



Antriebsentwicklung

Abschlussbericht

Arno Mathoy, BRUSA Elektronik AG, 9466 Sennwald



Dieses Projekt wird aus Fördermitteln des Bundesamtes für Energie unterstützt

Änderungsstand

Fassung	Datum	Bemerkungen
01	2004-01-09	Neues Dokument
02	2004-01-26	Überarbeitung

Inhalt

<i>1</i>	<i>Zusammenfassung</i>	<i>3</i>
<i>2</i>	<i>Das Coaster-Konzept</i>	<i>5</i>
<i>3</i>	<i>Energiespeicher.....</i>	<i>8</i>
<i>4</i>	<i>Auslegung des Antriebs</i>	<i>12</i>
<i>5</i>	<i>Erwartete Systemeigenschaften.....</i>	<i>30</i>
<i>6</i>	<i>Fahrversuche auf der Teststrecke</i>	<i>32</i>
<i>7</i>	<i>Validierung am Prüfstand.....</i>	<i>34</i>
<i>8</i>	<i>Ausblick.....</i>	<i>47</i>
<i>9</i>	<i>Schlusswort.....</i>	<i>47</i>

1 Zusammenfassung

1.1 Positionierung des BFE-Projektes

Die Entwicklung des Coaster-Systems findet auf vier Ebenen statt:

- Mechanik und Kinematik
- Antriebs- und Energiemanagement
- Leitstand und Kommunikation

1.2 Gliederung der Arbeit

1.2.1 Topologieuntersuchung

Die Asynchronmaschine erfüllt durch die sehr große Leistungsbandbreite alle Anforderungen. Allerdings limitieren die Rotorverluste bestimmte sicherheitsrelevante Betriebszustände, bei denen höchste Drehmomente bei tiefer Drehzahl verlangt werden.

Permanenterregte Maschinen hätten in diesen Betriebszuständen deutliche Vorteile, sind aber bei hohen Drehzahlen gegenüber Asynchronmotoren im Nachteil, weil sie nur mit großem Aufwand feldschwächbar sind.

Deshalb wird neben dem Asynchronmotor eine spezielle Ausführungsart des permanenterregten Synchronmotors untersucht, der durch die besondere Gestaltung des Rotors eine sehr gute Feldschwächbarkeit aufweist. Diese Motorgattung ähnelt im mittleren Drehzahl-Drehmomentverhalten eher der Asynchronmaschine und produziert dabei aber wesentlich geringe Rotorverluste.

1.2.2 Motorentwicklung

Die Maschine wird als Hochdrehmoment-Drehstrommotor ausgelegt, dessen magnetische Gestaltung des Stators eine Ausführung sowohl als Asynchronmotor als auch als Hybrid-Synchronmotor zulässt. Um das Entwicklungsrisiko zu minimieren wurde zuerst die Variante als Asynchronrotor realisiert.

Bei der Gewichtsoptimierung musste auch der besondere Sicherheitsaspekt bei einem öffentlichen Personentransportmittel von Beginn an mit berücksichtigt werden.

Die folgenden Bilder veranschaulichen die Maßnahmen zur Gewichtsminimierung auf magnetischer Ebene

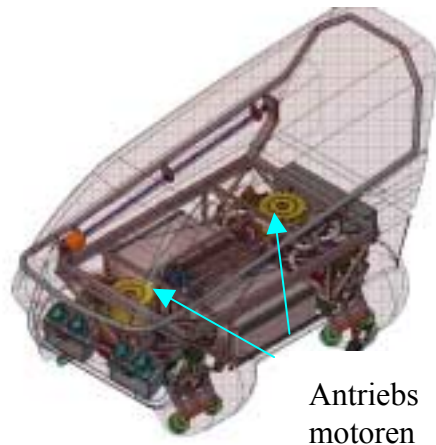
- Hohe Polzahl führt auf eine sehr geringe Statordicke und kurze Wickelköpfe
- Sehr großer Rotordurchmesser ermöglicht ein großes Grenzmoment pro Motorvolumen
- Minimierung der Rotorinnenmasse



Bild 1: Möglichst großer Rotordurchmesser



Bild 2: Gestaltung des Rotorinnenraumes (ASM)



Antriebsmotoren

1.2.3 Konstruktion und Fertigung

Auch bei der Verpackung der aktiven Motorkomponenten ist Leichtbau das oberste Gestaltungsprinzip:

- Biegefreie Getriebeanbindung durch zum Patent angemeldete integrierte Hohlwellenkupplung



- Integration des Drehzahlgebers in den Wickelkopfraum
- Dünner Kühlmantel durch runde Bohrungen im Kühlmantel mit Überströmkanälen im Lagerschild



1.2.4 Test und Validierung

- Verifizierung des Entwicklungsprozesses über Soll-Ist Vergleich am Prüfstand
- Umfangreiche Systemtests mit dem Fahrzeug auf der Teststrecke (noch im Gange)



2 Das Coaster-Konzept

2.1 Grundgedanke

Mit dem Downhill- oder dem City-Coaster soll die Verfügbarkeit des Individualverkehrs mit der Effizienz eines gut ausgenützten öffentlichen Verkehrsmittel kombiniert werden.

Die gesamte bisherige Entwicklungsphase war von diesem Grundgedanken getragen und führte auf ein schienengebundenes auto-ähnliches 6-sitziges Kleinfahrzeug, mit eigenem Antrieb und mitgeführtem Energiespeicher.

2.2 Fahzeugspezifikationen



2.2.1 Einsatzbedingungen

Das 6-sitzige Fahrzeug soll auf Zubringer-Bergbahnstrecken mit einer durchschnittlichen Steigung um 25% bis 35% eingesetzt werden.

Die Fahrleistungen ermöglichen auf der Bergstrecke (Transportgedanke) mit der Sesselbahn vergleichbare Fahrzeiten. Moderne Anlagen fördern mit ca. 5m/s was als Vorgabe für den COASTER herangezogen wird.

Auf der Talstrecke, die in der Regel nicht die Falllinie benützt und daher bei größerer Streckenlänge mit weniger Gefälle auskommt, steht der Erlebnisgedanke im Vordergrund. Hier sollen Fahrgeschwindigkeiten bis 15m/s in entsprechend gestalteten Kurven Fahrspaß vermitteln.

Die Abmessungen und das Aussehen des Coaster-Fahrzeuges wird bei gegebenen Spezifikationen vom Antriebskonzept mitbestimmt.

2.2.2 Leistungsdaten

Fahrzeug-Gesamtmasse	2200 kg	vollbesetzt mit 6 Personen oder 600 kg Nutzlast
Rollwiderstandsbeiwert	< 0,02	Kompromisswert für hohen Fahrkomfort
Luftwiderstandsbeiwert	< 0,35	Spielt im oberen Geschwindigkeitsbereich eine Rolle
Projektionsfläche frontal	< 3 m ²	Etwas mehr als ein PKW, bedingt durch die sogenannte Skateboard-Konstruktion mit Unterflur-Antrieb.
Maximalgeschwindigkeit	> 15m/s	Bei sehr flachen Anlagen unter Umständen größer
Maximale Steigfähigkeit	> 55%	Größte betriebsmäßig auftretende Fahrbahnsteigung
Mittlere Steigung	ca. 35%	Muss mit sehr hoher Energieeffizienz bewältigt werden

2.3 Energiespeicherkonzept

2.3.1 Hintergrund

Die Blütezeit der Batterie-Elektrofahrzeugentwicklungen liegt nun schon fast 10 Jahre zurück (Stand 2004). Deshalb scheint der beim Coaster eingeschlagene Weg mit der Antriebsenergiespeicherung an Bord auf den ersten Blick nicht offensichtlich, zumal heute allgemein davon ausgegangen wird, dass die meisten Entwicklungen an der aus Anwendersicht unbefriedigenden Batterietechnologie und deren Kosten scheiterten.

Wenn man diesen Zeitraum etwas differenzierter betrachtet, zeigt sich jedoch, dass noch andere Faktoren bei der negativen Entwicklung eine Rolle spielten. So hemmte beispielsweise die uneinheitliche und technisch unausgereifte Ladeinfrastruktur die Bildung eines globalen Elektrofahrzeug-Marktes – was nachweislich eine Grundvoraussetzung darstellt, um für die Autoindustrie interessant zu sein.

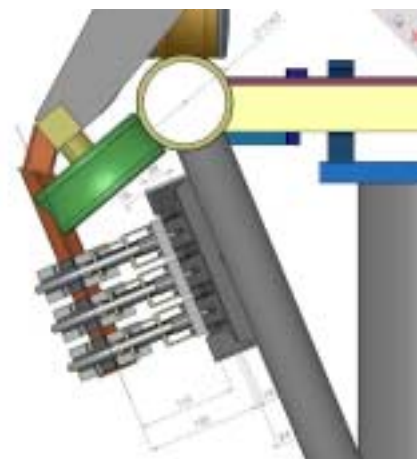
Beim Coaster besteht dieses Problem nicht, weil Fahrzeug und Ladeinfrastruktur einem in sich geschlossenen System angehören.

Durch die eng tolerierte formschlüssige Verbindung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn können industrielle Stromabnehmer die Energieübertragung ins Fahrzeug übernehmen.

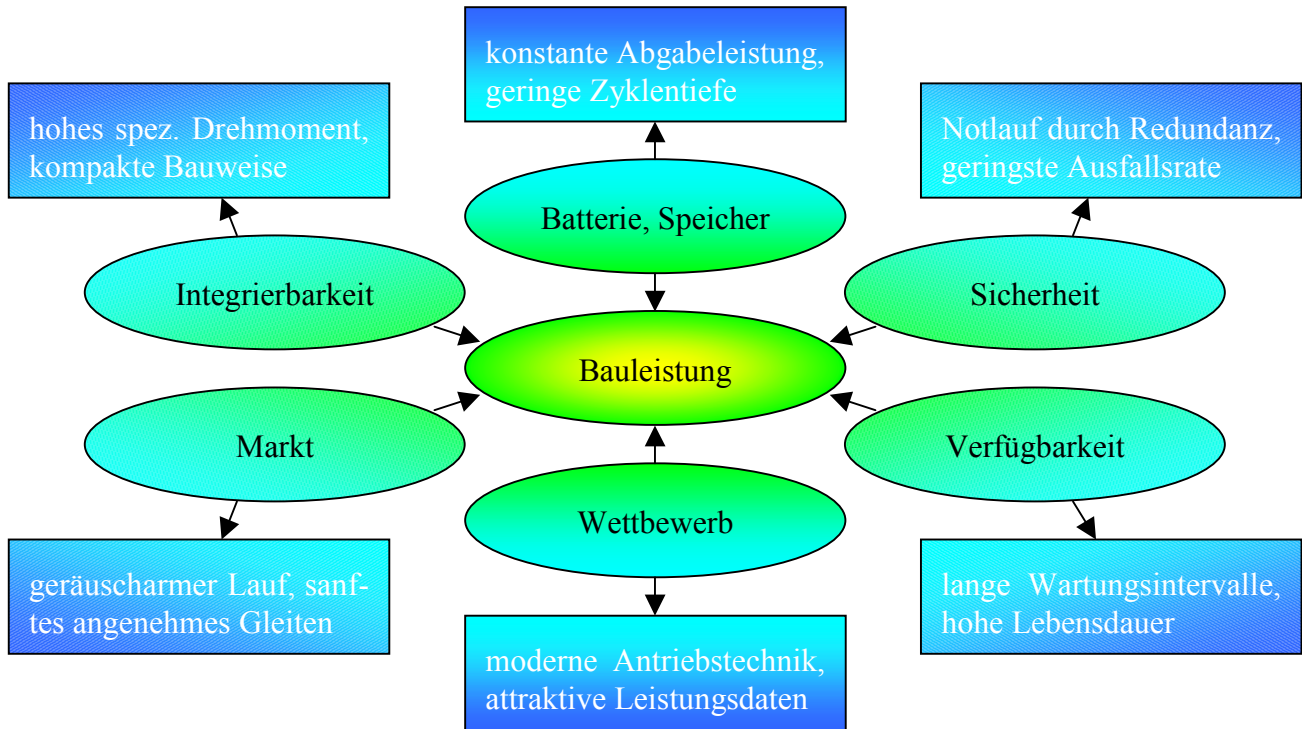
Aus ökonomischer Sicht sind die Systemkosten einer Batterie-Lösung den Systemkosten der Energiezuführung auf der gesamten Strecke entgegen zu stellen.

