

Semesterarbeit 02

Autor:
Thomas Rickenmann

1 Zusammenfassung

Die Idee aus einem Spinningbike Energie zu gewinnen ist nicht neu, doch bis jetzt sind noch alle Projekte an der praxisgerechten Nutzung gescheitert.

Mit dieser Arbeit, die auf der ersten Semesterarbeit aufbaut, wurde ein völlig neuartiges Konzept entwickelt, das dem Trittverhalten eines herkömmlichen Spinningbikes nichts nachsteht. Mit Hilfe eines vielpoligen Generators, der zusätzlich als Schwungmasse dient, kann der Tritt Widerstand stufenlos eingestellt werden - vom Leerlauf bis zu fast vollständigem blockieren. Damit konnte das gesteckte Ziel klar erreicht werden.

Ein Praxistest mit dem bekannten Schweizer Profi-Triathleten Olivier Bernhard hat gezeigt, dass die Maschine gar den hohen Anforderungen der Spitzensportler gerecht wird. Die gewonnene Energie kann später nicht nur für allgemeine Zwecke genutzt werden, sondern auch in der Leistungsdiagnose für Leistungssportler seine Anwendung finden.



Das erfolgreiche Projekt wäre ohne die grosse Unterstützung einiger Firmen schon in der Anfangsphase gescheitert. Daher bereits an dieser Stelle ein grosses Dankeschön allen beteiligten Personen!

1	ZUSAMMENFASSUNG	2
2	EINFÜHRUNG.....	5
3	PROJEKTAUFGABE	6
4	ROTOR.....	7
4.1	Gesamtansicht	7
4.2	Vermassung	8
4.3	Bohrungen.....	8
4.4	Gewicht & Massenträgheitsmoment.....	9
4.5	Fertigung / Resultat.....	9
4.6	Einbau der Magnete.....	12
5	PHASEN.....	14
5.1	Flussverlauf ideal	14
5.2	Anzahl Phasen	15
5.3	Erste Variante.....	16
5.3.1	Vorteile.....	18
5.3.2	Nachteile	18
5.4	Zweite Variante	19
5.4.1	Vorteile.....	21
5.4.2	Nachteile	21
5.5	Definitive Wahl.....	21
6	STATOR	22
6.1	Gesamtansicht	22
6.2	Vermassung	23
6.3	Obenansicht / Segment.....	23
6.4	Fertigung / Resultat.....	25
7	SPULEN	26
7.1	Dimensionierung	26
7.2	Berechnungen	27
7.2.1	Wahl des Drahtdurchmessers	29
7.2.2	Neu – Berechnung.....	29
7.2.3	Schlussfolgerung:.....	29
7.3	Fertigung / Resultat.....	30
7.4	Anpassung an Radius.....	31
7.5	Eingiessen der Spulen	32

7.5.1	Gussmasse	32
7.5.2	Vorbereitung	33
7.5.3	Einbau	33
8	MESSUNGEN.....	40
8.1	Flussverlauf real	41
8.2	Strom-Spannungskennlinie	42
8.3	Leistung – Strom Kennlinie.....	43
8.4	Temperaturverhalten.....	44
8.5	Vergleich: Berechnung – Messung	45
8.6	Fazit / Beweis	45
9	FERTIGER AUFBAU	46
9.1	3 Phasen	47
9.1.1	Brückengleichrichter	47
9.1.2	Oszillatorsignal	47
9.2	6 Phasen	48
9.2.1	Brückengleichrichter	48
9.2.2	Oszillatorsignal	48
10	FELDTTEST MIT OLIVIER BERNHARD	49
10.1	Testablauf.....	49
10.2	Testergebnis	50
10.3	Interview mit Olivier Bernhard	51
11	WIRTSCHAFTLICHKEIT	52
11.1	Kosten.....	52
11.2	Vergleich bestehender Maschinen	52
12	ORGANISATORISCHES	53
12.1	Zeitplan real.....	53
12.2	Aufwand	53
12.3	Bezugsquellen Material.....	54
12.4	Bild – und Programmverzeichnis	54
12.5	Literaturverzeichnis.....	55
12.6	Beilage	55
13	SCHLUSSWORT.....	56

2 Einführung

Wie bereits erwähnt baut dieses Projekt auf der ersten Semesterarbeit auf, wo eine umfangreiche Analyse und die grobe Dimensionierung des Generators im Vordergrund stand. Die wesentlichen Kenntnisse aus der alten Arbeit werden in dieser wiederverwendet und verfeinert. An den betreffenden Stellen ist jeweils ein Vermerk angebracht.

In dieser Arbeit ging es in erster Linie um die praktische Umsetzung der theoretischen Grundlagen.

Die einzelnen Phasen sind in einer logischen Reihenfolge in Kapitel gegliedert, obwohl es wegen der zeitlichen Beschränkung sehr oft Überschneidungen gab und einzelne Teile sehr weit im Voraus konstruiert und in Auftrag gegebenen werden mussten.

Sie haben sie in der Hand – die Doku und die freie Entscheidung zum weiter Lesen. Viel Vergnügen!

3 Projektaufgabe

2. Studienarbeit im Fachbereich Energietechnik, SS 2002

Thema : Spinningvelo mit Netzurückspeisung (Powerback)

Bearbeiter : Thomas Rickenmann

1. Hintergrund

Hometrainer, welche die anthropogen erzeugte Muskelarbeit in hochwertige elektrische Energie umwandeln und in das Niederspannungsnetz einspeisen können, waren schon mehrfach Gegenstand von Studien- und Diplomarbeiten am Labor für Energietechnik. F.Schlums und T.Rickenmann haben in ihrer 1. Studienarbeit im Wintersemester 2002 ein neuartiges Konzept für ein *Powerback* -Trainingsgerät entwickelt und vorgestellt. Als Basis dient eine professionelle *Spinning*-Maschine, wie sie in Sport- und Fitnesszentren anzutreffen ist. Das Schwungrad dieses Spinners wird zu einem *Scheibenläufergenerator* umgebaut, dessen Rotor mit Permanentmagneten bestückt ist und der Stator eine vielpolige Wechselstromwicklung trägt, die gleichmässig über den Umfang verteilt ist. Die dort induzierte Spannung soll gleichgerichtet und über einen Frequenzumformer in das Netz eingespeisen werden.

2. Aufgabenstellung

In der 2. Studienarbeit soll das o.g. Konzept schrittweise aufgebaut und verifiziert werden. Hierzu zählen insbesondere die aufwändige mechanische Konstruktion des Läufers und des Stators, die elektromagnetische Auslegung der Statorwicklungen und die messtechnische Überprüfung der elektrischen und mechanischen Parameter. Durch eine „saubere“ ingenieurtechnische Konstruktion ist der Nachweis zu erbringen, dass die Überlegungen, qualitativen Abschätzungen und Berechnungen aus der 1. Arbeit richtig sind und sich mit üblichen Herstellungstechniken in einem funktionsfähigen Prototypen realisieren lassen.

3. Pflichtenheft

Im Rahmen dieser 2. Studienarbeit sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Mechanische Konstruktion des Läufers und des Rotors
- Optimale Auslegung der Statorwicklungen (Geometrie, Bemessung, Verschaltung, Einbau)
- Schrittweise Überprüfung der Teilarbeiten durch entsprechende Messungen
- Fertigstellen eines vollfunktionsfähigen Prototyps mit einem Gleichstromausgang
- Vergleich mit den gesteckten Zielen und mit den bestehenden Maschinen

4. Vorgehen

Erstellen Sie einen Managementplan, aus dem die logische zeitliche Abfolge der erforderlichen Arbeitsschritte hervorgeht. Dokumentieren Sie die Ergebnisse aus den Besprechungen mit dem Betreuer bzw. mit auswärtigen Experten sowie Ihren zeitlichen und arbeitsmässigen Aufwand (Soll- Ist-Vergleich).

5. Dokumentation und Bericht

Alle Arbeitsschritte sind in bekannter Weise /1/ zu dokumentieren und in einem technischen Bericht zusammenzufassen.

6. Literatur

- /1/ Merkblatt für Studien- und Diplomarbeiten, Fachbereich Energietechnik
/2/ (Dokumentation H. Prechtl)

Rapperswil, 18.4.2002

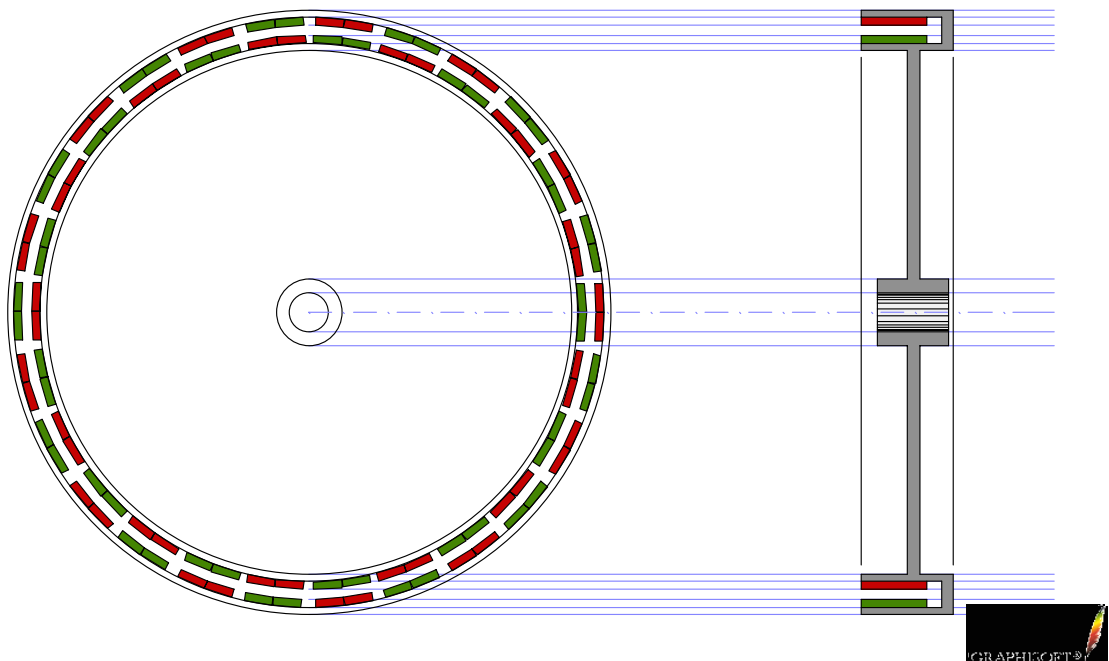
4 Rotor

In der ersten Semesterarbeit wurde der Stator grob dimensioniert und vermasst. Eine genaue Überarbeitung wurde nötig, um den geringen Platzbedarf zwischen der Gabel des Bikes optimal zu nutzen. Zudem mussten die gewünschten Toleranzwerte genau bestimmt werden. In der Regel genügen bei den meisten Abmessungen Abweichungen von bis $\pm 1\text{mm}$, ausser bei der Nut für das Magnetsystem und der Bohrung für die Nabe, die sehr präzise sein müssen.

Um die 26 Magnetpole genau platzieren zu können wird bei jedem Pol ein kleines Loch gebohrt, das später als Justierung für die Magnete gelten soll. Die folgenden Detailzeichnungen verdeutlichen dies grafisch.

Die Nabe konnte direkt bei der Firma Schwinn angefordert werden, damit die bereits vorhandenen Zusatzteile wie Ritzel und Rutschkupplung vom bestehenden Bike übernommen werden können.

4.1 Gesamtansicht



4.4 Gewicht & Massenträgheitsmoment

Um dem Trainierenden das gleiche Fahrgefühl gewährleisten zu können, sollte das Massenträgheitsmoment vom neuen Rad in etwa dem des Alten entsprechen. Weil einige Masse geändert werden mussten, wurde auch eine Neuberechnung des Gewichtes und des Massenträgheitsmomentes nötig.

	Gewicht	Massenträgheitsmoment
altes Rad	18 kg	0.73 kgm^2
neues Rad	25 kg	0.92 kgm^2
neues Rad ohne Kreisscheibe	17 kg	0.77 kgm^2

Wie die Berechnungen zeigen, ist das neue Rad bezüglich Gewicht und Massenträgheitsmoment etwas überdimensioniert. Einsparungen können lediglich noch bei der Kreisscheibe gemacht werden. Die Scheibe erfüllt ausschliesslich eine Stützfunktion. Bei der Fertigung sollte also so viel Material als möglich aus der Scheibe ausgenommen werden um dem alten Rad bezüglich den beiden Massen möglichst nahe zu kommen. Alle anderen Abmessungen können aus Festigkeitsgründen nicht abgespeckt werden.

4.5 Fertigung / Resultat

Ein Eisenstück zu dimensionieren ist das eine, dies zu fertigen das andere. Mit der Firma Thalman AG in Frauenfeld konnte ich glücklicherweise eine Firma finden, welche Eisenstücke in dieser Grösse bearbeiten kann. Ein zweiter Punkt ist der Preis, der bei normaler Verrechnung kaum zu bezahlen wäre.

Für die Fertigung bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten an.

1. Fertigung aus einem Stück Eisen
2. Zusammengesetzt aus drei Teilen

Die Fertigung aus einem Stück ist nicht sehr wirtschaftlich, da sehr viel Abfall entsteht, zudem war es der beauftragten Firma einfacher, die zweite Variante auszuführen.

Aus einem dickwandigen Rohr wird eine Nut ausgefräst und in die Mitte eine Kreisscheibe mit der Aussparung für die Nabe eingesetzt.

Die Bilder zeigen das fertige Resultat. Die aufwendige Konstruktion nahm ca. 30 Arbeitsstunden in Anspruch. Es ist erstaunlich, wie präzise die realen Masse den gewünschten übereinstimmen.





4.6 *Einbau der Magnete*

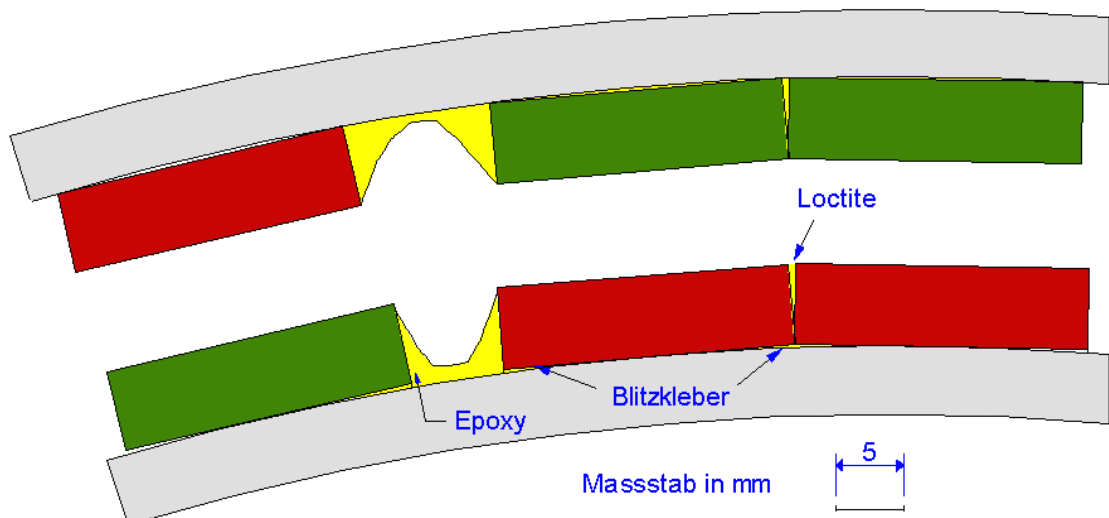
Wer schon einmal mit den stark magnetisierten Neodym Magneten hantiert hat, weiss um die enormen Kräfte, welche sie gegeneinander und auf magnetisch leitende Materialien ausüben.

Beim Einbau der Magnete war höchste Konzentration und zwei ruhige Hände gefordert. Denn wenn nur ein Magnet nicht korrekt eingesetzt ist, ist das ganze System unbrauchbar. Eine Herausforderung stellte vor allem das Zusammenpressen von jeweils zwei gleichpoligen Magneten dar. Der Einsatz von drei verschiedenen Klebstoffen war unumgänglich.



