

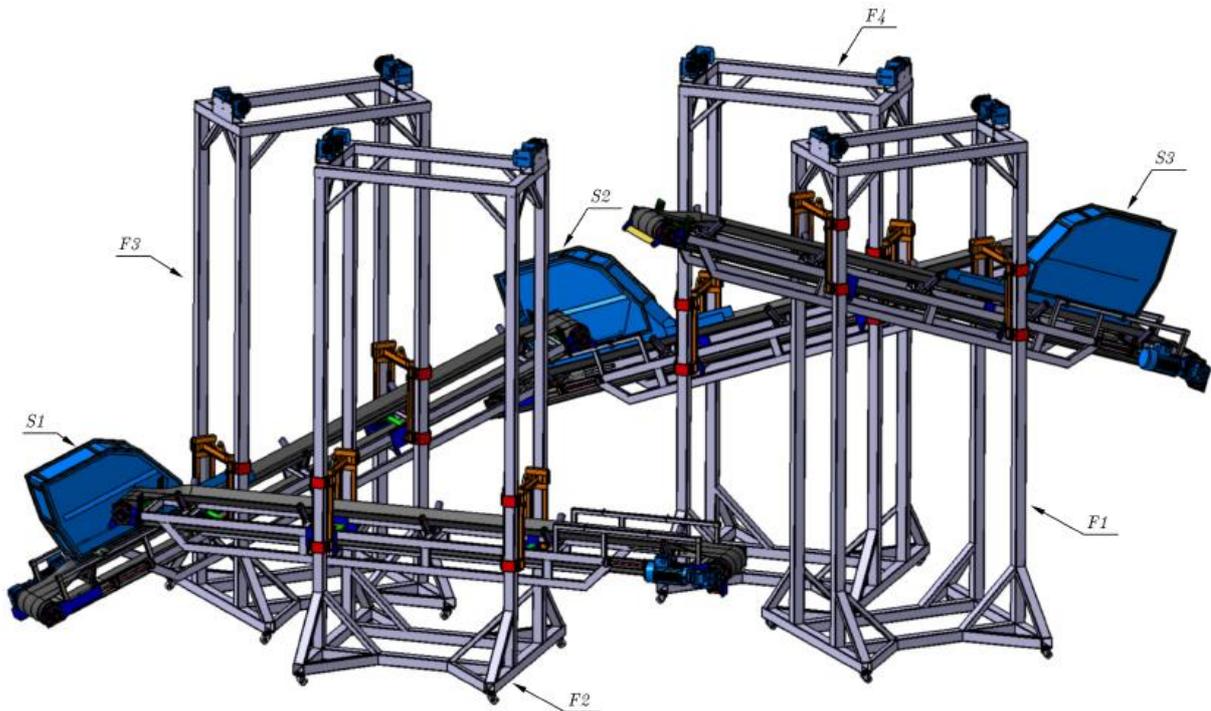


Abbildung 71: Anordnung der Förderbänder zu einem Kreislauf (Golob und Schäfer 2014, S. 108)

3.2.2 Feststoffturbine

Bei der vorhandenen Feststoffturbine handelt es sich um eine von Herrn Dr. Prenner entwickelte Turbine. Die Anströmung der Turbine erfolgt überschlächtig. Die Turbine hat einen Durchmesser von 766 mm und eine Breite von 806 mm. In Abbildung 72 ist die Turbine mit allen Abmessungen abgebildet. Die Turbine besitzt 10 Schaufeln, welche aus gekantetem Blech gefertigt sind. Die Übertragung des Drehmoments erfolgt über zwei Wellenflansche, welche an der Stirnseite mit den seitlich angeordneten Blechen der Turbine über Schraubenverbindungen befestigt sind. Von diesen beiden Flanschen wird das Drehmoment mittels Klemmschrauben an eine durchgehende Turbinenwelle übertragen.

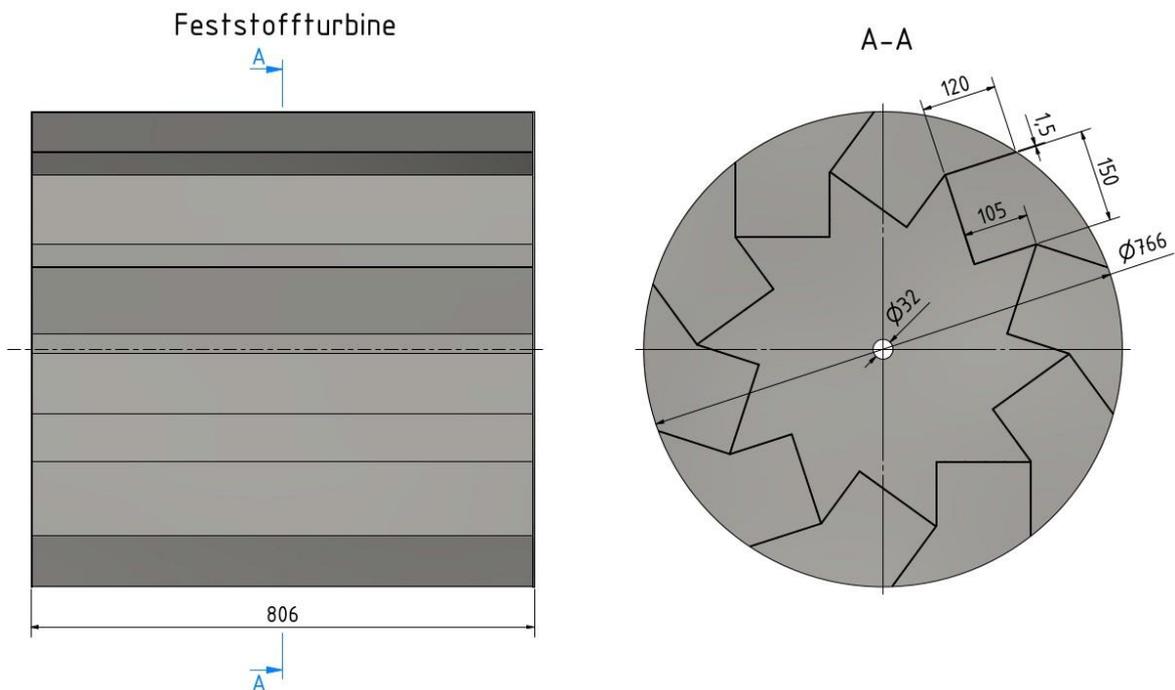


Abbildung 72: Abmessungen der Turbine [mm]

4 Anlagensteuerung

4.1 Anforderungen an die Steuerung

Damit die Anlage für eine Vielzahl von unterschiedlichen Versuchen verwendet werden kann, muss die Möglichkeit bestehen, die Geschwindigkeit und die Steigung der Förderbänder individuell steuern zu können. Um die Anlage universell einsetzbar zu machen, sollte die Geschwindigkeit jedes Förderbandes einzeln und stufenlos verstellt werden können. Dasselbe gilt für die Steigung der Förderbänder. Darüber hinaus sollte auch ein möglichst einfacher Synchronlauf der Gurtförderanlagen realisiert werden. Der Betriebszustand der einzelnen Förderbänder soll über ein optisches Zustandssignal erkennbar sein. Die Steuerung sollte den sicherheitstechnischen Anforderungen entsprechen und über eine NOT-AUS-Funktion verfügen. Zusätzlich sollte die Steuerung einen thermischen Motorschutz und Frequenzumrichter Schutz besitzen.

4.2 Steuerungskonzept

Die gesamte Anlage wird über einen Antriebsschaltschrank gesteuert. Ein mögliches Layout des Bedienfeldes ist in Abbildung 73 dargestellt. Über einen Hauptschalter kann die Anlage in Betrieb genommen werden. Die Steuerung der vier Förderbänder kann synchron oder separat erfolgen. Im Folgenden werden die Funktionen für ein Förderband beschrieben. Diese Steuerung kann jedoch auch synchron für alle vier Förderbänder erfolgen. Die Implementierung der Neigungsverstellung der Förderbänder ist optional und kann bei Bedarf erfolgen.

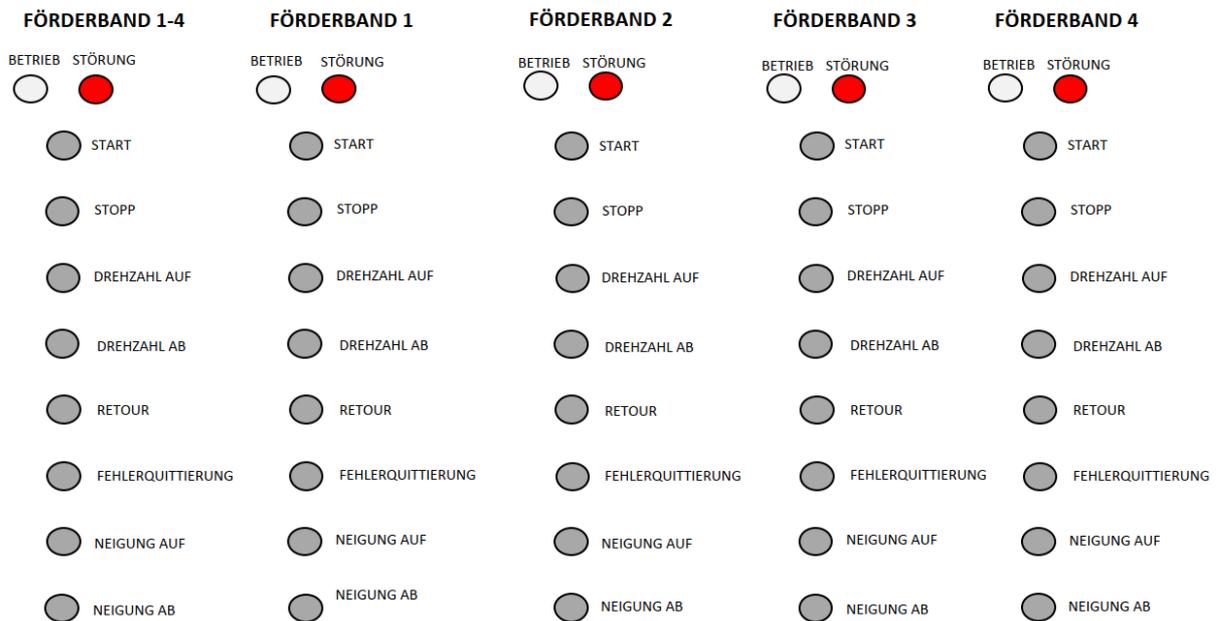


Abbildung 73: Layout des Bedienfeldes

Um ein Förderband zu starten, wird der Taster „Start“ betätigt. Durch die Betätigung läuft das Förderband bis zu einer vordefinierten Drehzahl hoch. Nun kann über die zwei Taster „Drehzahl Auf“ und „Drehzahl Ab“ die Geschwindigkeit des Förderbandes erhöht bzw. gesenkt werden. Wenn das Förderband in Betrieb ist, wird dies über eine weiße LED angezeigt. Über den Taster „Stopp“ kann das Förderband angehalten werden. Durch betätigen des Tasters „Retour“ kann das Förderband mit einer festgelegten Geschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung betrieben werden. Sollte es zu einer Störung kommen, wird das Förderband angehalten und die Störung über eine rote LED angezeigt. Wenn die Störung behoben wurde, kann über einen Taster „Fehlerquittierung“ die Störung quittiert werden und die Anlage kann wieder in Betrieb genommen werden. Die Neigungsverstellung erfolgt über die Taster „Neigung Auf“ und „Neigung Ab“. Um die gesamte Anlage im Notfall stillzusetzen, verfügt der Schaltschrank über einen NOT-AUS-Schalter, wodurch die Anlage vom Netz getrennt wird.

4.3 Elektrischer Aufbau

Die elektrische Anspeisung der Anlage erfolgt über einen fünfpoligen CEE-Stecker, über den der Schaltschrank an das Stromnetz angeschlossen wird. Über eine Hauptklemme erfolgt die Verteilung der drei Phasen im Schaltschrank. Von dieser Hauptklemme werden die Phasen über einen NOT-AUS-Schalter weiter zum Hauptschalter geführt. Damit die Antriebe nicht in die falsche Richtung anlaufen können, wird ein Phasenfolgerelais installiert. Für die Versorgung mit 24V Gleichstrom wird ein Schaltnetzteil verwendet, welches über einen Schutzschalter mit den drei Phasen verbunden wird. Für die logische Verknüpfung der Eingaben wird eine speicherprogrammierbare Steuerung, kurz SPS genannt, verwendet. Die Beschaltung der digitalen Eingänge dieser SPS erfolgt ebenfalls über den 24V DC-Stromkreis. Über die digitalen Ausgänge der SPS wird ein Frequenzumrichter angesteuert, welcher die Frequenz und die Spannung für den Motor steuert. Dieser Frequenzumrichter wird über einen Schutzschalter an die drei Phasen angeschlossen. An den Drei-Phasen-Ausgang des Frequenzumrichters wird der Asynchronmotor angeklemmt. Über zwei digitale Ausgänge am Frequenzumrichter werden die beiden Leuchtdioden geschaltet. Der Schaltplan des beschriebenen Aufbaus der elektrischen Schaltung ist dem Anhang 4 zu entnehmen. In der Tabelle 1 ist eine Kostenaufstellung mit den Komponenten, welche für dieses Konzept nötig sind, aufgelistet.

Kostenaufstellung 2,2 kW Antriebssteuerung					
Kosten pro Antrieb					
POS	Benennung	Typ (Beispiel)	Preis/Stück [€]	Menge [Stk.]	Gesamtpreis [€]
1	Frequenzumrichter	Siemens SINAMICS V20 2,2kW	309	1	309
2	Leistungsschütz	Siemens SIRIUS	26,64	2	53,28
3	SPS Erweiterungsmodul	Siemens LOGO! 8 Erweiterungsmodul	91	1	91
4	Drucktaster		7,29	6	43,74
5	Leuchtmelder		3,38	2	6,76
				SUMME	503,78
Allgemeine Kosten					
POS	Benennung	Typ (Beispiel)	Preis/Stück [€]	Menge [Stk.]	Gesamtpreis [€]
6	SPS	Siemens LOGO! 8 12/24RCE	116	2	232
7	Programmiersoftware	Siemens LOGO! Soft Comfort V8	45	1	45
8	Spannungswandler/ Gleichrichter	Schaltnetzteil PHOENIX 10A	119	1	119
9	Schaltschrank	600 x 800 x 210 mm (H x B x T)	130	1	130
10	Hauptschalter		15,3	1	15,3
11	NOT-AUS-Schalter		21,26	1	21,26
12	Leistungsschütz	Siemens SIRIUS	26,64	2	53,28
13	Diverses Verbindungsmaterial	Leitungen/Stecker	400	1	400
14	Drucktaster		7,29	5	36,45
				SUMME	1052,29
Gesamtkosten 4x2,2kW Antrieb					
POS	Benennung	Typ (Beispiel)	Preis/Stück [€]	Menge [Stk.]	Gesamtpreis [€]
	Kosten pro Antrieb		503,78	4	2015,12
	Allgemeine Kosten		1052,29	1	1052,29
				SUMME	3067,41

Preise exkl. MwSt.

Tabelle 1: Kostenaufstellung des Steuerungskonzeptes

5 Beschaltung des Generators und Aufbau des Schaltschranks

Um den verwendeten Asynchronmotor als Generator betreiben zu können, musste dieser, wie in Kapitel 2.2.5 dargelegt, mit drei Kondensatoren bestückt werden. Zwischen jeder der drei Phasen des Motors wurde in Dreieckschaltung ein Kondensator geschlossen. Bei der Berechnung der Kapazität nach Gleichung 1 und Gleichung 2, siehe Kapitel 2.2.5, ergab sich bei einer Spannung von 400 V, einem maximalen Strom von 0,95 A und einer Frequenz von 50 Hz eine Kapazität von 7,56 μF . Um die Kapazität bei den Versuchen variieren zu können, wurden Kondensatoren mit 2 μF , 5 μF und 8 μF gewählt.

Damit die Nennspannung des Motors nicht überschritten werden kann, wurde ein Spannungssteuerungsrelais mit Ober- und Unterspannungsüberwachung verwendet. Bei Überschreiten des eingestellten Schwellwertes schaltet das Relais ein weiteres Relais, welches den Kontakt zwischen den Kondensatoren und den drei Phasen der Asynchronmaschine unterbricht. Dies hat zur Folge, dass die Erregung des Generators zusammenbricht und keine Spannung mehr in die Statorwicklungen induziert wird. Die Begrenzung der Spannung nach unten ist erforderlich, da bei zu hoher Last die Spannung so weit abfallen würde, dass die Kondensatoren nicht mehr in der Lage, wären mit den Spulen einen schwingfähigen Schwingkreis zu erzeugen. Dadurch würde der Generator nicht mehr erregt werden. Diese Funktion des Spannungssteuerungsrelais kann bei Bedarf aktiviert werden. Damit der Nennstrom des Generators nicht durch die Last überschritten wird und es zu keiner Schädigung der Wicklungen kommt, wird ein Motorschutzschalter verwendet. Kommt es zum Überschreiten des eingestellten Stromwertes, unterbricht dieser den Kontakt zum Generator.

Aus Sicherheitsgründen wird, um im Notfall die Steuerung der Asynchronmaschine spannungsfrei zu machen, ein NOT-AUS-Schalter vorgesehen. Über einen weiteren Schalter kann die Last zu- bzw. weggeschaltet werden. Als Last dienen verstellbare Widerstände, welche zusätzlich mit Festwiderständen zusammen geschaltet werden, um den gewünschten Widerstandswert zu erhalten. Der Verstellbereich der Widerstände liegt bei ca. 500 Ω und pro Phase wird ein Verstellwiderstand benötigt. Die drei Widerstände werden in Sternschaltung mit den drei Phasen des Generators verbunden. Da die Last symmetrisch ist, erhält man die Gesamtleistung nach Gleichung 17 aus Kapitel 2.4.3. Durch Messen der Spannung an einer Phase und bei bekanntem Widerstand lässt sich die Leistung pro Phase mit Gleichung 10 errechnen.

5.1 Elektrische Schaltung

Die Schaltung besteht aus einem Steuerstromkreis und einem Leistungsstromkreis. Über den Steuerstromkreis erfolgt die Zuschaltung bzw. Trennung der Kondensatoren von der Asynchronmaschine. Im Folgenden werden die beiden Stromkreise, deren Aufbau sowie deren Funktion näher beschrieben.

5.1.1 Leistungsstromkreis

Der Leistungsstromkreis besteht aus dem dreiphasigen Eingang, welcher mit der Asynchronmaschine verbunden ist, und dem Ausgang, an welchem die Belastung angeschlossen werden kann. Die Absicherung der Asynchronmaschine erfolgt über einen Motorschutzschalter. Dieser begrenzt den maximalen Strom auf einen eingestellten Wert von 1,2 A. Über ein vom Steuerstromkreis angesteuertes Relais werden die Kondensatoren in Dreieckschaltung an die drei Phasen der Asynchronmaschine zugeschaltet bzw. davon getrennt. Eine zusätzliche Absicherung erfolgt am Ausgang über einen Leitungsschutzschalter. Dieser trennt die Last vom Generator, wenn ein Strom von 2A überschritten wird. Der Schaltplan des Leistungsstromkreises ist in Abbildung 74 dargestellt. Darin ist auch die Last, welche über drei Verstellwiderstände simuliert wird, zu erkennen. Die Last kann über einen zusätzlichen Leistungsschalter geschaltet werden. Als Überspannungsschutz wird ein Spannungssteuerungsrelais verwendet. Dieses überwacht die Spannung und schaltet bei Über- und/oder Unterspannung. Um die Spannung direkt am Schaltschrank ablesen zu können, wurde ein analoges Dreheisenmesswerk zur Spannungsmessung verbaut.

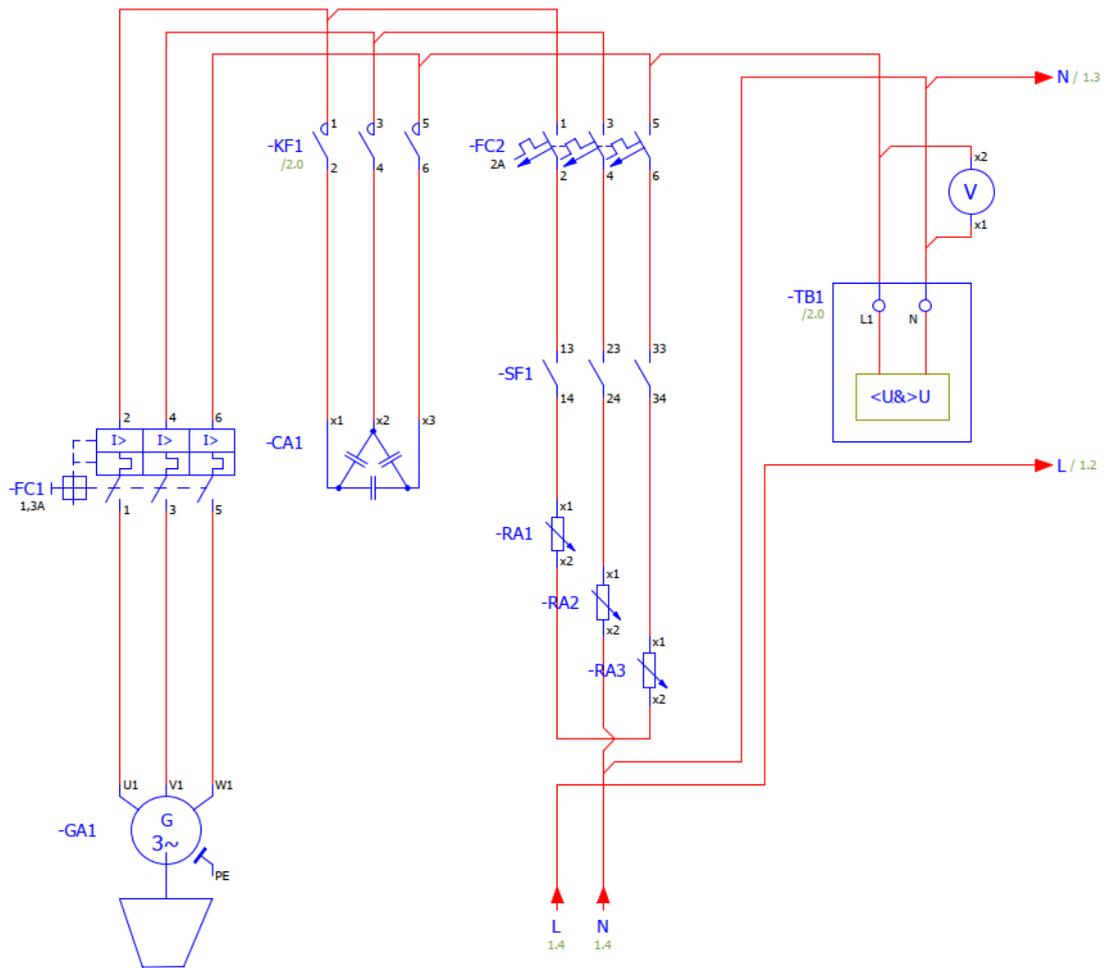


Abbildung 74: Schaltplan des Leistungsstromkreises

5.1.2 Steuerstromkreis

Als Spannung für den Steuerstromkreis wurde 230 V gewählt, da in diesem Fall auf ein Netzteil zur Gleichrichtung und Spannungstransformation verzichtet werden kann. Die Versorgung erfolgt über einen Schutzkontaktstecker, über welchen der Schaltschrank an das Stromnetz angeschlossen wird. Abgesichert wird der Steuerstromkreis über einen 2 A-Leitungsschutzschalter. Über einen NOT-AUS-Schalter wird die Spannungsversorgung aktiviert bzw. deaktiviert. Mittels eines roten Leuchttasters wird der Status angezeigt, also ob die Kondensatoren mit der Asynchronmaschine verbunden sind oder nicht. Leuchtet der Taster, bedeutet dies, dass die Kondensatoren getrennt sind. Durch Betätigung des Tasters wird über eine Selbsthalteschaltung ein Relais geschaltet, welches die Kondensatoren mit der Asynchronmaschine verbindet. Wird die am Spannungssteuerungsrelais eingestellte maximale Spannung erreicht, schaltet dieses, wodurch der Kontakt für die Selbsthaltefunktion unterbrochen wird. Dadurch werden die Kondensatoren von der Asynchronmaschine getrennt und es wird keine Spannung mehr erzeugt. Eine Betätigung des NOT-AUS-Tasters führt ebenfalls zu einer Unterbrechung der Selbsthaltefunktion und somit zu einem Trennvorgang der Kondensatoren. Abbildung 75 zeigt den Schaltplan des Steuerstromkreises.

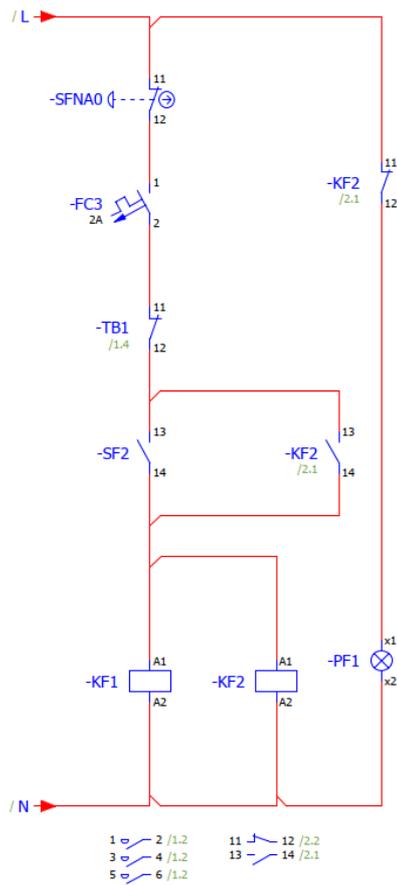


Abbildung 75: Schaltplan des Steuerstromkreises

Die beiden beschriebenen Stromkreise wurden, mit Ausnahme der verstellbaren Widerstände, im Schaltschrank verbaut. Die Widerstände wurden deswegen nicht im Schaltschrank verbaut, da es von Vorteil ist, wenn diese zum Verstellen des Widerstandswertes frei zugänglich sind. Abbildung 76 zeigt den inneren Aufbau des Schaltschranks. In Abbildung 77 ist die Schaltung der Widerstände abgebildet.