Zudem ist die wichtigste Formel aus der Blütezeit des Elektrofahrzeugs immer noch gültig:

Ein gutes Elektromobil muss um die Batterie herum entwickelt werden.



2.3.2 Einflussfaktoren und ihre Wirkung beim Evaluationsprozess



Einflussfaktor	Gewichtung	Bedingung
Batterie	sehr hoch	Bestimmt maßgeblich die Systemkosten des Antriebs
Sicherheit	sehr hoch	Notlaufeigenschaften bei Ausfall von Antriebskomponenten
Verfügbarkeit	hoch	Zuverlässig durch moderate Ausnutzung der Komponenten
Integrierbarkeit	mittel	Fahrzeug kann um das Antriebskonzept herum gebaut werden
Markt	mittel	Fahrleistungen müssen dem Produkt-Image entsprechen
Wettbewerb	gering	Kopieren sollte technisch anspruchsvoll bleiben

Ergebnis

- *Doppelantrieb(Redundanz!!) und konstanter Leistungsabgabe in weitem Bereich*
- *Optimierung für den mittleren Steigungsbereich*
- *Überlastfähigkeit bis hin zum doppelten Betriebsdrehmoment (aus der Redundanz!!)*
- *Energiespeicher bestimmt mittlere Antriebsleistung*
- *Bei der Auslegung wird mit dem Energiespeicher begonnen*

3 Energiespeicher

3.1 Auswahlkriterien

3.1.1 Speichertopologien für den Direktbetrieb elektrischer Zwischenkreise

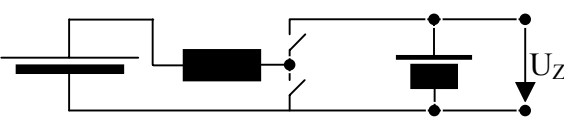
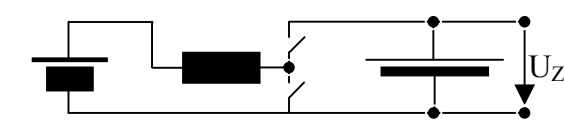
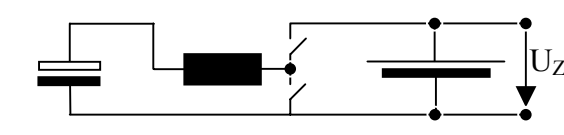
Topologie	Vorteile	Nachteile für „stand alone“
Supercaps	Wirkungsgrad, Zyklenzahl, Leistungsdichte	Preis, Energiedichte um eine Größenordnung zu gering, teures Lademanagement bei hoher Zellenzahl
Blei-Säure-Batterie	Preis, Verfügbarkeit, Beschaffung	Geringe Lebensdauer bei Zyklenbetrieb, viel zu geringe Energiedichte, Innenwiderstand SOC-abhängig.
Ni-Cd-Batterie Ni-MH-Batterie	Leistungsdichte zusätzlich bessere Energiedichte	Energiedichte knapp unter den Anforderungen, Batteriemangement, Einsatzverbot von Cd wahrscheinlich
Li-Ionen-Batterie	Energiedichte	Preis, Sicherheit, aufwändiges Lademanagement, starke Temperaturabhängigkeit des Innenwiderstandes
ZEBRA-Batterie	Energiedichte, Zyklfestigkeit, Preis, Betriebsbereich, Batteriemangement im Preis inbegriffen	Batteriegröße bei Fahrzeugen wird durch die geringe Leistungsdichte determiniert,
Brennstoffzellen	Energiedichte des Brennstoffes um eine Größenordnung über der von Batterien	Verfügbarkeit, Preis, Energierückgewinnung nur in Verbindung mit einer Hochleistungsbatterie möglich

3.1.2 Topologien ohne elektrische oder elektrochemischen Energiespeicher

Im Zusammenhang mit neuen Transportmitteln werden auch mechanische und thermische Energiespeicherkonzepte diskutiert.

Topologie	Vorteile	Nachteile
Schwungrad	Theoretisch sehr hohe Leistungsdichte, kann direkt auf einen elektrischen Zwischenkreis arbeiten	Energiedichte bleibt in der Regel unter der eines Blei-Akkus, hoher mechanischer Lageraufwand, teuer
Druckluftspeicherung	Drehmomentdichte des Hydraulikmotors	Wirkungsgrad bei stationärer Gaskompression, Energiedichte des Druckluftspeichers unter Blei-Akku
Kryothermischer Energiespeicher LN ₂	Flüssiger Stickstoff lässt sich sehr rasch einfüllen, Tankgeschwindigkeit,	Geringe Leistungsdichte der Stickstoff-Dampfmaschine, sehr große Wärmetauscher für Verdampfer.

3.1.3 Kombination von Hochleistungsspeichern mit Hochenergiespeichern

Konzept	Prinzipschaltbild	Charakteristik
Hochleistungsbatterie direkt am Zwischenkreis und entkoppelter Hochenergiebatterie		Eignet sich auch für stark wechselnde Belastung mit geringer mittlerer Leistung
Hochenergiespeicher über DCDC-Wandler mit einer Hochleistungsbatterie		Besonders vorteilhaft bei konstanter Dauerlast und kurzen sporadischen Lastspitzen
Hochenergiespeicher über DCDC-Wandler mit einem Superkondensator		Nützt den Supercap optimal aus und eignet sich für häufige, sehr hohe Wechsellast

Allen Konzepten haftet der Nachteil der hohen Komplexität und des Zusatzaufwandes in Form eines DCDC-Wandlers an.

Im COASTER-Fahrzeug kommt erschwerend hinzu, dass während der gesamten Bergfahrt oder mit umgekehrten Vorzeichen während der Talfahrt eine relativ hohe Leistung erforderlich ist und die daraus resultierende große Energiemenge mit den derzeit verfügbaren Kurzzeit – oder Hochleistungsspeichern nicht mehr bewältigt werden kann.

3.1.4 Schlussfolgerung

Beim COASTER Fahrzeug ist der Hauptspeicher zumindest auf die Leistung während der Bergfahrt zu dimensionieren. Der Energieinhalt des Speichers bestimmt dann nur noch die mögliche Betriebsdauer ohne Nachladung. Eine Kombination mit einem Hochenergiespeicher wäre nur dann sinnvoll, wenn die Gestaltung der Strecke nicht auf die Leistungsbegrenzung des Energiespeichers Rücksicht nehmen kann (bei sehr starke Gewichtung des Fahrspaß-Aspektes).

3.2 Auswahl der Zebra Batterie

Die ZEBRA-Batterie ist unter allen Hochenergiebatterien das derzeit am meisten ausgereifte Konzept und zu marktfähigen Preisen mit kurzer Lieferzeit erhältlich (Stand Mitte 2003).

Der Einsatz in einem öffentlichen Verkehrsmittel mit einer Nutzungsdauer von mindestens 10h/Tag egalisiert dabei den für die Hochtemperaturtechnologie typischen Nachteil der thermischen Grundverluste. Diese betragen im Mittel etwa 150W /Batterieeinheit.

Jede Batterieeinheit wird komplett mit einem Batteriemanagementsystem, integrierten allpoligen Leistungsschützen und Isolationsüberwachung geliefert und lässt sich problemlos in ein CAN 2.0B (Automotive CAN) integrieren.

Die Batterie wird bereits seit mehreren Jahren in Serienfertigungsanlagen produziert und hat ausgewiesene Langzeitqualitäten in professionellen Applikationen.

3.3 Eckdaten der gewählten Batterietype

Kenngrößen		Bemerkungen
Typenbezeichnung	Z37	Die Batterie hat um 24 Zellen mehr als der Standard Z5
Nennspannung	310V	Entspricht der Leerlaufspannung von 120 NaNiCl-Zellen
Nennkapazität	64 Ah	Zwei Stränge parallel verschaltet mit je 120 Zellen und 32Ah
Gesamtmasse	200kg	inklusive BMS, DC-Schütze

Wirkungsgrade der Zebra Batterie	C5	C2	C1	C½
Amperestundenwirkungsgrad	≈1	≈1	≈1	≈1
Energiewirkungsgrad	≈0.9	≈0.87	≈0.80	≈0.64
Energieinhalt bei unterschiedlicher Belastung	17.5 kWh	17.2 kWh	15.8 kWh	12.9 kWh

3.4 Rahmenbedingungen für die weitere Antriebsauslegung

3.4.1 Leistungsbegrenzung

Aus der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Energiewirkungsgrade bei unterschiedlicher Entladegeschwindigkeit folgt, dass der Energiewirkungsgrad in hohem Maße vom Belastungszustand der Batterie abhängt.

Da die Zebra Batterie in vielerlei Hinsicht das Optimum an verfügbarer Batterietechnologie darstellt, muss das Pflichtenheft in Bezug auf Fahrleistung an die Leistungslimiten der Batterie angepasst werden.

Als Maß gilt die sogenannte „Netto-Steigfähigkeit“ also die Anzahl Höhenmeter, die bei mittlerer bis hoher Steigung pro Sekunde bewältigt werden können:

$$P_{\text{Batt}} = F_{\text{COASTER}} \cdot v_N = m_{\text{COASTER}} \cdot 9.81 \cdot v_N / \eta_A$$

v_N Netto-Steigfähigkeit

η_A Antriebs-Wirkungsgrad, wird mit 0.85 angenommen.

$$v_N = P_{\text{Batt}} / m_{\text{COASTER}} \cdot 9.81 / 0.85$$

$$P_{\text{Batt}} / m_{\text{COASTER}} = p_{\text{spez}}$$

p_{spez} spezifische Leistung in [W/kg]