- Loctite 454 (gelartig)
- Blitzkleber (extra dünn)
- 5 min Epoxy (2 Komponenten – Kleber)

Das folgende Bild zeigt die jeweiligen Einsatzgebiete.

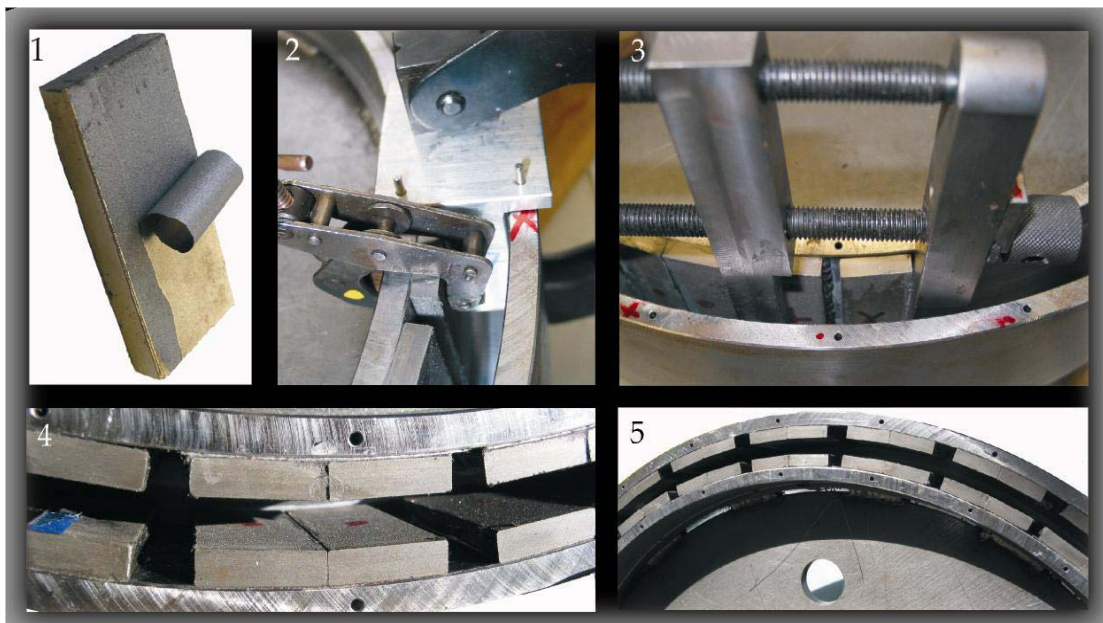


Den Magneten musste vor dem Einbau die Beschichtung abgezogen werden, damit sie sich später nicht von selbst lösen (Bild 1). Oft war der Einsatz einer speziellen Mini – Schleifmaschine nötig.

Mit Hilfe den Bohrungen auf dem Rotor (vergleiche Kapitel 4.3) konnte mit einer Lehre jeweils das erste Magnet eines Poles exakt an der richtigen Position platziert werden (2). Mit dem dünnflüssigen Blitzkleber wurde dieses fixiert.

Mit der Presszange wurde das zweite Magnet langsam ans bereits fixierte angesetzt. Sobald sich die beiden Stirnflächen berührten, sorgte der gelartige Loctite bei Luftabschluss innert Sekunden für absolute Festigkeit (3).

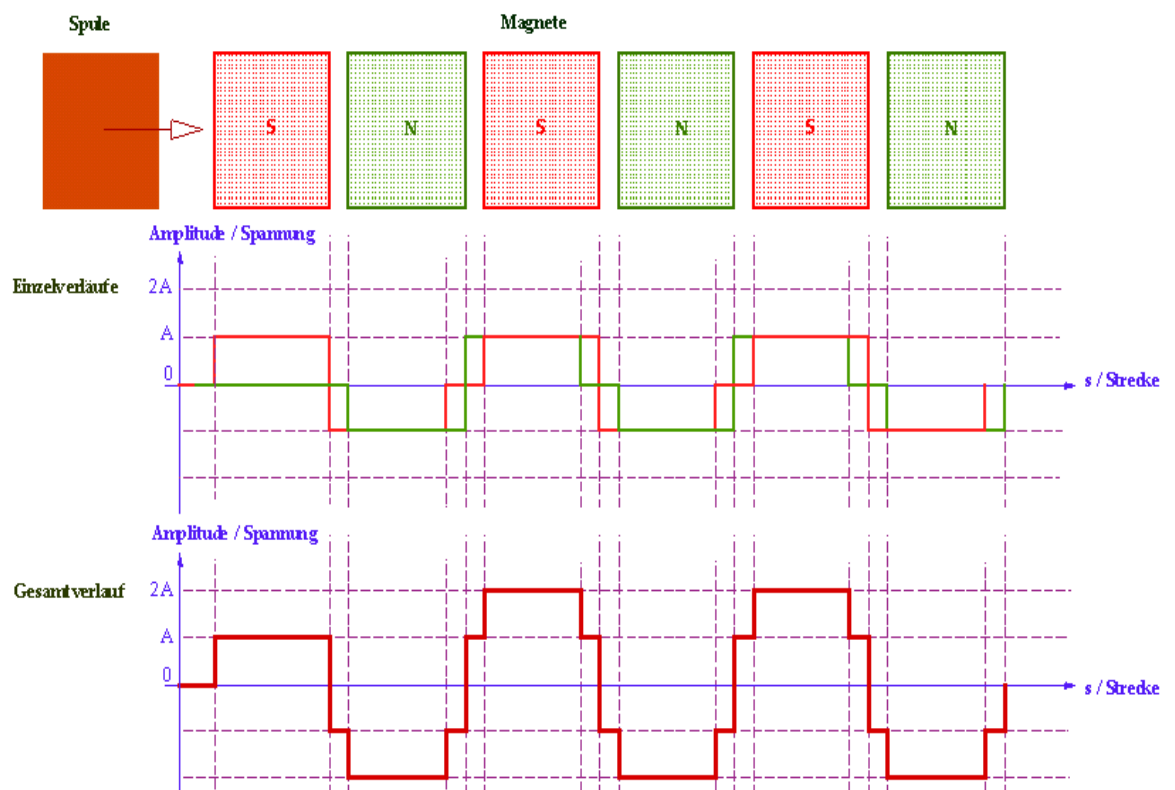
Am Schluss wurden die grösseren Spalten zwischen den Polen mit Epoxy ausgegossen, damit die Magnete auch bei den später eintretenden Rotationskräften in Position bleiben (4). Es war erfreulich, wie genau alle Magnete platziert werden konnten (5).



5 Phasen

5.1 Flussverlauf ideal

Die Abbildung zeigt den idealen Spannungsverlauf einer Spule über mehrere Magnetpole. Wenn die Spule in das Feld eines Poles tritt, wird sie zusätzlich vom vorangehenden Pol beeinflusst (siehe Einzelverläufe). Es resultiert dabei während einer bestimmten Zeit eine doppelte Spannungsamplitude (siehe Gesamtverlauf).



5.2 Anzahl Phasen

Im System stehen 26 Magnete zu 24 Spulen gegenüber. Die Differenz von zwei Polen entspricht genau einer Periode, dass heisst über den ganzen Umfang muss mit dem Versatz der Spulen EINE Periode ‚weggemacht‘ werden.

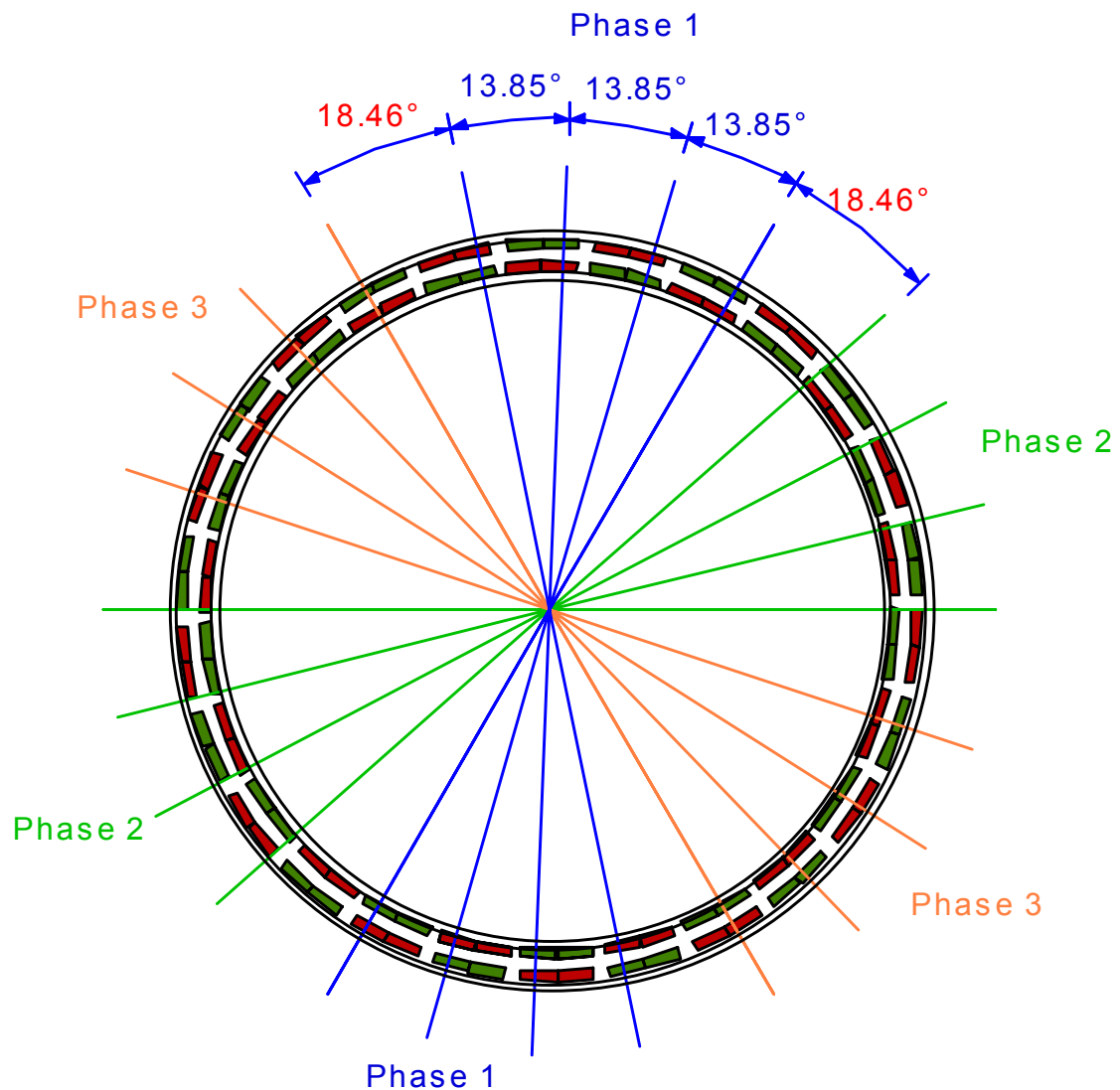
Die Zahl 24 lässt bei der Bestimmung der Anzahl Phasen ein paar Möglichkeiten offen, da sich diese Zahl durch einige Zahlen teilen lässt. Die Zahl von drei Phasen hat sich jedoch in der Praxis als am geeignetsten erwiesen, womit auch ich das System auf drei Phasen auslege. Zudem kann bei richtiger Verschaltung zwischen 3 und 6 Phasen gewählt werden (siehe Kapitel 9)

Eine Phase besitzt somit acht Spulen, wobei je vier Spulen der gleichen Phase gegenüberliegen. Das hat den Vorteil, dass das System gleichmässig belastet wird und keine störenden Schwingungen des Rotors oder Zugspannungen auftreten.

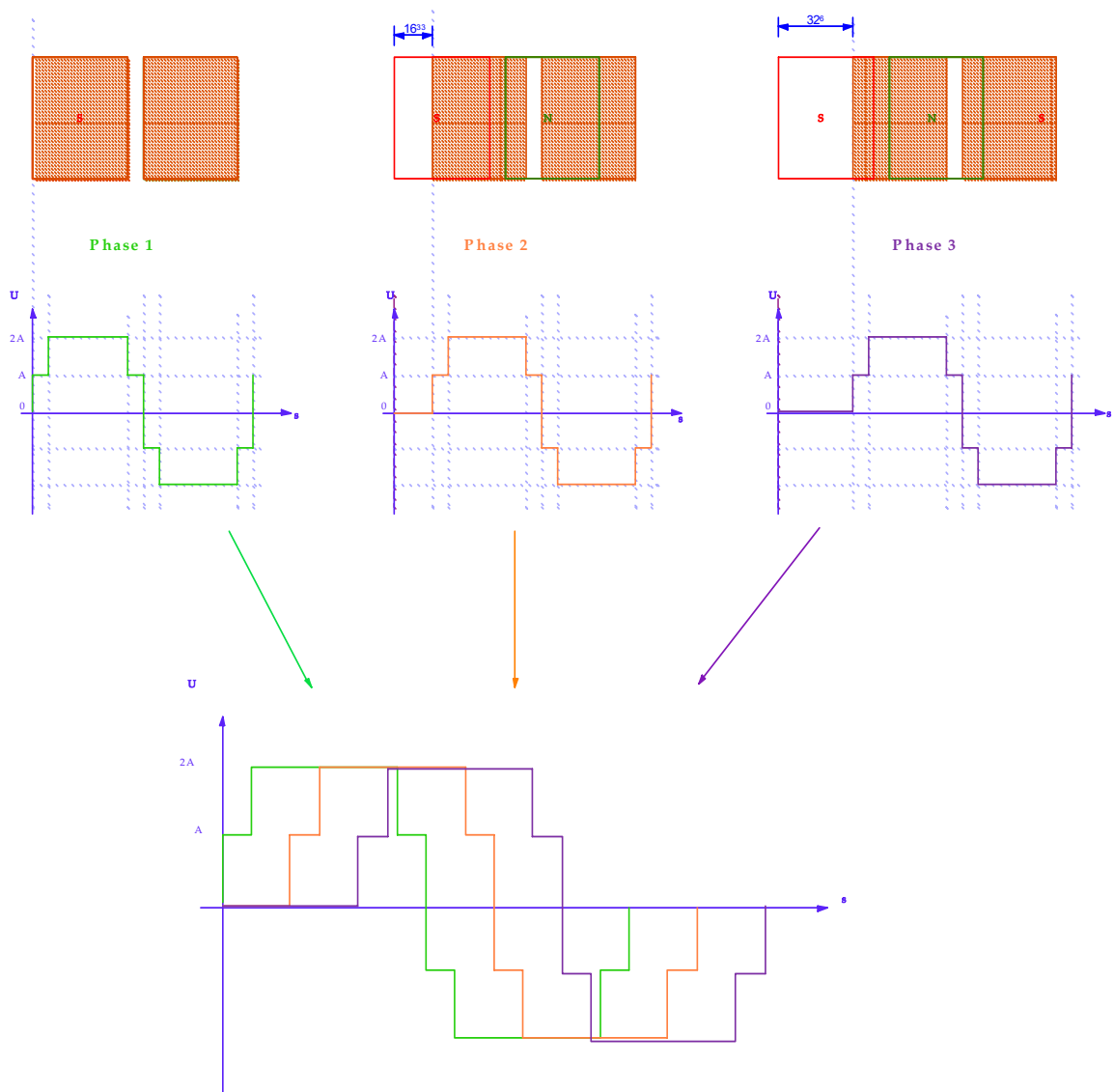
Bei der Anordnung der Spulen bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten an, die im folgenden genauer betrachtet werden und auf Vor- und Nachteile abgewogen werden.