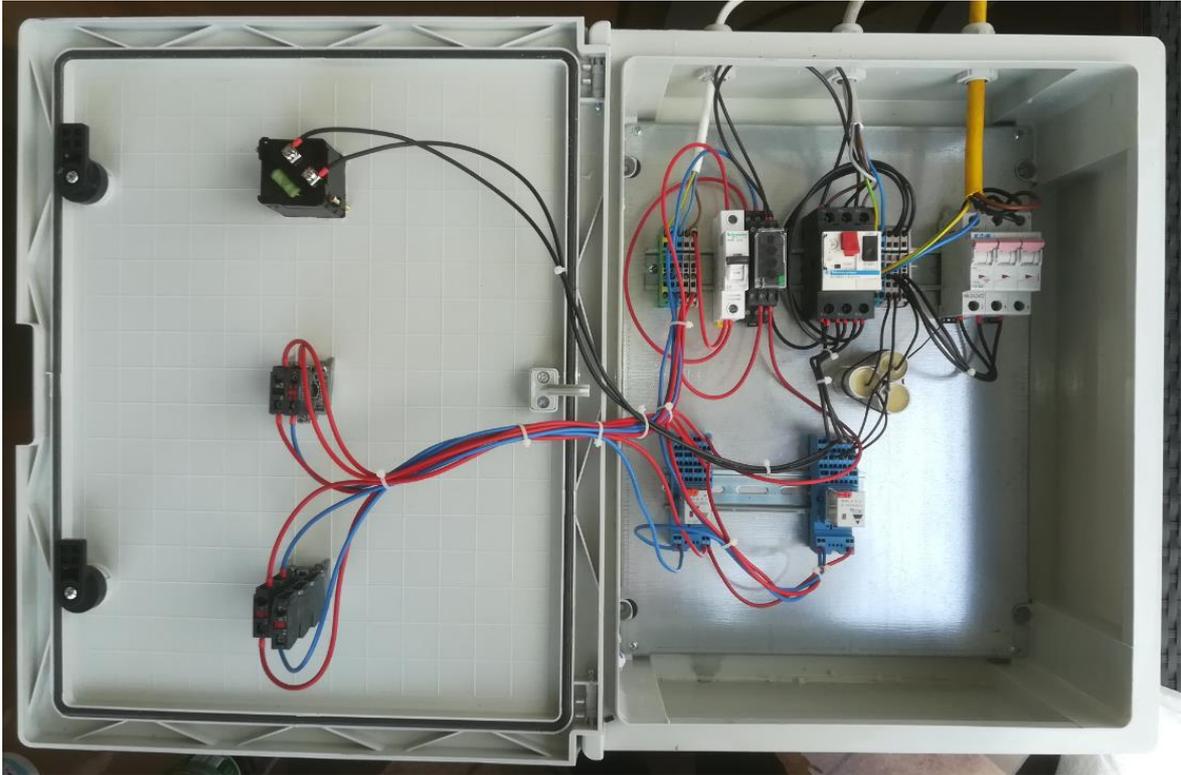


Abbildung 76: Innerer Aufbau des Schaltschranks



Abbildung 77: Schaltung der Widerstände

6 Prüfstand

6.1 Anforderungen an den Prüfstand

Mit dem Prüfstand sollen Versuche mit Feststoffturbinen durchgeführt werden. Untersucht werden soll das Verhalten der Turbinen bei unterschiedlichen Positionierungen entlang des Fördergutstromes. Des Weiteren sollen Versuche mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt werden. Dabei können sich diese durch ihre Schüttdichte, ihre Partikelgröße sowie deren Partikelgeometrie unterscheiden. Zusätzlich soll auch das Verhalten der Turbinen bei unterschiedlichen Massenströmen beurteilt werden können. Darüber hinaus soll eine Aussage über das Verschleißverhalten als auch über das Anbacken des Materials getroffen werden können. Sofern die Abmessungen der Turbinen ähnlich bleiben, sollten auch Turbinen mit anderen Schaufelgeometrien verwendet werden können. Die durch die Turbine erzeugte Leistung soll in Form von elektrischer Leistung abgenommen werden können. Die Abmessungen des Prüfstandes sind so auszulegen, dass dieser in den Förderkreislauf eingebunden werden kann.

6.2 Diskrete-Elemente-Simulation

Zur Abschätzung der gewinnbaren Leistung sowie der bestmöglichen Betriebsverhältnisse der Turbine und um Daten für die Konstruktion zu erhalten, wurden Simulationen mit Hilfe der Diskrete-Elemente-Methode durchgeführt. Als Simulationsprogramm wurde *ThreeParticle* von *Becker 3D GmbH* verwendet.

6.2.1 Simulationsaufbau

Ziel der Simulationen war es einerseits Werte für die optimale Positionierung der Turbine in Bezug auf den Abwurfpunkt zu finden, um dadurch eine bestmögliche Anströmung der Turbine zu gewährleisten. Andererseits sollten durch die Simulationen Daten für die Drehzahl und das Drehmoment der Turbine sowie die Reaktionskräfte, welche auf die Turbinenwelle wirken, ermittelt werden. Diese Daten werden für die Auslegung des Prüfstandes benötigt. Für den Aufbau der Simulationen wurde zu Beginn ein 3D-Modell der Turbine und des zubringenden Förderbandes erstellt. Diese wurden in das Simulationsprogramm importiert und wie in Abbildung 78 ersichtlich positioniert. Mit diesem grundsätzlichen Aufbau wurden die ersten Simulationsreihen durchgeführt, deren Parameter und Ergebnisse im Folgenden diskutiert werden.

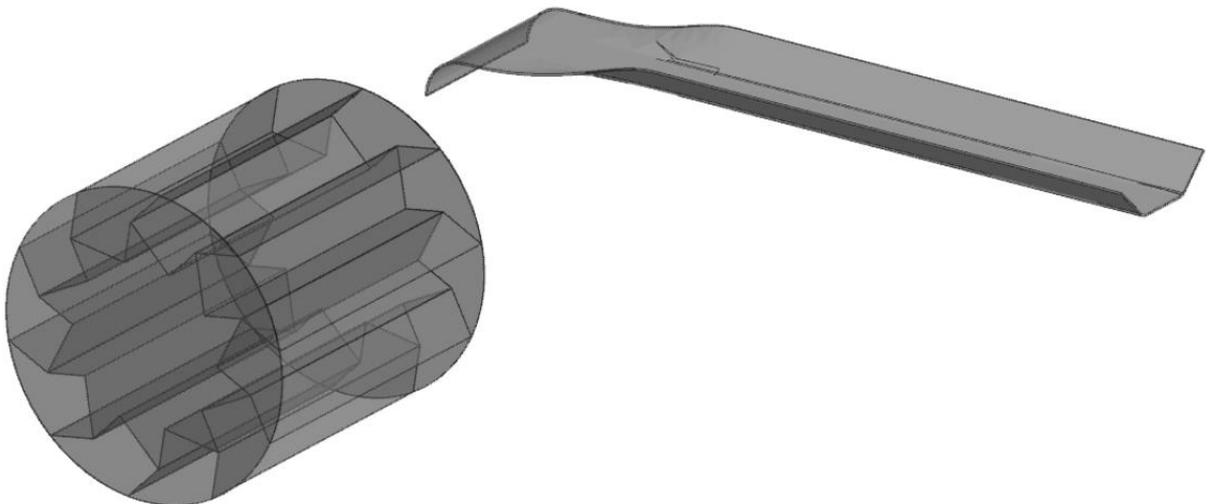


Abbildung 78: Aufbau der Simulation

Die erste Simulationsreihe diente der Findung erster Werte für Drehzahl, Drehmoment und Rotationsenergie. Zu Beginn wurde eine Simulation ohne Turbine durchgeführt, um die Abwurfparabel zu ermitteln und um erste Abschätzungen für den Achsabstand zwischen Turbine und abwurfseitigen Förderbandtrommel treffen zu können. Anhand dieser Abstände wurde die in Abbildung 78 dargestellte Simulation aufgebaut. Für diese Simulationen wurden folgende Parameter angenommen bzw. festgelegt. Die Partikelgröße in diesen ersten Simulationen wurde mit einem Durchmesser von 20 mm angenommen, da die Verwendung von größeren Partikeln die Anzahl der Partikel bei gleichem Massenstrom reduziert und dadurch die Simulationszeit verkürzt wird. Für den Massenstrom wurden 25 kg/s, 50 kg/s und 100 kg/s gewählt. Als Geschwindigkeit der Förderbänder wurde die maximale Geschwindigkeit der Förderbänder herangezogen, welche bei 2,5 m/s liegt. Für die in der Simulation verwendeten Komponenten und deren Materialien wurden folgende Daten, welche der Tabelle 2 zu entnehmen sind, in das Simulationsprogramm eingegeben. Als Kontaktmodell wurde das Hertz-Mindlin Modell gewählt und die Interaktionsdaten zwischen den Komponenten sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Feststoffturbine/Schurre (Stahl)	
Dichte	7860 kg/m ³
Schubmodul	1 GPa
Poissonzahl	0,3
Schüttgut (Gestein)	
Feststoffdichte	2800 kg/m ³
Schubmodul	100 GPa
Poissonzahl	0,4
Deckplatte Fördergurt (Gummi/Kautschuk)	
Dichte	920 kg/m ³
Schubmodul	25 GPa
Poissonzahl	0,45

Tabelle 2: Materialeingabedaten

Partikel-Partikel	
Haftreibungskoeffizient	0,2
Rollreibungskoeffizient	0,01
Stoßzahl	0,3
Partikel-Fördergurt	
Haftreibungskoeffizient	0,4
Rollreibungskoeffizient	-
Stoßzahl	0,2
Partikel-Feststoffturbine/Schurre	
Haftreibungskoeffizient	0,15
Rollreibungskoeffizient	0,01
Stoßzahl	0,3

Tabelle 3: Interaktionsdaten

6.2.2 Simulationsergebnisse

Bei den Simulationen wurde ersichtlich, dass sich mit der Höhe des Massenstromes die optimale Position der Turbine ändert. Mit steigendem Massenstrom steigt die Beladung des zubringenden Förderbandes, wodurch die mittlere Abwurfhöhe zunimmt und dadurch geringfügig auch die Wurfweite. Abbildung 79 und Abbildung 80 zeigen einen Ausschnitt aus einer Simulation. Dabei ist sowohl die Geschwindigkeit der Partikel als auch die Drehzahl der Turbine, welche bei dieser Simulation auf 30 U/min begrenzt wurde, bei einem Massenstrom von 50 kg/s zu erkennen.

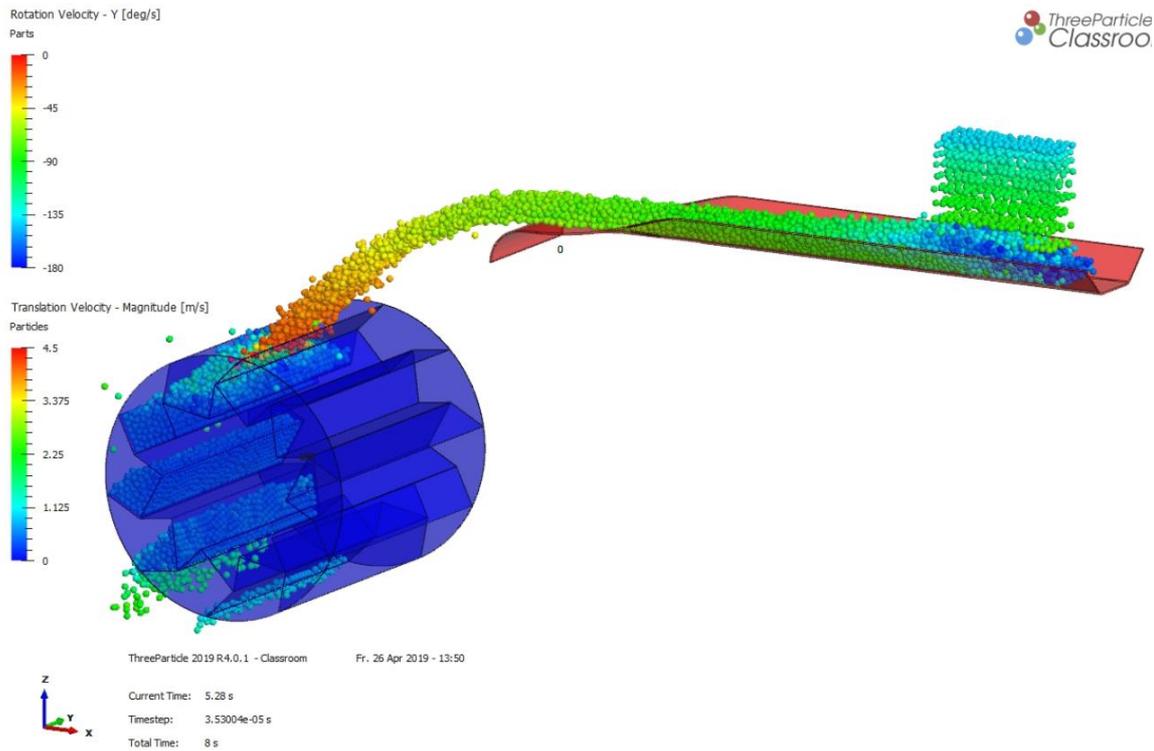


Abbildung 79: Isometrische Ansicht der Simulation

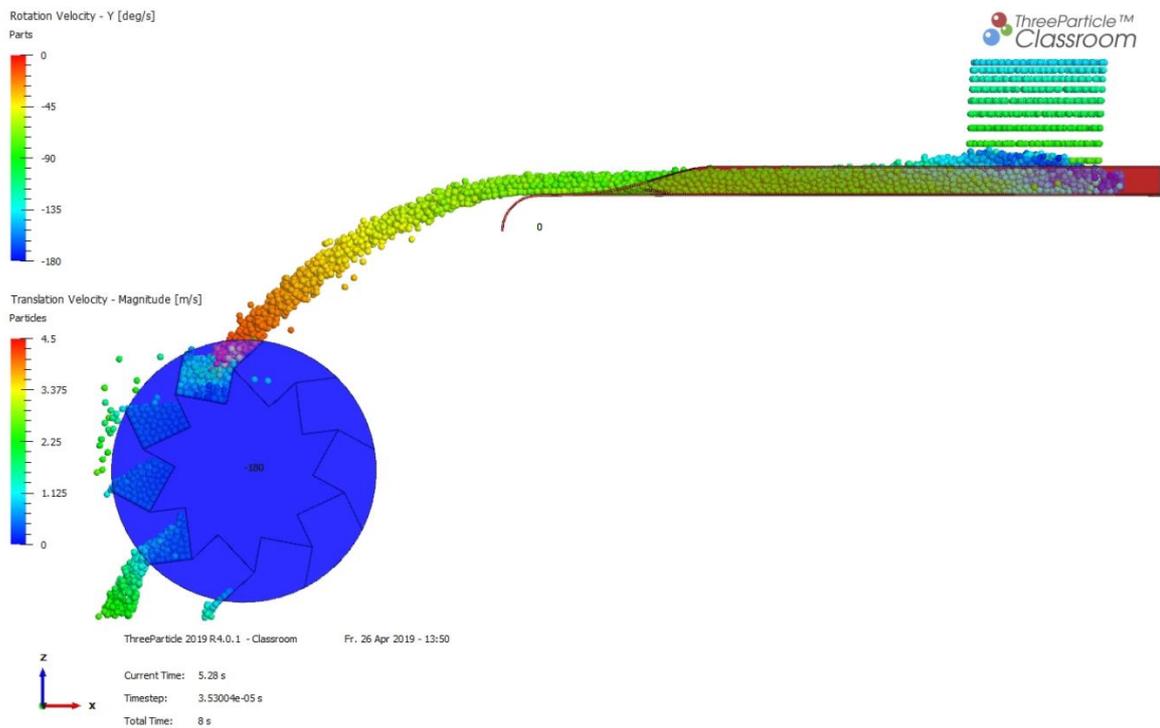


Abbildung 80: Vorderansicht der Simulation

Um die optimale Position der Turbine zu bestimmen, wurde die Simulation mit unterschiedlichen Turbinenpositionen durchgeführt. Durch Vergleichen der maximalen Leistung der jeweiligen Simulationen, konnten für die drei untersuchten Massenströme die optimalen Positionen der Turbine gefunden werden. Diese sind in Tabelle 4 aufgelistet, wobei die x-Richtung dem horizontalen Abstand und die z-Richtung dem vertikalen Abstand zwischen Turbinenachse und der Achse der Umlenktrömmel entspricht. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass es sich bei diesen Werten trotz der durchgeführten Simulationen um grobe Abschätzungen handelt, da die Bestimmung der optimalen Position den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde und diese Annäherungen für die Konstruktion des Prüfstandes ausreichend sind. Bei zusätzlicher Variation der y-Richtung könnte die Leistung wahrscheinlich geringfügig erhöht werden, jedoch in so geringem Ausmaß, dass es für die Konstruktion als nicht relevant gilt.

Massenstrom [kg/s]	x-Richtung [m]	z-Richtung [m]
25	0,76	0,7
50	0,85	0,7
100	0,89	0,7

Tabelle 4: Turbinenabstände

Die Daten, welche anhand der zuvor angeführten Turbinenpositionen ermittelt werden konnten, sind in Tabelle 5 aufgelistet. Zusätzlich ist in Abbildung 81 der zeitliche Verlauf der Leistung graphisch dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass es zu Beginn zu einer Spitze der Leistung kommt, da das Trägheitsmoment der Turbine überwunden werden muss. Danach fällt die Leistung auf einen annähernd gleichbleibenden Wert ab. Die maximale Drehzahl der Turbine wird aufgrund der Zentrifugalkraft, welche zu einer frühzeitigen Entladung der Schaufeln führt, begrenzt.

Massenstrom [kg/s]	Drehzahl [U/min]	Drehmoment [Nm]	Leistung [W]
25	40	45	188
50	50	60	314
100	55	67	388

Tabelle 5: Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei maximal erreichbarer Turbinendrehzahl

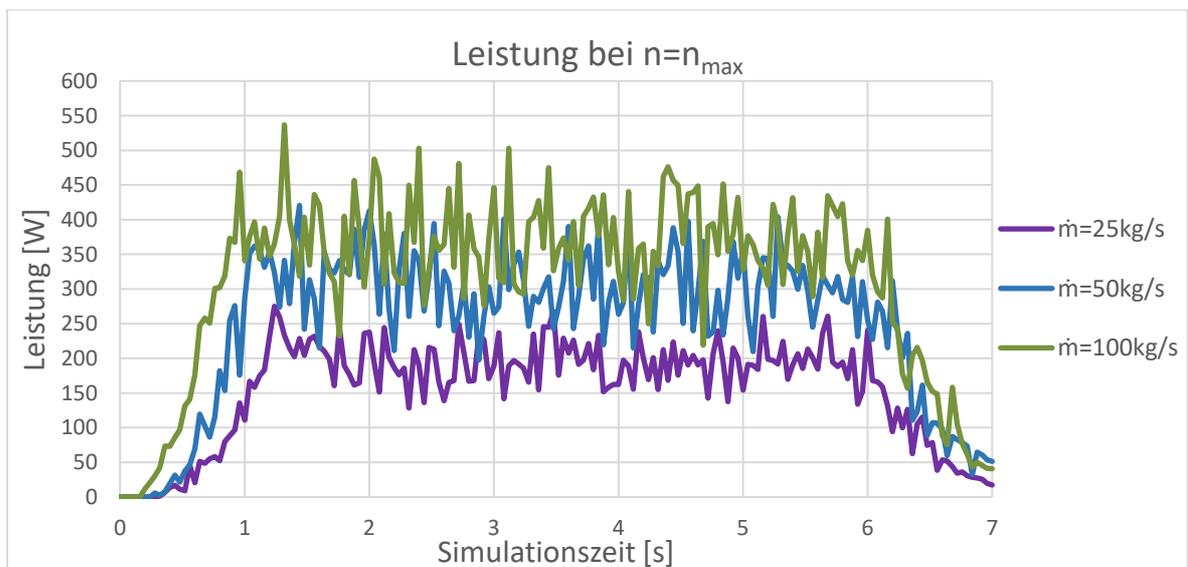


Abbildung 81: Leistung bei maximal erreichbarer Turbinendrehzahl

Bei der zweiten Simulationsreihe wurden alle zuvor getroffenen Einstellungen bezüglich der Positionen, der Massenströme, der Geschwindigkeit sowie der Partikelgröße beibehalten. Es wurde lediglich die Turbinendrehzahl auf 30 U/min begrenzt, um die Entleerung der Turbine zu verhindern und um das Drehmoment zu erhöhen. In Tabelle 6 sind die aus den Simulationen gewonnenen Werte aufgelistet. Dabei zeigt sich, dass es durch diese Drehzahlbegrenzung zu einem deutlichen Anstieg des Drehmomentes und der Leistung kommt. Der Verlauf der Leistung ist in Abbildung 82 dargestellt.

Massenstrom [kg/s]	Drehzahl [U/min]	Drehmoment [Nm]	Leistung [W]
25	30	95	298
50	30	160	502
100	30	170	534

Tabelle 6: Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 30 U/min

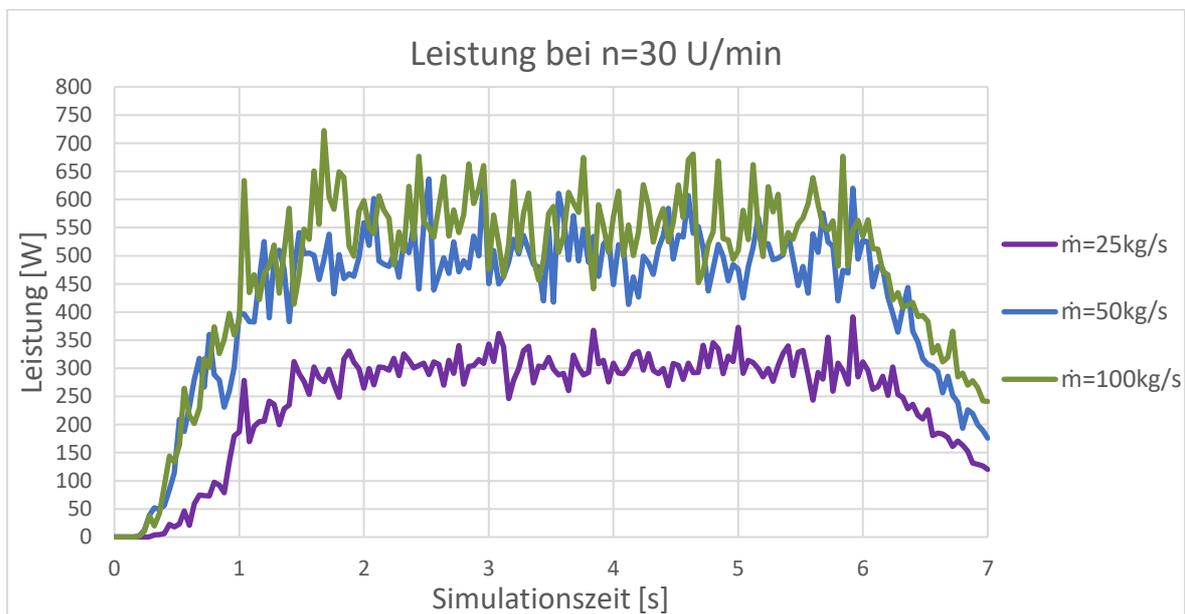


Abbildung 82: Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 30 U/min

Um die Auswirkung einer weiteren Drehzahlreduktion zu untersuchen, wurde die Drehzahl in der dritten Versuchsreihe auf 25 U/min herabgesetzt und nur mit den Massenströmen von 25 kg/s und 50 kg/s durchgeführt, da dies für eine Abschätzung der Tendenz ausreichend ist. Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass die Reduzierung der Drehzahl zwar einen Anstieg des Drehmomentes bewirkt, dieser jedoch aufgrund der niedrigeren Drehzahl zu keiner höheren Leistung führt. Abbildung 83 zeigt den Leistungsverlauf für eine Drehzahl von 25 U/min.

Massenstrom [kg/s]	Drehzahl [U/min]	Drehmoment [Nm]	Leistung [W]
25	25	109	286
50	25	174	455

Tabelle 7: Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 25 U/min

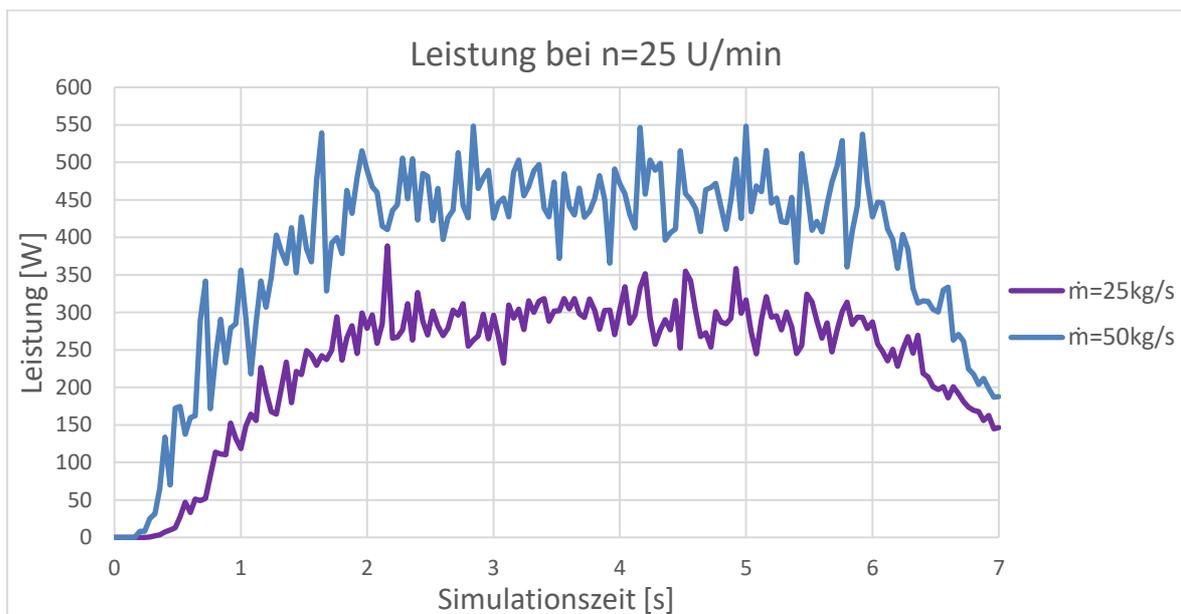


Abbildung 83: Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 25 U/min

Eine Gegenüberstellung der erhaltenen Leistungsverläufe für die unterschiedlichen Drehzahlen bei einem Massenstrom von 50 kg/s ist in Abbildung 84 dargestellt. Darin ist, wie bereits erwähnt, zu erkennen, dass die maximale Leistung bei einer Drehzahl von 30 U/min zu erwarten ist. Dasselbe Bild erhält man für die Massenströme von 25 bzw. 100 kg/s.