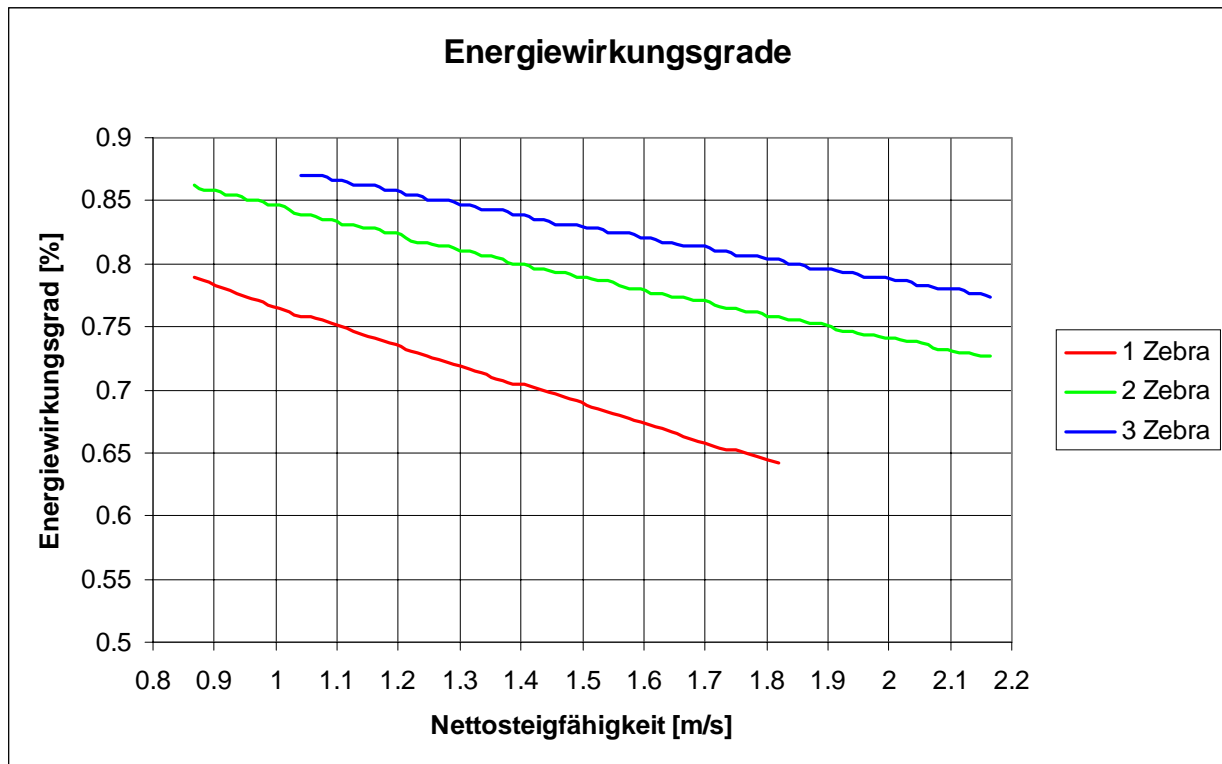
Die spezifische Leistung eines Fahrzeuges ist eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der zu erwartenden Fahrleistungen. Eine TGV Zugsgarnitur weist ca. 20W/kg Antriebsleistung auf, ein Mittelklasseauto etwa das doppelte.

3.4.2 Anzahl der Batterien pro Fahrzeug

Dabei gilt zu beachten, dass ein Fahrzeug mit mehr Batterien um mehr als das Batteriegewicht schwerer wird, weil ja auch das Fahrwerk und das Batteriefach vergrößert und verstärkt werden muss.

Anzahl	Gesamtmasse	Leistung 30kW	HK-Anteil	Batteriepreis
1 Zebra Z37	1900kg	C½	ca. 10%	€ 10 000
2 Zebra Z37	2200kg	C1	ca. 15%	€ 19 000
3 Zebra Z37	2500kg	C1.5	ca. 20%	€ 28 000

Aus der angestrebten Netto-Steigfähigkeit und den Angaben des Batterieherstellers zum Entladeverhalten lassen sich die zu erwartenden Energiewirkungsgrade des Batteriesatzes errechnen:



Aus dem Diagramm folgt, dass bei 1.5m/s Netto-Steigfähigkeit selbst mit 2 Batterien etwas schlechtere Bedingungen als C1 vorherrschen, denn C1 würden lediglich 31.6 kW bedeuten.

Da in der Praxis nicht dauernd mit dieser Leistung gefahren wird, kann man 1.5m/s Steigfähigkeit mit 2 Batterien gerade noch erreichen, wenn es bei 2200 kg Gesamtmasse bleibt.

Ein COASTER Fahrzeug mit nur einer ZEBRA Batterie bestückt ist technisch nicht sinnvoll und würde zu vorzeitigem Verschleiß der Batterie, schlechtem Energiewirkungsgrad und wegen des Spannungseinbruchs unter Last zu mangelhafter Antriebsleistung führen.

4 Auslegung des Antriebs

4.1 Rahmenbedingungen für die erforderliche Antriebsleistung

4.1.1 Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit aus der Batterieleistung

Die mechanische Leistung am Triebtrad dient der Überwindung der Fahrtwiderstände.

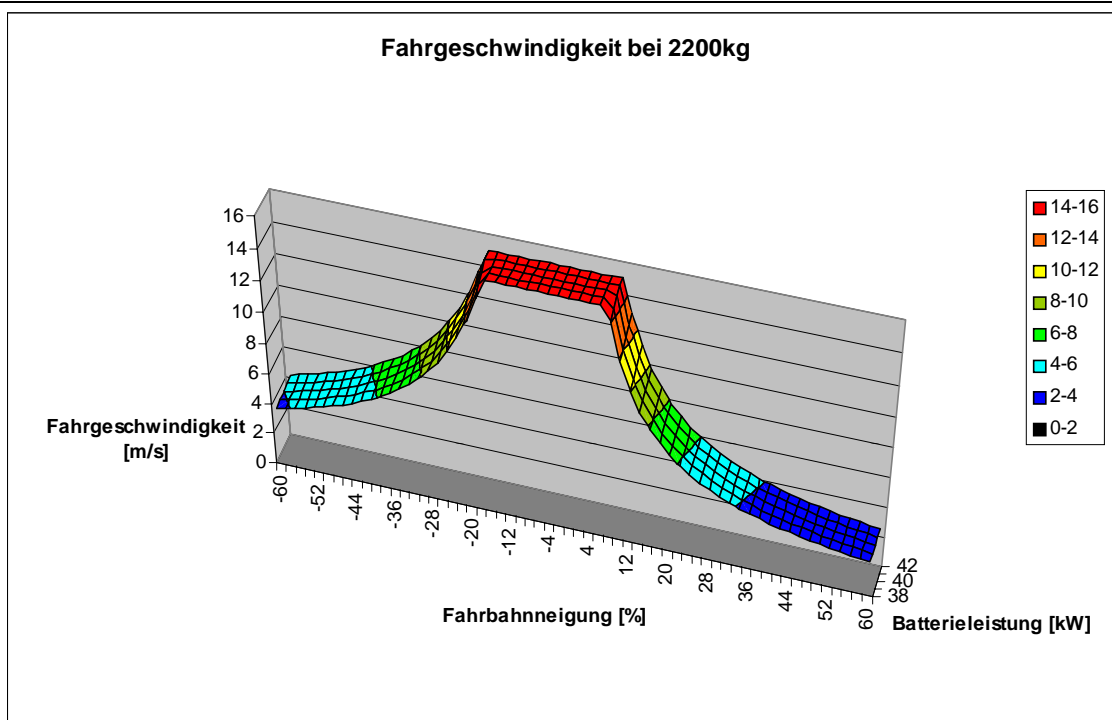
$$P_{Rad} = m_{DHC} \cdot g \cdot (s_{Fb} + r_{Roll}) \cdot v + \frac{c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot A_{Eff}}{2} \cdot v^3$$

P_{Rad}	mechanische Leistung am Triebtrad
$m_{COASTER}$	Bemessungsmasse des COASTER-Fahrzeuges, wird mit 2200 kg angenommen
r_{Roll}	Rollwiderstandsbeiwert, dimensionslos N/N
s_{Fb}	Fahrbahnneigung, dimensionslos m/m
ρ_{Luft}	Dichte der Luft, 1,3 kg/m ³
A_{eff}	Effektive Aufstandsfläche
c_w	Luftwiderstandsbeiwert, dimensionslos

Aus der vorgegebenen Klemmenleistung der Batterie ergeben sich unter Berücksichtigung der Umsetzungswirkungsgrade die zur Verfügung stehende mechanische Leistung:

$$P_{Rad} = P_{Batt} \cdot \eta_{Ant}^{sign(P_{Rad})} \cdot \eta_{Getr}^{sign(P_{Rad})}$$

P_{Batt}	Zulässige Klemmenleistung der Batterie
sign	Vorzeichenfunktion, (-1) bei negativer (generatorischer) Radleistung
η_{Ant}	Antriebswirkungsgrad, mit 0.85 angenommen
η_{Getr}	Getriebewirkungsgrad, mit 0.96 angenommen

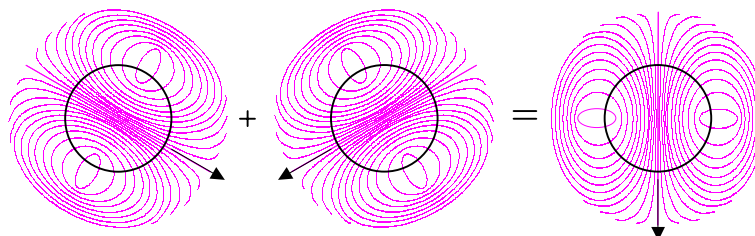


4.1.2 Besondere Anforderungen an die Antriebsmaschine

Das Konzept des DownhillCoasters schließt einen automatischen Selbstfahrbetrieb mit ein. Dabei ist das Geschwindigkeitsprofil so gestaltet, dass der Fahrgast das Gefühl einer freien Bewegung vermittelt bekommt (dem sogenannten „Coasting“).

Um den dafür erforderlichen komplexen Fahrtregelalgorithmus ausführen zu können, müssen die Antriebe als sogenannte Absolutstellglieder ausgeführt sein. Das bedeutet, dass ein verlangtes Drehmoment auch tatsächlich mit großer Präzision und unabhängig von der Drehzahl an der Motorwelle eingestellt wird, obwohl es einer direkten Messung nicht zugänglich ist. Sollte das geforderte Drehmoment nicht verfügbar sein, so ist der Wert des gelieferten Moments dem übergeordneten Rechner (VCU – vehicle control unit) mitzuteilen.

Diese Aufgabe kann nur durch die exakte Nachbildung des Maschinenmodells gelöst werden. Modelle von Sinusfeldmaschinen sind dabei denen anderer Maschinentypen deutlich im Vorteil, weil die Überlagerung zweier Sinusgrößen mathematisch immer wieder eine Sinusgröße zum Ergebnis hat. Damit bleibt der Rechenaufwand für das Modells überschaubar:



4.1.3 Komfort und Antriebsgeräusch

Ein weiterer Vorteil von Sinusfeldmaschinen liegt in ihrer konstanten Drehmomentabgabe und der relativ zu anderen Motortypen geringen Geräuschentwicklung aus Oberwellenfeldern.

Dies äußert sich auch in einer konstanten Leistungsaufnahme aus dem Zwischenkreis, was wiederum die Zusatzverluste am Innenwiderstand der Batterie minimiert.