5.3 Erste Variante

Die zwei mal vier Spulen pro Phase werden so angeordnet, dass die in den acht Spulen induzierte Spannung jeweils genau in Phase sind, das heisst vom Betrag her zu jedem Zeitpunkt den selben Spannungswert aufweisen. Die Spulen weisen untereinander einen Mittelpunktsabstand von genau 13.846 Grad auf. Die nächsten vier Spulen der zweiten Phase weisen einen Versatz zur ersten von einem Drittel der Periode (120 Grad) auf, was einem Winkelabstand von zusätzlichen 4.62 Grad entspricht: $13.85 + 4.62 = 18.46$ Grad. Der Rede kurzer Sinn - die Anordnung lässt sich am besten grafisch erklären.



In der folgenden Abbildungen sind zur besseren Darstellung nur zwei Pole pro Phase aufgezeichnet. Der resultierende Spannungsverlauf ist auf eine Spule bezogen. Je nach Serie- oder Parallelschaltung der Spulen resultiert eine bis viermal höhere Spannung pro Phase. Der Strom verhält sich umgekehrt proportional. Die zusätzlichen 4.62 Grad entsprechen auf dem Radius, wo die Spulen zu liegen kommen, einem Versatz von genau 16.33mm.



5.3.1 Vorteile

Die einzelnen Spulen einer Phase können beliebig in Serie oder Parallel geschaltet werden. Das hat den grossen Vorteil, dass man eine fast beliebige Ausgangsspannung erreichen kann. Der Spannungsverlauf ist leicht trapezförmig. Bei der anschliessenden Gleichrichtung wäre dies ein Vorteil.

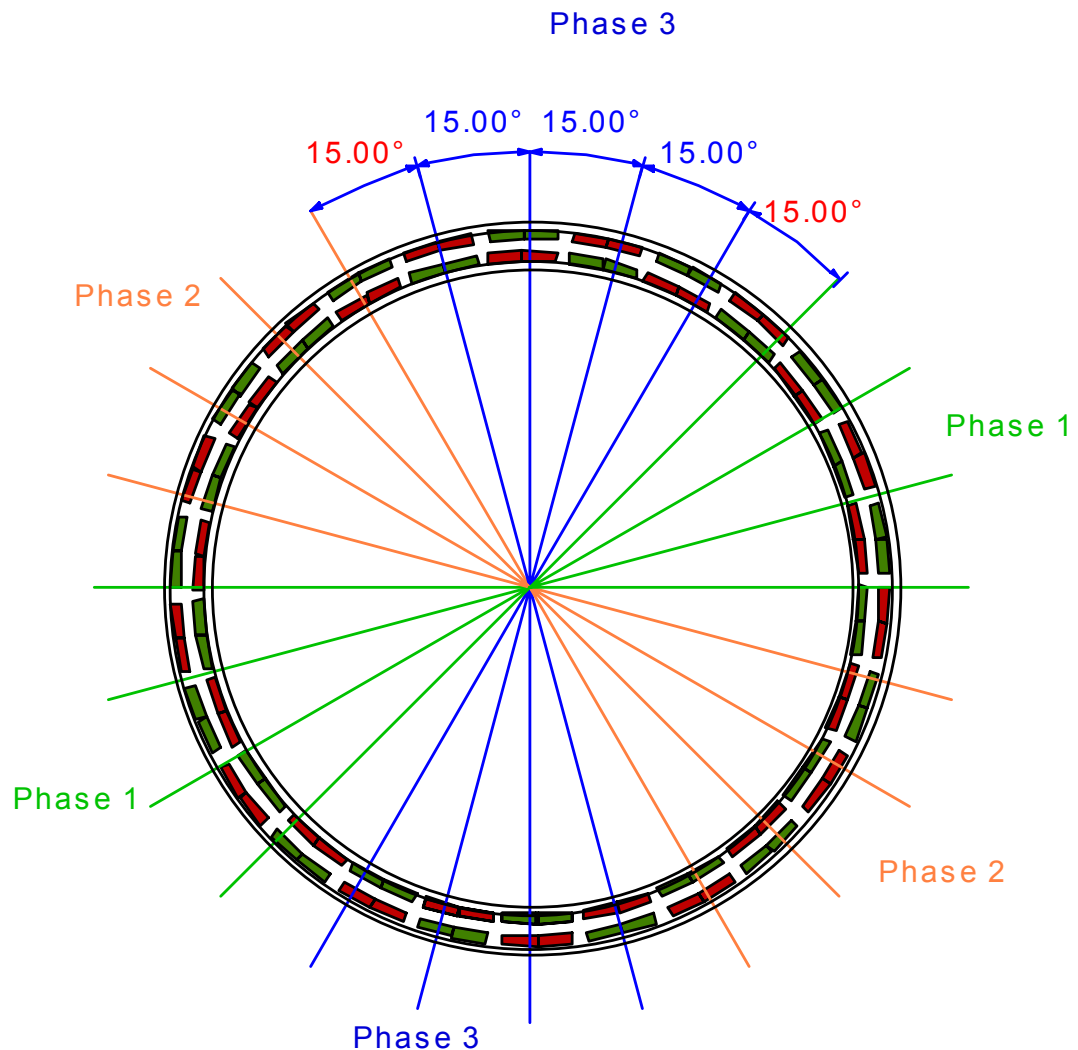
5.3.2 Nachteile

Experimente der Elektrovelo – Firma BKTech AG haben gezeigt, dass bei dieser Anordnung Rastmomente auftreten können. Durch die hohe Schwungmasse des Rotors ist dieser Effekt jedoch verschwindend klein. Bei der direkten Weiterverwendung der Spannung wäre der trapezförmige Spannungsverlauf eher ungünstig.

5.4 Zweite Variante

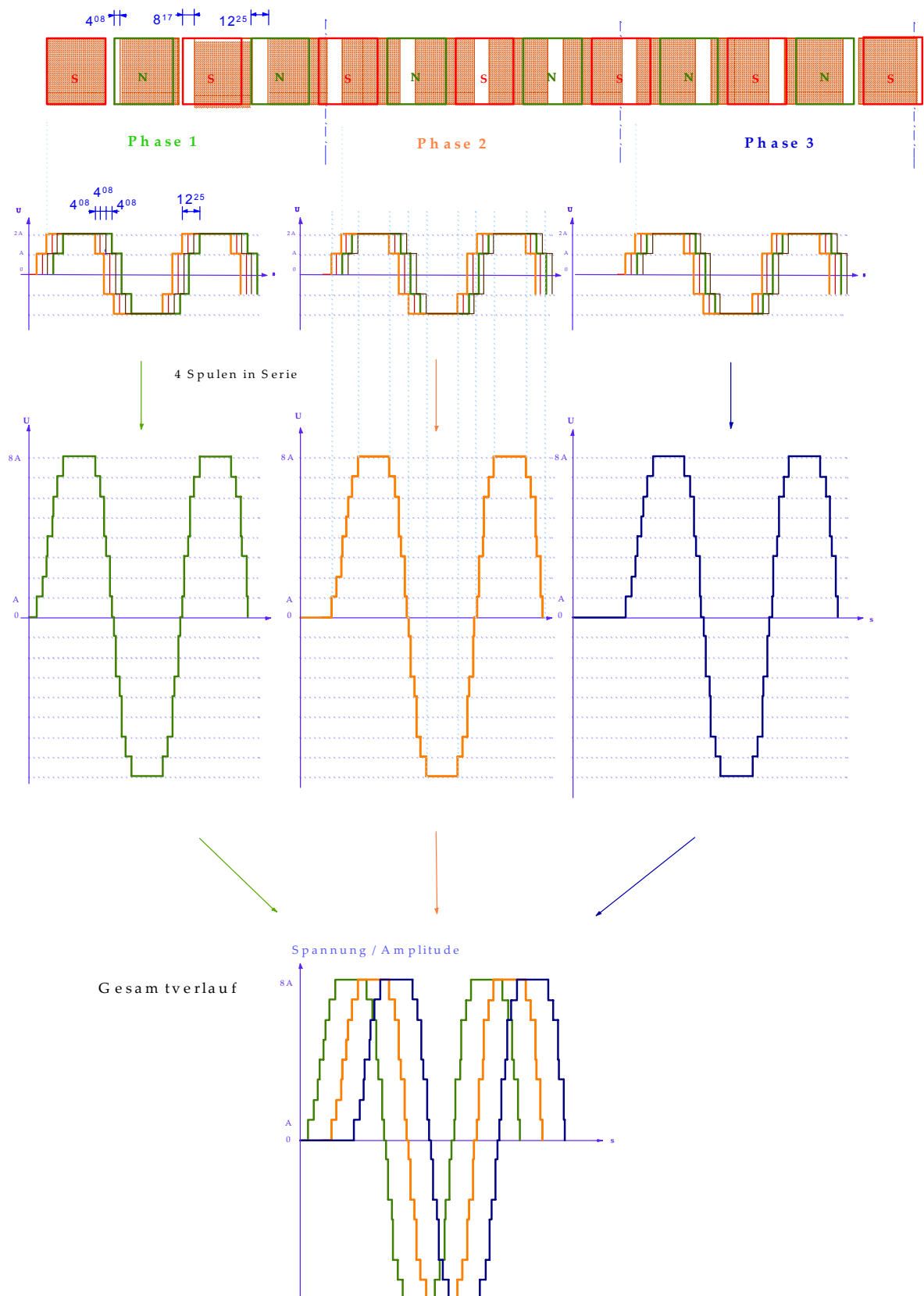
In der zweiten Variante werden die 24 Spulen so angeordnet, dass alle genau den gleichen Abstand zueinander haben. Der Versatz von einer Periode über dem ganzen Umfang wird auf alle Spulen gleichmässig verteilt.

Dies ergibt ein Spulenmittelpunktsabstand von: $\frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$.



Jede Spule hat damit in Bezug auf die Magnetpole einen zusätzlichen Abstand von 4.08 mm. Immer zwei mal vier Spulen werden zu einer Phase zusammengeschaltet.

Je vier Spulen gleicher Phase müssen in Serie geschaltet werden. Addiert man die vier Teilspannungen, so resultiert ein annähernd ‚schöner‘ Sinus. Die folgende Abbildung verdeutlicht diese Aussagen.



5.4.1 Vorteile

Der resultierende Spannungsverlauf gleicht annähernd einem Sinus. Falls die Spannung ohne Gleichrichtung direkt weiterverwendet wird, ist das die optimale Lösung. Zudem entstehen bei dieser Anordnung keinerlei Rastmomente, da zu keiner Zeit zwei Spulen gleichzeitig die maximale ‚Brems‘-Kraft ausüben.

5.4.2 Nachteile

Vier Spulen einer Phase müssen zwangsläufig in Serie geschaltet werden, was eine beliebige Kombination ausschliesst. Eine gewünschte Ausgangsspannung ist nur beschränkt einstellbar.

5.5 ***Definitive Wahl***

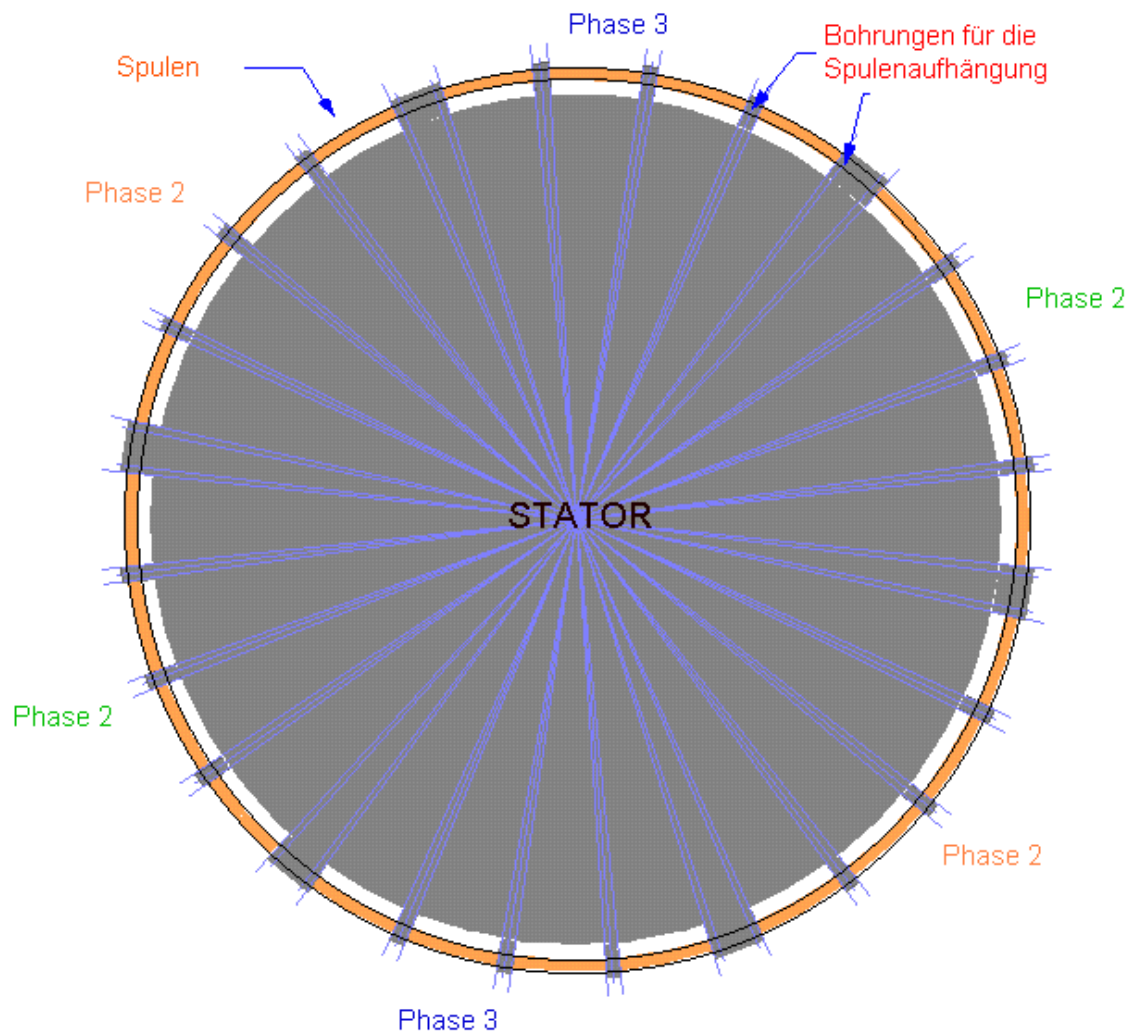
Bezüglich des Rastverhaltens wäre die zweite Variante sicherlich die bessere Wahl. Dieses Verfahren wird auch bei den Motoren der ‚Flyer‘ Elektrovélos angewandt und hat sich für Langsamläufer am besten bewährt. Da aber die resultierende Spannung einer Spule zu diesem Zeitpunkt noch nicht exakt bestimmt werden konnte, bot die erste Variante eine ideale Lösung, da sich die Gesamtspannung durch Serie oder Parallelschaltung der Spulen einstellen lässt. Durch die grosse Schwungmasse sollte das Rastmoment kaum in Erscheinung treten, was sich durch spätere Tests bestätigt hatte.

Zudem gestaltet sich die Spulenaufhängung bei der ersten Variante wesentlich einfacher, da zwischen den einzelnen Sektoren genügend Platz vorhanden ist.