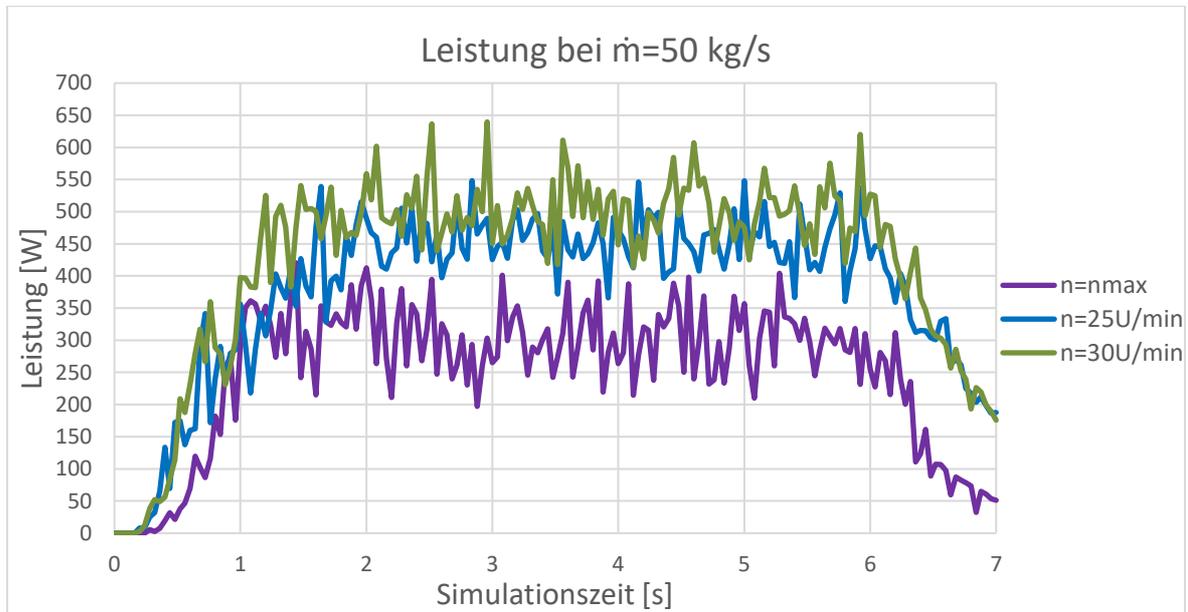


Abbildung 84: Leistung bei unterschiedlichen Drehzahlen

Aus den Simulationen wurden somit die maximalen auf die Turbinenwelle wirkenden Kraftkomponenten und das zu übertragende Drehmoment gewonnen. Die Maximalwerte für die Konstruktion treten bei der Simulation mit dem höchsten Massenstrom, welcher bei 100 kg/s liegt, auf. Für die Kraft wurden in vertikaler Richtung 850 N und in horizontaler Richtung 130 N ermittelt. Das maximale Drehmoment lag bei 200 Nm und die maximal zu erwartende Drehzahl bei 55 U/min wobei diese jeweils die Extremwerte aus den unterschiedlichen Simulationen darstellen. Mit diesen Daten wurde mit der Konstruktion des Prüfstandes, wie in Kapitel 6.3 näher beschrieben, begonnen. Dabei musste, um Materialverlust zu vermeiden und um eine sorgfältige Übergabe an das abziehende Förderband zu gewährleisten, eine geeignete Schurre entwickelt werden. Um die Funktionalität der Schurre zu überprüfen, wurde das 3D-Modell ebenfalls in die Simulation importiert. Zusätzlich wurde noch das abziehende Förderband nachgebildet. Mit diesem Aufbau, welcher in Abbildung 85 abgebildet ist, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Dazu wurden die Daten aus der Simulation mit dem Massenstrom von 50 kg/s und einer maximalen Turbinendrehzahl von 30 U/min übernommen.

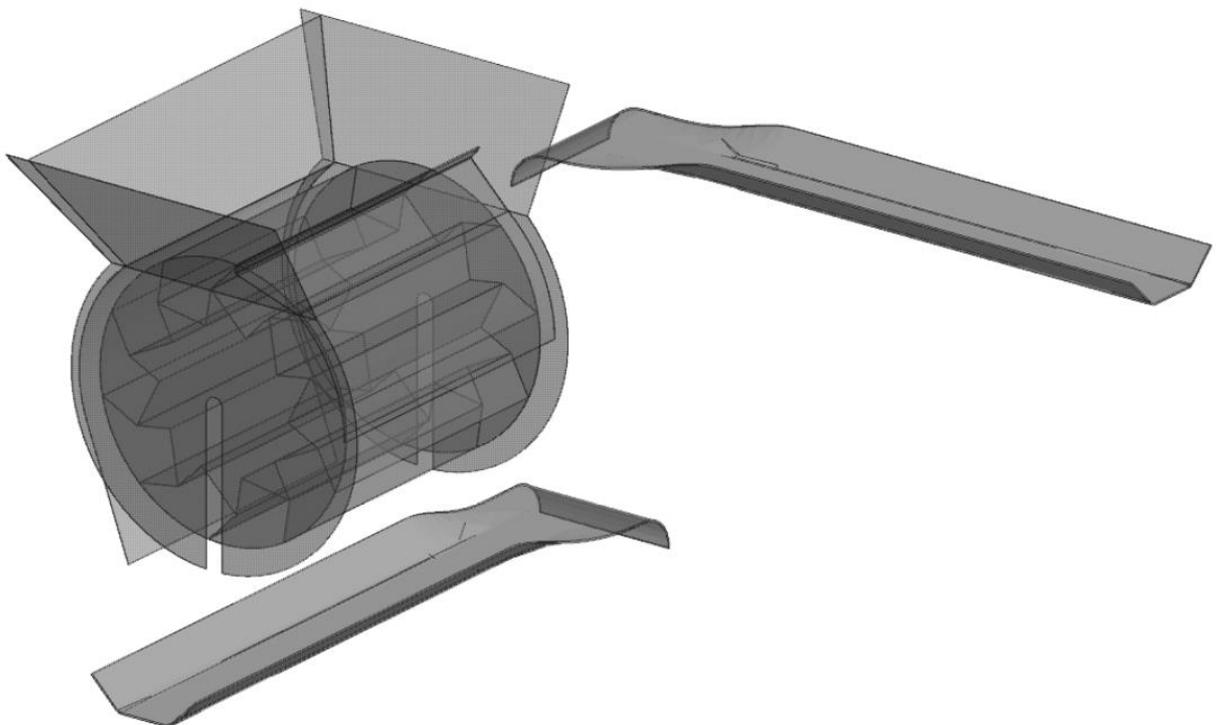


Abbildung 85: Simulationsaufbau mit Schurre

Wie sich zeigt, erfüllt die Schurre die erforderlichen Ansprüche und verhindert, dass jenes Material, welches frühzeitig aus der Schaufel austritt, den Förderkreislauf verlässt. Das Material wird durch die Schurre auf das abziehende Förderband weitergeleitet, wie die Abbildung 86 und Abbildung 87 zeigen. Dabei ist zu erkennen, dass aufgrund der Bewegungsgeschwindigkeit der Partikel in Querrichtung des abziehenden Förderbandes ein Teil der Partikel über den Fördergurtrand verloren geht. Um dies zu verhindern, muss an dieser Stelle ein zusätzliches Abweiserblech vorgesehen werden.

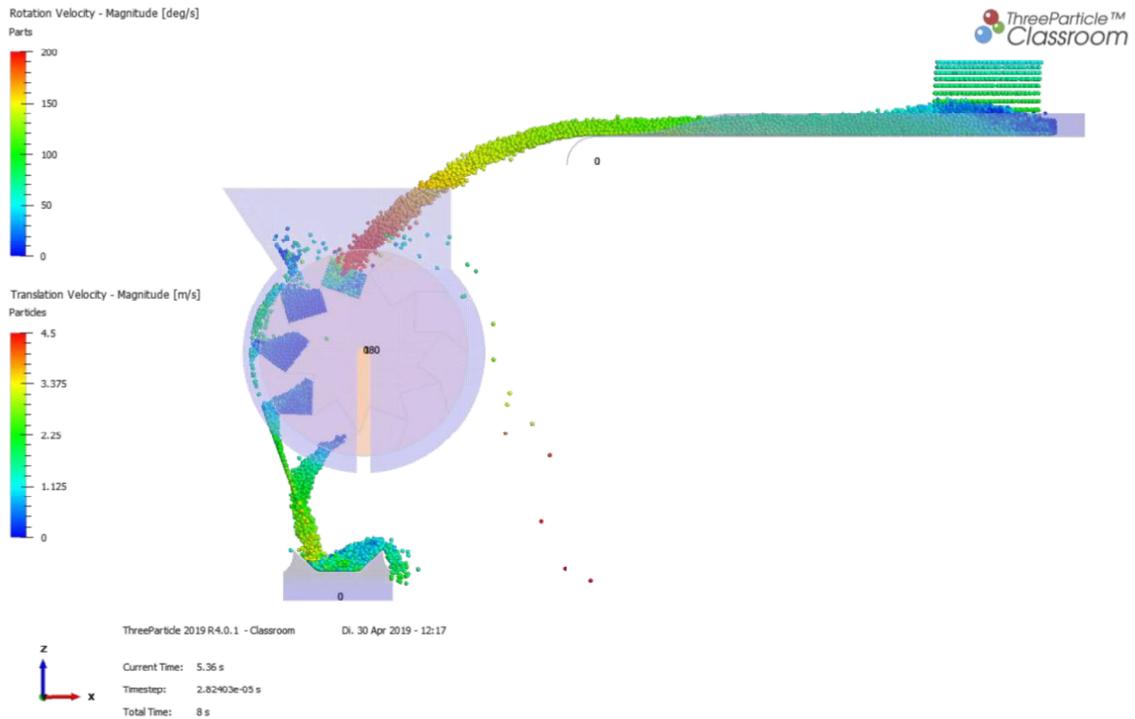


Abbildung 86: Vorderansicht der Simulation mit Schurre

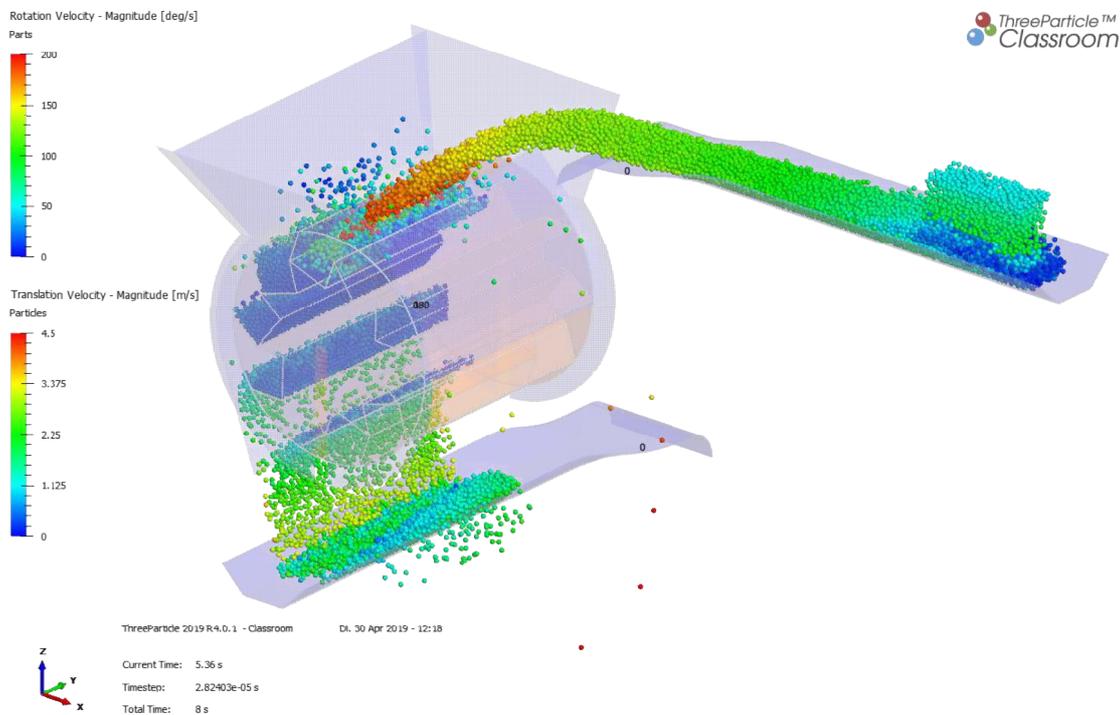


Abbildung 87: Isometrische Ansicht der Simulation mit Schurre

6.3 Rahmen des Prüfstandes

6.3.1 Anforderungen an den Rahmen

Der Rahmen dient in erster Linie der Aufnahme der Turbine sowie des Generators. Zusätzlich soll auf dem Rahmen eine Übergabeschurre montiert werden können, um ein Austreten des Schüttgutes zu verhindern. Die Abmessungen des Rahmens müssen an das abziehende Förderband angepasst werden, damit dieses unterhalb der Turbine und zwischen dem Rahmen verlaufen kann. Die auf die Turbine wirkenden Kräfte müssen über Lager in das Gestell übertragen werden, welches fix am Boden verankert werden soll, um die Kräfte in den Boden abzuleiten. Der Rahmen muss in der Lage sein, das auftretende Drehmoment des Generators abzustützen.

6.3.2 Aufbau des Rahmens

Der Rahmen wird in Form einer Stahlkonstruktion mit Stahlprofilen ausgeführt und aus zwei identischen Schweißbaugruppen, bestehend aus U-Profilen nach DIN 1026-1, aufgebaut. Diese zwei Baugruppen werden durch eine weitere Baugruppe, ebenfalls bestehend aus U-Profilen, über einen Stirnplattenanschluss mittels Schraubenverbindung verbunden. In Abbildung 88 ist der Rahmen mit den zugehörigen Baugruppen abgebildet. Zur Erhöhung der Stabilität ist, wie in Abbildung 88 ersichtlich, ein Diagonalverband bestehend aus Winkelprofilen vorgesehen.

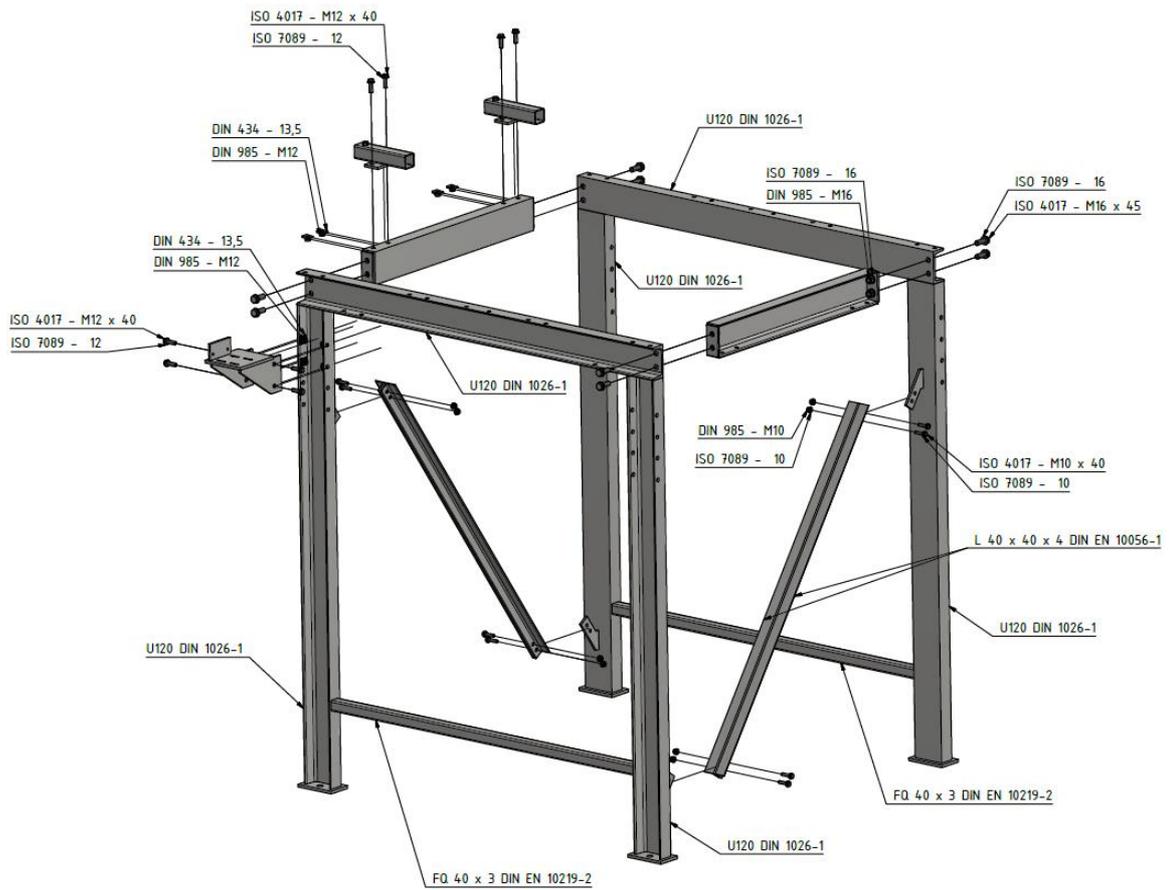


Abbildung 88: Aufbau des Rahmens

6.4 Mechanische Komponenten des Prüfstandes

6.4.1 Lagerung der Turbine

Die Lagerung der Turbine erfolgt über zwei Stehlager von SKF. Dabei handelt es sich um Y-Stehlager mit Gussgehäuse und der Bezeichnung SYJ 505. Die Lager wurden auf statische und dynamische Tragfähigkeit überprüft, dabei wurde eine Lebensdauer von 1,42 Millionen Stunden errechnet. Die Berechnung ist dem Anhang 3 zu entnehmen. Die Stehlager werden über Schraubenverbindungen mit dem Gestell verbunden. In Abbildung 89 ist die Lageranordnung abgebildet. Dabei handelt es sich um eine schwimmende Lagerung.

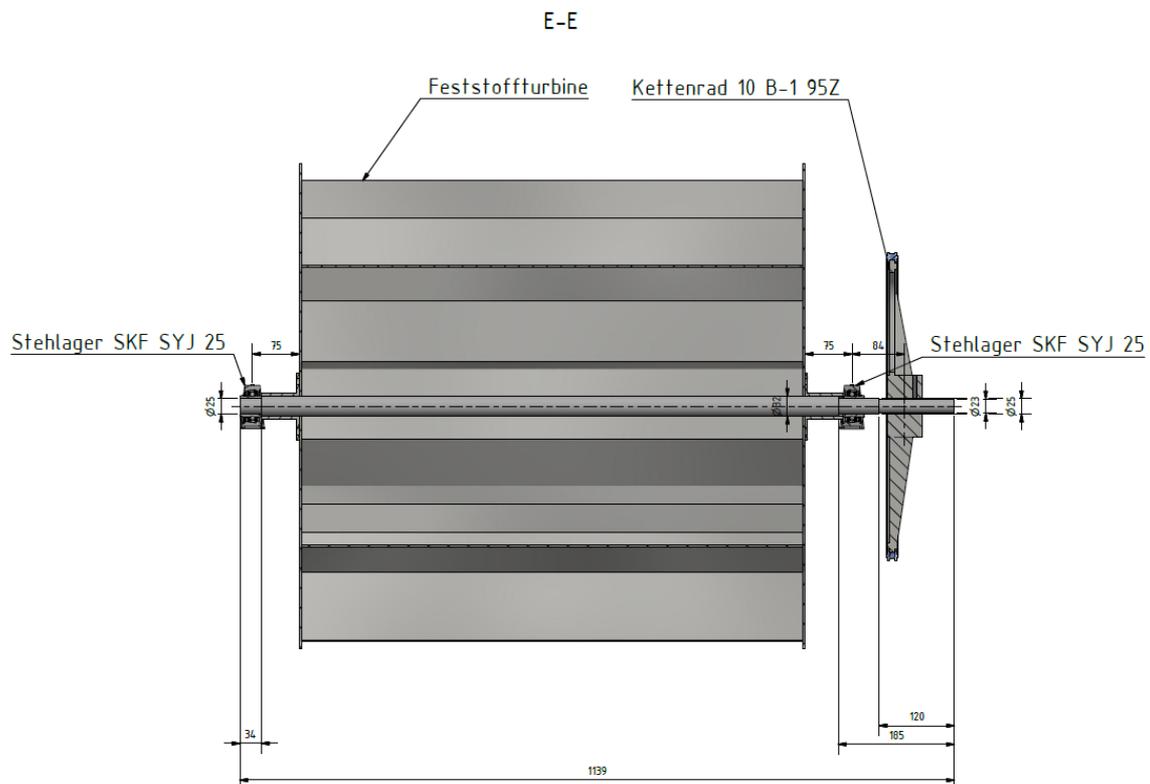


Abbildung 89: Lagerung der Turbine [mm]

6.4.2 Getriebe

Aufgrund der niedrigen Drehzahl der Turbine, welche im Bereich von 30 U/min liegt, wird eine Gesamtübersetzung von 47 benötigt. Für eine solche Übersetzung würde sich ein Planetengetriebe anbieten. Aus Kostengründen musste eine Alternative gewählt werden. Diese besteht aus einer Kombination eines Kegelradgetriebes mit einer Übersetzung von 8,178 und einem Kettentrieb mit einer Übersetzung von 6,33. Womit sich eine Gesamtübersetzung von 51,8 ergibt. Um die geforderte Gesamtübersetzung zu erreichen, wurde für die Turbinenseite ein Kettenrad mit 95 Zähnen und am Kegelradgetriebe ein Kettenrad mit 15 Zähnen nach DIN 8192 gewählt. Bei dem Kettentrieb handelt es sich um die Baugröße 10B-1 nach DIN 8187 mit einer Einfachrollenkette. Für die auftretenden Drehzahlen und Drehmomente wurde eine Kontrollberechnung mit dem Konstruktionsprogramm „Inventor“ durchgeführt, welche dem Anhang 2 zu entnehmen ist. Das maximale turbinenseitige Antriebsdrehmoment liegt bei 200 Nm bei einer Drehzahl von 30 U/min, was einer zu übertragenden Leistung von 628 W entspricht. Die Fixierung des Kettenrades auf der Welle wurde über drei Klemmschrauben realisiert. Für das getriebeseitige Kettenrad wurde eine Adapternabe angefertigt, mit welcher das Kettenrad über vier Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant nach DIN ISO 4762 verbunden ist, siehe Abbildung 90. Die Nabe überträgt das Drehmoment über eine Passfederverbindung mit einer Sicherungsschraube auf die Getriebewelle. In Abbildung 91 ist der gesamte Kettentrieb abgebildet.

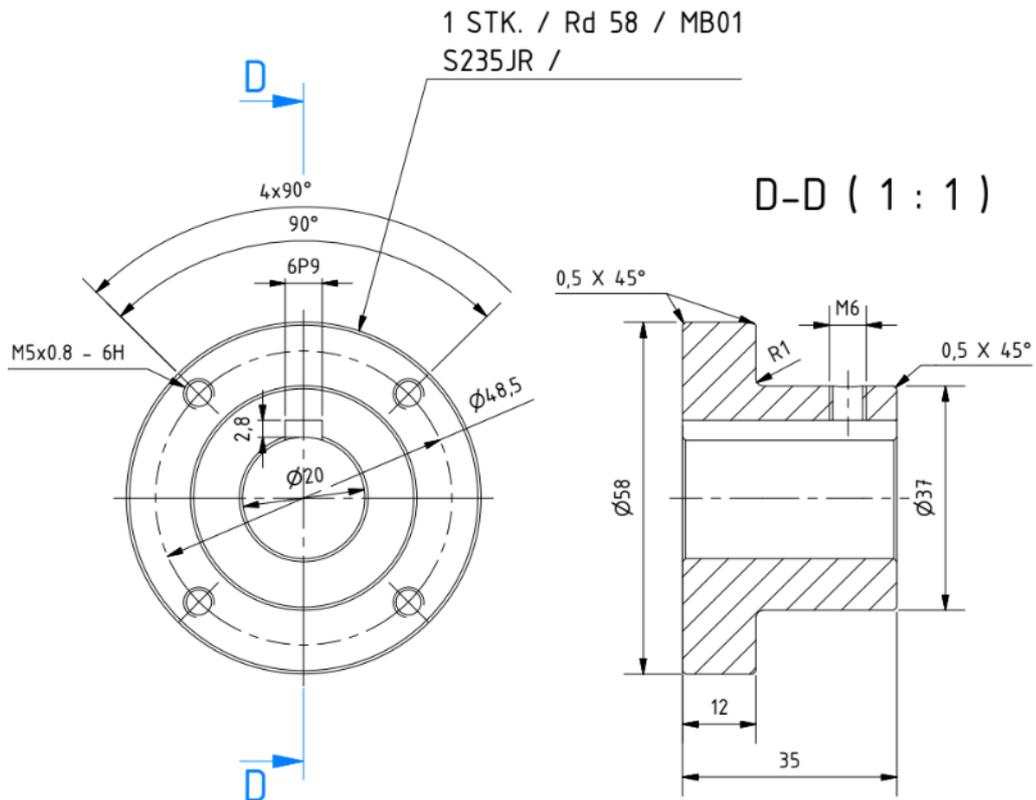


Abbildung 90: Adapternabe [mm]

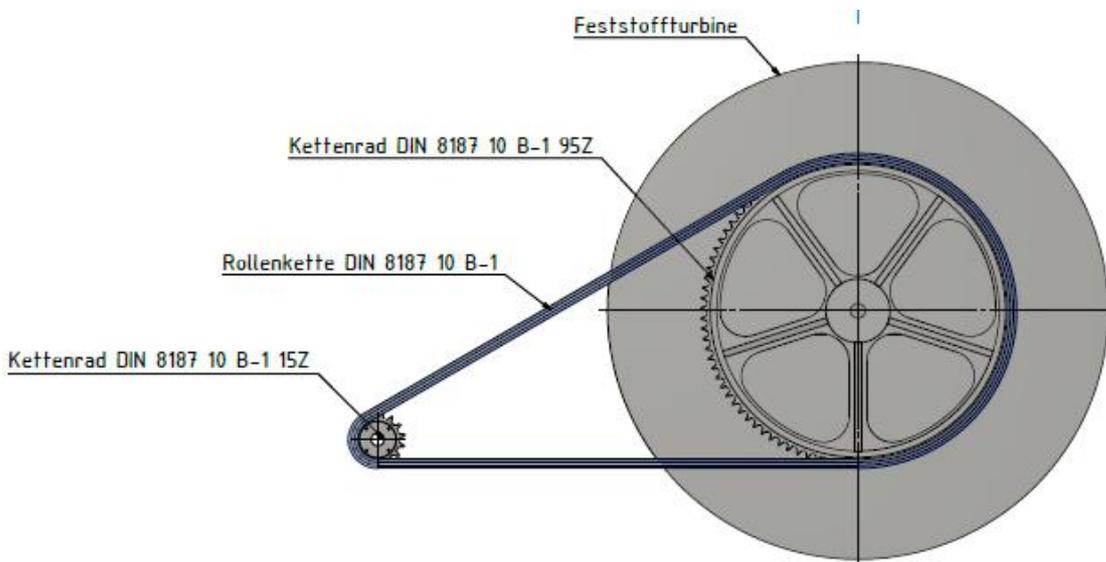


Abbildung 91: Gesamter Kettentrieb

6.4.3 Getriebemotor

Bei dem Getriebemotor, welcher als Generator betrieben werden soll, handelt es sich um einen Asynchronmotor, welcher direkt mit einem Getriebe verbunden ist. Hersteller des Getriebemotors ist das Unternehmen Lenze SE. Bei dem Motor handelt es sich um einen Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer und einer Polzahl von vier. Womit sich bei einer Netzfrequenz von 50 Hz eine Drehzahl von 1410 U/min ergibt. Der Motor weist eine Leistung von 0,37 kW bei einem Bemessungsdrehmoment von 2,51 Nm und einem Leistungsfaktor von 0,77 auf. Betrieben werden kann der Motor in Stern- oder Dreieckschaltung mit 230 V bzw. 400 V und einem Nennstrom von 1,6 A bzw. 0,95 A. Bei dem Getriebe handelt es sich um ein Kegelradgetriebe mit einer Übersetzung von 8,178. Das Abtriebsdrehmoment des Getriebes liegt bei 19,4 Nm und die Abtriebsdrehzahl bei 172,4 U/min. Daraus lässt sich ein Getriebewirkungsgrad von 0,945 ableiten. Alle weiteren Angaben sind dem Datenblatt im Anhang 1 zu entnehmen.