In die engere Wahl kommen daher nur Typen mit sinusförmiger Luftspaltfeldverteilung:

- Asynchronmaschine (ASM)
- Permanentterregte Synchronmaschine (PSM)
- Hybrid-Synchronmaschine (HSM)

In der Vorauswahl ausgeschlossen wurden alle Typen mit anderen Feldverteilungen:

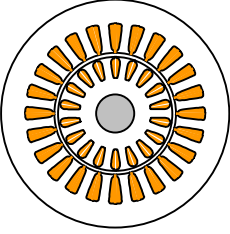
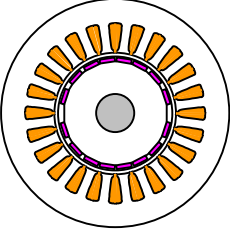
- Switched Reluctance Motor (SRM)
- Brushless DC-Motor (BLDC)

Außerdem werden Maschinenarten mit Bürsten oder Schleifringen ausgeschieden, weil sich diese Technologien in einem innovativen Produkt nur schwer vermarkten ließen:

- Gleichstrommotor (GM)
- Stromerregter Synchronmotor (SSM)

4.2 Auswahl der Antriebsmaschine

4.2.1 Übersicht der Maschinen mit sinusförmiger Feldverteilung

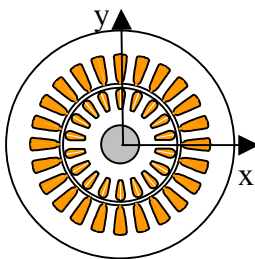
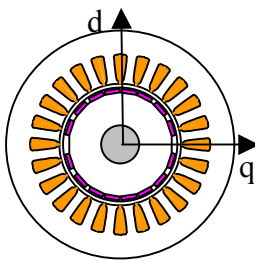
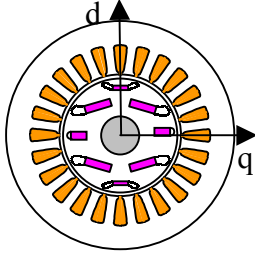
Topologie	Vorteile	Nachteile
Asynchronmaschine/ Induktionsmaschine 	Großer Drehzahlbereich konstanter Leistungsabgabe bei gleichbleibender Umrichterbelastung und hohem Gesamtwirkungsgrad Sonderbauformen mit geringem Werkzeugkostenanteil möglich Preisgünstige Serienfertigung bereits mit geringem Werkzeugaufwand möglich	Rotorverluste führen bei tiefen Drehzahlen und hohem Drehmoment zu hohen Rotortemperaturen Maximal mögliches Drehmoment nimmt quadratisch mit der Drehzahl ab Hochpolige Motoren erfordern sehr präzise und kleine Luftspalte für gute Stromphasenwinkel
Permanenterrregte Synchronmaschine 	Höchste Drehmomentdichte aller drei Motortypen, hochpolige Motoren relativ leicht herstellbar. Entwickelt bei kurzgeschlossener Wicklung ein hohes Bremsmoment bei niedriger Drehzahl (zusätzliche Sicherheitsfunktion) Sehr hoher Wirkungsgrad im unteren Drehzahlniveau	Bereich hoher Drehzahlen (Feldschwächebereich) erfordert sehr große Blindstromkomponenten vom Umrichter. Sehr hohe Kurzschlussströme oder sehr hohe Leerlaufspannungen bei Umrichterdefekt möglich Aufwändiger Fertigungsprozess auch in der Serie erforderlich
Hybrid- Synchronmaschine 	Drehzahlbereich konstanter Leistung wie bei Asynchronmaschine, aber mit höherem Wirkungsgrad im unteren Drehzahlbereich. Entwickelt im Kurzschlussbetrieb ein Bremsmoment bei etwas höherer Drehzahl als die PSM Geringerer Magnetanteil als PSM, Dämpferkäfig möglich	Motortopologie hat wegen der äußerst komplexen Regelung wenig Verbreitung gefunden. Hohes Entwicklungsrisiko bei der mechanischen Ausführung, sehr wenige Referenzprojekte weltweit Für eine hohe Querreaktanz sind wie bei der ASM sehr präzise und kleine Luftspalte einzuhalten

ASM und PSM sind weit verbreitet und in Ihrem Verhalten hinlänglich bekannt. Die Hybrid-Synchronmaschine findet derzeit kaum eine Industrieanwendung.

Die Hauptursache dafür liegt sicherlich darin, dass bei Standardantrieben die Vorteile gegenüber Asynchronantrieben die Mehrkosten bei der Anschaffung derzeit nicht rechtfertigen.

Dem gegenüber steht eine äußerst komplexe Regelstruktur, besonders wenn dieser Maschinentyp im Feldschwächebereich an einer konstanten Spannungsquelle betrieben wird. Das ist bei Batteriefahrzeugen aber praktisch immer der Fall.

4.2.2 Gegenüberstellung der Drehmomentdichte

Topologie	Phasenstromgleichungen	Bezeichnungen
Asynchronmaschine/ Induktionsmaschine 	Drehmomentgleichung $M = \frac{3p}{2} \Psi_0 \cdot b \cdot i_{xM}$ Für das Feld $\Psi_0 \cdot b$ ist noch zusätzlich ein Magnetisierungsstrom nötig. Der gesamte Phasenstrom ist in den meisten Betriebsfällen um etwa 1.25 größer als der für das Drehmoment verantwortliche Wirkstrom.	i_{xM} momentbildender Strom p Polpaarzahl Ψ_0 Maximal sinnvoller Fluss b Feldzahl $\Psi_{Act} \cdot b = \Psi_0$
Permanenterregte Synchronmaschine 	Drehmomentgleichung $M = \frac{3p}{2} \cdot \Psi_A \cdot i_q$ Ψ_A liegt bei gleicher Motorgeometrie im Bereich von Ψ_0 einer Asynchronmaschine, ohne dass dafür ein zusätzlicher Magnetisierungsstrom erforderlich wäre. Die PSM erzeugt daher mehr Drehmoment pro A Phasenstrom.	i_q Strom in der Flussquerachse p Polpaarzahl Ψ_A Permanentfluss
Hybrid- Synchronmaschine 	Drehmomentgleichung $M = \frac{3p}{2} (\Psi_A \cdot i_q + (L_q - L_d) \cdot i_d \cdot i_q)$ Das Reluktanzverhalten des Rotors trägt zu einer weiteren Komponente bei. (L_q ist etwa 3 mal größer als L_d .) Die Maschine erzeugt auf diese Weise mehr Drehmoment pro A als die ASM, aber etwas weniger als die PSM gleicher Baugröße	i_q Strom in der Flussquerachse i_dStrom in Magnetfeldrichtung p Polpaarzahl Ψ_A Permanentfluss L_qInduktivität der Querachse L_dInduktivität der Hauptachse

Wird NUR die Drehmomentdichte im unteren Drehzahlbereich betrachtet, weist die Permanenterregte Synchronmaschine das günstigste Drehmoment-Gewichtsverhältnis auf

1. Permanenterregte Synchronmaschine
2. Hybrid-Synchronmaschine
3. Asynchronmaschine

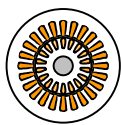
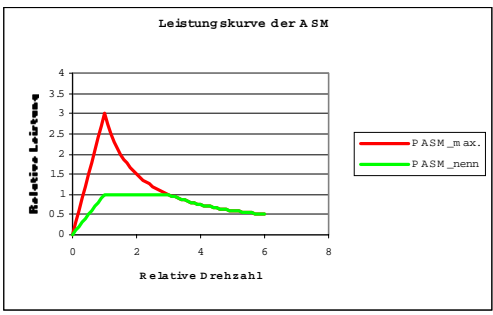
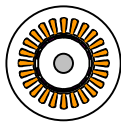
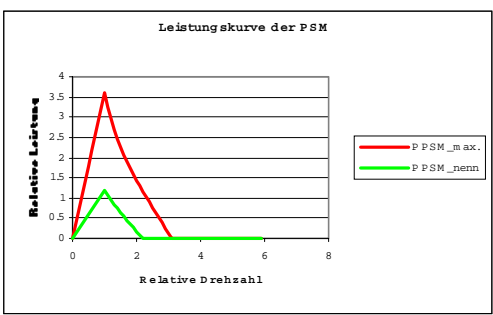
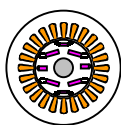
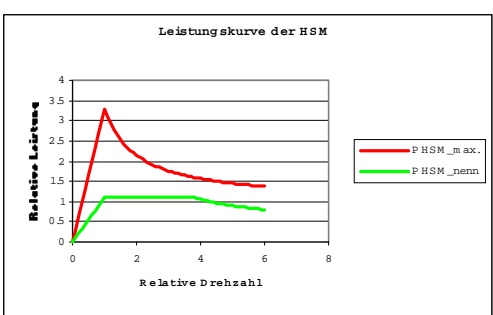
4.2.3 Betrieb an konstanter Spannung (Feldschwächebereich)

Leistung ist das Produkt aus Strom und Spannung. Der maximale Phasenstrom wird dabei immer vom Umrichter begrenzt, weil eine elektrische Maschine stets eine größere thermische Zeitkonstante als ein Halbleiter aufweist.

Deshalb wird die Spitzenleistung bei jener Drehzahl erreicht, an der die Motorspannung mit ihrem Scheitel an die Grenze der Batteriespannung anstößt. (Eckpunkt)

Ab diesem Punkt kann die Leistung des Umrichters bei gegebener Batteriespannung nicht mehr gesteigert werden. Das bedeutet, dass der Motor bei weiterer Drehzahlerhöhung den dargebotenen Grenzstrom zu Drehmoment verarbeiten können sollte. Im Idealfall ergibt sich damit eine Drehmomentabnahme mit der Funktion $1/n$ über dem Eckpunkt

Dieses Verhalten zeigen aber nur stromerregte Gleichstrommaschinen und bis zu einem gewissen Grad stromerregte (Schleifring) Synchronmotoren, die wegen ihrer Bürsten nicht in die engere Wahl gekommen sind:

Topologie	Leistungs-Kennlinien	Erklärung
ASM 	 <p>Leistungskurve der ASM</p>	<p>Die Maschine selbst limitiert im Feldschwächebereich die Leistungsaufnahme. Daher geht die Grenzleistungskurve im oberen Drehzahlbereich in die Nennleistungskurve über.</p> <p>Dieses Verhalten limitiert den nutzbaren Drehzahlbereich einer Asynchronmaschine für Fahrzeugantriebe</p>
PSM 	 <p>Leistungskurve der PSM</p>	<p>Ab dem Erreichen der Batteriespannung kann die Drehzahl nur durch massiven Stromeinsatz gegen das Permanentfeld gesteigert werden. Dies geht zu Lasten der momentbildenden Komponente.</p> <p>Bei Erreichen der Grenzdrehzahl ist der gesamte Strom zur Feldschwächung erforderlich.</p>
HSM 	 <p>Leistungskurve der HSM</p>	<p>An der Spannungsgrenze kann zunächst durch Veränderung des Stromphasenwinkels eine Feldschwächung ohne viel Zusatzaufwand erreicht werden.</p> <p>Bei höherer Drehzahl steigt der Feldstromanteil stärker, was den nutzbaren Drehzahlbereich limitiert. Das Verhalten ist jedoch besser als das der ASM.</p>

Für ein Fahrzeug im Sinne der Projektvorgaben ist das Verhalten im oberen Drehzahlbereich am höchsten zu gewichten. Die Hybrid-Synchronmaschine zeigt dabei das günstigste Verhalten:

1. Hybrid-Synchronmaschine
2. Asynchronmaschine
3. Permanenterregte Synchronmaschine

4.2.4 Auswertung Systemeigenschaften

Für die einzelnen „Disziplinen“ Drehmoment und Feldschwächung werden Punkte verteilt. Die Vergabe erfolgt von 5 Punkten für besonders günstiges Verhalten bis zu 1 Punkt für sehr ungünstige Eigenschaften in der Betreffenden Kategorie.

Je nach Anwendung als Personentransportfahrzeug oder Lastenfahrzeug werden die Kategorien unterschiedlich gewichtet. Diese Gewichtungen stellen die Multiplikatoren für die Disziplinpunkte im Bereich der topologischen Untersuchung.