6 Stator

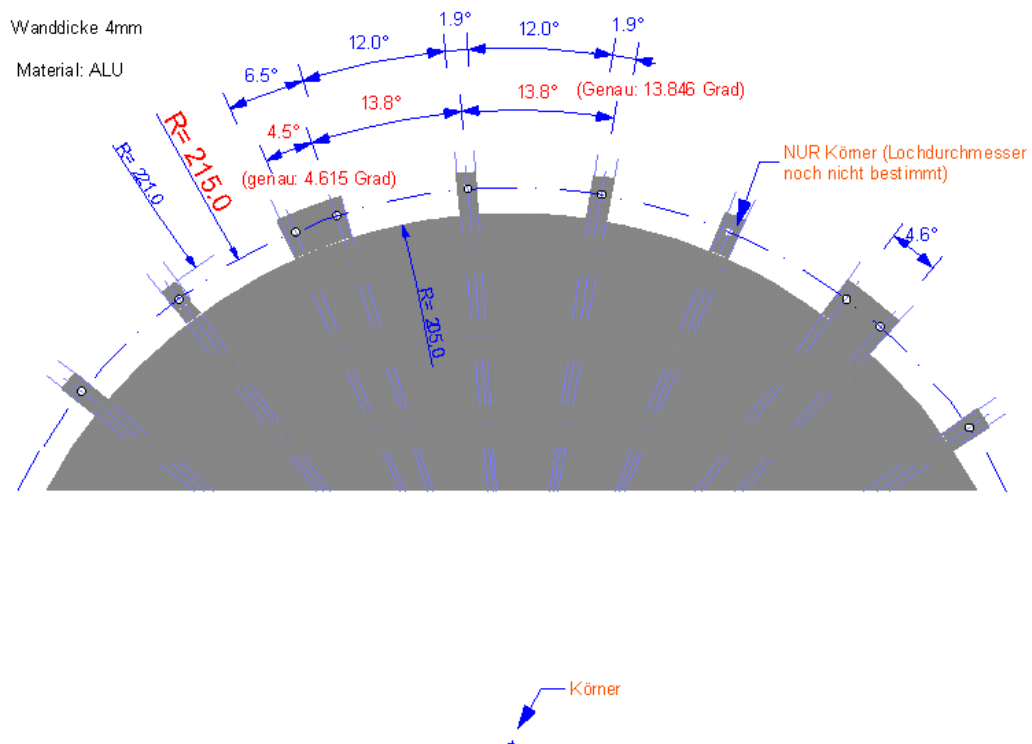
Der Stator hat die Aufgabe, die insgesamt 24 Spulen genau in Position zu halten. Der Platz zwischen der bestehenden Gabel vom Spinningbike ist sehr begrenzt. Der Stator sollte also auf möglichst kleinem Raum untergebracht werden. Eine Aluscheibe mit 4mm Wandstärke sorgt für genügende Stabilität.

6.1 Gesamtansicht



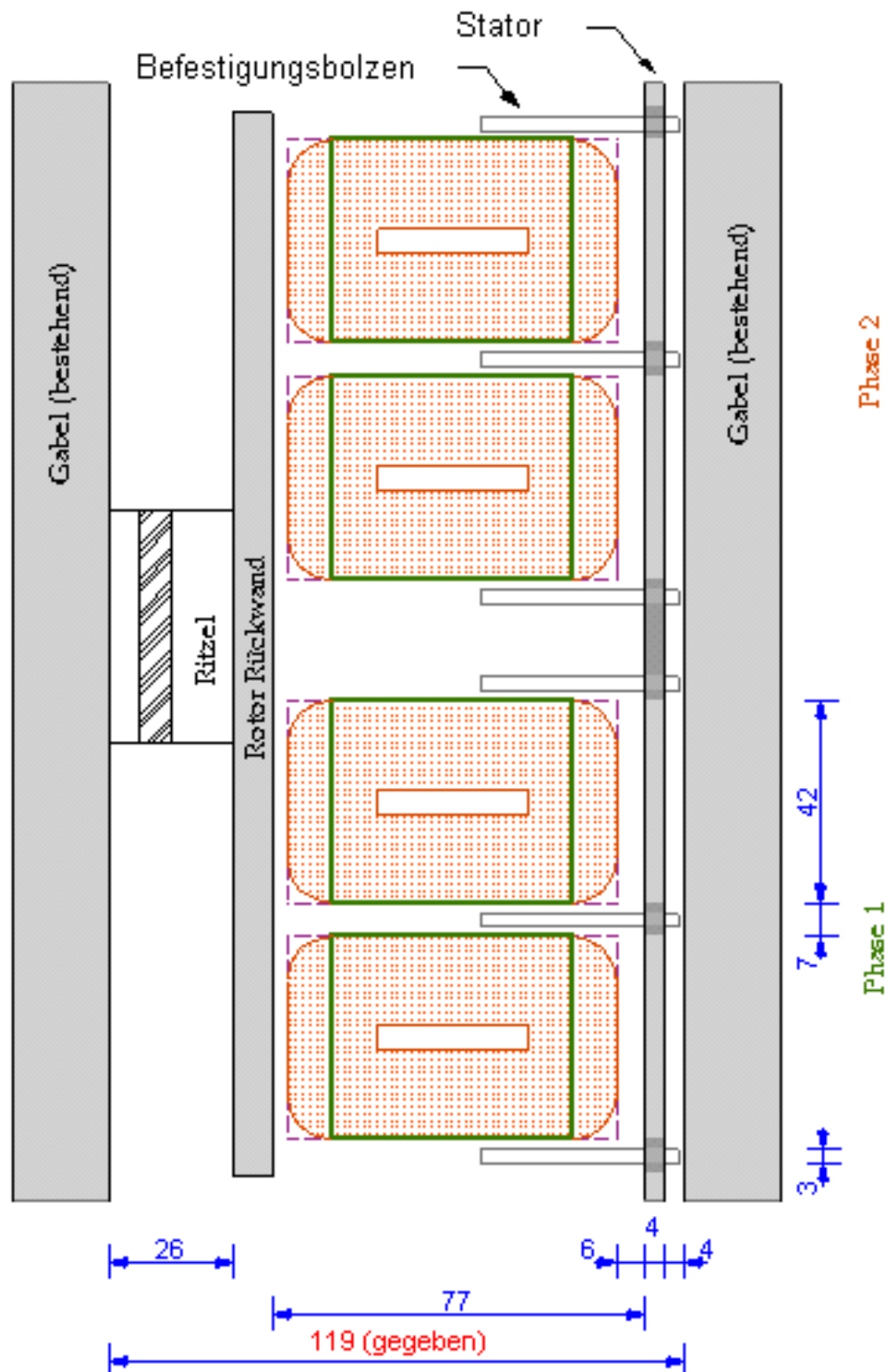
6.2 Vermassung

Die Bohrungen für die Spulenaufhängung haben einen Versatz von genau 18.85 Grad innerhalb einer Phase. Die einzelnen Phasen werden getrennt durch einen Versatz von 4.62 Grad.



6.3 Obenansicht / Segment

Bei dieser Ansicht wird deutlich, wie minimal die Platzverhältnisse sind. Zwischen den Gabeln ist ein Platz von maximal 119mm, für Ritzel, Rotor und Stator. Die Abmessungen der Ritzel und Rutschkupplung ist fest gegeben und kann nicht verändert werden. Bereits bei der Konstruktion des Rotors wurde darauf geachtet, dass der Platz so optimal wie möglich ausgenutzt wird. Die nächste Abbildung zeigt die ideale Platzverteilung. Gegebenenfalls müssen die Spulen etwas verkürzt werden, damit mehr Platz für den Stator ist. Ich strebe an, den Rotor samt Stator und Spulen auf die gleiche Achse zu setzen und gleichzeitig einzubauen. Damit können die Spulen vor dem Einbau genau ausgerichtet und in Position gebracht werden.



6.4 Fertigung / Resultat

Die Fertigung des Stators führte die Firma Neher AG in Ebnat-Kappel aus. Die korrekten Aussparungen wurden mit modernster Lasertechnik direkt aus einer Chromstahlplatte ausgenommen. Der nichtmagnetische Chromstahl liess sich für die beauftragte Firma besser bearbeiten als Aluminium. Für meine Anwendung bringt dies nur Vorteile, da die Biegefestigkeit von Chromstahl um einiges höher ist.



Dank der Lasertechnik lässt sich das Material messerscharf und hochpräzise schneiden.



7.2 Berechnungen

Für die Berechnung des Drahtdurchmessers und folglich für die Anzahl Windungen pro Spule können verschiedene Überlegungen zum Ziel führen. Bei den Berechnungen werden hauptsächlich zwei Ziele verfolgt.

1. Die erzeugte Spannung sollte in einem gewissen Rahmen liegen, die sich mit gebräuchlichen Mittel später ins Netz einspeisen lässt.
2. Das nötige Drehmoment sollte bei kleinen Umdrehungen maximal wirken, das heisst der Leiter sollte einen gewissen Strom führen können, ohne zu überhitzen.

Für die Ausgangslage der Berechnungen wird von der gewünschten Spannung ausgegangen. Mit der Spannung folgt bei gegebener Feldstärke und Leiterlänge sofort die Anzahl Windungen die bei gegebenem Platz untergebracht werden müssen. Daraus ergibt sich der Drahtdurchmesser. Mit der zulässigen Stromdichte lässt sich der maximale Strom im Leiter berechnen, der wiederum mit dem Drehmoment in Beziehung steht. Mit dem maximal zulässigen Strom kann überprüft werden, ob das gewünschte Drehmoment mit der anfangs gewählten Spannung aufgebracht werden kann.

Bei der Wahl der gewünschten Spannung wird von einem ‚Richtwert‘ von $250V_{p-p}$ pro Phase bei niedriger Drehzahl von 170U/min (vergl. Semesterarbeit 01) ausgegangen. Damit sollte nach Gleichrichten des Drehstroms und dem anschliessenden Wechselrichten im besten Fall direkt ins Netz eingespiesen werden können. Die Einspeisung ist jedoch nicht das Thema dieser Arbeit, wodurch auf eine ausführliche Berechnung verzichtet wird.

Es ist noch anzumerken, dass die folgenden Berechnungen im voraus aufgestellt wurden. Die angenommen Werte beruhen zum Teil auf Simulationen und Berechnungen aus der ersten Semesterarbeit.

Die anschliessenden Berechnungen werden für die Dimensionierung von einer einzelnen Spule vorgenommen.

1. Mit 8 Spulen pro Phase ergibt sich für eine einzelne eine Spannung von:

$$\frac{250V}{8} \approx 31V$$

2. Mit der gegebenen Feldstärke von 0.65 Tesla, mittleren wirksamen Drahtlänge von 4cm und einer Umfangsgeschwindigkeit von 3.8m/s folgt die Windungszahl:

$$N = \frac{U}{B \cdot v \cdot l} = \frac{31V}{0.65T \cdot 3.8 \frac{m}{s} \cdot 0.04m} \approx 314 \text{ Windungen}$$

Nach den Überlegungen aus Kapitel 5.1 wird im fertigen Magnetsystem über einer Spule die doppelte Spannung erwartet, womit die Windungszahl halbiert werden kann:

$$\text{Definitive Windungszahl: } \frac{298}{2} = 157 \text{ Windungen}$$

3. Der Drahtdurchmesser x lässt sich mit folgender Formel bestimmen:

$$n = \left(\frac{2(h - 2x)}{x\sqrt{3}} + 1 \right) \frac{s}{x}$$

Aufgelöst nach x ergibt einen **Durchmesser von x = 0.70mm = 0.38 mm²**

N: Windungszahl = 149
 h: Höhe der Spule = 4.5mm
 s: Breite der Spule = 18.5mm
 x: Drahtdurchmesser = ?

4. Für eine Luftspule gilt eine maximal zulässige Stromdichte von etwa $7 \frac{A}{mm^2}$. Dies erlaubt einen Strom von maximal: $I = J \cdot A \approx 2.7A$

5. Das mögliche Drehmoment pro Spule lässt sich somit folgendermassen berechnen:

$$M = \frac{U_{RMS} \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{59.2W}{2 \cdot \pi \cdot 3.8 \frac{m}{s}} = 2.5Nm$$

7.2.1 Wahl des Drahtdurchmessers

Der Drahtdurchmesser wurde auf 0.7mm berechnet. Leider konnte aus kostengründen und der kleinen Stückzahl nur ein Durchmesser von 0.56mm besorgt werden. Es ist jedoch anzumerken, dass bei den Berechnungen ideale Bedingungen vorausgesetzt wurden. So wird es kaum möglich sein die Spulen optimal zu wickeln, was folglich die Windungszahlen senkt. Deshalb ist die Wahl eines etwas kleineren Durchmesser keine schlechte Wahl.

Mit diesen Überlegungen wurde der Drahtdurchmesser von 0.56mm definitiv bestellt.

7.2.2 Neu – Berechnung

Der Einsatz eines 0.56mm Drahtes wird die vorhin berechneten Werte nicht grundlegend verändern. Trotzdem wird es nötig, die Werte neu zu berechnen, damit ein Vergleich mit den späteren Messungen möglich wird. Die fertigt gewickelten Spulen weisen 200 Windungen auf. Erste Messungen ergaben bei 170 U/min eine Leerlaufspannung von $20V_{RMS}$ pro Spule.

Die neuen ‚Eckdaten‘ pro Spule lauten:

Zulässiger Strom:	1.7A
$P_{max} = U_{RMS} \cdot I$:	34 Watt
Max. Drehmoment:	1.76 Nm

7.2.3 Schlussfolgerung:

In der ersten Semesterarbeit wurde ein Drehmoment von maximal 1.3 Nm pro Spule berechnet. Damit sollte mit dieser Dimensionierung eine genügend hohe Bremswirkung erzielt werden können, ohne die Spulen zu überlasten.

7.3 *Fertigung / Resultat*

Für die Fertigung der Spulen wurde die Firma Moser AG in Schmerikon beauftragt. Ein speziell mit Backlack versehener Kupferdraht kann die Spule durch Erwärmung in feste Form gebracht werden. Die Spule kann nur gerade gewickelt werden. Die Anpassung an den Radius erfolgt in einem zweiten Schritt. Das folgende Bild zeigt eine Spule, die den geforderten Aussenabmessungen genau entsprechen.



Frontansicht

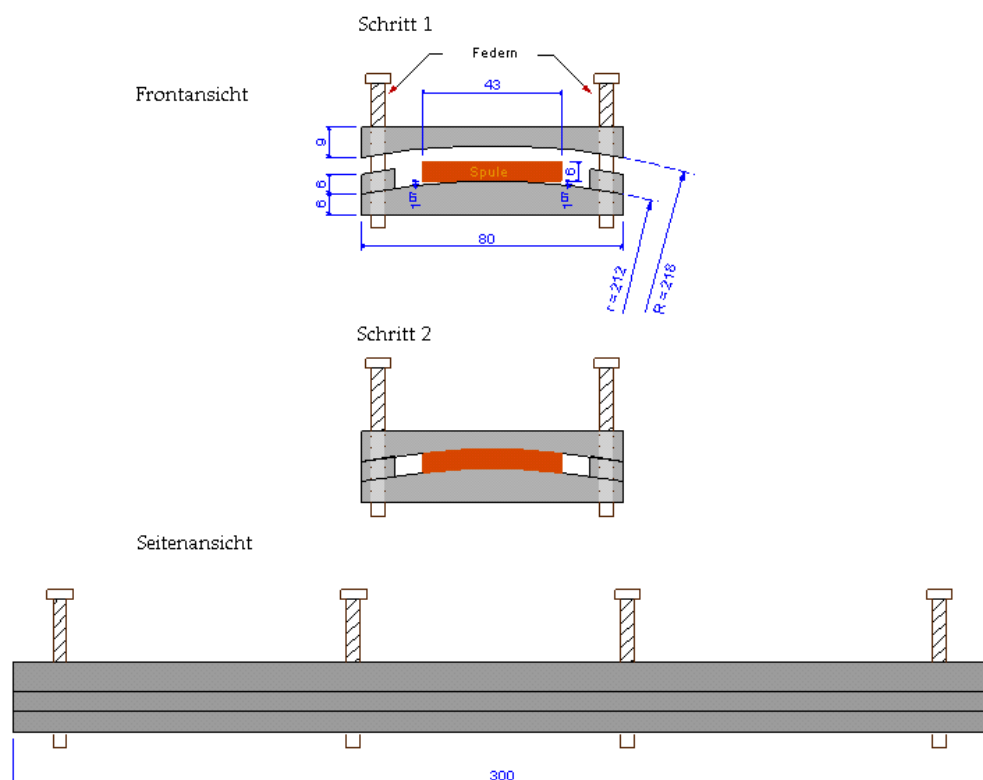


Seitenansicht

7.4 Anpassung an Radius

Um den Luftspalt optimal auszunützen, mussten die Spulen dem Radius angepasst werden. Durch erwärmen der Spule schmilzt der Backlack – die Spule kann gebogen werden.