6.5 Übergabeschurre

6.5.1 Anforderungen an die Schurre

Die Hauptaufgabe der Schurre liegt darin, das Material geführt an das abziehende Förderband zu übergeben. Dazu muss der Auslauf der Schurre derart gestaltet sein, dass kein Fördergut neben das Förderband gelangt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die Schurre ein Anlaufen der Turbine in die falsche Richtung verhindern muss. Dazu muss die Schurre das Fördergut, welches beim Hochlauf und beim Abschalten der Anlage die Turbine nicht auf der geforderten Position trifft, ableiten und auf anderem Wege dem abziehenden Förderband zuführen. Zusätzlich sollte für Versuche mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern die Möglichkeit für eine Spaltmaßverstellung zwischen Turbine und Schurre bestehen. Für Wartungs- und Umbauarbeiten sollte die Schurre möglichst einfach demontierbar sein.

6.5.2 Aufbau der Schurre

Der Aufbau der Schurre wurde folgendermaßen ausgeführt. Die Schurre muss aus drei Teilen aufgebaut werden, um die geforderten Eigenschaften zu erfüllen. Der erste Teil besteht aus den seitlichen Blechen, welche am Rahmen befestigt werden. Darüber sind zwei weitere seitliche Bleche unter einem Winkel von 60° trichterförmig angeordnet. Um eine falsche Beladung der Turbine zu verhindern, verfügt die Schurre an der dem zubringenden Förderband angeordneten Seite über ein Abweiserblech, siehe Abbildung 92.

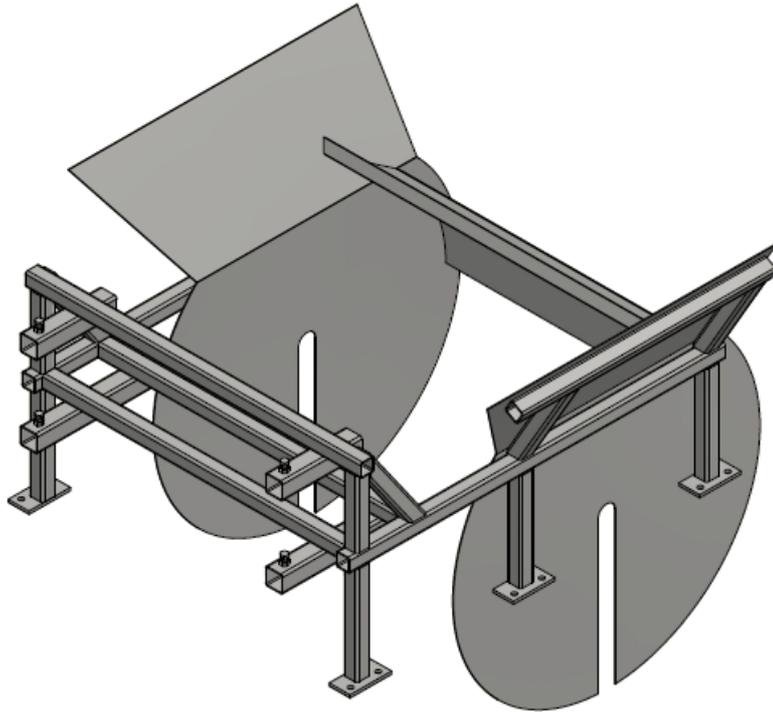


Abbildung 92: Teil der Schurre mit Abweiserblech

Trifft das Fördergut im Anlaufbetrieb auf das Abweiserblech, wird es durch dieses auf den zweiten Teil der Schurre abgeleitet. Dieser Teil ist in Abbildung 93 dargestellt und als Rutsche ausgeführt, welche das Fördergut auf das abziehende Förderband weiterleitet.

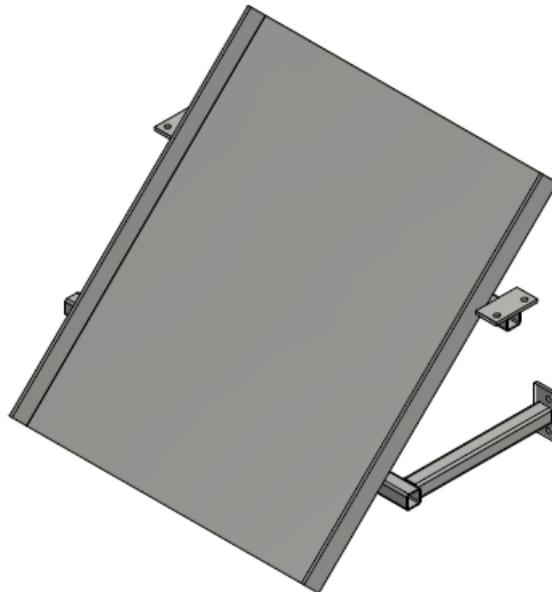


Abbildung 93: Rutsche

Den dritte Teil der Schurre bildet die auf der dem zubringenden Förderband entgegengesetzten Seite befindliche Verstelleinheit. Diese ist in Abbildung 94 dargestellt und dient der Verstellung des Spaltmaßes. Geführt und verstellt wird jener Teil über eine Formrohrkonstruktion, welche am Rahmen befestigt wird. Über diese erfolgt mittels Schrauben die Fixierung der Verstelleinheit.

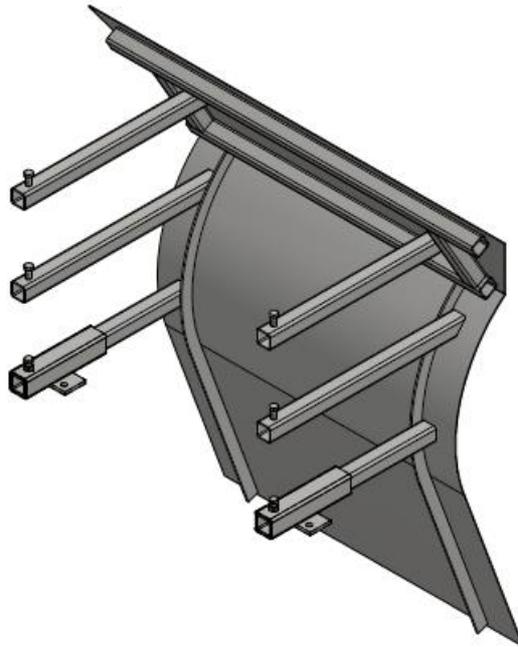


Abbildung 94: Verstelleinheit

Die gesamte Schurre wird mittels Schraubenverbindungen am Gestell montiert und kann bei Bedarf ohne Demontage der Turbine abgenommen werden. Abbildung 95 zeigt die gesamte Schurre bestehend aus dem Hauptteil mit Abweiserblech, der Rutsche und der Verstelleinheit.

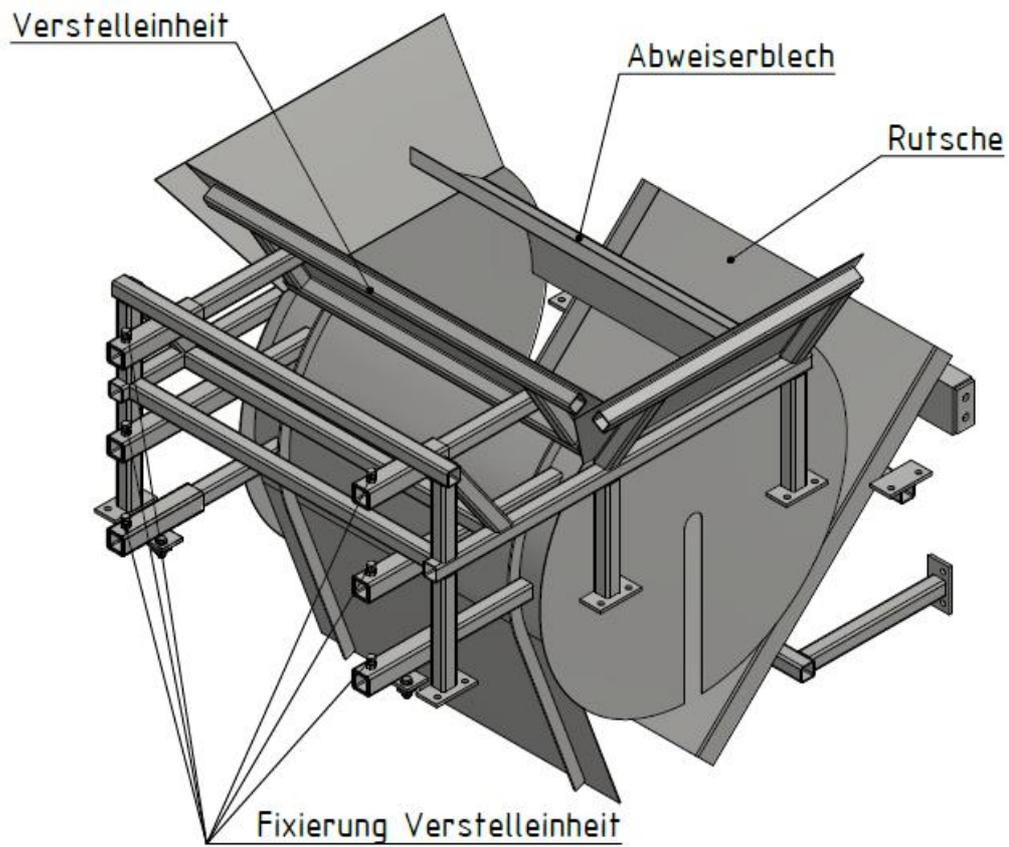


Abbildung 95: Gesamte Schurre

7 Versuchsbetrieb

7.1 Versuchsaufbau

Um die Funktionstüchtigkeit des Turbinenprüfstandes zu testen und um erste Abschätzungen bezüglich des Turbinenwirkungsgrades in Kombination mit einem Generator treffen zu können, wurde der Turbinenprüfstand in einen Förderkreislauf bestehend aus den vier Gurtförderanlagen, welche in Kapitel 3.2 beschrieben wurden, implementiert. Dazu wurden die Gurtförderanlagen in rechteckiger Anordnung aufgestellt. Die Übergabe zwischen den Förderbändern erfolgt in einem Winkel von 90° . Ausgehend von den geometrischen Verhältnissen, die in Kapitel 6.2 durchgeführten Simulationen, wurde der Prüfstand im Förderkreislauf positioniert. Das zubringende Förderband wurde mit einem vertikalen Achsabstand zwischen Turbine und Umlenkrolle von 700 mm angeordnet und weist keine Steigung auf. In horizontaler Richtung beträgt der Achsabstand 745 mm. Das abziehende Förderband wurde unter dem Prüfstand positioniert und weist eine Steigung von 14° auf. Verdeutlicht wird dieser Aufbau in der Abbildung 96, welche die gesamte Versuchsanlage bestehend aus den vier Förderbändern und dem Turbinenprüfstand zeigt. Abbildung 97 gibt einen genaueren Einblick in die Anordnung des Prüfstandes zwischen dem zubringenden und dem abziehenden Förderband. Als Fördergut wurde Streusplitt mit einer Schüttdichte von 1550 kg/m^3 und einer durchschnittlichen Körnung von 5 mm verwendet. Die Fördergeschwindigkeit betrug $2,58 \text{ m/s}$.



Abbildung 96: Zu einem Förderkreislauf angeordneten Förderbänder



Abbildung 97: Anordnung des Prüfstandes im Förderkreislauf

Für den Betrieb des Getriebemotors als Generator wurde dieser über einen fünfpoligen 16 A CEE Anschluss mit dem Schaltschrank verbunden. Der Schaltschrank wurde zur Spannungsversorgung über einen dreipoligen Schutzkontaktstecker an das 230 V Stromnetz angeschlossen. Um den Generator belasten zu können, wurden an den Schaltschrank für erste Versuche anstelle eines Dreiphasen-Leistungswiderstandes einzelne verstellbare Widerstände angeschlossen. Um die für die Versuche benötigten Widerstandswerte zu erreichen, wurden zu den Verstellwiderständen zusätzlich Festwiderstände hinzugeschlossen. Abbildung 98 zeigt den Schaltschrank mit den daran angeschlossenen Widerständen.



Abbildung 98: Schaltschrank mit angeschlossenen Widerständen

Die Geschwindigkeit der Förderbänder wurde mit einem Multifunktions-Handdrehzahlmessgerät gemessen. Die Spannung wurde zum einen mittels der Spannungsanzeige am Schaltschrank und zum anderen mit zwei weiteren digitalen Multimetern gemessen. Mit diesen Multimetern wurden auch die eingestellten Widerstandswerte an den drei Phasen gemessen. Über den Zusammenhang aus Gleichung 10 wurde die Leistung pro Phase ermittelt. Aufgrund der Sternschaltung der Widerstände musste die Strangspannung, welche durch die Gleichung aus Abbildung 64 errechnet wurde, eingesetzt werden. Die Gesamtleistung setzt sich, wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, aus den Leistungen der einzelnen Phasen zusammen. Da an den drei Phasen identische Widerstände eingestellt wurden, konnte die Leistung einer Phase mit drei multipliziert werden, um die Gesamtleistung zu erhalten. Mit diesem beschriebenen Aufbau wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, deren Ergebnisse im folgenden Kapitel dokumentiert werden.

7.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wurden die vier Förderbänder ohne Fördergut auf die gewünschte Geschwindigkeit hochgefahren. Im nächsten Schritt wurde kontinuierlich Fördergut in Form von Streusplitt auf die Förderbänder aufgebracht. Durch das Fördergut wurde die Turbine in Bewegung gesetzt. Ab einer Leerlaufdrehzahl von ca. 10 U/min konnten die Kondensatoren über den Schaltschrank hinzugeschaltet werden. Damit es zu einer Erregung der Rotorspule durch den Schwingkreis kommen kann, ist ein Minimum an Leistung notwendig. Ab diesem Zeitpunkt fungiert der Motor als Generator und es wird eine Spannung in die Statorspulen induziert. Diese induzierte Spannung kann an der Anzeige am Schaltschrank abgelesen werden. Zusätzlich zu dem in den Schaltschrank integrierten Dreheisenmesswerk wurden zur Messung der Spannung zwei zusätzliche digitale Multimeter verwendet. Somit kann die Spannung an allen drei Phasen gemessen werden. Anschließend wurden die Förderbänder solange mit Material beladen, bis die Leerlaufspannung 400V erreichte. Über einen dreiphasigen Leistungsschalter wurde der Generator, mit den zuvor auf einen definierten Widerstandswert eingestellten Widerständen, belastet. Nach dem Abstellen des gesamten Förderkreislaufes wurde der Massenstrom, durch Multiplikation der gemessenen Querschnittsfläche mit der Fördergeschwindigkeit und der Schüttdichte, ermittelt.

Um die maximale durch den Generator und die Turbine erzeugte Leistung zu ermitteln, wurden Versuche mit unterschiedlichen Widerstandswerten, Massenströme und Kondensatoren durchgeführt. Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Versuche werden im folgenden Kapitel erörtert.

7.3 Versuchserkenntnisse

In diesem Kapitel wird anhand von einigen repräsentativen Versuchen, welche ausschließlich einen Auszug aus der Vielzahl der durchgeführten Versuche darstellen, das Verhalten der Turbine in Kombination mit dem Generator beschrieben. Mit Hilfe der unterschiedlichen Versuchsreihen wurde durch Änderung des Massenstromes, der Widerstandswerte und der Kapazität der Kondensatoren die maximal generierbare Leistung ermittelt. Der Ablauf, sowie die gewonnenen Erkenntnisse dieser ausgewählten Versuche werden im Folgenden im Detail beschrieben und sind mit den Nummern V1 bis V6 nummeriert.

Nach Zuschalten der Kondensatoren bei der ersten Versuchsreihe wurde der Massenstrom solange erhöht, bis die Spannung 400V erreichte, wobei die Spannung aufgrund der schwankenden Drehzahl im Bereich zwischen 320V und 400V variierte. Aufgrund dieser Schwankungen wird in weiterer Folge der Mittelwert der Spannung für die Beschreibung herangezogen. Somit ergab sich eine mittlere Spannung von 360V. Anschließend wurden die Kondensatoren von der Asynchronmaschine getrennt, um die Leerlaufdrehzahl messen zu können, und anschließend wieder hinzugeschaltet. Die gemessenen Daten sowie die eingestellten Werte, sind in Tabelle 8 aufgelistet. Darin stellt die theoretische Belastung jene Belastung dar, welche ohne Abfall der Spannung bei Belastung mit den Widerständen auftreten würde. Der Wert der Leistung entspricht der Gesamtleistung aller drei Phasen. Die im Schüttgut enthaltene Leistung wurde mithilfe der Gleichung 18 ermittelt. Die Höhendifferenz in dieser Gleichung stellt den Abstand zwischen dem Abwurfpunkt und dem tiefsten Punkt der Turbine dar. Die Fördergeschwindigkeit lag bei allen Versuchen wie bereits in Kapitel 7.1 erläutert bei der maximalen Geschwindigkeit von 2,58 m/s. Aus Tabelle 8 ist zu erkennen, dass nach dem Zuschalten der Kondensatoren die Drehzahl der Turbine aufgrund der zur Erregung der Asynchronmaschine benötigten Energie sehr stark absinkt. Anschließend wurde der Generator mit den Widerständen, welche eine theoretische Last von 116 W simulieren, belastet. Dabei zeigte sich, dass es zu einem weiteren Absinken der Drehzahl kommt. Dieser Drehzahlabfall führt zu einem Absinken der Spannung, was bei gleichbleibendem Widerstand einen Abfall der Leistung zur Folge hat. Vergleicht man die effektive Leistung mit jener, welche im Schüttgut enthalten ist, wird ersichtlich, dass lediglich 15% der Leistung aus dem Fördergut in

elektrische Energie umgesetzt werden konnten. Wird der Wirkungsgrad des Generators berücksichtigt, so erhöht sich der Wirkungsgrad der Turbine bei diesem Versuch auf 25%.

Versuchs Nr.:	V 1				
Massenstrom [kg/s]	18				
Widerstand [Ohm]	1120	Kapazität [µF]	5		
	Drehzahl [U/min]	Spannung [V]	theoretische Belastung [W]	Lesitung [W]	Leistung Fördergut [W]
Leerlauf	50				268
mit Kondensatoren	24,5	360			
bei Belastung	23	210	116	40	

Tabelle 8: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 1

$$P_{ges} = \dot{m} * g * h + \dot{m} * \frac{v^2}{2} \quad \text{Gleichung 18}$$

Damit das Verhalten bei steigender Last beurteilt werden kann, wurde der Widerstandswert herabgesetzt, was einer theoretischen Last von 216 W entspricht. Dabei zeigte sich, dass trotz nahezu doppelter Belastung, die Drehzahl und in weiterer Folge die Spannung nur verhältnismäßig wenig abnehmen. Die erzielte Leistung erhöht sich jedoch nur geringfügig und der Wirkungsgrad erhöht sich unter Berücksichtigung des Generatorwirkungsgrades auf 27%. In Tabelle 9 sind die eingestellten Werte und das Ergebnis des zweiten Versuches aufgelistet.

Versuchs Nr.:	V 2				
Massenstrom [kg/s]	18				
Widerstand [Ohm]	600	Kapazität [µF]	5		
	Drehzahl [U/min]	Spannung [V]	theoretische Belastung [W]	Lesitung [W]	Leistung Fördergut [W]
Leerlauf	50				268
mit Kondensatoren	24,5	360			
bei Belastung	22	160	216	43	

Tabelle 9: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 2

Um den Abfall der Spannung bei Belastung zu verringern, wurde in einer zweiten Versuchsreihe die Kapazität der Kondensatoren auf 13 μF erhöht. Diese Erhöhung hat jedoch auch zur Folge, dass die Spannung im lastfreien Zustand, bei gleicher Drehzahl wie in der ersten Versuchsreihe, deutlich über 400 V liegen würde. Da dies aufgrund der Spannungsbegrenzung nicht möglich ist, mussten die Kondensatoren zusammen mit der Last zugeschaltet werden. Dabei stellte sich heraus, dass durch den höheren Energiebedarf der Kondensatoren, die erhaltene Leistung unter den Werten aus der ersten Versuchsreihe liegt. In Tabelle 10 sind die erhaltenen Werte für eine Kapazität von 13 μF festgehalten.

Versuchs Nr.:	V 3				
Massenstrom [kg/s]	18				
Widerstand [Ohm]	600	Kapazität [μF]	13		
	Drehzahl [U/min]	Spannung [V]	theoretische Belastung [W]	Lesitung [W]	Leistung Fördergut [W]
Leerlauf	50				268
mit Kondensatoren	15	200			
bei Belastung	14,5	140	67	33	

Tabelle 10: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 3

Um die generierbare Leistung zu erhöhen, wurde der Volumenstrom auf 23 kg/s erhöht. Dadurch ergaben sich die Werte aus Tabelle 11. Vergleicht man bei diesem Versuch die Leistung des Fördergutes und jene Leistung, welche in den Widerständen umgesetzt wird, ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad auf 32% erhöht werden konnte.

Versuchs Nr.:	V 4				
Massenstrom [kg/s]	23				
Widerstand [Ohm]	600	Kapazität [μF]	13		
	Drehzahl [U/min]	Spannung [V]	theoretische Belastung [W]	Lesitung [W]	Leistung Fördergut [W]
Leerlauf	62				343
mit Kondensatoren	17,5	280			
bei Belastung	15	200	131	67	

Tabelle 11: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 4

Aufgrund der Erkenntnisse der vorhergehenden Versuchsreihen wurde, um die gewinnbare Leistung zu erhöhen, die Kapazität der Kondensatoren auf 2 μF gesenkt. Die Verringerung der Kapazität bewirkt, bei gleicher Drehzahl wie in den vorhergehenden Versuchsreihen, eine niedrigere Spannung. Nach Zuschalten der Last wurde solange Material hinzugegeben, bis die mittlere Spannung unter Belastung 380 V betrug. Da sich die Spannung beim Wegschalten der Last erhöht hätte, und dadurch das Spannungssteuerungsrelais die Kondensatoren vom Generator getrennt hätte, konnte die Spannung sowie die Drehzahl ohne Last in diesem Fall nicht ermittelt werden. Eine Messung ergab in diesem Zustand einen Massenstrom von 30 kg/s. Durch den erhöhten Massenstrom steigt auch die Leerlaufdrehzahl, wie in Tabelle 12 ersichtlich ist. Daraus konnte, nach Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Generators, ein Wirkungsgrad der Turbine von 48% ermittelt werden.

Versuchs Nr.:	V 5				
Massenstrom [kg/s]	30				
Widerstand [Ohm]	1120	Kapazität [μF]	2		
	Drehzahl [U/min]	Spannung [V]	theoretische Belastung [W]	Lesitung [W]	Leistung Fördergut [W]
Leerlauf	73				448
mit Kondensatoren	-	-			
bei Belastung	37	380	-	129	

Tabelle 12: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 5

In weiterer Folge wurde, wie bereits in den vorhergehenden Versuchen, die Belastung bei gleichbleibendem Massenstrom erhöht. Das Ergebnis dazu ist in Tabelle 13 dargestellt. Dabei konnte eine Leistung von 150 W rückgewonnen werden. Im Vergleich zu der Leistung des Fördergutes entspricht dies, wiederum unter Berücksichtigung des Generatorwirkungsgrades, einem Wirkungsgrad von 56%. Das Ergebnis dieses Versuches stellt das Maximum der erzielten Leistung dar.