Top.	Personentransport FZ							Lasten- oder Servicefahrzeug						
	Drehmomentdichte			Feldschwächung			Sum	Drehmomentdichte			Feldschwächung			Sum
	Top Pkt	Faktor	Pkt	Top Pkt	Faktor	Pkt		Top Pkt	Faktor	Pkt	Top Pkt	Faktor	Pkt	
ASM	3	x1	3	4	x2	8	11	3	x2	6	4	x1	4	10
PSM	5	x1	5	0	x2	0	5	5	x2	10	0	x1	0	10
HSM	4	x1	4	5	x2	6	14	4	x2	8	5	x1	5	13

Ergebnis aus der Topologieuntersuchung

HSM

Technisch gesehen stellt die Hybrid-Synchronmaschine die ideale Lösung für den Downhill-Coaster dar. Hervorstechend sind die herausragenden Eigenschaften im Feldschwächebereich kombiniert mit dem etwas höheren Dauerdrehmoment im tiefen Drehzahlbereich als bei der ASM

ASM

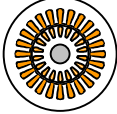
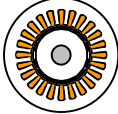
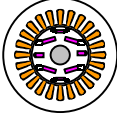
Im DownhillCoaster für den Personentransport schneidet - wie zu erwarten - die Asynchronmaschine ebenfalls sehr gut ab. Hohe Drehzahlen, wie sie für die Geschwindigkeitsbandbreite erforderlich sind, lassen sich auch mit der ASM sehr gut erreichen.

PSM

Die PSM ist aufgrund der hohen UmrichterAusnutzung im Bereich tiefer Drehzahlen für Service oder Transportfahrzeuge geeignet, weil dort die Endgeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. In diesem Bereich entscheidet die maximale Schubkraft über die zulässige Nutzlast, welche bei diesem Maschinentyp die höchsten Werte pro Gewichtseinheit erwarten lässt.

4.2.5 Sicherheitsaspekt

Für den Personentransport sind beträchtliche Sicherheitsauflagen vorgesehen. Der Personenschutz soll aber auch selektiv wirken und den Fahrablauf der Anlage nicht beeinträchtigen

	ASM 	PSM 	HSM 
Verhalten bei Ausfall der Umrichters (Kurzschluss der Motorwicklung)	Bei Umrichterausfall entsteht keinerlei Bremsmoment. Notbremsung erfolgt rein mechanisch	Bei Kurzschluss z.B. nach Umrichterdefekt entsteht ein beträchtliches Bremsmoment besonders bei tiefen Drehzahlen. Die Notbremsung wird passiv unterstützt.	Verhalten ähnlich der PSM, aber mit etwas geringerem Bremsmoment. Die Notbremsung verläuft dadurch „komfortabler“. Das etwas höhere Drehzahlniveau des maximalen passiven Moments kann zum kontrollierten Abläufen benützt werden.
Punkte	2	3	4
Verfügbarkeit	Bei Umrichterausfall kann das Fahrzeug mit einem Antrieb die Fahrt fortsetzen. Der ausgefallene Antrieb verhält sich neutral	Durch das Bremsmoment kann die fahrt nicht ohne weiteres fortgesetzt werden. Vor der Weiterfahrt muss entweder der Umrichter vom Motor getrennt, oder die mechanische Verbindung zum Triebad gelöst werden.	Verhalten ähnlich der PSM, aber das geringere Bremsmoment würde ein „Überfahren“ des passiven Momentes ermöglichen. Die dann entstehenden Kurzschlussströme sind auch geringer als bei der PSM
Punkte	5	1	3
Überlastbarkeit	Problematisch ist nur der Notbetrieb mit einem Antrieb im Grenzbereich.	Thermisch hochstabile Magnetqualitäten verursachen etwas höhere Stückkosten	Magnete sind thermisch besser geschützt als bei der PSM.
Punkte	3	3	4
Summe	10	7	12

Die Hybrid-Synchronmaschine bietet aus heutiger Sicht den besten Kompromiss zwischen In-sassenschutz und geringster Beeinträchtigung des Fahrablaufs im Fehlerfall.

4.2.6 Entwicklungsrisiko und -kosten

Das Entwicklungsrisiko beeinflusst die Entwicklungskosten negativ und bringt Terminrisiken mit sich. Diese sind ohne Alternativen in der Projektanfangsphase zu vermeiden:

	ASM 	PSM 	HSM 
Entwicklungsrisiko für den Prototypen	Abgesehen von mechanischen Problemen wie Wellendichtung, Lagerung und Rotorwuchtung sind keine besonderen Risiken zu erwarten. Die Herausforderung liegt im geringen Luftspalt, der den des Feldstrombedarf minimiert.	Nur die Magnetbefestigungstechnik im angestrebten Drehzahlbereich geht etwas über die Standardanforderung hinaus. Mechanisch gelten die selben Risiken wie bei der ASM	Beim Rotor sind mechanische und elektrische Auslegung miteinander verknüpft. Der Magnetpfad gräbt einen Spalt quer durch den Rotor, der die mechanischen Eigenschaften stark beeinträchtigt. Das Entwicklungsrisiko wird daher als beträchtlich eingestuft
Punkte	4	3	1
Entwicklungskosten für die erste Serie (Pilotanlage)	Die motorspezifischen Werkzeugkosten beschränken sich auf Einzelnutschnitte sowie auf Rotorring – Druckgussformen.	Zusätzlich zu den Kosten für die Nutzung fallen auch Werkzeugkosten für die Magnetform und die Magnetmontage an.	Hier sind die größten Kosten zu erwarten, weil die Rotorgeometrie ein Komplett-Stanzwerkzeug erfordert.
Punkte	4	3	1
Stückkosten	Die Motorelemente liegen im Bereich von Standardmotoren.	Auch hier können Standardrichtwerte als Anhaltspunkt dienen. Durch den Magnetgehalt ist der Rotor immer deutlich teurer als ein Asynchronrotor	Die Stückkosten werden wahrscheinlich vom Fertigungsaufwand bestimmt. Ist der Fertigungsprozess beherrschbar, ist der Preisabstand zur ASM geringer als zur PSM
Punkte	4	2	3
Summe	12	8	5

Die Asynchronmaschine als „dezentrale“ Technologie, die von vielen Herstellerfirmen beherrscht wird, kann in diesem Bereich von keiner anderen Technologie überboten werden.

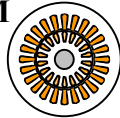
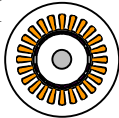
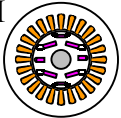
4.2.7 Auswahlentscheidung

Eine objektive Auswahlentscheidung ist eigentlich durch die vom Projektrahmen vorgegebene Gewichtung der Kostenfaktoren bestimmt.

Werden die drei Faktoren

- Technik
- Sicherheit
- Kosten

gleichmäßig gewichtet, ergibt sich für den **DownhillCoaster-Antrieb** ein interessantes Bild:

Punkteverteilung nach den verschiedenen Beurteilungskriterien für das DownhillCoaster-Personenfahrzeug	ASM 	PSM 	HSM 
Technik- und Topologieuntersuchung	11	5	14
Sicherheits- und Verfügbarkeitsstudie	10	7	12
Kosten- und Risikoanalyse	12	8	5
Punktesumme	33	20	31

- *Realisierung des Antriebs mit Asynchronmaschine (ASM)*

Nach Abwägen aller bekannter Einflussfaktoren wird zunächst die Asynchronmaschine ausgeführt. Die magnetische Gestaltung des Stators erfolgt so, dass jederzeit die Hybrid-Synchronmaschine nur durch Rotorwechsel implementiert werden kann, was zu einem späteren Zeitpunkt auch geplant ist

- *Untersuchung des Potentials einer Hybrid-Synchronmaschine (HSM)*

Parallel zur Entwicklung der ASM sollen die Eigenschaften des baugleichen Hybrid-Synchronmotors ermittelt werden, um das Potential auf Systemebene zu identifizieren.

4.2.8 Anmerkung zur Entscheidung

Gewichtung der Kostenseite

Wenn die Entwicklungskosten eine geringere Rolle spielen, ist die Hybrid-Synchronmaschine die beste Wahl. Dies kann zum Beispiel bei Anlagen für besonders lange oder schwierige Strecken der Fall sein.

Berücksichtigung der Projektphase

Die Wahl der ASM erfolgt auch unter dem Aspekt der Termintreue. Ist eine Lösung einmal verfügbar und sind COASTER-Anlagen lieferbar, ergibt sich für den Bereich technische Weiterentwicklung ebenfalls ein völlig anderes Bild.

4.3 Motordesign (gilt für ASM und HSM)

4.3.1 Bestimmung des Drehzahlneaus und des Übersetzungsverhältnisses

Aus den mechanischen Vorgaben erhält man:

maximale Fahrgeschwindigkeit	15m/s	bei Auslegung mit maximal 55% Steigung
Triebraddurchmesser	0.382m	gegeben durch die Fahrbahngeometrie
Drehzahl des Triebrades	$N_T = v/d/\pi \cdot 60 = 750 \text{ Upm}$	
Art des Getriebes	Zahnriemen	Sinnvolle Überstzung pro Stufe bis max. 3
Anzahl Getriebestufen	2	Maximal mögliche Unterstzung 1:8
Höchste Eingangsdrehzahl an der ersten Stufe $\approx 6000 \text{ 1/min}$	$\approx 6000 \text{ Upm}$	Bedingt durch die verfügbare Standard-Lagertechnik
Übersetzungsverhältnis	$\ddot{u} = N_{\text{mot}} / N_T = 8$	Beide Stufen zusammen

4.3.2 Bestimmung des maximalen Drehmoments

Aus den Fahrzeug- und Streckendaten ergibt sich:

Höchstzulässige Fahrzeuggesamtmasse	2200 kg	Bemessungsgrundlage ohne Sicherheit
Maximale Steigung	55 %	Bemessungsgrundlage ohne Reserve
Maximale statische Zugkraft	$F = m_{\text{COASTER}} \cdot g \cdot \sin(\arctan(0.55))$ $F = 2200 \cdot 0.482 = 1060 \text{ N}$	Nur zum Halten des Fahrzeuges in der Steigung.
Mit dem Triebraddurchmesser	0.382m	Von vorher
Ergibt sich ein erforderliches Drehmoment am Triegrad von	1986 Nm	Maximal mögliche Unterstzung 1:9
Mit dem Übersetzungsverhältnis ergibt sich das erforderliche Motormoment	$M_{\text{Mot_stat}} = M_T / \ddot{u} = 248 \text{ Nm}$	rein statisches Moment, ohne Bewegung
Mit einer Sicherheit von 1.2	$M_{\text{Mot}} = 300 \text{ Nm}$	Beide Antriebe zusammen

*Dieses Drehmoment von **300Nm** muss im Notfall von einem Antriebsmotor allein aufgebracht werden können. Als Nennmoment ergibt sich die Hälfte, also **150Nm***

4.3.3 Optimierung der Rotorgeometrie (ASM und HSM)

Das Ziel der Auslegung besteht darin, das geforderte Drehmoment aus einem möglichst geringen Motorgewicht zu gewinnen.

Neben der Motortopologie hat die Form des Rotors einen wesentlichen Einfluss auf die Drehmomentdichte einer elektrischen Maschine.