Eine spezielle Vorrichtung, wie das Bild zeigt, wäre ideal gewesen. Die Spulen könnten in einem Ofen erhitzt werden auf den richtigen Radius gebogen werden. Das Herstellen dieses Werkzeuges wäre jedoch sehr aufwendig und kostspielig.



Eine alternative Lösung bot das Biegen der Spulen direkt am bestehenden Rotor. Mit einem Strom von etwa 7 Ampere wurde die Spule auf ca. 80 Grad Celsius erhitzt und in Form gebracht.

7.5 *Eingiessen der Spulen*

7.5.1 Gussmasse

Für das Eingiessen der Spulen wurde ein spezieller Zweikomponenten - Kleber (Arathane Polyurethane Casting System) von der Firma Astorit AG verwendet. Die Gussmasse sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- grösstmögliche Festigkeit nach dem Aushärten
- langsam aushärten, damit genügend Zeit zum Einfüllen bleibt und sich das System durch eine schnelle Reaktion nicht erwärmt bzw. verformt.
- Temperaturfest bis ca. 100 Grad Celsius.
- Nachtäglich bearbeitbar
- gut elektrisch isolierend

Anhand dieser Anforderungen wurden folgende Komponenten gewählt:

- XB 5631 Polyol
- XP 5610 Isocyanate

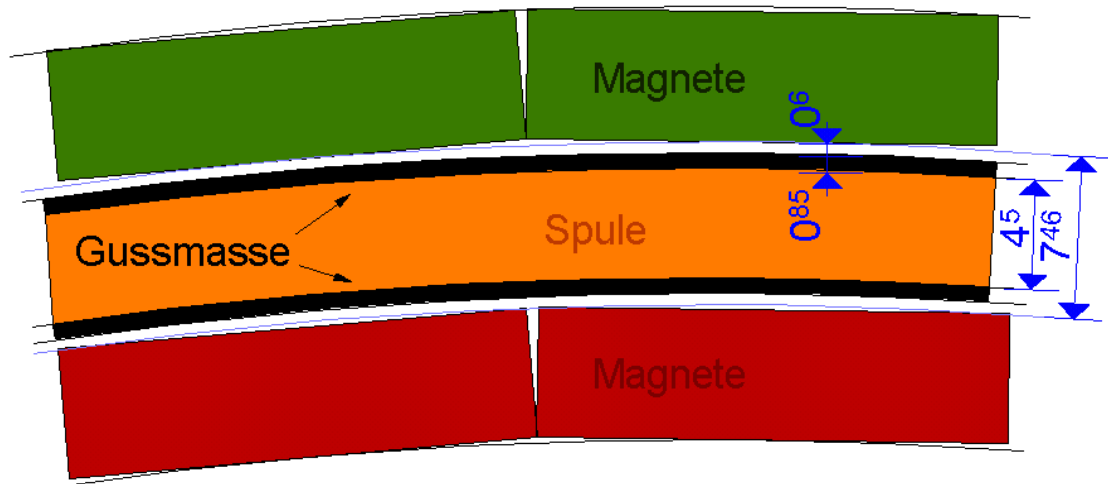
Technische Daten:

	Einheit	Polyol	Isoyanate	Mixed System
Mixverhältnis (Gewichtanteile)		100	25	
Mixverhältnis (Mengenanteile)		100	30	
Viscosität bei 25 Grad Celsius	mPa*s	10000	110	1700
spezifisches Gewicht	g/cm ³	1.46	1.23	1.51
Brennpunkt	Grad	>150	>200	>150
Handling time	min			14
Gel time bei 25 Grad	min			67
Aushärtezeit bei 23 Grad	h			24
Aushärtezeit bei 80 Grad	h			6
Dielectric strength	kV/mm			24
Volume resistivity	Ohm*cm			4.6*10¹⁴

Anhand der technischen Daten ist ersichtlich, dass die Kombination der beiden Stoffe genau den gewünschten Werten entspricht.

7.5.2 Vorbereitung

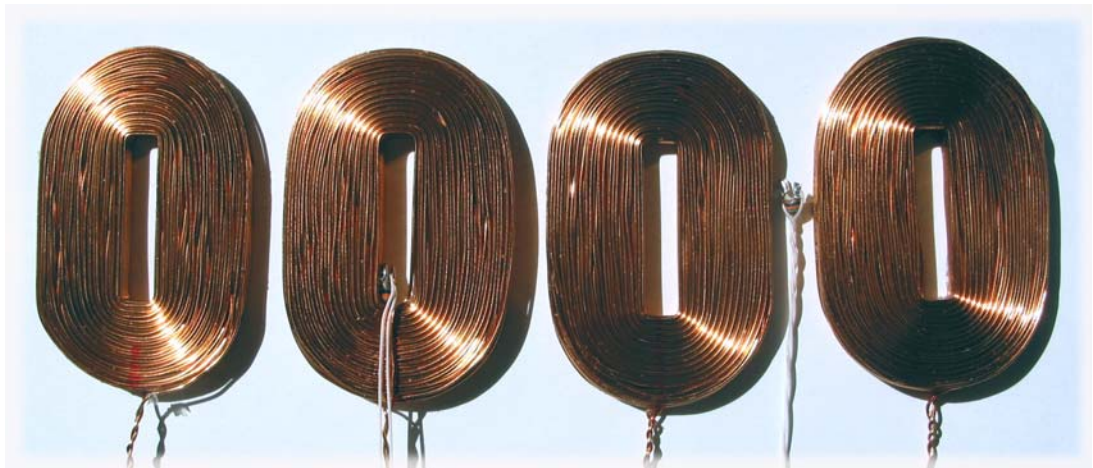
Um höchste Stabilität der Spulen zu erhalten, sollte so viel Gussmasse wie möglich zwischen den Spulen verwendet werden. Jedoch ist der Platz im Luftspalt zwischen den Magneten sehr begrenzt. Die Spulen weisen eine Höhe von 4.5mm auf. Der Luftspalt ist 7.4mm breit. Es bleibt also auf jeder Seite ein maximaler Spalt von 1.45mm zwischen Spule und Magnet. Ein Luftspalt von 0.6mm zwischen Gussmasse und Magnet sollte genügen, damit bleibt eine Wandstärke der Gussmasse von ca. 0.85mm. Am besten lässt sich diese Situation grafisch zeigen.



7.5.3 Einbau

Da die eingegossenen Spulen haargenau in den Luftspalt passen müssen, war es unmöglich extern eine Gussform zu konstruieren, welche genau dem Negativ des Luftspaltes entsprach. So bot sich nur noch eine Möglichkeit die Spulen in die korrekte Form zu bringen. Mit Hilfe von dünnen Trennwänden wurden die Spulen direkt im Magnetsystem eingegossen. Das selbstentwickelte Verfahren wird nachträglich in den einzelnen Schritten genauer beschrieben.

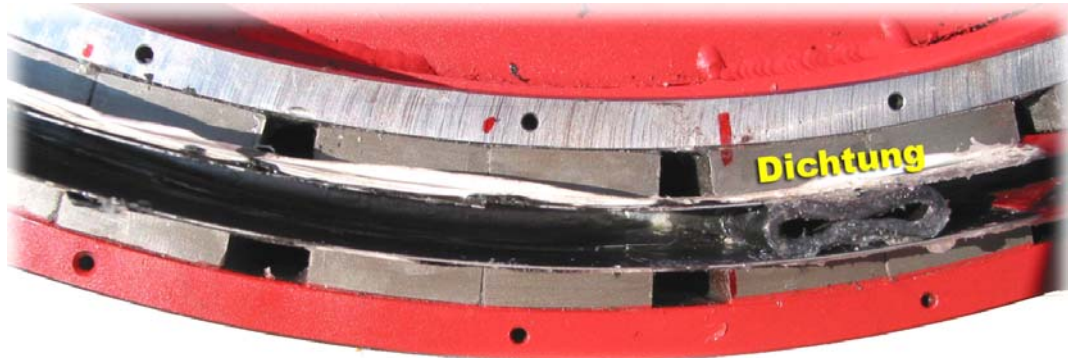
1) Die Spulen wurden sektorenweise zu vier Stück eingegossen. Um beim ersten Testlauf die Spulentemperatur zu überwachen, wurden zusätzlich zwei NTC Widerstände miteingegossen.



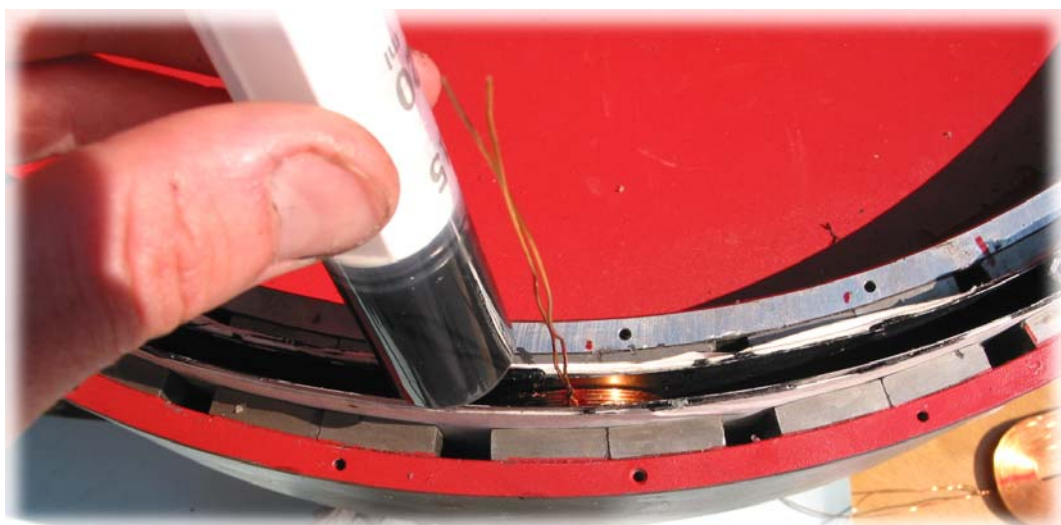
2) Die Trennwände sind gerade so dick, wie später der kleine Luftspalt zwischen Magnet und Füllmasse werden sollte. Die dünnen Bleche bestehen aus rostfreiem Stahl(=leichtmagnetisch). Dies hat den grossen Vorteil, dass die Wände an den Magneten haften, aber die gesamte Form am Schluss trotzdem leicht entfernbar ist. Stellen, die später nicht mit der Füllmasse verklebt bleiben sollen, wurden vorgängig mit einem speziellen Trennmittel behandelt.



3) Das folgende Bild zeigt die eingesetzten Trennwände. Seitlich wurde mit einer Gummihülse und Silikonmasse abgedichtet. Die Gussform ist nun fertig.



4) Die Spulen werden eingesetzt und die Füllmasse darüber gegossen.



- 4) Kurz nach dem Eingiessen wurden die auf dem Stator montierten Bolzen in die Masse eingelassen. Damit wird erreicht, dass die Spulen bereits jetzt die genaue Position im System einnehmen.



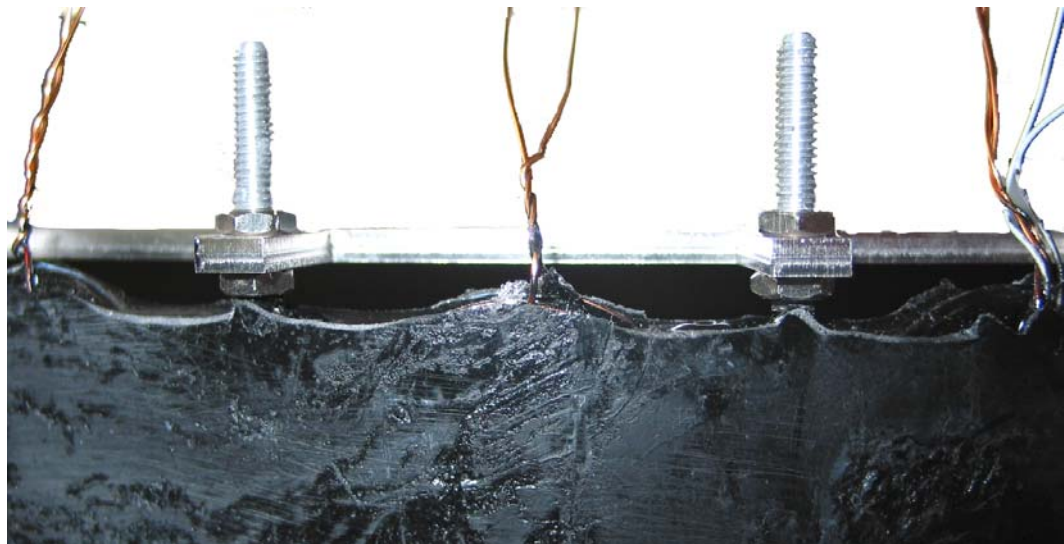
5) Nach etwa 24 Stunden ist die Masse soweit ausgehärtet, dass die Form ausgebaut werden konnte.



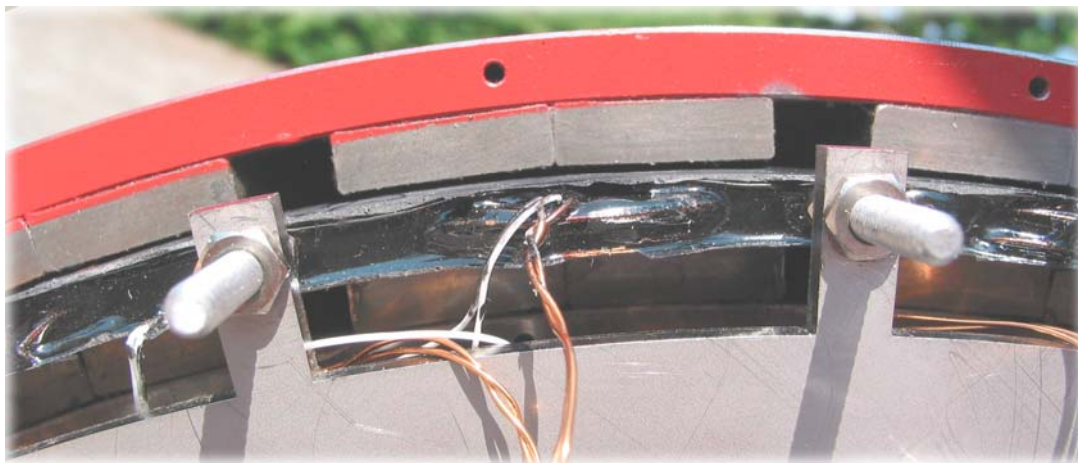
4. Nach der Demontage zeigt sich, ob das Trennmittel seine Aufgabe erfüllt hat. Die Form sollte sich leicht entfernen lassen.