Versuchs Nr.:	V 6				
Massenstrom [kg/s]	30				
Widerstand [Ohm]	600	Kapazität [μ F]	2		
	Drehzahl [U/min]	Spannung [V]	theoretische Belastung [W]	Lesitung [W]	Leistung Fördergut [W]
Leerlauf	73				448
mit Kondensatoren	-	-			
bei Belastung	35	300	-	150	

Tabelle 13: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 6

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Prüfstand voll funktionstüchtig ist und mit dem verwendeten Motor bzw. Generator eine maximale Leistung von 150 W rückgewonnen werden konnte. Um die erzielbare Leistung weiter zu erhöhen, müsste der Volumenstrom erhöht werden. Dadurch würde das Drehmoment ansteigen, was jedoch durch das maximale Drehmoment des Getriebemotors begrenzt wird. Des Weiteren stellt der schlechte Wirkungsgrad des als Generator verwendeten Asynchronmotors ein Problem dar, da dieser lediglich bei 60% liegt. Jedoch stellt dieser eine kostengünstige Alternative für den ersten Test des Prüfstandes und einer groben Abschätzung des möglichen Wirkungsgrades dar. Eine Erhöhung der Leistung ist bei Verwendung eines geeigneteren Generators, wie in Kapitel 9 erläutert wird, zu erwarten. Damit die Bedeutung dieses Ergebnisses besser beurteilt werden kann, wurde in weiterer Folge eine Simulation entsprechend den Versuchsdaten aufgebaut. Im folgenden Kapitel wird das Versuchsergebnis der Simulation gegenüber gestellt und diskutiert.

8 Gegenüberstellung von Versuch und Simulation

Abschließend wurde noch eine Simulation durchgeführt, um diese mit den realen Versuchen zu vergleichen. Um den Vergleich anzustellen, wurde der Versuch mit der maximal erzielten Leistung gewählt. Dazu wurde die Turbine mit denselben Abständen wie in den Versuchen positioniert. Der Abstand zwischen Turbinenachse und Umlenktrommelachse in x-Richtung betrug 0,745 m und jener in z-Richtung 0,7 m. Die Geschwindigkeit wurde, aus den Messungen, mit 2,58 m/s übernommen. Als Massenstrom wurde der gemessene Wert von 30 kg/s eingegeben. Die Schüttdichte wurde dem realen Material angepasst und lag bei 1550 kg/m³. Die an der Turbine im Versuch gemessene Drehzahl von 37 U/min wurde als maximale Drehzahl im Simulationsprogramm festgelegt und anschließend die Simulation durchgeführt. In Abbildung 99 ist ein Ausschnitt der Simulation dargestellt. Dabei sind sowohl die Partikelgeschwindigkeiten als auch die Drehzahl der Turbine zu erkennen.

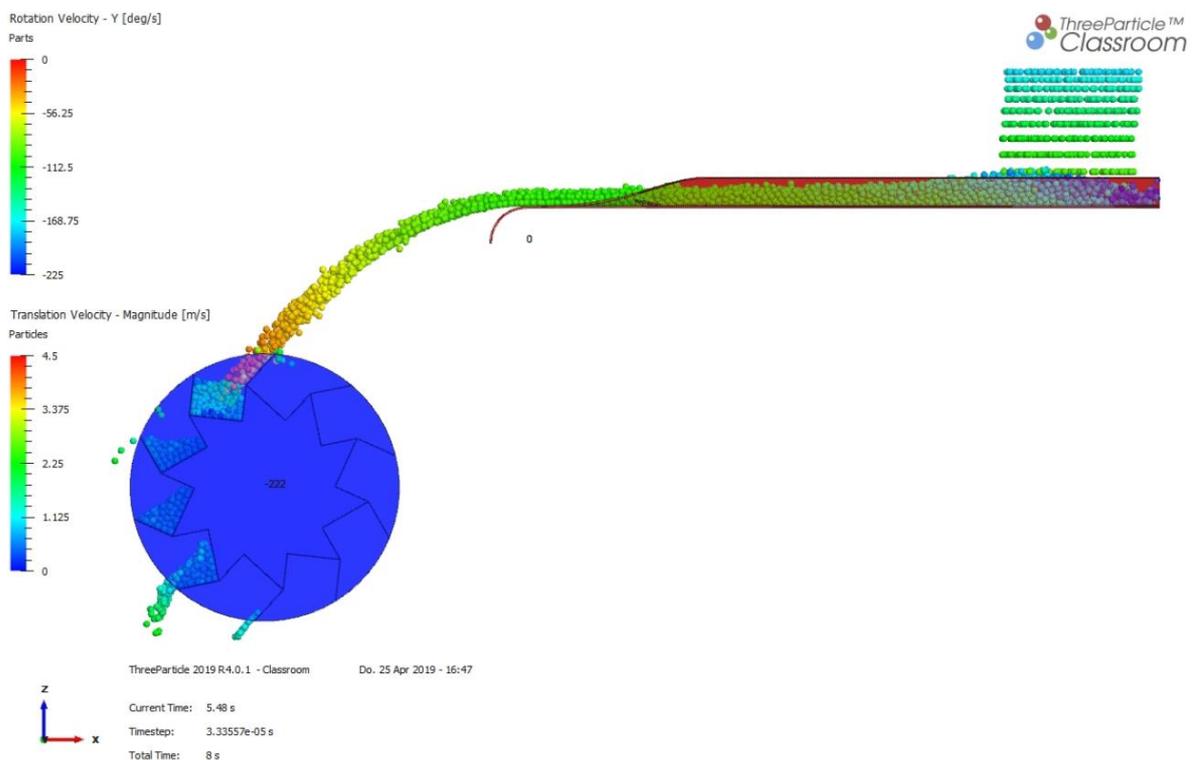


Abbildung 99: Vorderansicht der Vergleichssimulation

Eine Auswertung der Ergebnisse ergab, ohne Berücksichtigung des An- und Auslaufvorganges der Turbine, eine durchschnittliche Leistung von 228 W bei einem Drehmoment von 59 Nm. Der Verlauf der Leistung über die Simulationszeit wird in Abbildung 100 gezeigt.

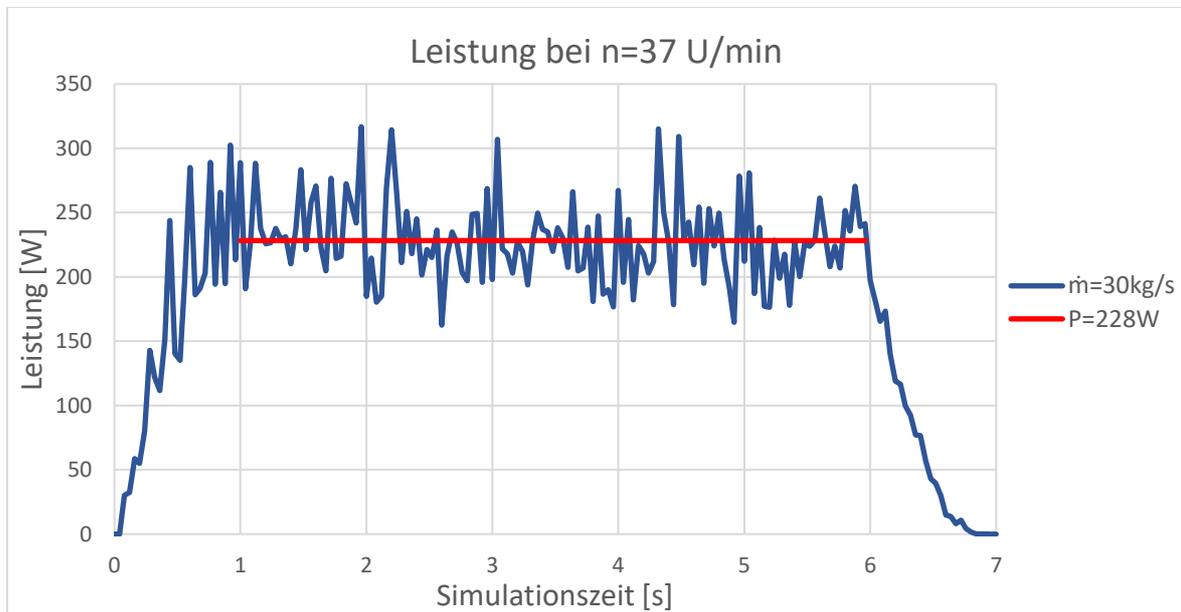


Abbildung 100: Leistungsverlauf der Vergleichssimulation

Das Fördergut besitzt, nach Gleichung 18, bei einem vertikalen Abstand vom Abwurfpoint bis zum tiefsten Punkt der Turbine eine Leistung von 448 W. Damit ergibt sich aus der Simulation ein Turbinenwirkungsgrad von 50,9%. Wird bei der in den Versuchen gemessenen Leistung der Wirkungsgrad des Generators berücksichtigt, welcher bei einer Drehzahl von 30 U/min ermittelt wurde, und bei 63% liegt, kann auf einen maximalen Wirkungsgrad der Turbine von ca. 55,8% geschlossen werden. Dabei ist jedoch zu erwähnen, dass die Drehzahl im Versuch höher lag und der Wirkungsgrad des Generators aus diesem Grund niedriger ist, weshalb auch der Turbinenwirkungsgrad etwas unter 55,8% liegt. Somit können die Ergebnisse aufgrund der geringen Abweichung der Wirkungsgrade, aus den Versuchen und der Simulation, als schlüssig angesehen werden.

9 Ausblick

9.1 Maßnahmen zur Optimierung des Prüfstandes

Damit mit dem Prüfstand eine höhere Qualität der Ergebnisse erzielt werden kann, sollte der Motor, welcher als Generator betrieben wurde, durch einen geeigneten Generator ersetzt werden. Dies könnte in erster Linie ein Synchrongenerator mit regelbarem Rotorstrom sein, um damit die Ausgangsspannung regeln zu können. Effizienter wäre ein regelbarer Asynchronmotor mit einer hohen Polpaarzahl, da dieser über eine niedrigere Nenndrehzahl verfügen würde. Dadurch könnte die Übersetzung bzw. das Getriebe entfallen, was eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades zufolge hätte. Für einen präziseren Betrieb bei weiterführenden Versuchen wäre eine speicherprogrammierbare Steuerung von Vorteil. Einerseits, wäre über diese die Regelung des Rotorstromes und somit die Regelung der Spannung möglich, und andererseits könnten Versuche mit unterschiedlichen Drehzahlen bei gleichbleibendem Massenstrom durchgeführt werden. Darüber hinaus könnte die Messung der Leistung sowie das Ablesen der gewünschten Daten in die Steuerung implementiert werden.

9.2 Weiterführende Versuche

Um das Betriebsverhalten sowie das Verhalten des Wirkungsgrades bei unterschiedlichen Zuständen genauer zu untersuchen, müssten weitere Versuche durchgeführt werden. Es sollten Versuche mit unterschiedlichen Massenströmen durchgeführt werden, womit eine Bestimmung der optimalen Positionierung der Turbine bei verschiedenen Massenströmen einhergeht. Weiters sollten Versuche mit Materialien jeglicher Art durchgeführt werden. Diese Materialien sollten sowohl diverse Korngrößen als auch Schüttdichten aufweisen. Darüber hinaus könnten Turbinen mit modifizierten Schaufelgeometrien in der Praxis untersucht werden, um eventuell fördergutspezifische, optimale Geometrien zu finden. Ein wichtiger Punkt für weiterführende Versuche wäre das Verschleißverhalten an der realen Turbine zu untersuchen, damit eine maximale Standzeit der Turbine gewährleistet werden kann. Auch das Verschleißverhalten des Fördergutes könnte untersucht werden. Dies würde eine Einschätzung über den Grad der Schädigung ermöglichen, um einen Anhaltswert dafür zu bekommen, wie schonend die Übergabe für das Fördergut als auch für das abziehende Förderband ist.

Ziel dieser weiterführenden Versuche sollte es sein eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer solche Anwendung in Schüttgutförderanlagen treffen zu können. Falls eine solche Wirtschaftlichkeit bestätigt werden könnte, sollte eine kompakte, anwendungsfreundliche und für möglichst viele Förderanlagen leicht zu integrierende Variante entwickelt werden, um somit die Energiekosten zu senken.

Literaturverzeichnis

- Bernstein, Herbert. *Elektrotechnik/Elektronik für Maschinenbauer*. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2012.
- Binder, Andreas. *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Springer-Verlag, 2012.
- Fischer, Rolf. *Elektrische Maschinen*. 17. Auflage. Carl Hanser Verlag München, 2017.
- Fischer, Rolf, und Hermann Linse. *Elektrotechnik für Maschinenbauer*. 14. Auflage. Springer Vieweg, 2012.
- Golob, Wolfgang, und Karl-Heinz Schäfer. „Entwicklung eines Förderkreislaufes für Modellversuche.“ *Bachelorarbeit*. Montanuniversität Leoben: Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre, 2014.
- Hofmann, Wilfried. *Elektrische Maschinen*. Pearson Deutschland GmbH, 2013.
- Lanthaler, Michael . „Betriebssicherheits- und Sicherheitsvorrichtungen bei Gurtförderanlagen.“ *Masterarbeit*. Montanuniversität Leoben: Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre, 2011.
- Lerch, Reinhard. *Elektrische Messtechnik*. 7. Auflage. Springer Vieweg, 2016.
- Prenner, Michael. „Feststoffturbine zur Energierückgewinnung in Kombination mit Gurtförderanlagen.“ *in: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 2015: Heft 1, S. 21-31.
- Prenner, Michael. „Energy Recovering System for Moving Bulk Materials.“ *in: Earth Science*, 2019: Vol. 8, No. 1, S. 20-44.
- Prenner, Michael, Christoph Grübler, und Sonja Zeiler. „Vorteile von Feststoffturbinen.“ *in: AUS DER WISSENSCHAFT*, 2018: Schüttgut Nr.5 S. 68-72.
- Schröder, Dierk. *Elektrische Antriebe-Grundlagen*. 6. Auflage. Springer Vieweg, 2017.
- Schwab, Adolf J. *Elektroenergiesysteme*. 3. Auflage. Springer-Verlag, 2012.
- Teigelkötter, Johannes. *Energieeffiziente elektrische Antriebe*. Springer Vieweg, 2013.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschlächtige Anströmung.....	6
Abbildung 2: Oberschlächtige Anströmung	6
Abbildung 3: Mittelschlächtige Anströmung.....	7
Abbildung 4: Durchströmturbine	7
Abbildung 5: Stoßrad mit vertikaler Drehachse	8
Abbildung 6: Schief im Raum liegende Turbinenachse	9
Abbildung 7: Verteilung des Magnetfeldes über den Motorquerschnitt (Schröder 2017, S. 201).....	10
Abbildung 8: Verteilung der magnetischen Flussdichte über den Umfang (Schröder 2017, S. 203).....	11
Abbildung 9: Verlauf der Feldstärke entlang des Umfanges (Schröder 2017, S. 206)	11
Abbildung 10: Stator mit drei stromdurchflossenen Spulen (Schröder 2017, S. 209)	12
Abbildung 11: Grundwellen und deren Überlagerung zur resultierenden Feldverteilung (Schröder 2017, S. 210).....	12
Abbildung 12: Kurzschlusskäfig (Schröder 2017, S. 212)	13
Abbildung 13: Bewegter Leiter im Magnetfeld (Schröder 2017, S. 212).....	13
Abbildung 14: Drehmomentenkennlinie Asynchronmaschine (Schröder 2017, S. 219).....	15
Abbildung 15: Außenpolmaschine (Fischer 2017, S. 341)	16
Abbildung 16: Schenkelpolmaschine (Fischer 2017, S. 341)	16
Abbildung 17: Vollpolmaschine (Fischer 2017, S. 341)	16
Abbildung 18: Aufbau Schenkelpolmaschine (Schröder 2017, S. 285)	17
Abbildung 19: Rotor mit Oberflächenstrom (Schröder 2017, S. 386)	17

Abbildung 20: Verteilung Lorentzkräfte bei unterschiedlichen Polradwinkel (Schröder 2013, S. 363).....	18
Abbildung 21: Lorentzkräfte bei einem Polradwinkel von 90° (Schröder 2013, S. 363).....	18
Abbildung 22: Aufbau einer Gleichstrommaschine (Vgl. Binder 2012, S. 849).....	21
Abbildung 23: Ausbildung des Magnetfeldes einer Gleichstrommaschine (Schröder 2017, S. 72).....	23
Abbildung 24: Beschaltungsmöglichkeiten von Gleichstrommaschine (Fischer 2017, S. 75) a) Reihenschlussmotor; b) Nebenschlussmotor; c) Fremderregter Motor; d) Doppelschlussmotor.....	24
Abbildung 25: Aufbau eines Kommutators (Schröder 2017, S. 646).....	24
Abbildung 26: Beschaltung der Asynchronmaschine für den Betrieb als Generator (Fischer 2017, S. 310).....	26
Abbildung 27: Betriebspunkt der Asynchronmaschine (Fischer 2017, S. 311).....	27
Abbildung 28: Blindstromkennlinie von Kondensator und Spule (Fischer 2017, S. 311).....	28
Abbildung 29: Betriebspunkt bei Verwendung von Drosselspulen (Fischer 2017, S. 312).....	28
Abbildung 30: Einstellmöglichkeiten der Spannung über die Drehzahl oder über die Kapazität der Kondensatoren (Fischer 2017, S. 312).....	28
Abbildung 31: Ausbildung des Haupt- und Streuflusses (Schwab 2012, S. 293) .	30
Abbildung 32: Zusammensetzung der Polradspannung (Vgl. Schwab 2012, S. 295)	30
Abbildung 33: Ersatzschaltbild des Synchrongenerators (Vgl. Schwab 2012, S. 294)	30
Abbildung 34: Vereinfachtes Ersatzschaltbild (Vgl. Schwab 2012, S. 297)	31
Abbildung 35: Regelung der Klemmspannung durch den Erregerstrom (Vgl. Schwab 2012, S. 297)	31

Abbildung 36: Schaltung des fremderregten Gleichstromgenerators (Fischer und Linse 2012, S. 274)	32
Abbildung 37: Schaltung des Nebenschlussgenerators (Vgl. Bernstein 2012, S. 295)	33
Abbildung 38: Schaltung des Reihenschlussgenerators (Vgl. Bernstein 2012, S. 295)	34
Abbildung 39: Schaltung des Doppelschlussgenerators (Vgl. Bernstein 2012, S. 295)	35
Abbildung 40: Anordnung der Wicklungen am Rotor (Vgl. Bernstein 2012, S. 296)	35
Abbildung 41: Rotorschaltung mit einstellbarem Vorwiderstand (Fischer 2017, S. 246)	37
Abbildung 42: Änderung der Drehmomentenkennlinie in Abhängigkeit des Vorwiderstandes (Schröder 2017, S. 251)	37
Abbildung 43: Leistungsbilanz bei Verwendung eines Vorwiderstandes (Fischer 2017, S. 248)	37
Abbildung 44: Drehmomentenkennlinien bei Senkung der Klemmspannung (Hoffmann 2013, S. 267)	38
Abbildung 45: Schaltungsmöglichkeiten der Spulengruppen (Hoffmann 2013, S. 261)	40
Abbildung 46: Spannungs- und Leistungsverhältnisse der Schaltungsvarianten (Hoffmann 2013, S. 261)	40
Abbildung 47: Umschaltvarianten zwischen den Spulengruppen (Hoffmann 2013, S. 261)	40
Abbildung 48: Steuerkennlinie bei Änderung der Frequenz (Fischer 2017, S. 256)	41
Abbildung 49: Drehmomentverlauf im Proportionalbereich (Schröder 2017, S. 332)	42
Abbildung 50: Drehmomentverlauf im Feldschwächungsbereich (Schröder 2013, S. 332)	43

Abbildung 51:Verlauf des Kippmomentes über den Proportional- und Feldschwächungsbereich (Fischer 2017, S. 257).....	43
Abbildung 52: Schaltung einer Gleichstrommaschine mit Ankervorwiderstand (Fischer 2017, S. 86).....	45
Abbildung 53: Änderung der Drehmomentenkennlinie bei Änderung des Vorwiderstandes (Fischer 2017, S. 87)	45
Abbildung 54: Anker- und Feldstellbereich (Fischer 2017, S. 88).....	46
Abbildung 55: Drehzahlkennlinien im Anker- und Feldstellbereich (Fischer 2017, S. 88).....	47
Abbildung 56: Schaltung eines Reihenschlussmotors mit abgestufter Erregerwicklung (Fischer 2017, S. 89)	47
Abbildung 57: Leistungselektronische Schaltung eines Frequenzumrichters (https://www.precifast.de/frequenzumrichter-funktion/)	48
Abbildung 58: Spannungsrichtige Messung bezogen auf den Verbraucher (Vgl. Bernstein 2012, S. 140).....	50
Abbildung 59: Stromrichtige Messung bezogen auf den Verbraucher (Vgl. Bernstein 2012, S. 140).....	50
Abbildung 60: Leistungsdreieck für die Wirk-, Blind- und Scheinleistung (Bernstein 2012, S. 109).....	51
Abbildung 61: Phasenverschiebung bei induktivem Widerstand (Bernstein 2012, S. 107).....	51
Abbildung 62: Phasenverschiebung bei kapazitiven Widerstand (Bernstein 2012, S. 106).....	51
Abbildung 63: Sternschaltung (Vgl. Bernstein 2012, S. 94).....	53
Abbildung 64: Dreieckschaltung (Vgl. Bernstein 2012, S. 94)	53
Abbildung 65: Sternschaltung im 4-Leiter-System (Vgl. Steffen und Bausch 2007, S. 265).....	54
Abbildung 66: Leistungsmessung bei 4-Leiter-System bei unsymmetrischer Belastung (Bernstein 2012, S. 146).....	55

Abbildung 67: Leistungsmessung mittels Aronschaltung (Bernstein 2012, S. 148)	55
Abbildung 68: Leistungsmessung bei symmetrischer Belastung (Bernstein 2012, S. 147)	56
Abbildung 69: Vorhandener Gurtförderer (Golob und Schäfer 2014, S. 104)	62
Abbildung 70: Typenschild des Getriebemotors	63
Abbildung 71: Anordnung der Förderbänder zu einem Kreislauf (Golob und Schäfer 2014, S. 108)	63
Abbildung 72: Abmessungen der Turbine [mm]	64
Abbildung 73: Layout des Bedienfeldes	66
Abbildung 74: Schaltplan des Leistungsstromkreises	72
Abbildung 75: Schaltplan des Steuerstromkreises	74
Abbildung 76: Innerer Aufbau des Schaltschranks	75
Abbildung 77: Schaltung der Widerstände	75
Abbildung 78: Aufbau der Simulation	77
Abbildung 79: Isometrische Ansicht der Simulation	81
Abbildung 80: Vorderansicht der Simulation	81
Abbildung 81: Leistung bei maximal erreichbarer Turbinendrehzahl	83
Abbildung 82: Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 30 U/min	84
Abbildung 83: Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 25 U/min	85
Abbildung 84: Leistung bei unterschiedlichen Drehzahlen	86
Abbildung 85: Simulationsaufbau mit Schurre	87
Abbildung 86: Vorderansicht der Simulation mit Schurre	89
Abbildung 87: Isometrische Ansicht der Simulation mit Schurre	89
Abbildung 88: Aufbau des Rahmens	91
Abbildung 89: Lagerung der Turbine [mm]	92
Abbildung 90: Adapternabe [mm]	94

Abbildung 91: Gesamter Kettentrieb	94
Abbildung 92: Teil der Schurre mit Abweiserblech	97
Abbildung 93: Rutsche	97
Abbildung 94: Verstelleinheit.....	98
Abbildung 95: Gesamte Schurre	99
Abbildung 96: Zu einem Förderkreislauf angeordneten Förderbänder	101
Abbildung 97: Anordnung des Prüfstandes im Förderkreislauf	101
Abbildung 98: Schaltschrank mit angeschlossenen Widerständen	102
Abbildung 99: Vorderansicht der Vergleichssimulation	109
Abbildung 100: Leistungsverlauf der Vergleichssimulation	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kostenaufstellung des Steuerungskonzeptes	68
Tabelle 2: Materialeingabedaten	78
Tabelle 3: Interaktionsdaten	79
Tabelle 4: Turbinenabstände.....	82
Tabelle 5: Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei maximal erreichbarer Turbinendrehzahl	83
Tabelle 6: Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 30 U/min.....	84
Tabelle 7: Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei einer Turbinendrehzahl von 25 U/min.....	85
Tabelle 8: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 1.....	105
Tabelle 9: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 2.....	105
Tabelle 10: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 3.....	106
Tabelle 11: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 4.....	106
Tabelle 12: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 5.....	107
Tabelle 13: Daten und Ergebnisse aus Versuch Nr. 6.....	108

Formelzeichen

C	Kapazität
c	Konstante
f	Frequenz
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
I	elektrische Stromstärke
k	Konstante
M	Drehmoment
\dot{m}	Massenstrom
n	Drehzahl
P	Leistung
Q	Blindleistung
R	elektrischer Widerstand
S	Scheinleistung
s	Schlupf
U	elektrische Spannung
v	Geschwindigkeit
X	Reaktanz
Φ	magnetischer Fluss
ω	Kreisfrequenz

Anhang Inhaltsverzeichnis

Anhang 1: Datenblatt Lenze Getriebemotor	II
Anhang 2: KettentrieBBerechnung	IV
Anhang 3: Lagerberechnung	VIII
Anhang 4: Schaltplan Steuerungskonzept	X
Anhang 5: Schaltplan Generator-Motor Steuerung	XXXII
Anhang 6: Übersichtsplan Turbinenprüfstand	XXXV

Anhang 1: Datenblatt Lenze Getriebemotor

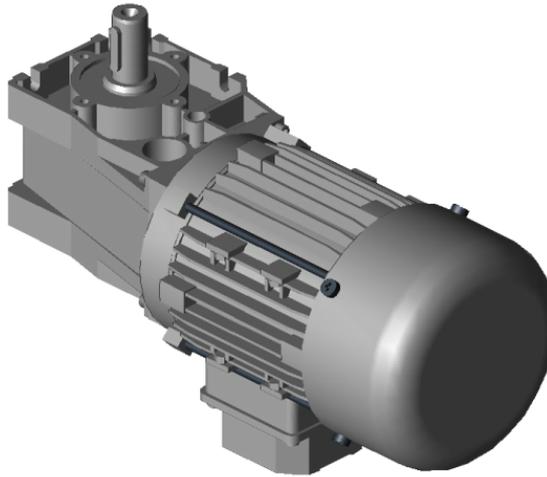
Produktdatenblatt

G50AB-MDEMA

Lenze

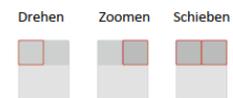
g500 Kegelradgetriebe

G50AB-MDEMA



Hinweis: Bei dem dargestellten Modell handelt es sich um eine vereinfachte Darstellung. Es kann zu geringfügigen Abweichungen kommen.