Die Kraft, die an der Rotoroberfläche entwickelt wird, heißt Drehschub. Sie ist bei Sinusfeldmaschinen orts- und zeitabhängig und wird durch die ebenfalls orts und zeitabhängigen Größen Flussdichte und Oberflächenstromdichte bestimmt. Der Nutzenstrom wird sich dabei an der Oberfläche verteilt gedacht:

$$\sigma_{\text{Drehschub}}(\varphi, t) = B_{\text{Air}}(\varphi, t) \cdot J_{\text{Nut}}(\varphi, t) \cdot A_{\text{Nut}} / d_{\text{Teil}}$$

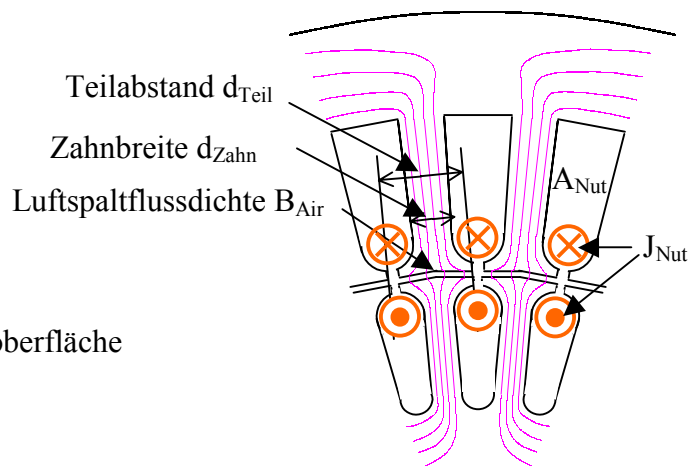
B_{Air} Luftspaltflussdichte

J_{Nut} Stromdichte

A_{Nut} effektiver Nutquerschnitt

d_{Teil} Teilabstand an der Luftspaltoberfläche

O_{Rotor} Rotoroberfläche



Integriert über die Oberfläche ergibt sich bei Sinusfeldmaschinen mit Nutflächen zwischen 100 und 150 mm² (baugrößenabhängig) ein charakteristischer Drehschub von 30kN /m².

Die Oberfläche des Luftspaltes (praktisch identisch mit der des Rotors) errechnet sich aus:

$$O_{\text{Rotor}} = d_{\text{Rotor}} \cdot \pi \cdot l_{\text{Fe}}$$

Das Drehmoment hingegen errechnet sich aus

$$M = \sigma_{\text{Drehschub}} \cdot O_{\text{Rotor}} \cdot r_{\text{Rotor}}$$

$$M = \sigma_{\text{Drehschub}} \cdot r_{\text{Rotor}}^2 \cdot l_{\text{Fe}} \cdot \pi / 2$$

$$\text{mit: } r_{\text{Rotor}}^2 \cdot l_{\text{Fe}} \cdot \pi = V_{\text{Rotor}}$$

folgt, dass das Drehmoment vom Volumen des Rotors und dem charakteristischen Drehschub abhängt:

$$M = \sigma_{\text{Drehschub}} \cdot V_{\text{Rotor}} / 2$$



Rotor mit Hohlwelle beim Auswuchten

Eine optimierte Rotorkonstruktion besteht daher aus möglichst wenig aktiver Masse, die über den Umfang verteilt ein möglichst großes Volumen einschließt. Der Raum im Innern des Rotors sollte dabei feldfrei, also elektrisch inaktiv bleiben. auf diese Weise kann mittels Bohrungen im Rotorblechpaket und einer Hohlwelle weitere Masse eingespart werden.

Der Rotor einer HSM hätte eine identische Innenraumgestaltung

4.3.4 Limiten des Rotordurchmessers (ASM und HSM)

Der Strategie, die Drehmomentdichte über den Rotordurchmesser zu steigern, sind aber auch Grenzen gesetzt. Die Festigkeit von Reinaluminium als Leitermaterial setzt dabei das Limit, weil die Zugspannung im Kurzschlussring eine Funktion der Umfangsgeschwindigkeit ist:

Die Fliehkraft die auf ein an ein differentielles Quaderchen des Ringelements wirkt, beträgt:

$$\Delta F_m = r_m \cdot A_R \cdot \rho_{Al} \cdot \Delta \varphi \cdot \omega^2 \cdot r_m$$

F_{qu} Fliehkraft eines ringquaderchens

A_{Ring} dem Ringquerschnitt

r_m mittlerer Durchmesser ($\approx r_{Rotor}$)

ρ_{Al} Dichte von Aluminium (2700 kg/m^3)

$r_m \cdot \Delta \varphi$ „Höhe“ des Ringquaderchens

Integriert über einen Halbkreis ergibt sich die Zugkraft, die an jeder Stelle des Ringes angreift und den Ring zu zerreißen sucht:

$$2 F_{Zug} = \int_0^\pi dF_{qu} \sin \varphi \, d\varphi$$

$$2 F_{Zug} = r_m^2 \cdot A_{Ring} \cdot \rho_{Al} \cdot \omega^2 \cdot \int_0^\pi \varphi \sin \varphi \, d\varphi$$

$$2 F_{Zug} = r_m^2 \cdot A_{Ring} \cdot \rho_{Al} \cdot \omega^2 \cdot 0 \left[(\sin \varphi - \varphi \cdot \cos \varphi) \right]$$

$$2 F_{Zug} = r_m^2 \cdot A_{Ring} \cdot \rho_{Al} \cdot \omega^2 \cdot \pi$$

$$F_{Zug} = r_m^2 \cdot A_R \cdot \rho_{Al} \cdot \omega^2 \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$\sigma_{Zug} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{Al} \cdot v_{umfang}^2$$

Mit $\omega \cdot r_m$ wird die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors zum Kriterium, denn besonders bei Ringen für hochpolige Maschinen kann man $r_m \approx r_{Rotor}$ setzen.

Für Rein-Aluminium, wie es für hocheffiziente Druckgussrotoren verwendet wird, sind 50 N/mm die höchstzulässige Zugspannung daraus ergibt sich die maximale Umfangsgeschwindigkeit mit

$$v_u = \sqrt{2 \sigma_{Zug} / \rho_{Al} / \pi}$$

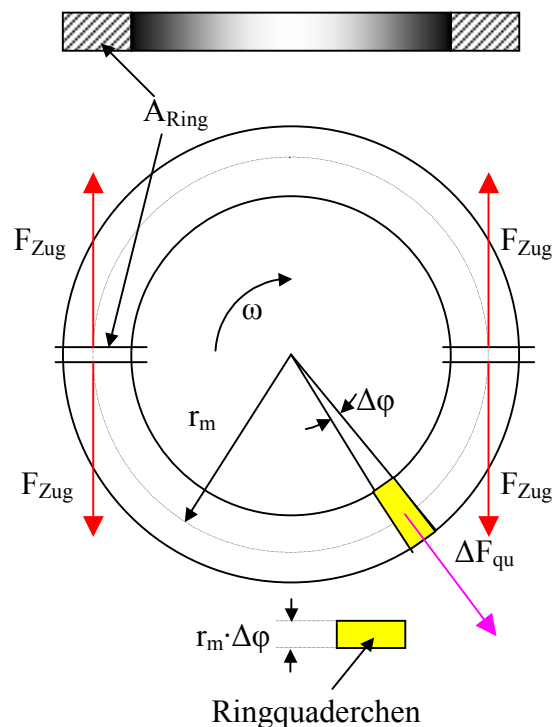
$$v_u = \sqrt{(2 \cdot 50 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{)]} / 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]} / \pi) = 108 \text{ [m/s]}$$

Im Hinblick auf einen ausreichenden Sicherheitsabstand zur Maximaldrehzahl sollten maximal 75% dieser Umfangsgeschwindigkeit oder etwa 80 m/s erreicht werden. Damit ergibt sich für den Rotordurchmesser ein Limit von:

$$r_{Rotor} < v_u \text{ max} / (N_{Mot \text{ max}} \cdot \pi / 30)$$

$$r_{Rotor} < 80 / 628 = 0.127 \text{ m}$$

Der Rotordurchmesser darf bei 6000 1/min maximal 254mm betragen. Gewählt wurde die nächstkleinere verfügbare Gussform des Herstellers mit 240mm Durchmesser.



4.3.5 Bestimmung der aktiven Eisenlänge des Motors (ASM)

In der Praxis setzt hier die Berechnung der elektrischen Maschine an. Als Überschlagswert kann aber wiederum mit dem zu erwartenden Oberflächenschub von 30 kN/m² gerechnet werden:

Mit dem Durchmesser von 240mm kann der erforderliche Drehschub für 300Nm berechnet werden:

$$M = r_{\text{Rotor}} \cdot F_{\text{Drehschub}}$$

$$F_{\text{Drehschub}} > 300\text{Nm} / 0.12 \text{ m} = 2500\text{N}.$$

Somit sollte die aktive Rotoroberfläche in etwa

$$A_{\text{Rot}} = F_{\text{Drehschub}} / \sigma_{\text{Drehschub}} = 2500\text{N} / 30000\text{N/m}^2 = 0.0833 \text{ m}^2$$

betragen. Dies führt auf eine aktive Länge von

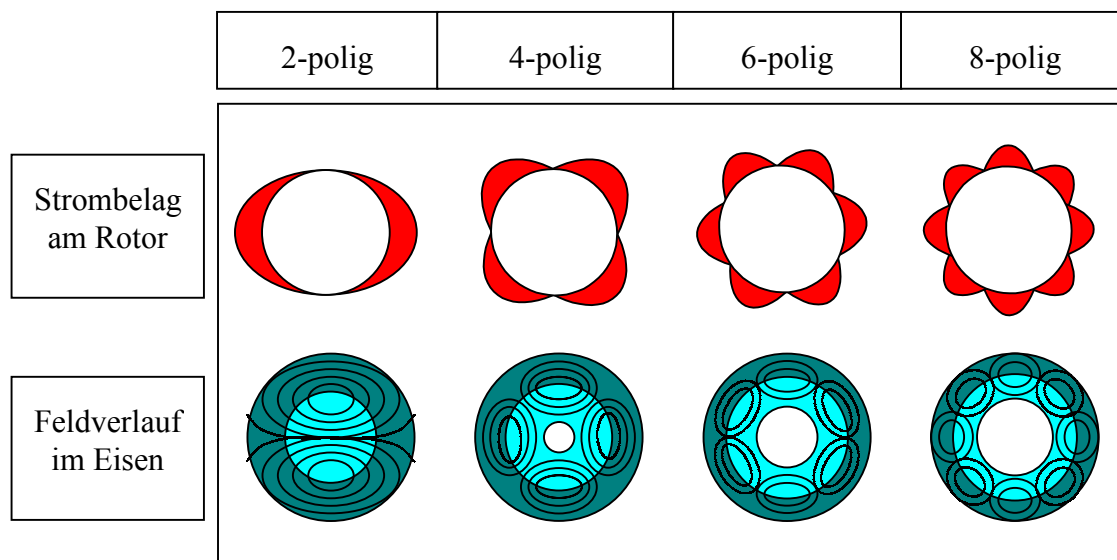
$$A_{\text{Rot}} = d_{\text{Rot}} \pi \cdot l_{\text{Act}}$$

$$l_{\text{Act}} > 0.0833\text{m}^2 / 0.24\text{m} / \pi = 0.110\text{m}$$

Eine Detailrechnung, die berücksichtigt, dass die 300Nm einen ausgesprochenen Kurzzeitbetrieb darstellen, ergibt eine aktive Länge von 100mm.

4.3.6 Bestimmung der Jochdicke und des Außendurchmessers (ASM und HSM)

Der Außendurchmesser einer Maschine mit gegebenem Rotordurchmesser wird größtenteils durch die Polzahl bestimmt. Je höherpolig, umso dünner kann das Joch ausgeführt werden:



Die Jochdicke bestimmt letztlich den Außendurchmesser. Allerdings sind der Polzahl bei den Maschinen mit Stromerregung Grenzen gesetzt, weil pro Polpaar der Fluss durch den Luftspalt getrieben werden muss. Das erfordert jedes mal Erregeraufwand und somit zusätzlich Strom durch die Statornut.