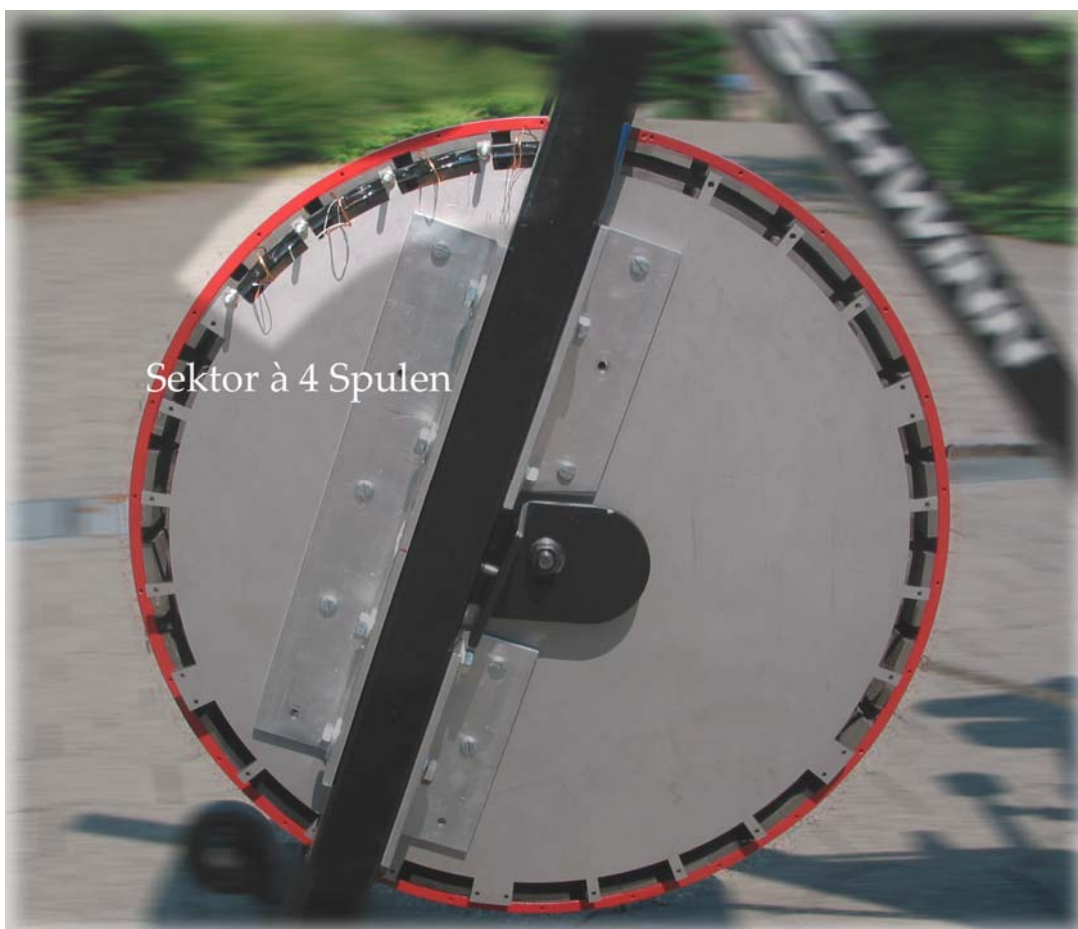
Die folgenden Bilder zeigen das fertige Segment à vier Spulen. Die Befestigung am Stator erfolgt mit je zwei nichtmagnetischen Flachmuttern.



Die Spulen passen präzise ins Magnetsystem. Der verbleibende Luftspalt ist minim.



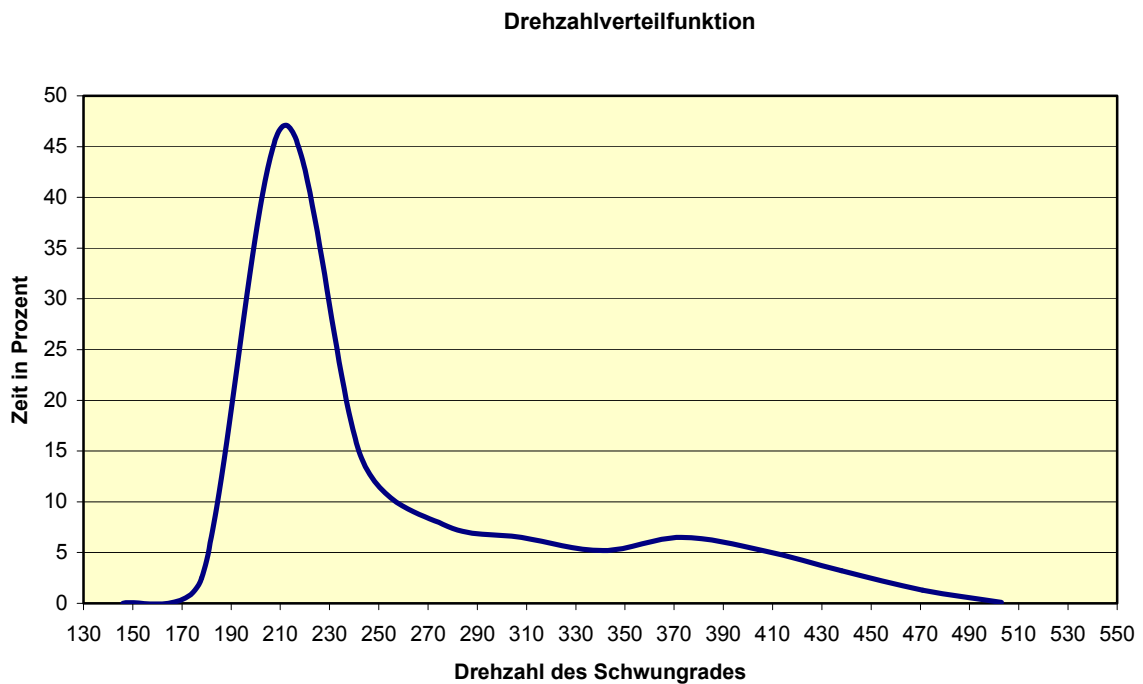
Insgesamt werden 6 Sektoren à 4 Spulen benötigt.



8 Messungen

Bei den folgenden Messungen wurden zwei Spulen mit einer Windungszahl von 170 bzw. 220 einzeln getestet. Die entgültigen Spulen weisen eine Windungszahl von 200 auf, also etwa dem Mittelwert der beiden getesteten. Es wurde bewusst jeweils nur über einer Spule gemessen, da sich die acht Spulen pro Phase fast beliebig in Serie oder Parallel schalten lassen. Somit lässt sich später die gewünschte Ausgangsspannung / Strom je nach Verwendungszweck einstellen.

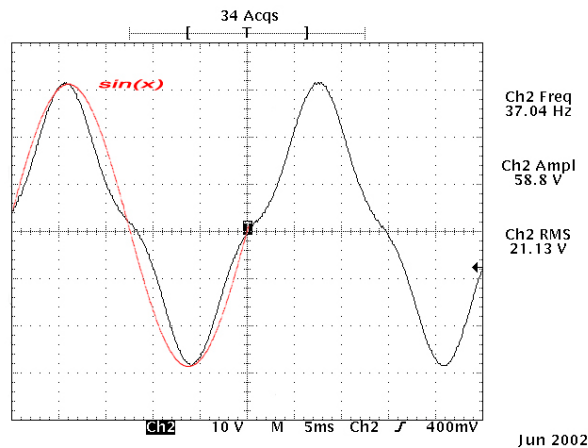
In der ersten Semesterarbeit wurde das Drehzahlverhalten während einer Spinninglektion aufgenommen. In der Grafik ist zu entnehmen, dass während der meisten Zeit in einem Bereich von 170 – 250 U/min gefahren wird und das bei hohem Widerstand.



Beim Testaufbau wurden die Spulen mit einem Stufenlos einstellbaren Widerstand belastet und 20 Werte zwischen 960 Ohm – 2.5 Ohm abgenommen.

8.1 Flussverlauf real

Vergleicht man den idealen Flussverlauf aus Kapitel 5.1 mit dem gemessenen, sind doch einige Abweichungen festzustellen. Die Kurve ähnelt

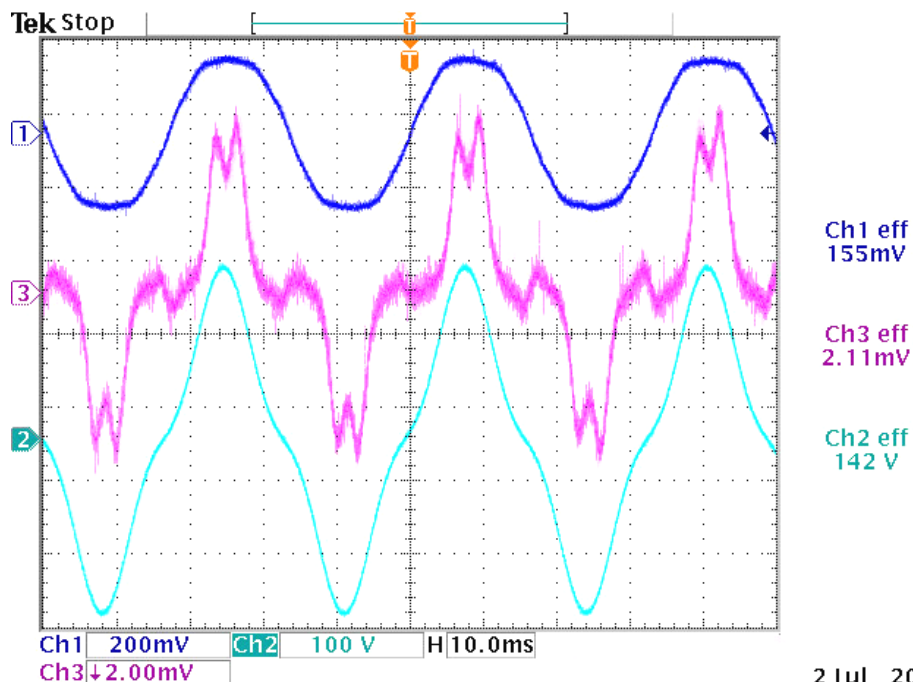


Jun 2002

stark einem Sinus, der zur Veranschaulichung mit roter Farbe überlagert wurde. Die Messung erfolgte bei einer Umdrehung von 170 pro Minute, was einer Frequenz von ca. 37Hz entspricht.

Grund für diesen etwas ‚spitzen‘ Sinus ist sicherlich das nicht ideale Magnetfeld. Vielmehr wirkt sich aber die Spulenform aus, die bei der

Berechnung (Kap. 5.1) als EINE Windung auf dem äussersten Radius der Spule angenommen wurde. Die reale Spule ist aber wie eine Spirale aufgewickelt. Die inneren Leiterschleifen erzeugen also nur während einer kurzen Zeit eine Spannung. Zur Veranschaulichung wurde das Signal der äussersten (blau), innersten (lila) und der Addition aller 220 Leiterschleifen (Cyan) gemessen. Die blaue Linie kommt dem idealen Verlauf sehr nahe (vergleiche Kap: 4.1)

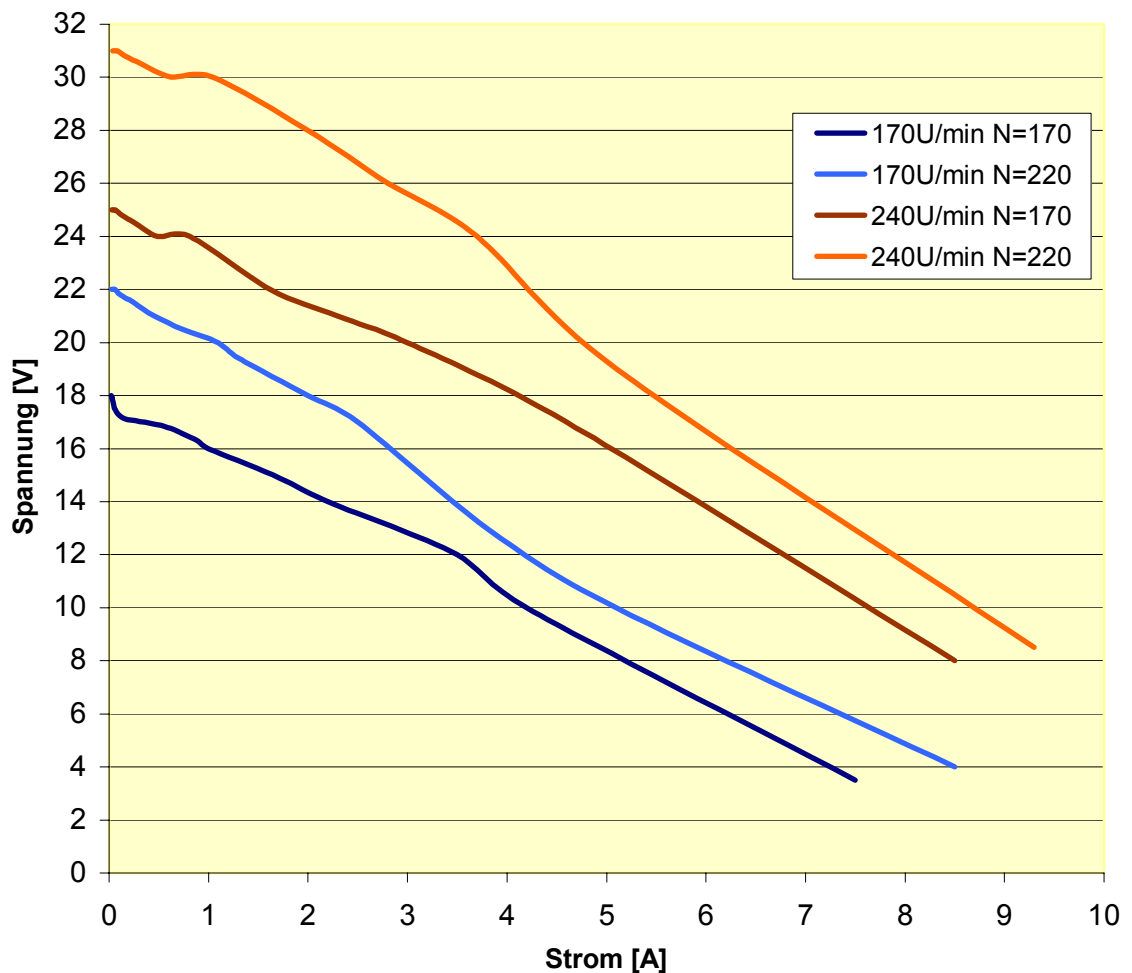


2 Jul 2002

8.2 Strom-Spannungskennlinie

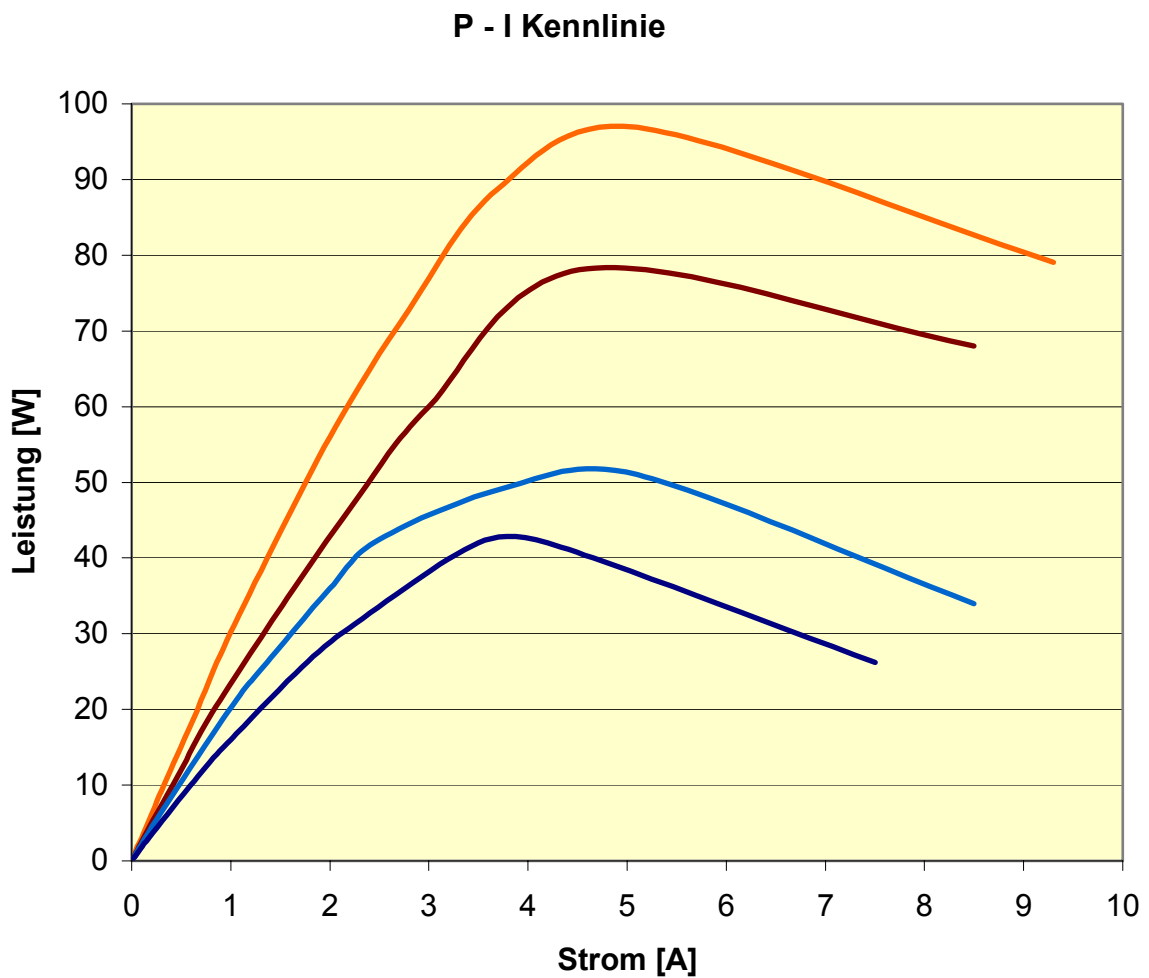
Die Grafik zeigt, dass die Spannung beinahe linear mit dem Strom abnimmt. Bei einem Strom von über 7 Ampere wurde die Messung kritisch, da sich die Spulen sehr stark erhitzen.