Maus-Bedienung des 3D-Modells



3D.stp
data.csv
data.xls

Technische Produktinformationen

g500 Kegelradgetriebe

KMAT	13508849
Getriebereihe	g500 Kegelradgetriebemotor
Getriebe	g500-B45
Motor	MD 071-32
Bemessungsleistung	0.37 KWT
Bemessungsfrequenz	50 HTZ
Übersetzung	8.178
Abtriebsdrehzahl	172.4 PMI
Abtriebsdrehmoment	19 4P
Belastbarkeit	2.26
Motoranbau an Getriebe	Direktanbau (Motor integriert)
Einbaulage	E
Schutzart	IP55
Oberflächen-/Korrosionsschutz	ohne OKS
Farbe	unlackiert
Typenschild 1. / 2.	Aluminium / ohne

Getriebe-Code	G50AB045MVAR2C00
Abtriebswelle	V - Vollw. 20x40 mm Lage 3
Wellenausführung	Standard (Stahl)
Abtriebswellendichtung	Standard (NBR)
Wellenabdeckung	nein
Montagesatz für Hohlwelle	nein
Bauform	A - mit Fuß, mit Zentrierung
Abtriebsflansch	R - ohne Flansch
Drehmomentabstützung	ohne
Drehmomentstütze	Lage ohne Angabe
Winkel Drehmomentstütze	nicht vorhanden
Entlüftungselement	ohne Entlüftung
Schmierstoff	CLP 460
Schmierstoffmenge	0.35 LTR
Montagepaste	nicht beigelegt
Motor-Code	MDEMAXX071-32C0C
Wirkungsgradklasse	#
Bemessungsdrehzahl	1410 PMI
Bemessungsdrehmoment	2.51 4P
Bemessungsspannung	230 / 400 V
Bemessungsstrom	1.6/0.95A
Leistungsfaktor	0.77
Lagerung Antriebswelle	Standard
Anschlussart	Klemmenkasten
Klemmenkasten	in Lage 5
Kabeleinführung	ohne Angabe
Motorschutz	TKO (Thermokontakt Öffner)
Kühlung	Eigenlüfter
Bremsenausführung	ohne Bremse
Rückführung	ohne
Approbation USA/Kanada	ohne
Approbation China	ohne
Energieeffizienz China	ohne
Motorcode C86	1241
Inverter	ohne
Netzanschluss	ohne
Bremswiderstand Typ	ohne
Bremswiderstand	ohne

Anhang 2: Kettentriebberechnung

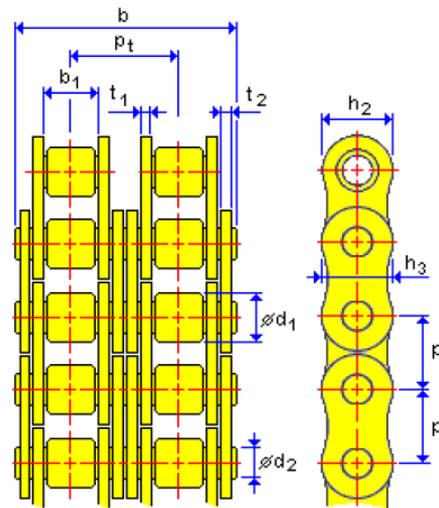
Rollenketten-Generator

25.08.2018 Manuel Seidl

Projektinformationen

▣ Ketteneigenschaften

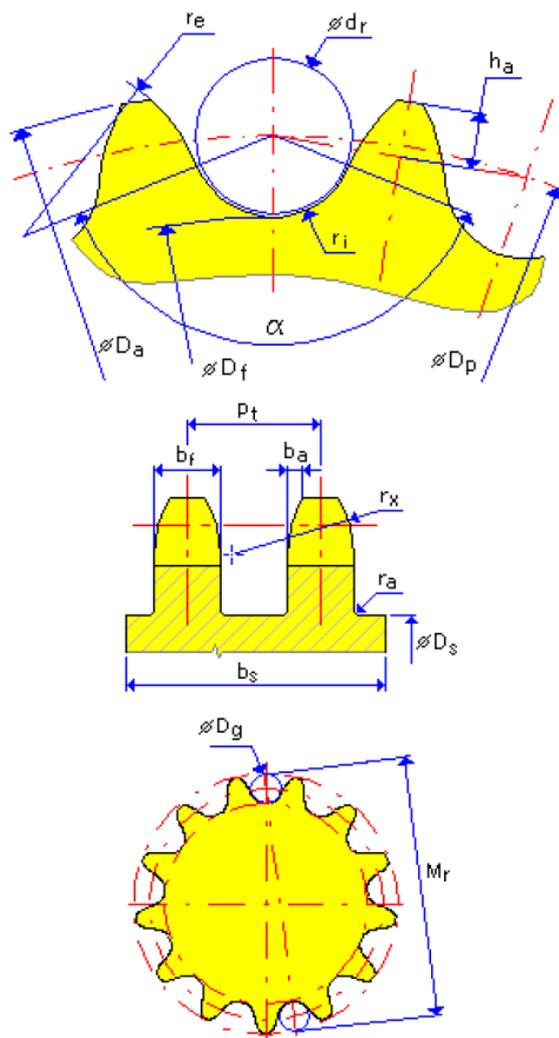
Kette : DIN 8187:1984 - Präzisionsrollenkettens mit kurzer Teilung (EU)	
Kettengrößenbezeichnung	10B-1-156
Steigung	p 15,875 mm
Anzahl der Kettenglieder	X 156,000 oE
Anzahl der Kettenstränge	k 1,000 oE
Mindestbreite zwischen Innenplatten	b ₁ 9,650 mm
Maximaler Rollendurchmesser	d ₁ 10,160 mm
Maximaler Durchmesser des Stiftkörpers	d ₂ 5,080 mm
Maximale innere Plattentiefe	h ₂ 14,730 mm
Maximale äußere oder mittlere Plattentiefe	h ₃ 13,720 mm
Maximale Breite über Lagerzapfen	b 19,600 mm
Maximale innere Plattenbreite	t ₁ 1,500 mm
Maximale äußere oder mittlere Plattenbreite	t ₂ 1,500 mm
Ketten-Auflagefläche	A 67,000 mm ²
Zugfestigkeit	F _u 22200,000 N
Spezifische Masse der Kette	m 0,900 kg/m
Koeffizient für Kettenkonstruktion	φ 1,000 oE



▣ 1-Eigenschaften des Kettenrads: Zahnrad

Typ	Antriebskettenrad	
Anzahl der Zähne	z	95,000 oE
Anzahl kontaktierender Zähne	z _c	56,000 oE
Flankendurchmesser	D _p	480,139 mm
Reihenanzahl	k	1,000 oE
Sitzspiel	SC	0,051 mm
Zahnbreite	b _f	9,168 mm
Zahnflankenfreistellung	b _a	1,984 mm
Zahnflankenradius	r _x	15,875 mm
Abdeckblechdurchmesser	D _s	455,687 mm
Kettenrad-Abdeckblechbreite	b _s	9,168 mm
Höhe des Zahns über Flankenpolygon	h _a	4,763 mm

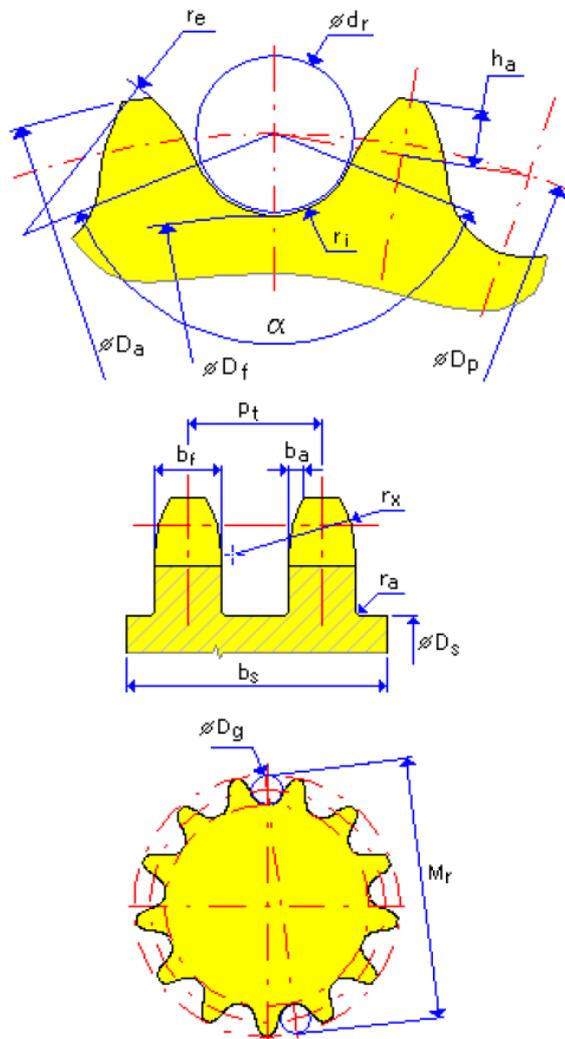
Radius der Rollen-Auflagefläche	r_i	5,131 mm
Zahnflankenradius	r_e	118,262 mm
Winkel der Rollen-Auflagefläche	α	139,05 grad
Abdeckblech-Rundungsradius	r_a	0,635 mm
Kettenrad-Spitzendurchmesser	D_a	489,401 mm
Kettenrad-Stammdurchmesser	D_f	469,877 mm
Stiftdurchmesser wird gemessen	D_g	10,160 mm
Messung über Stifte	M_R	490,233 mm
X-Koordinate	x	-748,419 mm
Y-Koordinate	y	201,892 mm
Spannungslänge	L_f	748,419 mm
Leistungsverhältnis	P_x	1,000 oE
Leistung	P	0,628 kW
Drehmoment	T	200,000 N m
Drehzahl	n	30,000 rpm
Trägheitsmoment	I	0,222 kg m ²
Eingriffsbogen	β	210,19 grad
Kraft bei Eingang	F_1	833,605 N
Kraft bei Ausgang	F_2	0,512 N
Achslast	F_r	834,047 N



2-Eigenschaften des Kettenrads: Zahnrad

Typ	Angetriebenes Kettenrad	
Anzahl der Zähne	z	15,000 oE
Anzahl kontaktierender Zähne	z_c	7,000 oE
Flankendurchmesser	D_p	76,355 mm
Reihenanzahl	k	1,000 oE
Sitzspiel	SC	0,051 mm
Zahnbreite	b_f	9,168 mm
Zahnflankenfreistellung	b_a	1,984 mm
Zahnflankenradius	r_x	15,875 mm
Abdeckblechdurchmesser	D_s	50,497 mm
Kettenrad-Abdeckblechbreite	b_s	9,168 mm
Höhe des Zahns über Flankenpolygon	h_a	4,763 mm
Radius der Rollen-Auflagefläche	r_i	5,131 mm

Zahnflankenradius	r_e	20,726 mm
Winkel der Rollen-Auflagefläche	α	134,00 grad
Abdeckblech-Rundungsradius	r_a	0,635 mm
Kettenrad-Spitzendurchmesser	D_a	84,211 mm
Kettenrad-Stammdurchmesser	D_f	66,093 mm
Stiftdurchmesser wird gemessen	D_g	10,160 mm
Messung über Stifte	M_R	86,096 mm
X-Koordinate	x	0,000 mm
Y-Koordinate	y	0,000 mm
Achsabstand	C	775,172 mm
Spannungslänge	L_f	748,419 mm
Leistungsverhältnis	P_x	1,000 oE
Leistung	P	0,616 kW
Drehmoment	T	30,947 N m
Drehzahl	n	190,000 rpm
Trägheitsmoment	I	180 kg mm ²
Kraftübertragungsverhältnis	i	0,158 oE
Eingriffsbogen	β	149,81 grad
Kraft bei Eingang	F_1	0,512 N
Kraft bei Ausgang	F_2	833,605 N
Achslast	F_r	834,047 N



▣ Arbeitsbedingungen

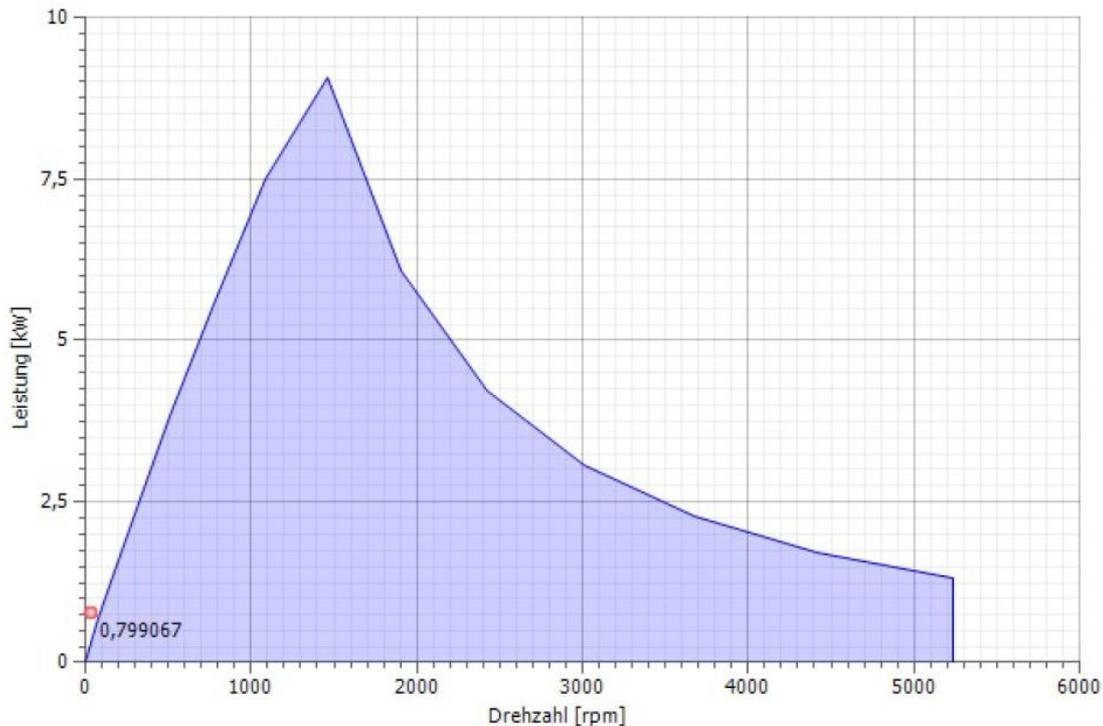
Leistung	P	0,628 kW
Drehmoment	T	200,000 N m
Drehzahl	n	30,000 rpm
Wirkungsgrad	η	0,980 oE
Erforderliche Gebrauchsdauer	L_h	15000,000 h
Max. Kettenverlängerung	ΔL_{max}	0,030 oE
Anwendung	Starke Stöße	
Umgebung	Verschmutzt	
Schmierung	Empfohlen (siehe Anmerkungen unten)	

▣ Leistungs-Korrekturkoeffizienten

Stoßkoeffizient	Y	4,000 oE
Gebrauchsdauerkoeffizient	f_1	1,720 oE
Größenkoeffizient des Kettenrads	f_2	1,000 oE
Reihenkoeffizient	f_3	1,000 oE
Schmierungskoeffizient	f_4	1,000 oE

Achsabstandskoeffizient	f_5	0,837 oE
Verhältniskoeffizient	f_6	0,883 oE
Koeffizient für Gebrauchsdauer	f_7	1,000 oE

☐ Kettennennleistung



☐ Ergebnisse

Geschwindigkeit der Kette	v	0,754 mps
Riemenzugkraft	F_p	833,093 N
Zentrifugalkraft	F_C	0,512 N
Maximale Spannung in Kettenweite	F_{tmax}	833,605 N
Faktor für statische Sicherheit	$S_S > S_{Smin}$	26,631 oE > 7,000 oE
Faktor für dynamische Sicherheit	$S_D > S_{Dmin}$	6,658 oE > 5,000 oE
Lagerdruck	$p_B < p_0 * \lambda$	12,442 MPa
Zulässiger Lagerdruck	p_0	26,016 MPa
Koeffizient für spezifische Reibung	λ	0,786 oE
Sollleistung	$P_D < P_R$	0,799 kW
Kettennennleistung	P_R	1,568 kW
Kettengebrauchsdauer für angegebene Verlängerung	$t_h > L_h$	582774 h
Gebrauchsdauer der Kettenverbindungsplatten	$t_{hL} > L_h$	1138120 h
Rollen- oder Buchsengebrauchsdauer	$t_{hr} > L_h$	719183 h

☐ Zusammenfassung der Meldungen

Berechnung: Empfohlene Schmierung: Tropfölschmierung
 Berechnung: Maximale Kettennennleistung wird durch Verbindungsplattenermüdung beschränkt.
 Berechnung: Berechnung deutet auf Konstruktionsübereinstimmung hin.

Anhang 3: Lagerberechnung

Komponenten-Generator des Lagers

25.08.2018 Manuel Seidl

▣ Projektinformationen

▣ Führung

Typ der Festigkeitsberechnung - Kontrollberechnung

▣ Belastungen

Radialbelastung des Lagers	F_r	825 N
Axialbelastung des Lagers	F_a	200 N
Drehzahl	n	50 rpm
Erforderlicher Faktor für statische Sicherheit	s_0	2,0 oE

▣ Lager

Bezeichnung		DIN 625 SKF- beidseitig abgedeckt (SKF 6005-2Z)
Innendurchmesser des Lagers	d	25,000 mm
Außendurchmesser des Lagers	D	47,000 mm
Lagerbreite	B	12,000 mm
Nennkontaktwinkel des Lagers	α	5 grd
Grundlegende dynamische Belastungsbewertung	C	14000 N
Grundlegende statische Belastungsbewertung	C_0	6550 N
Koeffizient der dynamischen Radialbelastung	X	1,00 oE / 0,56 oE
Koeffizient der dynamischen Axialbelastung	Y	0,00 oE / 2,00 oE
Grenzwert von F_a/F_r	e	0,22 oE
Koeffizient der statischen Radialbelastung	X_0	0,60 oE
Koeffizient der statischen Axialbelastung	Y_0	0,60 oE
Begrenzungsdrehzahl Schmierfett	n_{Lim1}	16000 rpm
Begrenzungsdrehzahl Schmieröl	n_{Lim2}	32000 rpm

▣ Berechnung der Lagergebrauchsdauer

Berechnungsmethode		ANSI/AFBMA 9-1990 (ISO 281-1990)
Erforderliche Nenngebrauchsdauer	L_{req}	10000 h
Erforderliche Zuverlässigkeit	R_{req}	90 oE
Gebrauchsdauer-Anpassungskoeffizient für spezielle Lagereigenschaften	a_2	1,00 oE
Gebrauchsdauer-Anpassungskoeffizient für Betriebsbedingungen	a_3	1,00 oE
Arbeitstemperatur	T	50 °C
Koeffizient für zusätzliche Kräfte	f_d	1,00 oE

▣ Schmierung

Reibungskoeffizient μ	0,0015 oE
---------------------------	-----------

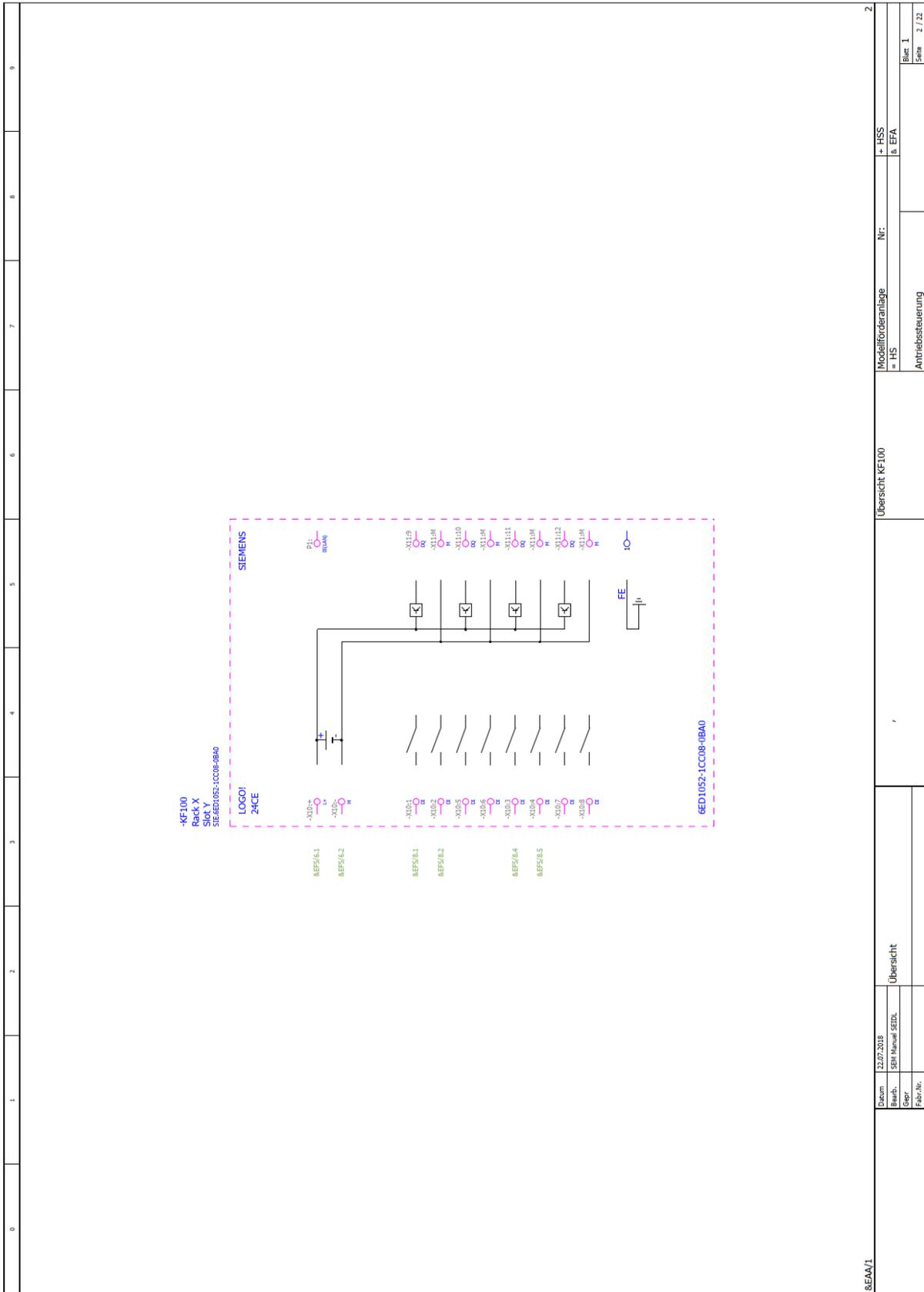
Schmierung	Fett
------------	------

Ergebnisse

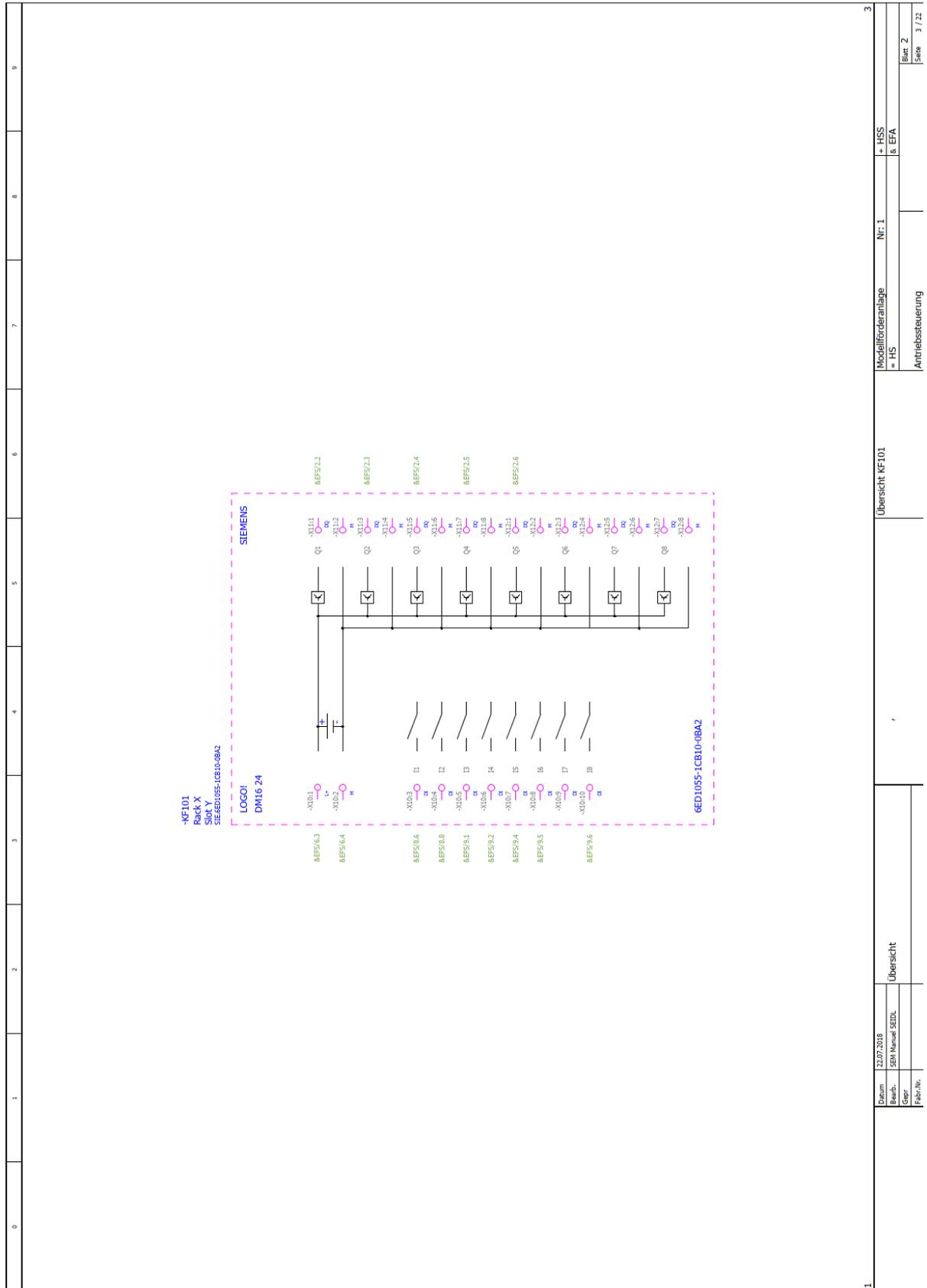
Grundlegende Nenngebrauchsdauer	L_{10}	1428042 h
Angepasste Nenngebrauchsdauer	L_{na}	1428042 h
Berechneter Faktor für statische Sicherheit	s_{0c}	7,93939 oE
Leistungsverlust durch Reibung	P_z	0,08463 W
Benötigte Mindestbelastung	F_{min}	66 N
Statische Entsprechungsbelastung	P_0	825 N
Dynamische Entsprechungsbelastung	P	862 N
Überdrehungskoeffizient	k_n	320,000 oE
Gebrauchsdauer-Anpassungskoeffizient der Zuverlässigkeit	a_1	1,00 oE
Temperaturkoeffizient	f_t	1,00 oE
Entsprechungsgeschwindigkeit	n_e	50 rpm
Minimale Geschwindigkeit	n_{min}	50 rpm
Maximale Geschwindigkeit	n_{max}	50 rpm
Festigkeitskontrolle		Positiv