Die Jochdicke wird aber auch noch durch einen anderen Faktor bestimmt, nämlich der Luftspaltflussdichte. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Zahnbreite und Nutabstand, weil der gesamte Statorfluss eines Pols auch über das Joch fließen muss:

Aus der sinusförmigen Flussverteilung ergibt sich näherungsweise ein Zusammenhang zwischen Polpaarzahl, Rotordurchmesser und dem Verhältnis Nutabstand zu Zahnbreite:

$$\Psi_p = d_{\text{Joch}} \cdot B_{\text{Sat}} \cdot l_{\text{Fe}} \approx d_{\text{Rot}} / 2p \cdot B_{\text{Air}} \cdot l_{\text{Fe}} \cdot 1.05^{*})$$

Ψ_p Polspulenfluss

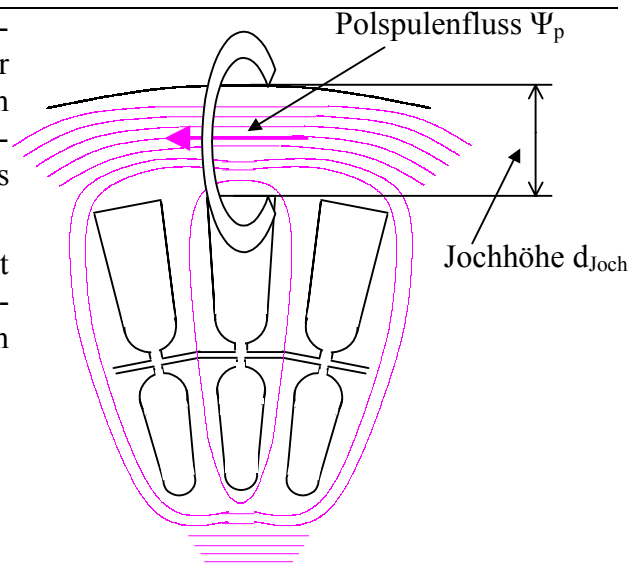
p Polpaarzahl

B_{Sat} Sättigungsflussdichte (1.65T)

*) Der Faktor 1.05 steht für die Berücksichtigung des Stator - Streufeldes

Da der Stator später auch als HSM-Motor verbaut werden soll, wurde die Luftspaltflussdichte B_{Air} auf die heute verfügbaren Magnetmaterialien abgestimmt. Diese bewirken im Luftspalt ein Feld von ca. 0.9 T, was bei einer Sättigungsinduktion von 1.65 T einem Verhältnis von Zahnbreite zu Teilung von etwa 0.55 entspricht.

Damit ergibt sich der Außendurchmesser in Abhängigkeit von der Polzahl für einen Motor mit 240mm Rotordurchmesser. (Die Fertigungsnorm für Rotoren mit 240mm Durchmesser beträgt 0.75mm)



Ausführung	Nuthöhe*)	Jochhöhe	Durchmesser	Luftspaltdicke
6-polig	21mm	24mm	330mm	0.5mm
8-polig	22mm	18mm	320mm	0.4mm
10-polig	22.5mm	14.5mm	314mm	0.32mm
12-polig	23mm	12mm	310mm	0.3mm

*) Die Nuthöhe nimmt mit der Polpaarzahl leicht zu, um Nutquerschnitt für den erhöhten Erregerbedarf zu gewinnen. Der Rotor hat dann ein gleichbleibendes Dauerdrehmoment.

Kleine Luftspalte unter der Fertigungsnorm sind bei großen Rotoren schon aus mechanischen Gründen sehr schwierig zu realisieren, weil sie sehr große Anforderungen an die Passungen zwischen Lagerschild und Statorzylinder auf der einen Seite und dem Lagersitz auf der anderen Seite stellen.

Der größte Sprung tritt bei dem Übergang von der 6-poligen zur 8-poligen Ausführung auf. Nach Rücksprache mit dem Fertigungsunternehmen der mechanischen Gehäuseteile wurde ein Luftspalt von 0.4mm als gerade noch beherrschbar eingestuft.

4.3.7 Luftspaltveränderungen der ASM im Betrieb

Die Wahl der Polzahl ist bis zu einem gewissen Grad eine Ermessensangelegenheit und eine Frage der zur Verfügung stehenden Fertigungstechnik. Auf jeden Fall müssen die im Betrieb auftretenden luftspaltverändernden Vorgänge berücksichtigt werden.

Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl	$\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	das entspricht bei 50K Temperaturdifferenz 0.06%
Angenommene Temperaturdifferenz zum Stator	100K	Bemessungsgrundlage ohne Reserve
Aufweitung des Rotordurchmessers erfolgt im Umfang, weil der Innenbereich Druckkräfte ausübt	$\Delta d_{\text{Rotor}} = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot d_{\text{Rotor}} / \pi$ $\Delta d_{\text{Rotor}} = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 240 / \pi$ $\Delta d_{\text{Rotor}} = 0.09 \text{ mm}$	Damit ergibt sich eine Verkleinerung des Luftspaltes um: 0.045mm
Mit dem Elastizitätsmodul von Stahl	$E_{\text{Fe}} = 200 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	
Und der bei Drehzahl auftretenden Zugspannung im Umfang des Rotorjoches. Das Gewicht des aktiven Teils wird hinzugerechnet:(analog Ring)	$\sigma_{\text{Zug}} = \pi/2 \cdot \rho_{\text{Ersatz}} \cdot v_{\text{umfang}}^2$ $\sigma_{\text{Zug}} = \pi/2 \cdot 1500 \cdot 75^2$ $\sigma_{\text{Zug}} = 68 \cdot 10^6$	Zugspannung im Rotorjoch
ergibt sich eine Umfangszunahme des Rotorjochs von	$\Delta u_{\text{Rotorjoch}} = (\sigma_{\text{Zug}} / E_{\text{Fe}}) \cdot u_{\text{Rotorjoch}}$ $\Delta d_{\text{Rotor}} = \Delta u_{\text{Rotorjoch}} / \pi$ $\Delta d_{\text{Rotor}} = 0.1224 \text{ mm}$	Damit ergibt sich Verkleinerung des Luftspaltes infolge Fliehkraft um: 0.062mm
Beide Effekte können sich positiv überlagern	Summe der Luftspaltverkleinerungen	0.107mm

Eine 8-polige Ausführung ist guter Kompromiss zwischen einem möglichst geringen Außendurchmesser und allzu hohen Fertigungsanforderungen und den damit verbundenen Herstellungskosten in der Serie. Die betriebsbedingte Rotoraufweitung bewirkt dynamisch eine Verkleinerung des Luftspaltes um bis zu 25%.

4.4 Variante mit Hybridsynchronmaschine

4.4.1 Spezifischer Drehschub

Verschiedene elektrische Maschinen kann man bezüglich ihres Betriebsverhaltens auch auf ihre spezifische Kraftentfaltung auf der Rotoroberfläche untersuchen. Diese Kenngröße gilt unabhängig von der Motorform und der Polpaarzahl.

$$\tau_{\sigma} = F/A_{\text{Rotor}} \text{ [N/m}^2\text{]}$$

- spezifischer Drehschub im Dauerbetrieb τ_{σ_therm}

Er wird definiert über die maximale zulässige Wicklungstemperatur bei Dauerbetrieb und worst-case Umgebungsbedingungen. Die Wicklungstemperatur liegt dabei unter der bauartbedingt spezifizierten Höchsttemperatur um jederzeit den spezifizierten Überlastfall ermöglichen zu können.

- spezifischer Drehschub im Kurzzeitbetrieb (adiabatischer Drehschub) τ_{σ_adb}

Sie definiert sich über das Produkt aus spezifiziertem Überlastmoment und dessen geforderte Einwirkdauer. Aus dem Dauerbetrieb wird nach diesem Überlastfall die spezifizierte Höchsttemperatur erreicht.

Dieser Fall ist meist auch das Auslegungskriterium für den Umrichter.

- magnetische Drehschubgrenze τ_{σ_mag}

ASM

Während die Asynchronmaschine bei den ersten beiden Kenndaten den permanent erregten Drehfeldmaschinen unterlegen ist, hat sie dafür (theoretisch) keine magnetische Drehschubgrenze. Zumindest solange der Eisenpfad nicht über das Streufeld gesättigt wird.

PSM

Permanenterregte Synchronmotore mit Oberflächenmagneten besitzen zwar eine magnetische Drehschubgrenze, bei der jede weitere Stromerhöhung weniger Drehmoment erzeugen würde, diese Grenze liegt aber etwa um den Faktor 2,5 über der Kurzzeitgrenze im Coaster. Sie wird nur bei hochdynamischen Servoantrieben ausgenützt.

HSM

Der Hybridsynchronmotor sollte so ausgelegt werden, dass die magnetische Drehschubgrenze im Bereich des Kurzzeitbetriebes zu liegen kommt.

spezifischer Drehschub (für 30kW)	Asynchronmotor	Hybridsynchronmotor
τ_{σ_therm} (Dauerbetrieb)	15kN/m ²	18kN/m ²
τ_{σ_adb} (Stoßbetrieb)	35kN/m ²	40kN/m ²
τ_{σ_mag} (magnetische Grenze)	keine definierte	>40kN/m ²

4.4.2 Betriebsverhalten des Hybridsynchronmotors

Teillastbetrieb bis 120Nm

Bis an die Sättigungsgrenze ähneln sich ASM und HSM im Strombedarf (grüne Kurve)

Vorteil HSM: keine Rotorverluste

Überlastbetrieb bis 300Nm

Auch hier ähneln die beiden Maschinen einander.

Feldschwächebereich

Hier zeigt sich der größte Vorteil der HSM: mit dem gegebenen Umrichterstrom ist theoretisch ein Konstantleistungsbetrieb bis zu sehr hohen Drehzahlen möglich. (gestrichelte Ellipsen).

Auch wenn die Grenzlastbetriebspunkte einen sehr hohen Erregerstrom erfordern, sind sie mit der HSM wenigstens möglich. Dies ist insbesondere im Rückspeisebetrieb bei großer Drehzahl entscheidend.