U-I Kennlinie



8.3 Leistung – Strom Kennlinie

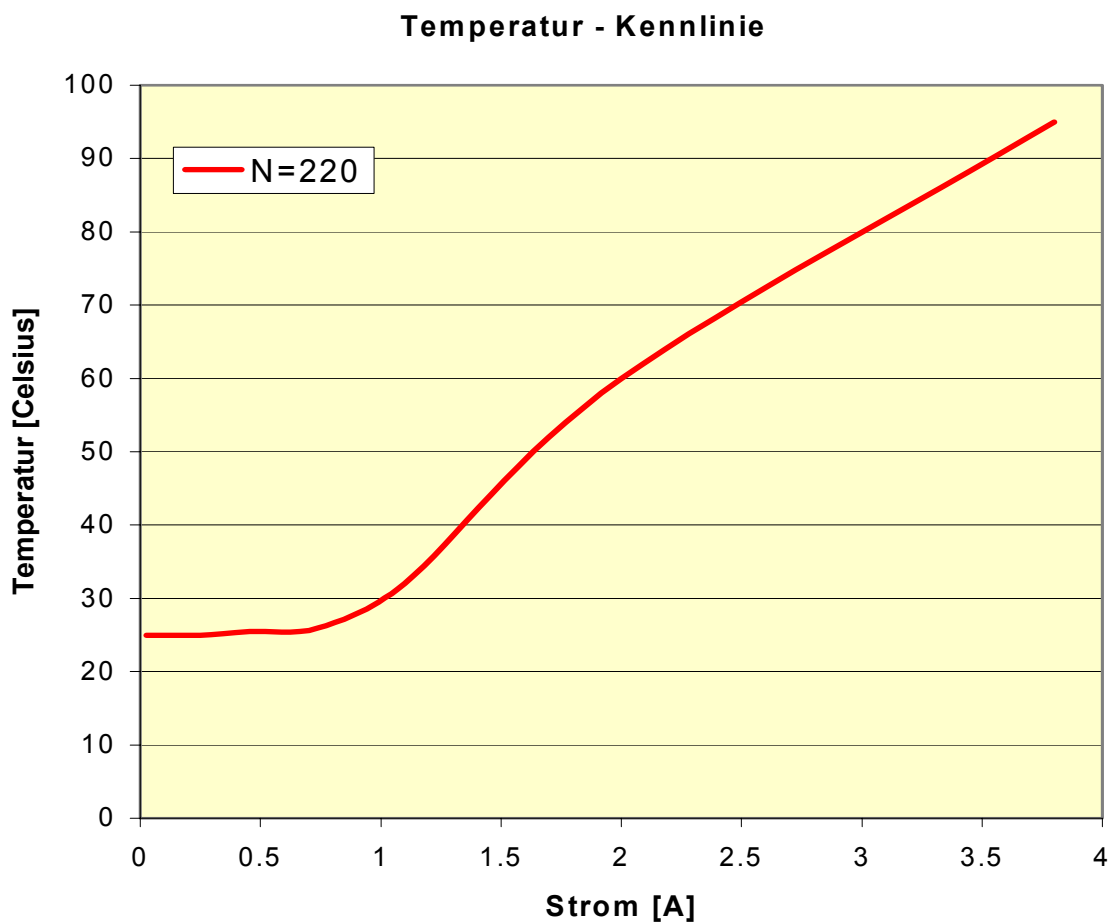
Von Interesse ist vor allem die gewonnene Leistung. Die Grafik zeigt, dass die Leistung bis zu einem gewissen Strom praktisch linear zunimmt. Ab Stromstärken von 4 Ampere nimmt die Wärmeverlustleistung in den Spulen drastisch zu.



8.4 Temperaturverhalten

Bei der grösseren Spule ($N=220$) wurde vor dem Eingiessen ein NTC Widerstand an die Spule geklebt, womit bei den verschiedenen Belastungen die Temperatur bestimmt werden konnte. Die Spule sollte nicht über 100 Grad Celsius erhitzt werden, da sonst der Backlack zu schmelzen beginnt. Das ganze Spulensystem würde damit instabil. Es wird deutlich, dass die Temperatur bei etwa 1 Ampere zu steigen beginnt. Der Strom sollte unter Dauerbelastung nicht über 3 Ampere steigen, was einer Temperatur von etwa 80 Grad entspricht.

Beim Versuch herrschte eine Raumtemperatur von 26 Grad Celsius.



8.5 Vergleich: Berechnung – Messung

Es ist nun interessant die berechneten Werte mit den gemessenen zu vergleichen. Im Kapitel 7.2.2 wurden für eine Spule von 200 Windungen folgende Werte berechnet:

Leerlaufspannung:	20V _{RMS}
Zulässiger Strom:	1.7A
$P_{max} = U_{RMS} \cdot I$:	34 Watt

Zu vergleichen ist jeweils der mittlere Wert der gemessenen Spulen (N=170;220), da ja beim fertigen Modell Spulen von 200 Windungen eingesetzt werden.

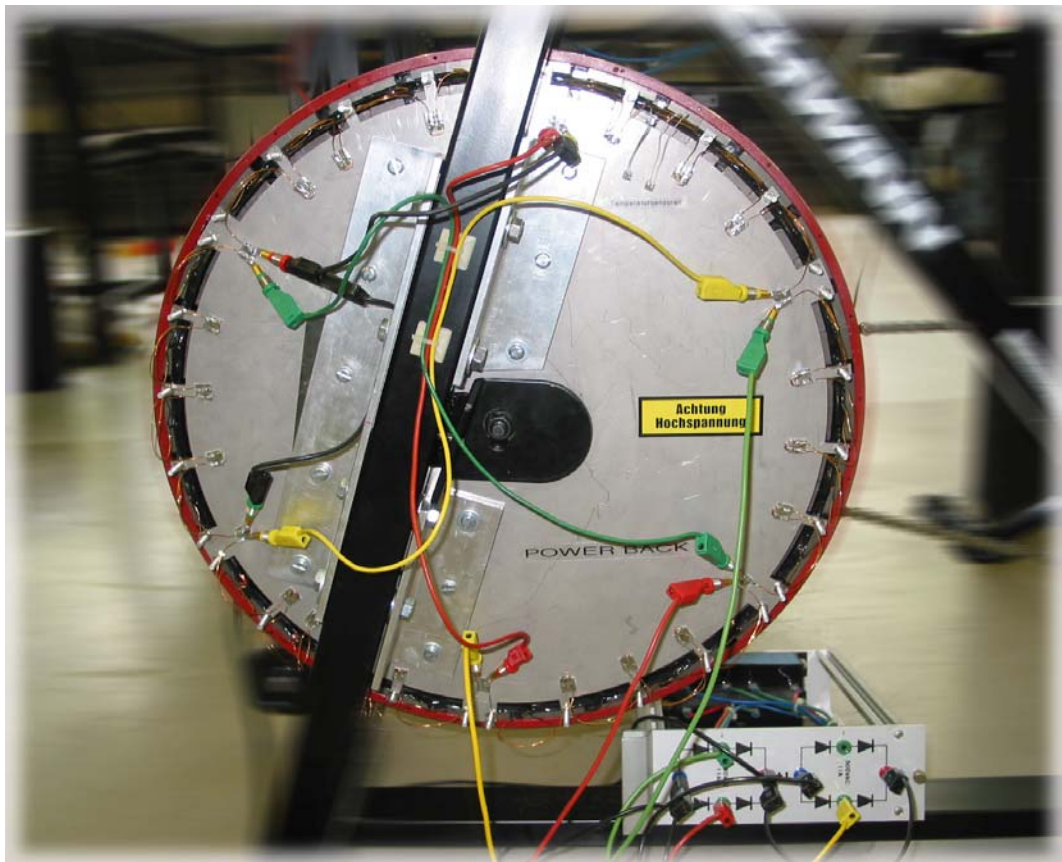
Vergleicht man die P-I Kennlinie mit den berechneten Werten, so ergibt sich für den max. zulässigen Strom von 1.7A eine Leistung von ca. 30 Watt pro Spule. 1.7A ergibt eine Spulentemperatur von etwa 50 Grad Celsius, was im zulässigen Bereich liegt.

8.6 Fazit / Beweis

Tests mit 4 Spulen haben ergeben, dass Leistungen von über 500 Watt durch Menschenkraft nur kurzzeitig erreicht werden können. Aufgeteilt auf 26 Spulen ergibt sich pro Spule eine Leistung von etwa 19 Watt, womit nicht einmal bei tiefen Drehzahlen die 1 Ampere-Grenze überschritten wird. Damit ist bewiesen, dass die Maschine den Anforderungen eines Spitzensportlers bei weitem genügen wird!! Die Maschine könnte kurzzeitig theoretisch über 2000 Watt Leistung abgeben!

9 Fertiger Aufbau

Kurz vor Abschluss der Arbeit konnte der gesamte Aufbau realisiert und einige Tests und Messungen durchgeführt werden. Verschaltet wurden in einem ersten Versuch pro Phase je 2 mal 4 Spulen in Serie. Je nach Verschalten der zwei Sektoren pro Phase resultieren 3 oder 6 Phasen. Über eine entsprechende Brückenschaltung wurden die Signale gleichgerichtet.



Die gesamte vom Generator abgegebene Wirkleistung ist zeitlich konstant, obwohl in jedem einzelnen Strang die Leistung pulsiert. Diese Theorie gilt für Drehphasensysteme und n -Phasensysteme.

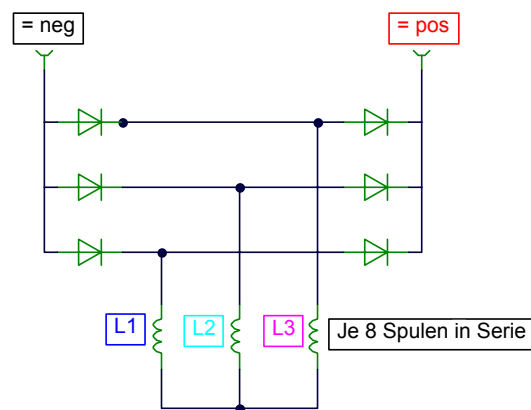
Die von einem symmetrischen Drehstromsystem abgegebene mittlere Wirkleistung beträgt $P = U \cdot I \cdot \sqrt{3}$

Die Messungen wurden bei einer Drehzahl von 170 U/min abgenommen.

9.1 3 Phasen

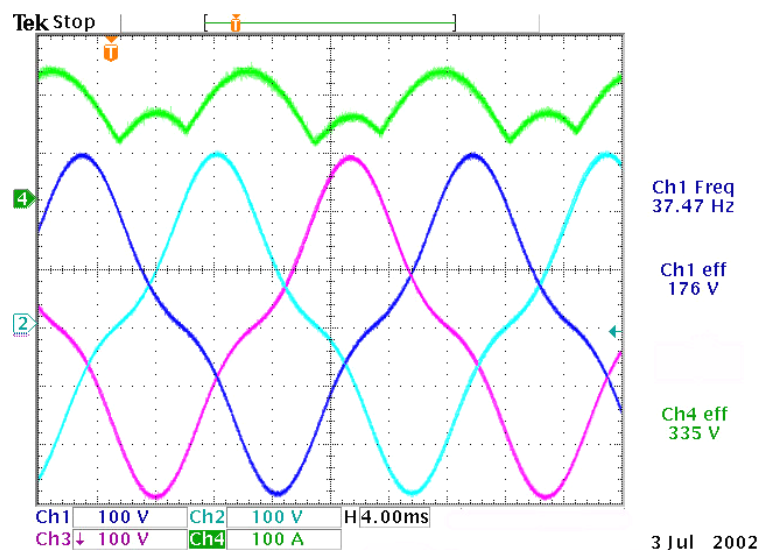
Werden die 2 Sektoren gleicher Phase in Serie geschaltet (8 Spulen), entstehen 3 Phasen. Die einzelnen Stränge werden in Sternschaltung verbunden.

9.1.1 Brückengleichrichter



9.1.2 Oszillatorsignal

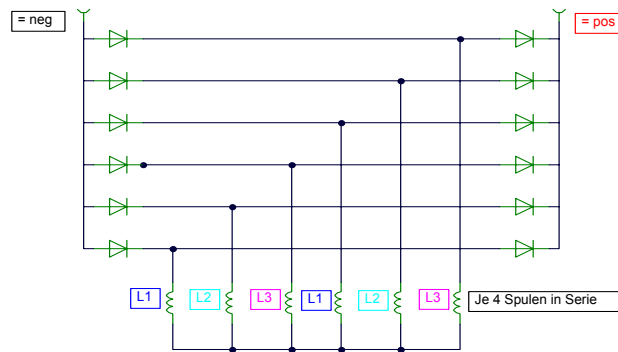
Die grüne Linie zeigt den Verlauf der gleichgerichteten Spannung. Da das Signal kein reiner Sinus ist, entstehen bei der Gleichrichtung kleine ‚Unebenheiten‘. Mit Hilfe eines Kondensators kann jedoch der verbleibende Rippel fast vollständig geglättet werden. Es entsteht eine Effektivspannung von 335V.



9.2 6 Phasen

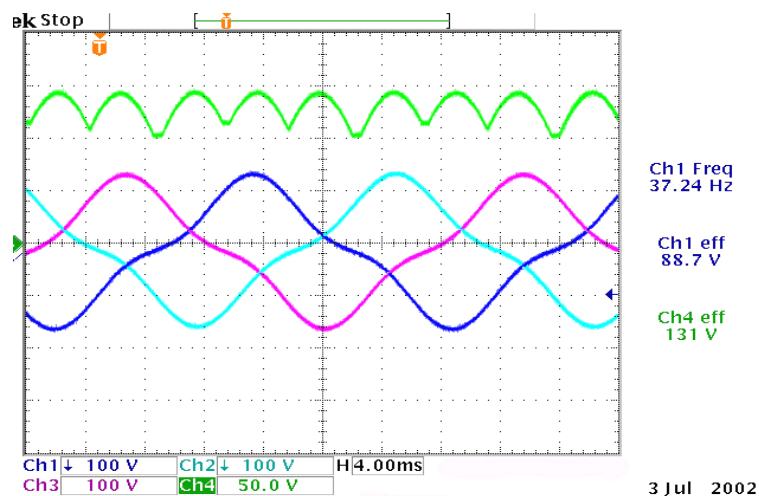
Wird jeder Sektor zu 4 Spulen einzel gleichgerichtet, entstehen bei richtiger Verschaltung 6 Phasen die über je 2 Dioden gleichgerichtet werden.