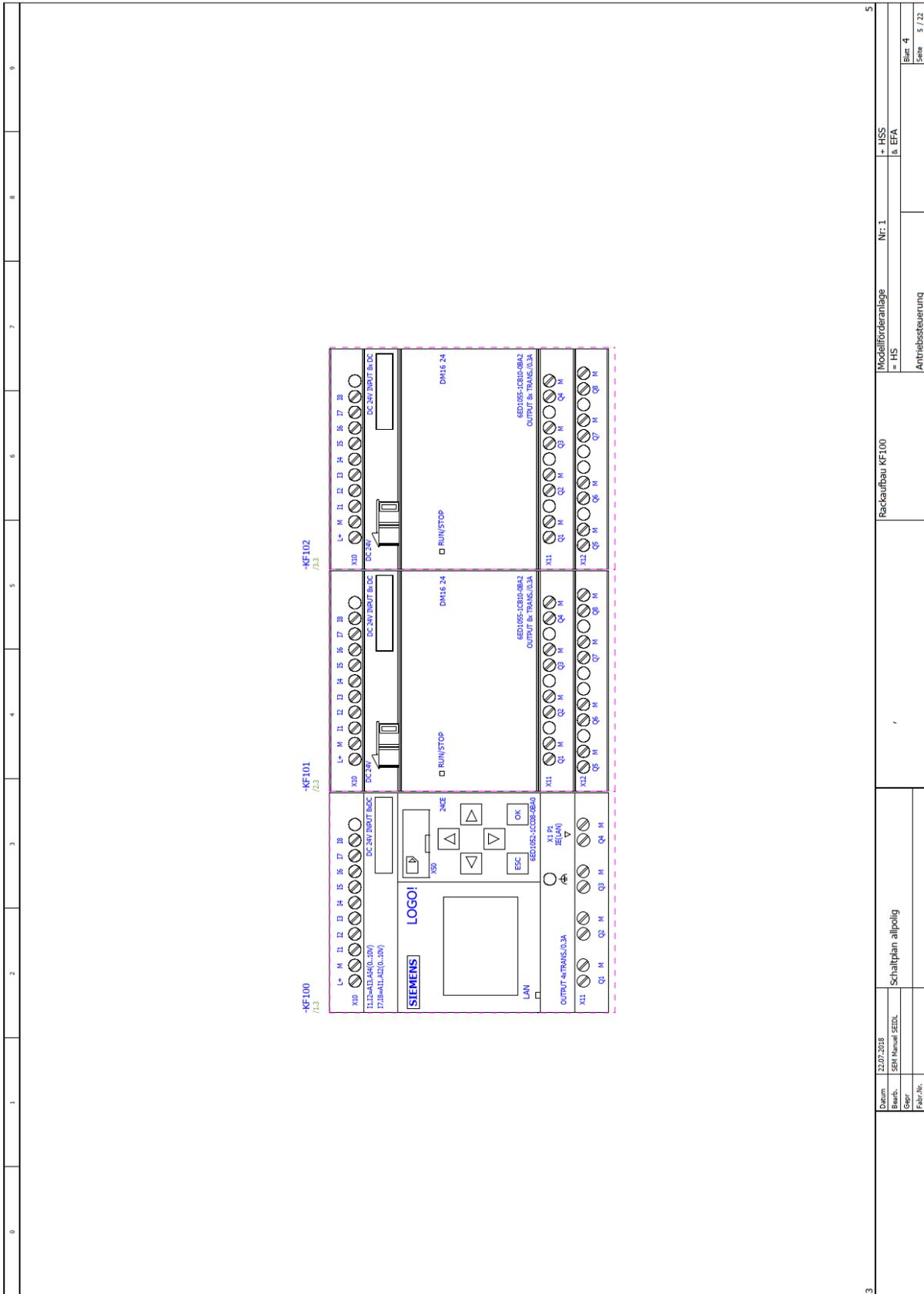
Zusammenfassung der Meldungen

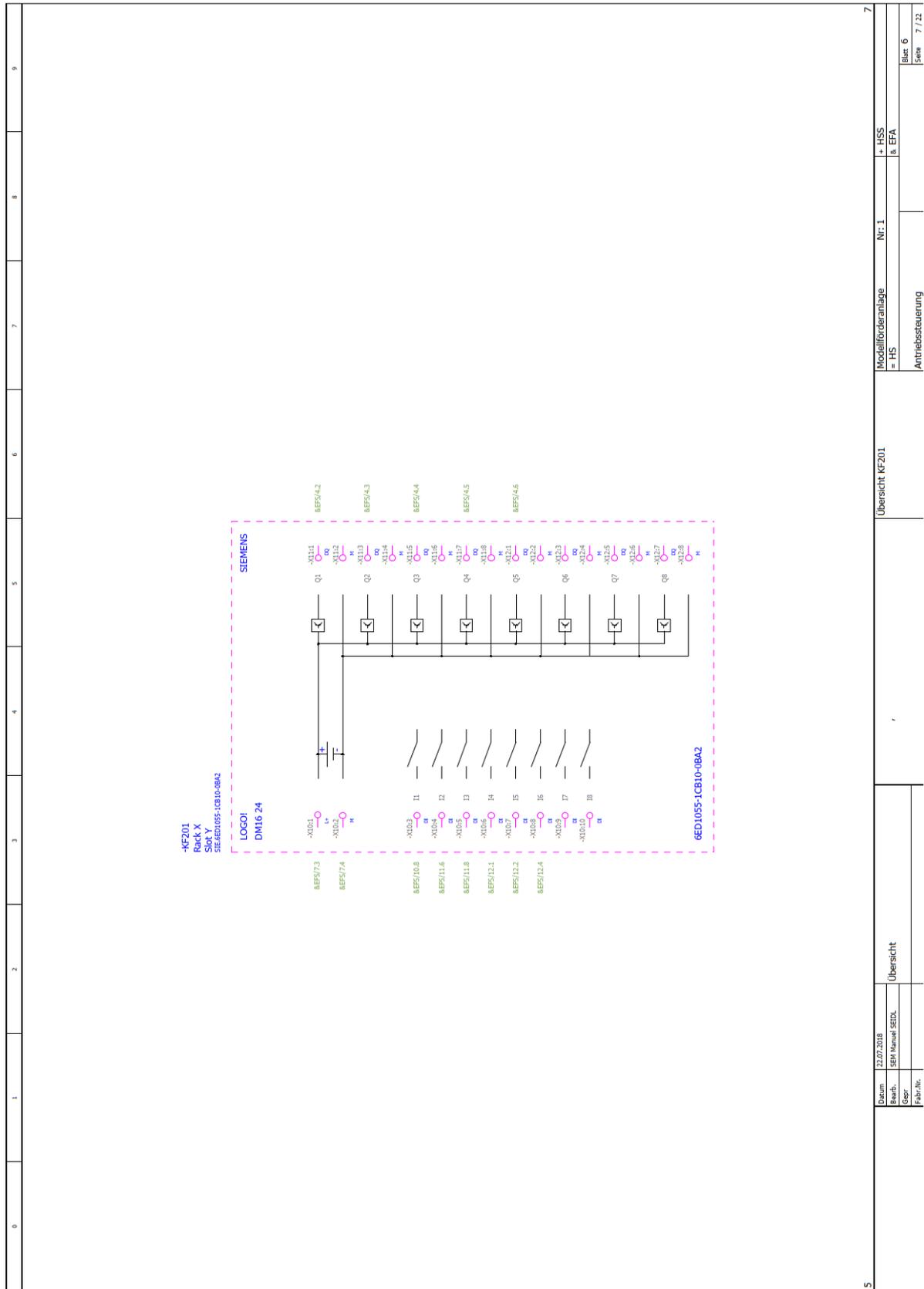
10:51:18 Berechnung: Berechnung deutet auf Konstruktionsübereinstimmung hin.



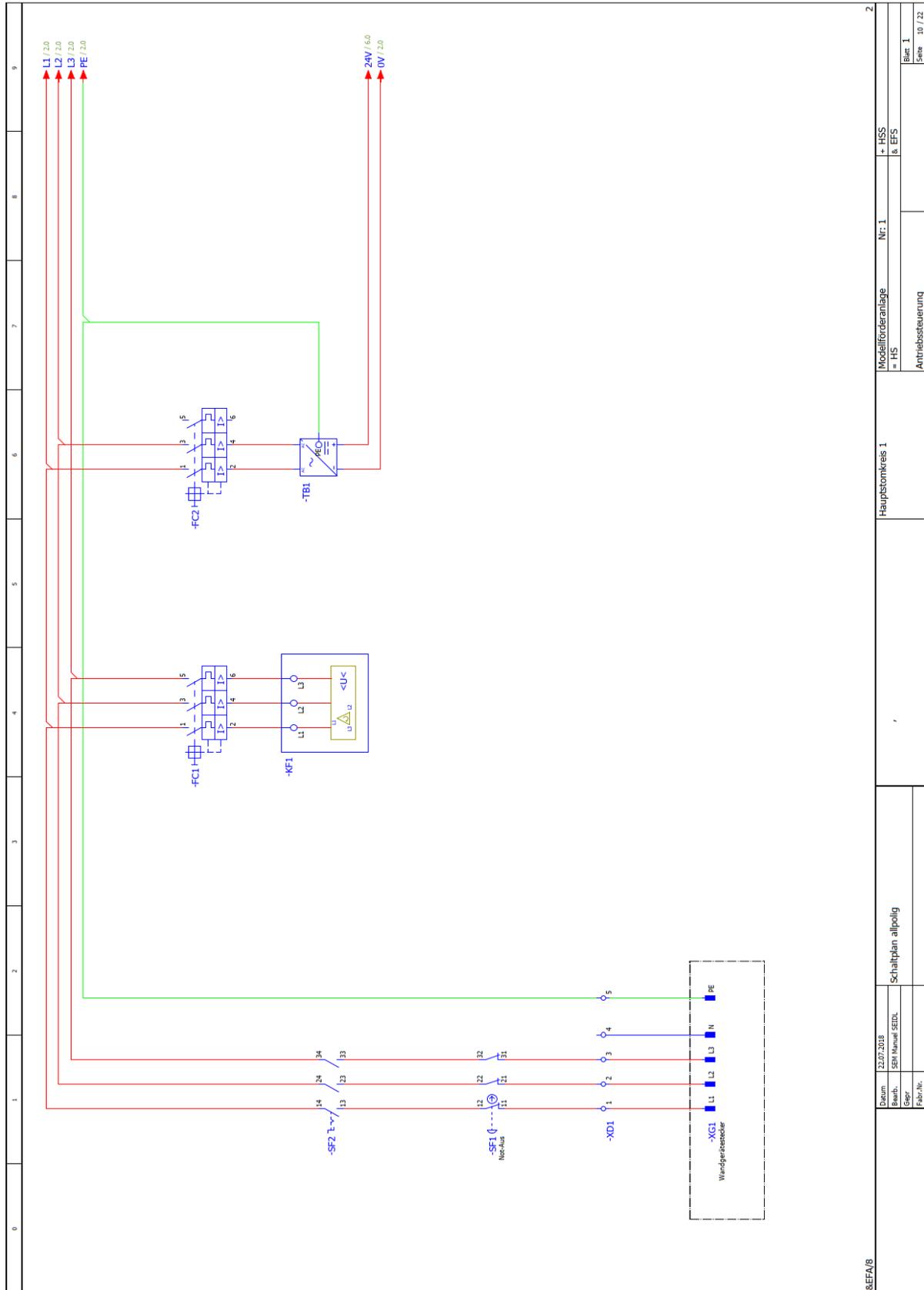
8EAAV1	Übersicht	Übersicht KF100	NT:	+ HSS & EFA	2								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">Datum</td> <td style="width: 20%;">22.07.2018</td> </tr> <tr> <td>Bearb.</td> <td>SEH Manual SEIDL</td> </tr> <tr> <td>Gepr.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fahr./Nr.</td> <td></td> </tr> </table>		Datum	22.07.2018	Bearb.	SEH Manual SEIDL	Gepr.		Fahr./Nr.					
Datum	22.07.2018												
Bearb.	SEH Manual SEIDL												
Gepr.													
Fahr./Nr.													
Übersicht													
				Blatt 1 Seite 2 / 22									







Datum: 22.07.2018 Bearb.: SEH Manuel SEDL Gepr.: Fabr.Nr.:	Übersicht	Übersicht KF201	Modellförderanlage = IHS	Nr: 1	+ HSS & EFA
					Blatt 6 Seite 7 / 12



SEFA/8

Datum	22.07.2018
Bearb.	SEH Manuel SEEDL
Gepr.	
Fahr.Nr.	

Schaltplan allpölg

Hauptstromkreis 1

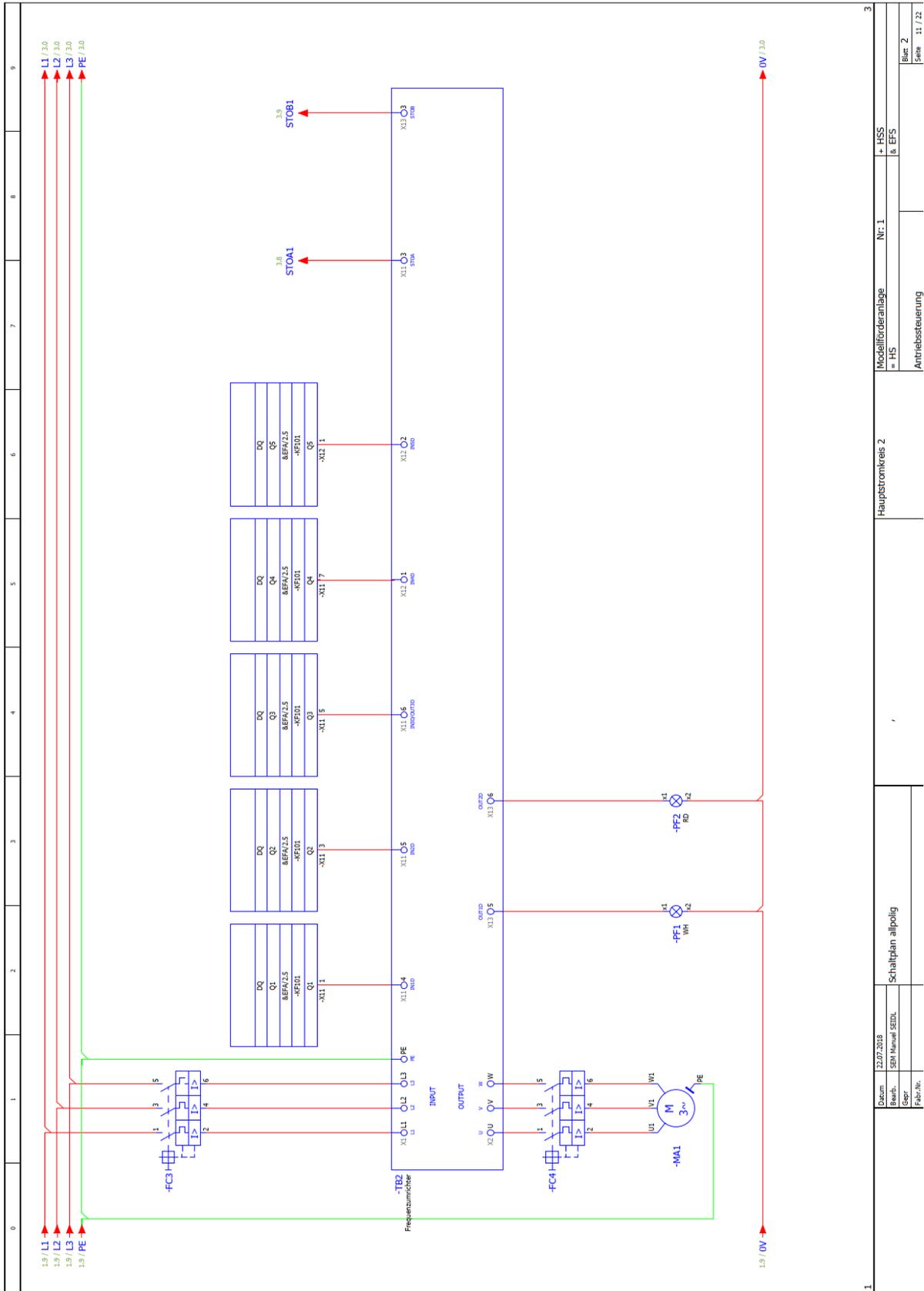
Modellförderanlage Nr. 1

+ HSS

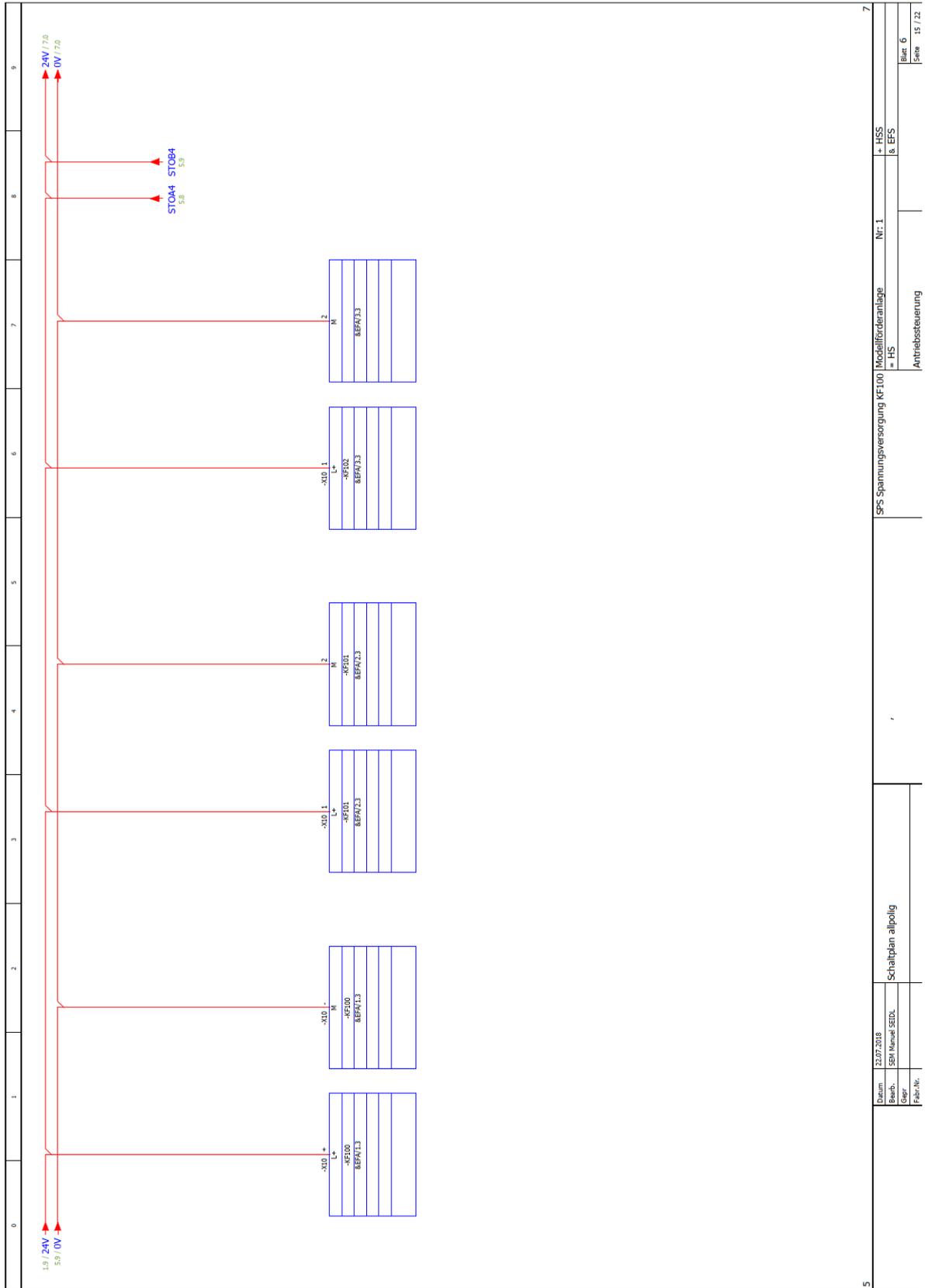
& EFS

Blatt 1

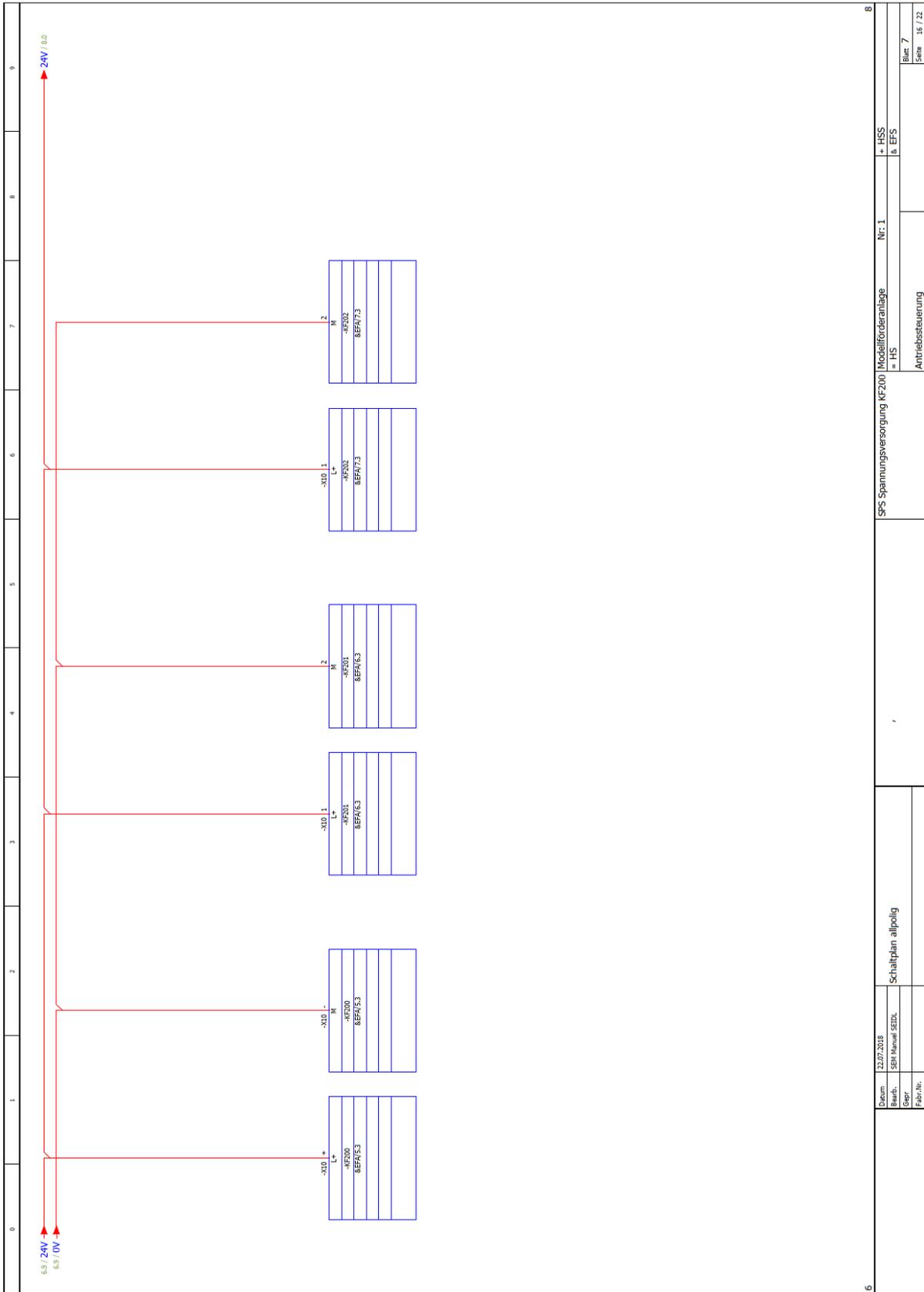
Seite 10 / 22

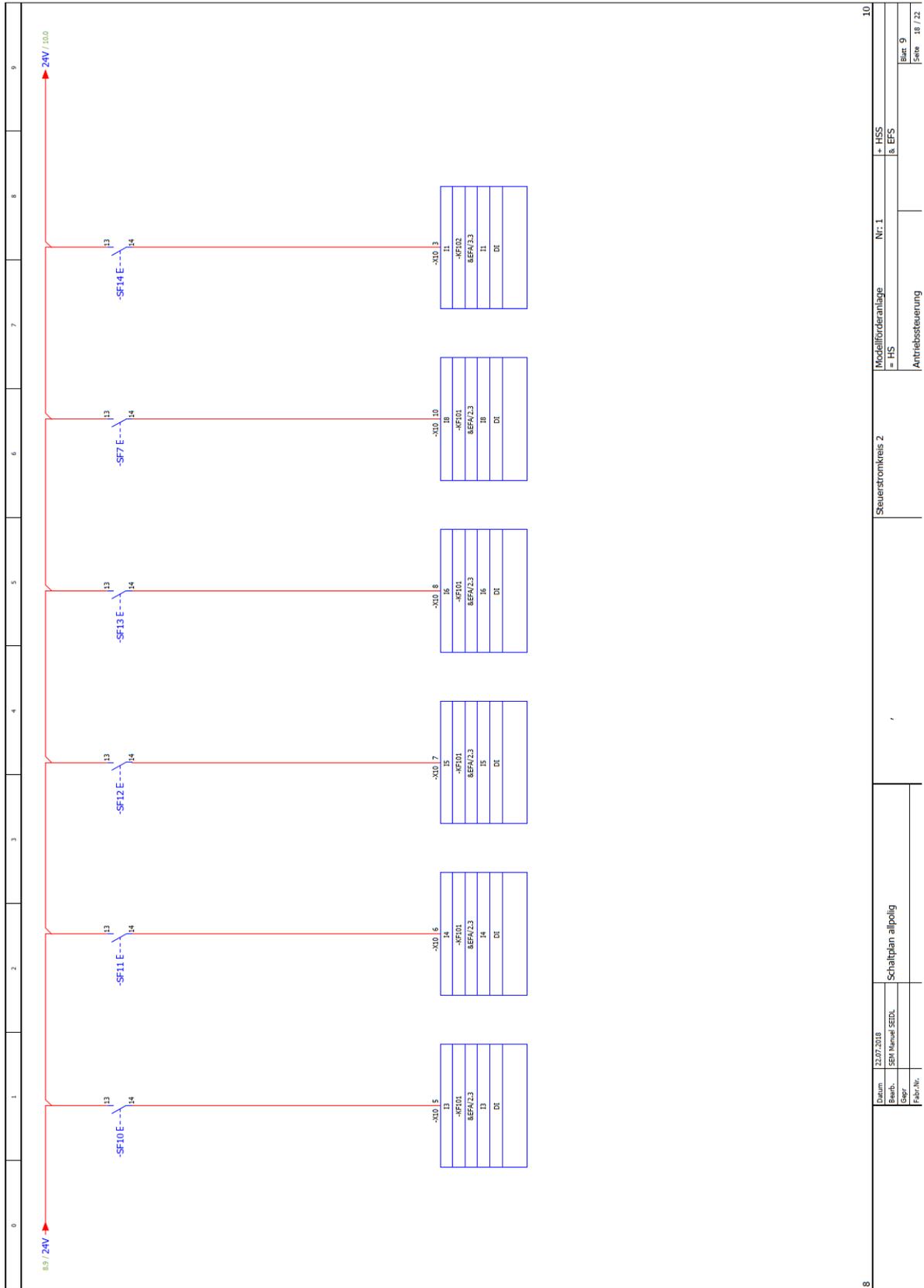


Datum: 22.07.2018		Schaltplan allpolig		Hauptstromkreis 2		Modellförderanlage Nr. 1		+ HSS & EFS	
Bearb.: SEM Manual_SEIDL									
Gepr.:									
Fabr.Nr.:									
								Blatt 2	
								Seite 11 / 21	