9.2.1 Brückengleichrichter



9.2.2 Oszillatorsignal

Im Vergleich zum 3-Phasensystem wird deutlich, dass der Rippel wesentlich kleiner ist als beim 3-Phasensystem. Im Oszillator - Bild sind nur deren 3 Phasen aufgezeichnet, da das Messgerät ‚nur‘ deren 4 Mess - Kanäle aufweist. Man kann sich jedoch jede der 3 gezeigten Phasen zusätzlich negiert vorstellen, wodurch das 6-Phasensystem resultiert. Die gleichgerichtet, grüne Linie macht deutlich, dass 6 Phasen vorhanden sind. Entsprechend sind auch die Strangspannungen nur halb so gross, da ja jeweils nur 4 Spulen in Serie geschaltet sind. Es resultiert eine effektive Ausgangsspannung von 131V.



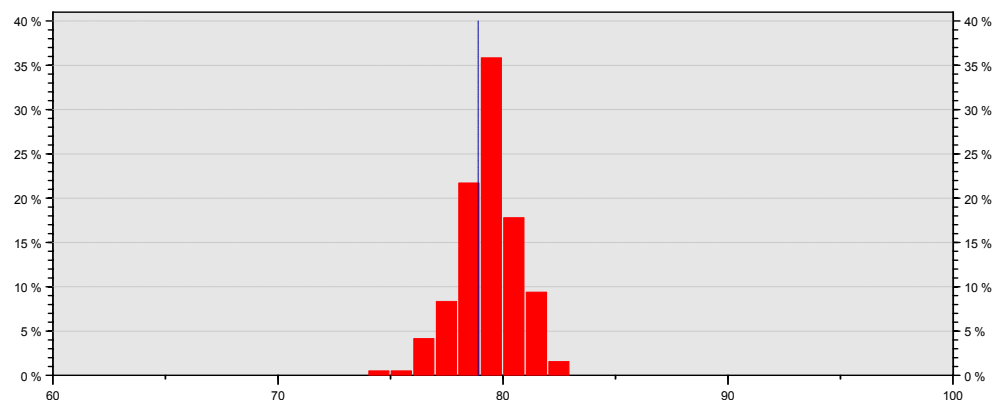
10 Feldtest mit Olivier Bernhard

Olivier Bernhard (Profi-Triathlet, Langdistanz Duathlon Weltmeister 99/00, Duathlon CH-Meister 2002, 5. Ironman Hawaii 99 ...) sagte spontan zu, um den Generator auf Herz und Nieren zu testen.



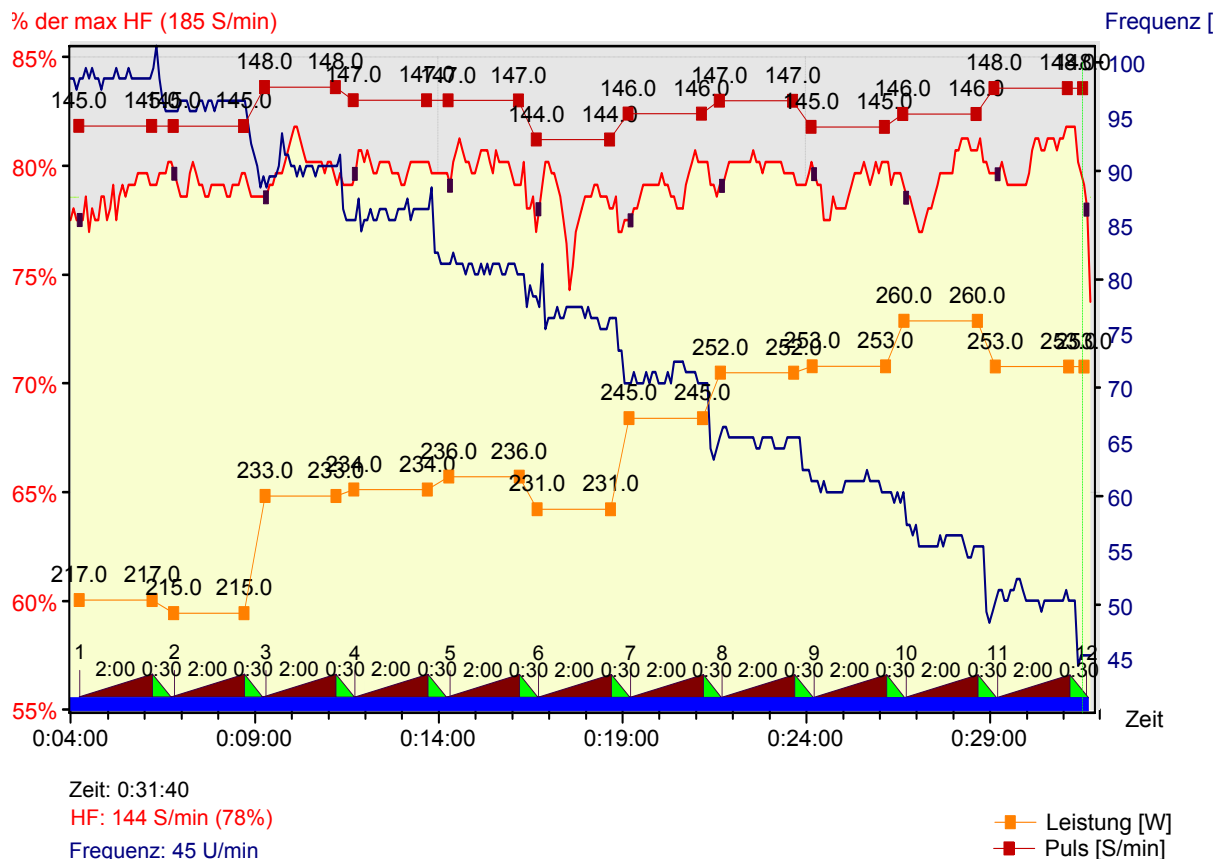
10.1 Testablauf

Ziel des Testes war es, den Generator bei verschiedenen Drehzahlen zu belasten und gleichzeitig den Puls konstant bei ca. 80% der maximalen Herzfrequenz zu halten. 80% entspricht einem mittleren bis intensiven Training. Entsprechend wurde die Last am Generator abgestimmt. Der Test wurde bei 100 Upm gestartet und jeweils nach 2 min um 5 Upm gesenkt. Nach jeder Stufe wurde eine ‚Totzeit‘ von 30 Sekunden eingesetzt, um die geforderten Werte anzugleichen, damit die Ergebnisse nicht verfälscht wurden. Wie das Puls Verteil - Diagramm zeigt, konnten die Puls-werte sehr genau eingehalten werden. Der Durchschnitt lag über die ganze Dauer bei 78% der max. Herzfrequenz. Die Trettfrequenz und der Puls wurden im Intervall von 5 Sekunden aufgezeichnet und die Leistung über das jeweilige Intervall von 2 min gemittelt.



10.2 Testergebnis

Der Test ist sehr erfolgreich verlaufen. Die dunkelrote Linie zeigt die Puls-Durchschnittswerte während jeweils einer Periode von 2 min. Wie der Grafik zu entnehmen ist, fuhr der Sportler über die ganze Strecke mit ziemlich konstanter Belastung. Die orange Linie zeigt gleichzeitig die abgegebene Leistung am Generator.



Interessant ist vor allem, dass die Leistungsabgabe bei etwa 55 Upm ihr Maximum erreicht, das heisst die Kraft des Sportlers am effizientesten auf das Rad übertragen wird. Bei hohen Drehzahlen wird ein Teil der Leistung in Rotationsenergie verschwendet. Unter 50 Upm ist ein ‚runder Tritt‘ nicht mehr möglich – die abgegebene Leistung sinkt wieder. Der Leistungseinbruch im Intervall 6 (6 – 7) ist darauf zurückzuführen, dass während diesem Intervall auch die Pulszahl am niedrigstens war (144 S/min)

Zeichenerklärung: *Hellrot:* momentaner Puls in % der max HF ; *Dunkelrot:* gemittelter Puls über Intervall in S/min ; *blau:* momentane Trettfrequenz in U/min ; *Orange:* gemittelte Leistung in Watt über Intervall;

10.3 Interview mit Olivier Bernhard

Olivier, Du hast das Spinning Power Back Bike ausgiebig getestet. Als Spinninginstructor und Leistungssportler weißt Du um die Bedürfnisse der Trainierenden genau Bescheid. Genügt dieses Bike den hohen Anforderungen der Sportler?

Vollkommen, die Last kann stufenlos von null bis maximal eingestellt werden, was will man mehr! Die Maximalbelastung von 750 Watt genügt jedem Sportler.

Hast Du ein Unterschied im Trittverhalten verspürt gegenüber einem herkömmlichen Spinning Bike?

Nein, überhaupt nicht, nur das leise Summen vom Generator lässt auf etwas Neuartiges schliessen.

Die gewonnene Leistung soll später sinnvoll genutzt werden können, z.B. für die Netzversorgung. Was hältst Du von dieser Idee?

Viele Gelegenheitssportler sehen keinen Sinn, sich stundenlang auf einen Hometrainer zu sitzen und ihre Energie ungenutzt zu verheizen. Mit dem Power Back sehe ich eine sinnvolle Verwendung für die mühsam abtrainierten Kalorien.

Vielmehr sehe ich jedoch den Einsatz in der Leistungsdiagnose. Mit der Kombination Trittfrequenz, Puls und erzeugten Leistung können viele wertvolle Daten gewonnen werden, die u. a. auf das momentane Leistungsvermögen schliessen.

Nach all dem Lob - Ist Dir auch etwas Negatives aufgefallen das verbessert werden könnte?

Das Einstellen der Last mit den Schiebewiderständen präsentierte sich noch etwas umständlich, was aber später sicherlich auch anders gelöst werden kann(?)

Oli, herzlichen Dank für das Interview und den spontanen Einsatz als Testperson!

11 Wirtschaftlichkeit

11.1 Kosten

Um die Wirtschaftlichkeit der Maschine abzuschätzen, ist es nötig eine grobe Kostenübersicht zu erstellen.

Bezeichnung:	Normalpreis:		Rechnung:
Magnete	1200.-		1000.-
Rotor	3500.-		700.-
Stator	500.-		150.-
Spulen	1000.-	->	1000.-
Füllstoff	250.-	->	250.-
Kleinmaterial	250.-		200.-
	-----		-----
Total	6050.-		3300.-

11.2 Vergleich bestehender Maschinen

Was die Funktionalität anbelangt, ist die neu entwickelte Maschine den bestehenden weit überlegen. Das Fahrverhalten entspricht genau dem eines herkömmlichen Spinningbike. Über den Herstellungspreis von grund 3300.- lässt sich streiten. Es muss jedoch gesagt werden, dass eine Serienproduktion wesentlich günstiger zu stehen käme als ein Prototyp.

12 Organisatorisches

Nach den Lehren aus der ersten Semesterarbeit konnte der zuvor erstellte Zeitplan mit geringfügigen Abweichungen eingehalten werden, deshalb wird auf einen ist/soll Vergleich verzichtet.

12.1 Zeitplan real

Tätigkeit / Kalenderwoche		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Stator	Konstruktion erarbeiten																
	Dimensionierung																
	Fertigung / Aufbau																
	Liefertermin																
Rotor	Machbarkeit abklären / Kosten																
	Überarbeitung der Abmessungen																
	Firma für die Fertigung suchen																
	Magnete einbauen																
	Liefertermin																
Spulen	Dimensionierung																
	Strom / Spannungsberechnung																
	Phaseneinteilung																
	Eingiessen																
	diverse Versuche																
	Form / Windungszahl eruieren																
	Liefertermin																
Elektronik	Gleichrichter dimensionieren																
	Gleichrichter aufbauen																
Div .	Bericht erstellen																

12.2 Aufwand

Der zeitliche Aufwand für diese Arbeit ist kaum zählbar. Auf eine statistische ‚Stoppuhr-Auswertung‘ habe ich bewusst verzichtet. Viele der glorreichen Ideen und Überlegungen entstanden oft nicht am Schreibtisch sondern während unzähligen Lauf - + Velotrainingstunden.

12.3 *Bezugsquellen Material*

Magnete:	BBA Magnettechnik	Schachenallee 29 5001 Aarau
Rotor:	Thalmann Maschinenbau AG	Hummelstrasse 8500 Frauenfeld
Stator:	Neher AG	Felsensteinstr. 8 9642 Ebnat-Kappel
Spulen:	Feurer + Mooser AG	Allmeindstr. 23 8716 Schmerikon
Füllstoff:	ASTORit AG	Kobiboden 4 8840 Einsiedeln
Kleinmaterial:	Hobby Keba Neher AG Eisenhandlung Giger Manor	9630 Wattwil 9642 Ebnat-Kappel 9630 Wattwil 9630 Wattwil

12.4 *Bild – und Programmverzeichnis*

- Fotos wurden mit der Digitalcamera Canon Powershot G2 aufgenommen und mit dem Programmen Canon ZoomBrowser EX, Photoshop 7.0 und Corel DRAW überarbeitet.
- Konstruktionszeichnungen wurden mit dem Programm Archi – CAD gezeichnet und vermasst.
- Das Leistungsdiagramm mit Puls, Trettfrequenz und Leistung wurde mit der POLAR Precision Performane Software ausgewertet, welches die Daten von der POLAR Uhr S-701 einlesen kann.
- Die Elektronischen Schaltungen wurden mit ,Tina' aufgebaut.
- Das Kurzvideo wurde mit ,Casablanca' bearbeitet und vertont.

12.5 *Literaturverzeichnis*

Theorie und Lösungsansätze habe ich aus folgenden Büchern bezogen:

- Formelsammlung Physik, Verlag Harri Deutsch
ISBN: 3-7293-0008-3
- Taschenbuch der Elektrotechnik
ISBN: 3-8171-1563-6
- Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch
ISBN: 3-8171-1556-3
- Elektrische Maschinen, Rolf Fischer
ISBN: 3-446-1842-6
- Elektrische Antriebe, Böhm
ISBN: 3-8023-1590-1

12.6 *Beilage*

- Kurzvideo mit Olivier Bernhard als Testperson – zeigt die Extremstufen (Lehrlauf / hohes Drehmoment) .
Windows media Player erforderlich. – neue Version auf CD zum Downloaden vorhanden.

13 Schlusswort

Ein Bubentraum wird wahr – was vor 15 Jahren mit dem Baukasten seine Anfänge nahm, konnte ich mit dieser Arbeit verwirklichen – ein perfekt funktionsfähiger Generator! Ich stehe am Ende meiner Träume, oder doch erst am Anfang? Diese Arbeit hat mich in jeder Hinsicht geprägt, ich habe gelebt, gekämpft, gelitten, gelacht, geweint für diese Arbeit. Über das Konstruieren mit CAD, das Koordinieren mit verschiedenen Firmen, organisieren von Materialien, realisieren von eigenen Ideen, der Kampf um die Zeit bis hin zum präzisen arbeiten - es war eine echte Freude an diesem Projekt zu arbeiten.

Am meisten gefreut hat mich jedoch die Hilfsbereitschaft von Verwandten, Freunden und Kollegen. Ohne sie alle wäre meine Arbeit schon gar nicht zustande gekommen – der grosse Traum wäre eine Traum geblieben. Eine Zeile genügt nicht, um die grosse Dankbarkeit auszudrücken und die unzähligen Arbeitsstunden wieder gutzumachen!! Jeder hat ‚Sein‘ zum grossen Puzzle beigetragen.

Folgende Personen haben wesentlich mitgeholfen mir den grossen Traum zu verwirklichen:

Berhold Jonientz, Kurt Schoch, Rolf Thalmann, Urs Wagner

Ich werde Euch für Eure grosse Hilfe nie vergessen! Herzlichen Dank

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei meinem Sportskollegen Oli Bernhard für seinen spontanen Einsatz als Testfahrer und nicht zuletzt meinem Betreuer, Herrn Prechtel, der mir das Weiterführen der Arbeit erst ermöglicht hatte und immer mit grossen Einsatz hinter meiner Arbeit stand.

Die letzte Zeile ist geschrieben – eine Interessante und überaus erfolgreiche Zeit geht zu ende - die Arbeit ist beendet – aber in meinen Gedanken wird sie weiterleben – bis zum nächsten Traum..

Thomas Rickenmann

Rapperswil, den 11.07.02