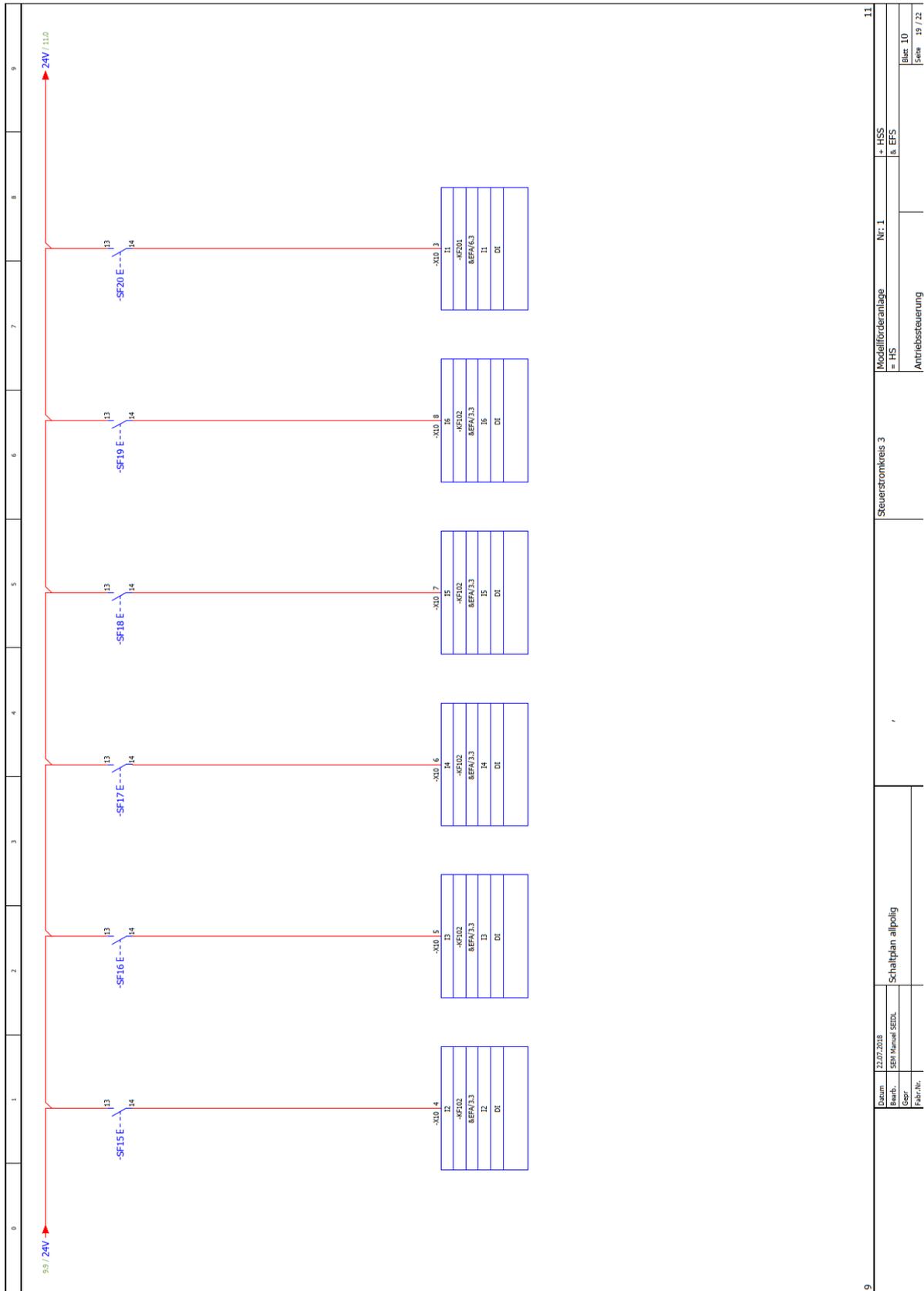


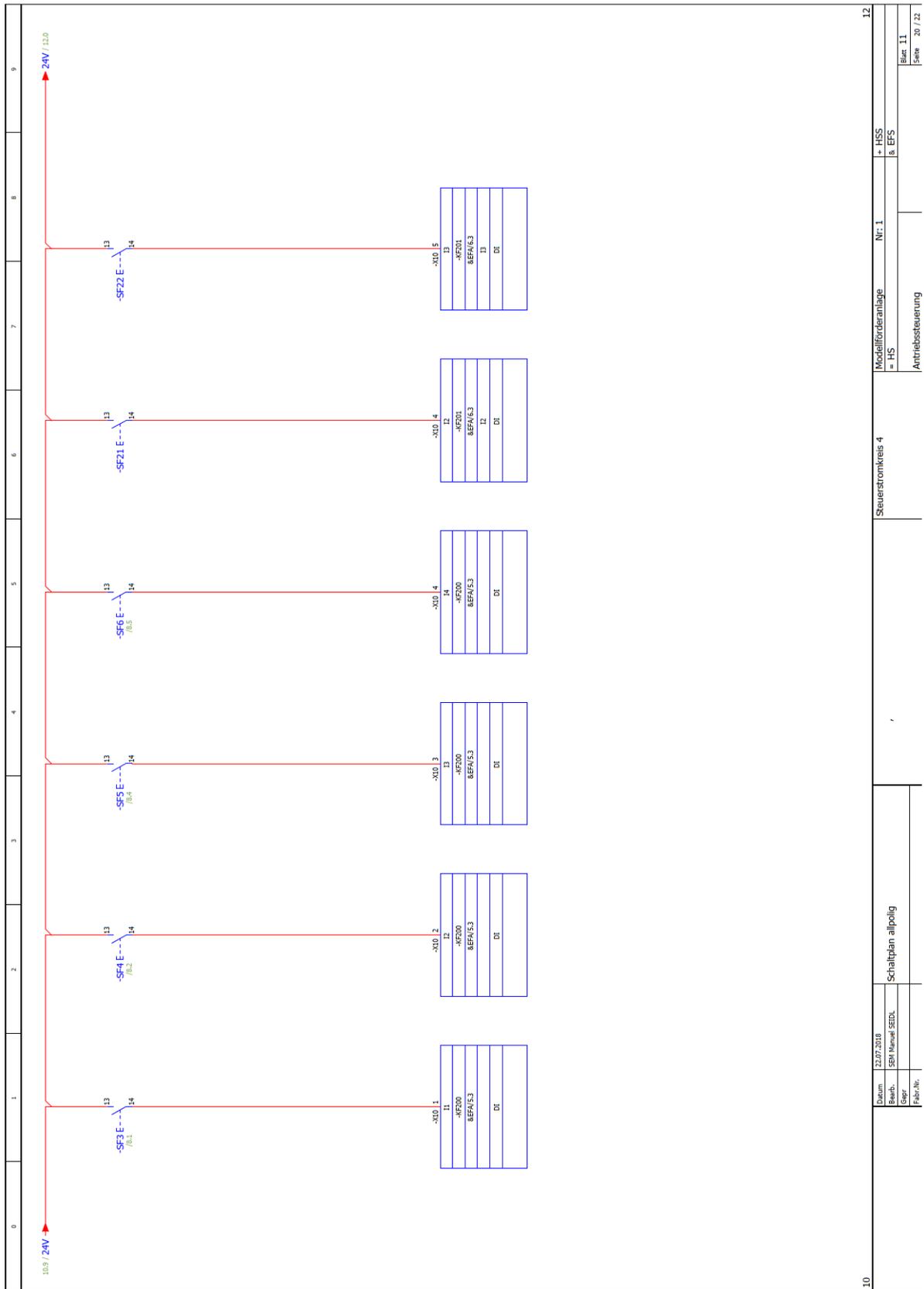
Datum: 22.07.2018		Schaltplan allpölig		SPS Spannungsversorgung KF100		Modellfördränlage		Nr.: 1		+ HSS	
Bearb.: SSI Manual SEDL						= HS				+ EFS	
Zeichn.:										Blatt 6	
Fabr.Nr.:										Seite 15 / 23	



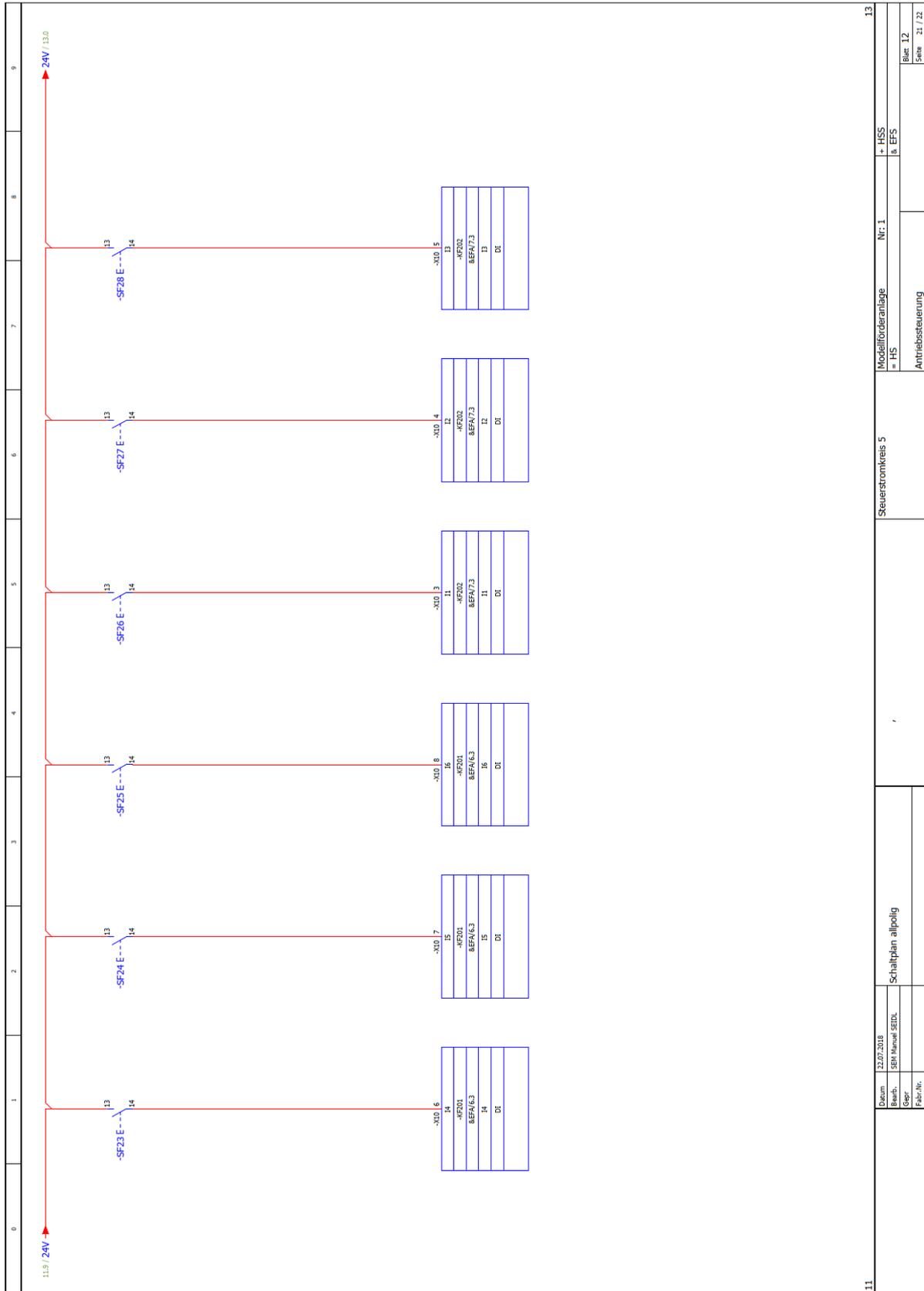


8	9	10
Datum: 22.07.2018 Bearb.: SBN Manuel SEDL Gepr.: Fabr./r.:		Schaltplan allpilig
Steuerstromkreis 2 = HSS		Modellförderanlage Nr. 1 + HSS & EFS Antriebssteuerung
		Blatt 9 Seite 18 / 22



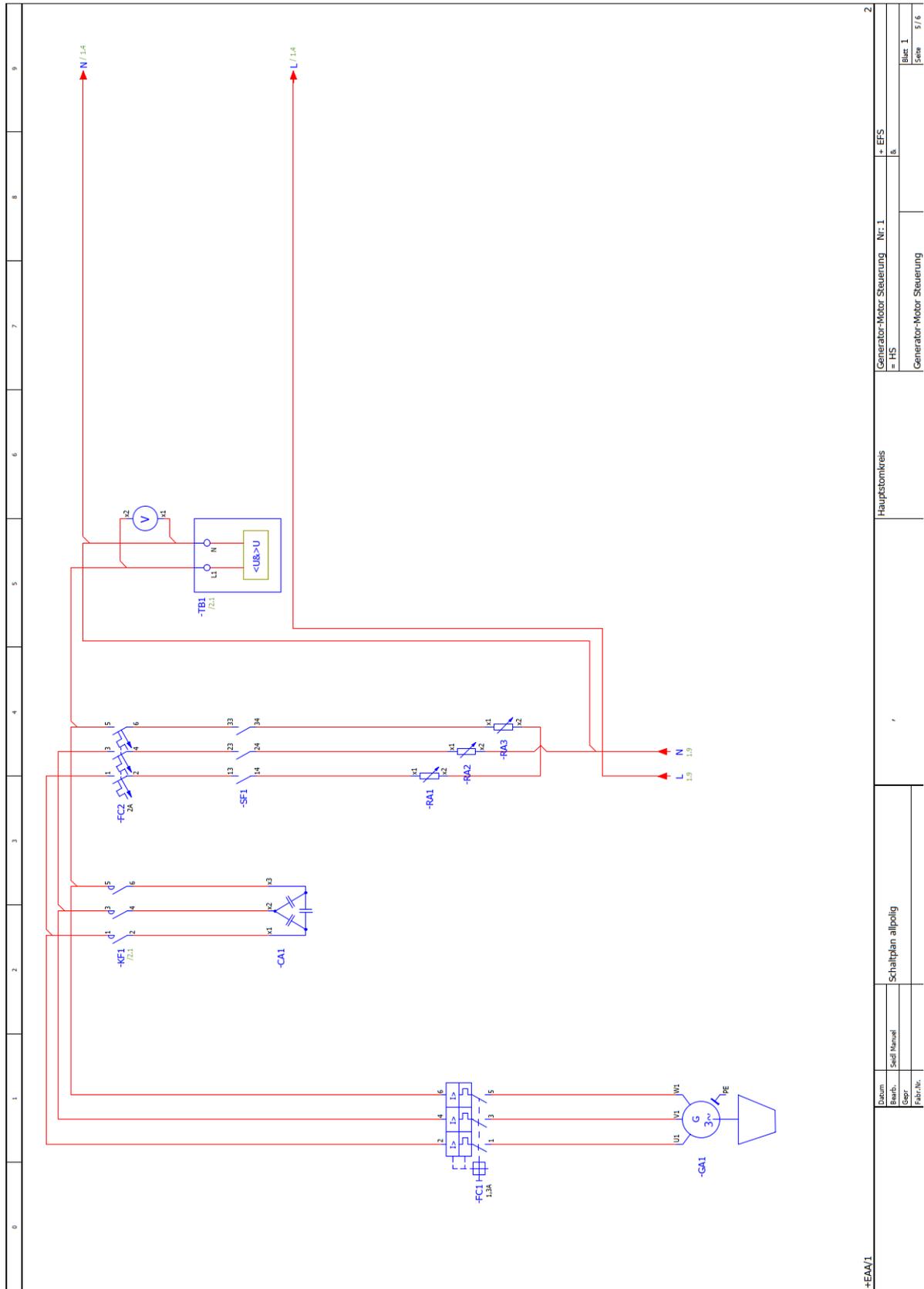


10.9 / ZAV		10.8		10.7		10.6		10.5		10.4		10.3		10.2		10.1		9	
																		+ HSS & EFS	
																		Nr: 1	
																		Modellföreranlage = HFS	
																		Antriebssteuerung	
																		Steuerstromkreis 4	
																		Schaltplan allpilig	
Datum: 22.07.2018		Bearb.: SBN Manuel SEDL																	
Gepr.:		Fabrik.:																	
																		Blatt 11	
																		Seite 20 / 22	



Anhang 5: Schaltplan Generator-Motor Steuerung

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9														
<div style="border: 2px solid black; padding: 10px; margin: 10px auto; width: 80%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> Projektname und Version <small>project name and version</small> Generator-Motor Steuerung </td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> Bearbeitet am <small>edited on</small> 08.04.2019 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> Projektnummer <small>project number</small> 1 </td> <td style="padding: 5px;"> Anzahl der Seiten <small>number of pages</small> 6 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> Baustelle (Firma / Kunde) <small>building site</small> Generator-Motor Steuerung </td> <td style="padding: 5px;"> Hersteller (Firma) <small>manufacturer (company)</small> Seidl Manuel </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> Projektbeschr./ Leistung <small>project description/ power</small> Generator-Motor Steuerung </td> <td style="padding: 5px;"> Projektverantwortlicher <small>project manager</small> Seidl Manuel </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> Software <small>software</small> Vorschrift </td> <td style="padding: 5px;"> Fabrikat/Nummer <small>maker/ number</small> Auftragsnummer 1 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> Auftragsnummer 1 <small>order number 1</small> Auftragsnummer 2 </td> <td style="padding: 5px;"> Erstellt am <small>created on</small> 29.03.2019 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> Auftragsnummer 2 <small>order number 2</small> Projektende </td> <td style="padding: 5px;"> Datum Bearb. Gepr. Fabr./Nr. <small>date</small> URJ Jennifer Url Gepr. Fabr./Nr. </td> </tr> </table> </div>										Projektname und Version <small>project name and version</small> Generator-Motor Steuerung	Bearbeitet am <small>edited on</small> 08.04.2019	Projektnummer <small>project number</small> 1	Anzahl der Seiten <small>number of pages</small> 6	Baustelle (Firma / Kunde) <small>building site</small> Generator-Motor Steuerung	Hersteller (Firma) <small>manufacturer (company)</small> Seidl Manuel	Projektbeschr./ Leistung <small>project description/ power</small> Generator-Motor Steuerung	Projektverantwortlicher <small>project manager</small> Seidl Manuel	Software <small>software</small> Vorschrift	Fabrikat/Nummer <small>maker/ number</small> Auftragsnummer 1	Auftragsnummer 1 <small>order number 1</small> Auftragsnummer 2	Erstellt am <small>created on</small> 29.03.2019	Auftragsnummer 2 <small>order number 2</small> Projektende	Datum Bearb. Gepr. Fabr./Nr. <small>date</small> URJ Jennifer Url Gepr. Fabr./Nr.
Projektname und Version <small>project name and version</small> Generator-Motor Steuerung	Bearbeitet am <small>edited on</small> 08.04.2019																						
Projektnummer <small>project number</small> 1	Anzahl der Seiten <small>number of pages</small> 6																						
Baustelle (Firma / Kunde) <small>building site</small> Generator-Motor Steuerung	Hersteller (Firma) <small>manufacturer (company)</small> Seidl Manuel																						
Projektbeschr./ Leistung <small>project description/ power</small> Generator-Motor Steuerung	Projektverantwortlicher <small>project manager</small> Seidl Manuel																						
Software <small>software</small> Vorschrift	Fabrikat/Nummer <small>maker/ number</small> Auftragsnummer 1																						
Auftragsnummer 1 <small>order number 1</small> Auftragsnummer 2	Erstellt am <small>created on</small> 29.03.2019																						
Auftragsnummer 2 <small>order number 2</small> Projektende	Datum Bearb. Gepr. Fabr./Nr. <small>date</small> URJ Jennifer Url Gepr. Fabr./Nr.																						
=EFS/1 + EAA Generator-Motor Steuerung Nr. 1 + HS Generator-Motor Steuerung Blatt 1 Seite 4/6																							



+EAA1

Generator-Motor Steuerung Nr: 1	+ EFS
= IHS	8
Generator-Motor Steuerung	

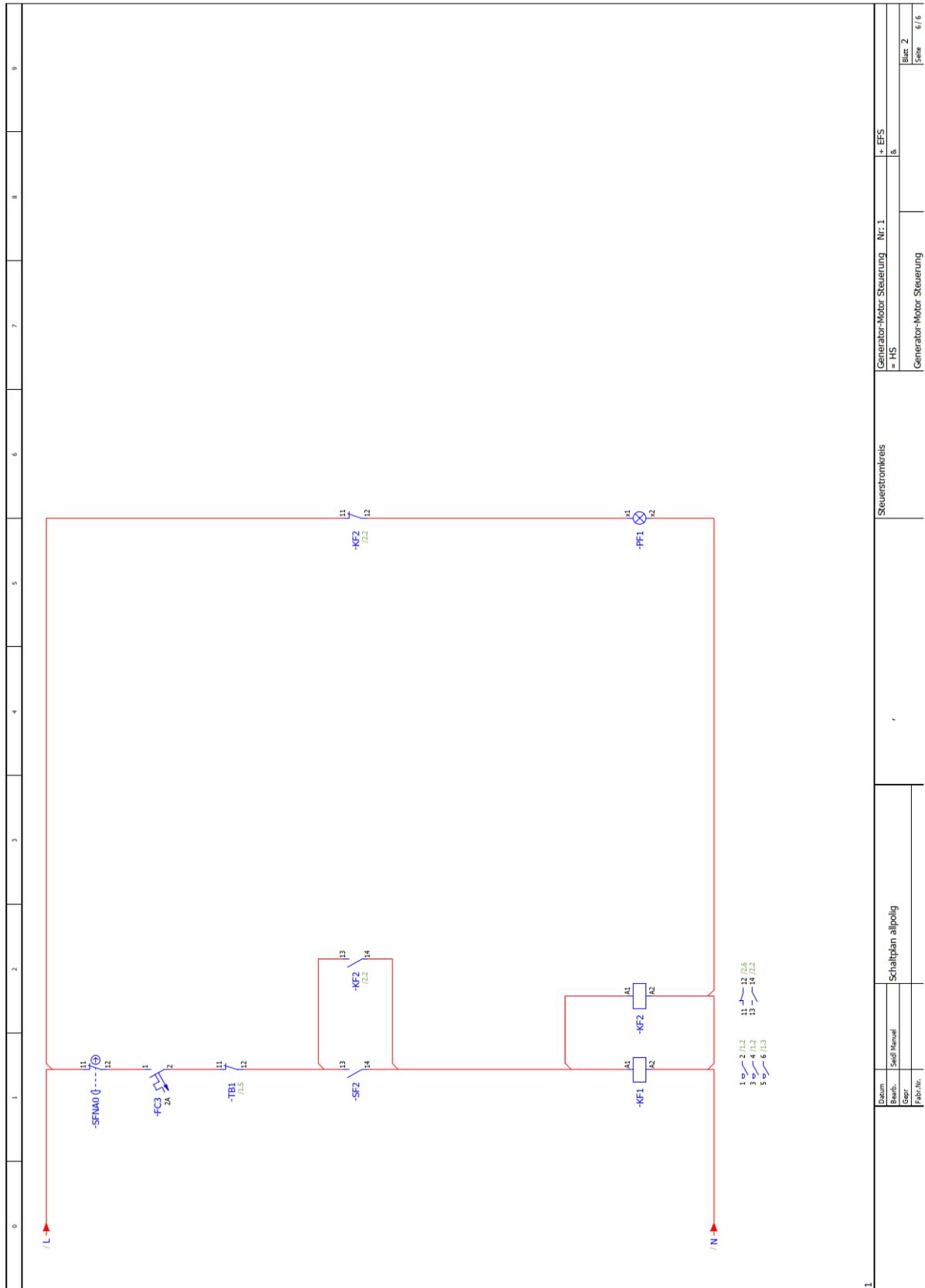
Hauptstromkreis

7

Schaltplan allpoltig

Datum	Seit	Manuel
Beinh.		
Gepr.		
Fabrik.		

Blatt 1
Seite 5/6



Anhang 6: Übersichtsplan Turbinenprüfstand