4.4.3 Auslegung

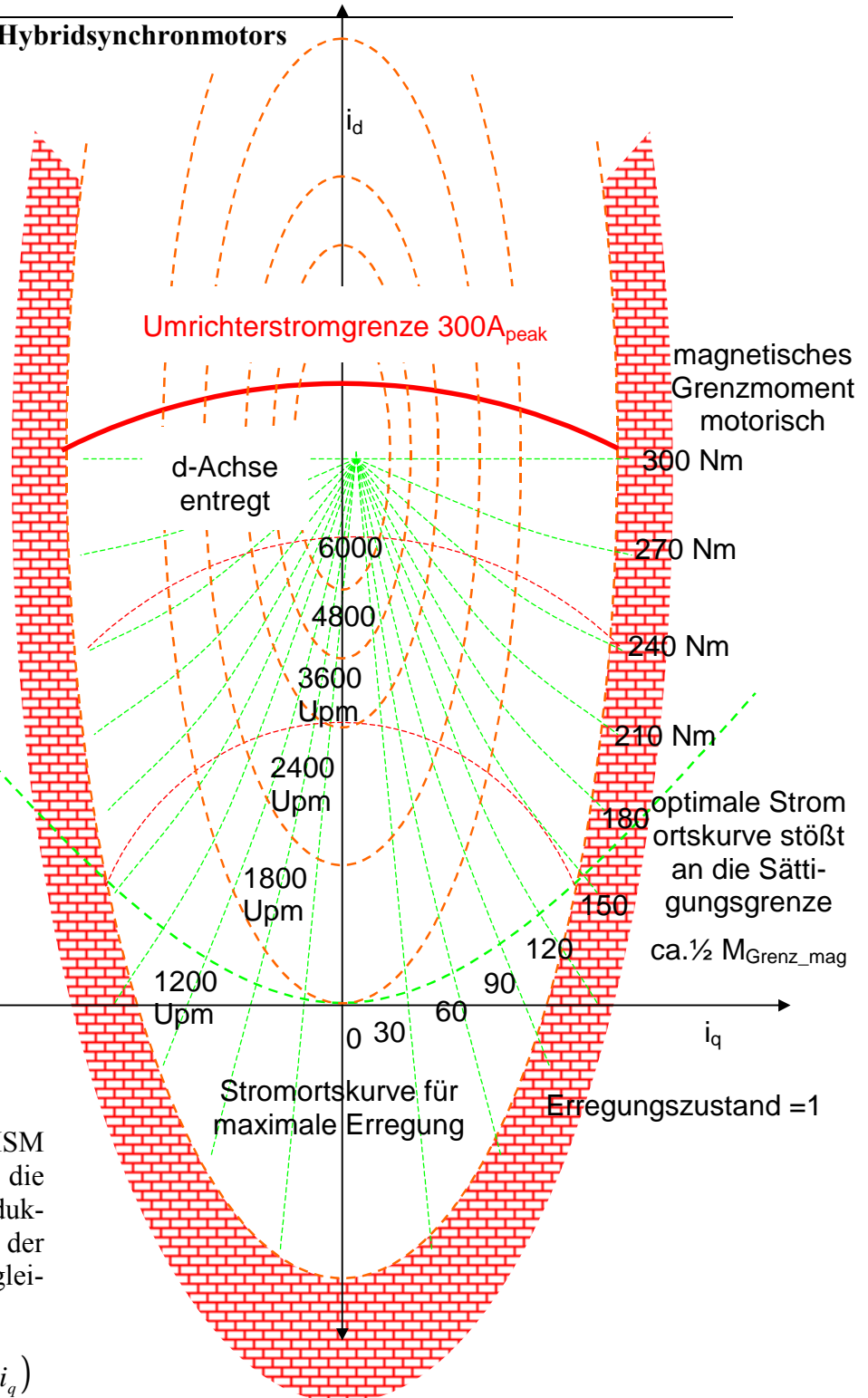
Die Rotorgeometrie der HSM muss so gewählt werden, dass die Magnetisierung Ψ_A und die Induktivitäten der Magnetachse und der Querachse der Drehmomentgleichung genügen

$$M = \frac{3p}{2} (\Psi_A \cdot i_q + (L_q - L_d) \cdot i_d \cdot i_q)$$

L_d ist klein wegen der Luftspaltwirkung der Magnete und entspricht dem Kehrwert der langen Halbachse. Ψ_A legt die Lage des Ellipsenmittelpunktes zur q-Achse fest.

L_q , 3x größer als L_d , entspricht etwa dem Kehrwert der kleinen Halbachse

Somit lassen sich die Parameter der HSM graphisch aus dem Diagramm herleiten.

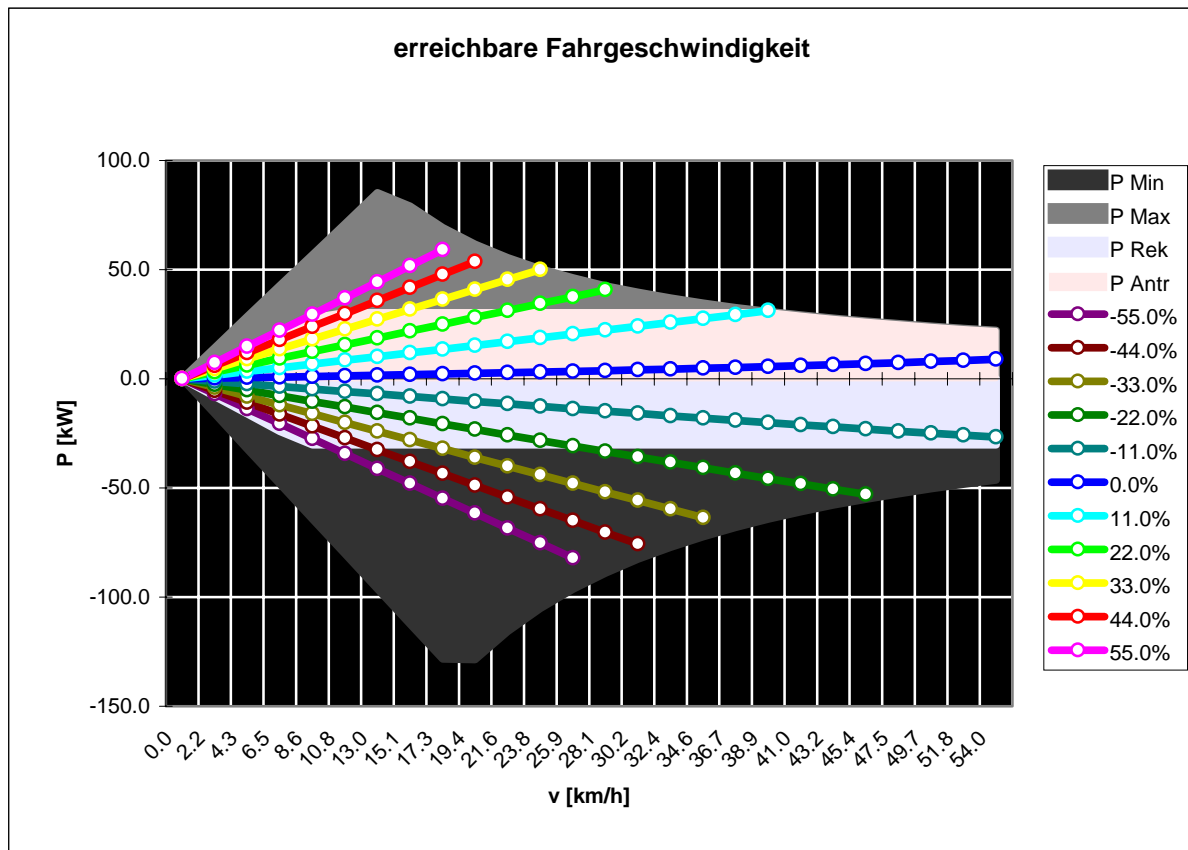


5 Erwartete Systemeigenschaften

5.1 Normalbetrieb

Mit der nun gebauten Asynchronmaschine können die Projektziele erreicht werden. Die mechanischen und elektrischen Eckdaten wurden mittlerweile bestätigt und sind geeignet, die Projektvorgaben zu erfüllen.

Für den DownhillCoaster-Antrieb ergibt sich somit folgendes Bild:



Die grauen Flächen markieren dabei die Bemessungsleistung, die auf Grund der Batterielimite aber nicht verwendet wird.

Die hellen Bereiche sind die von der Batterie bestimmten Leistungsgrenzwerte.

Im obersten Drehzahlbereich wirkt der Motor selbst Leistungsbegrenzend. Dies ist ein für den Asynchronmotor typischer Kompromiss, der hier vor allem wegen der geforderten Notlauf-eigenschaften und der begrenzten Umrichterressource eingegangen werden musste.

Insgesamt zeigt sich, dass die äußerst anspruchsvolle Antriebsaufgabe mit dem vorliegenden Motordesign bewerkstelligt werden kann, ohne dass die Stromrichter überdimensioniert werden müssten.

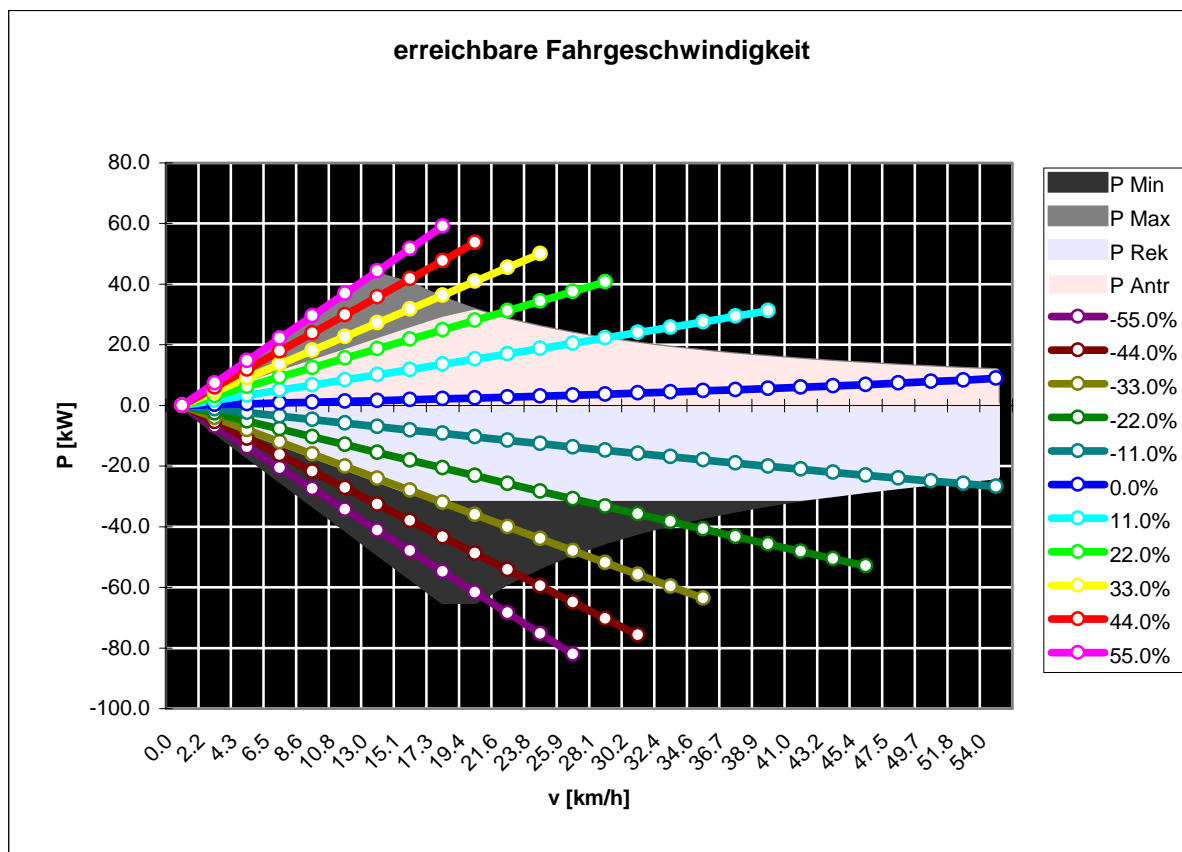
Kostendisziplin ist eine der Hauptforderungen für den gesamten Entwicklungsvorgang

5.2 Notlaufeigenschaften

Mit nur einem funktionsfähigen Antrieb kann das Fahrzeug zumindest in allen spezifizierten Streckenabschnitten bewegt werden.

Steht die Batterieleistung dem verbleibenden Antrieb zur Gänze zur Verfügung, wird ersichtlich dass nun der Motor selbst über weite Strecken die Leistungsaufnahme begrenzt.

Dies trifft insbesondere auf den Feldschwächebereich zu, bei dem aber immerhin noch die volle spezifizierte Fahrtgeschwindigkeit in der Eben erzielt werden dürfte.



6 Fahrversuche auf der Teststrecke

6.1 Aufbau des Projektträgers

Im 1. Quartal 2004 begann die Gesamtintegration in das Fahrzeug. Die wesentlichste Voraussetzung dafür war die Fertigstellung des Fahrwerkes.

Parallel dazu fanden einsatznahe Prüfstandversuche mit den Fahrzeugkomponenten statt:



Bild: Fahrwerk im Rohzustand



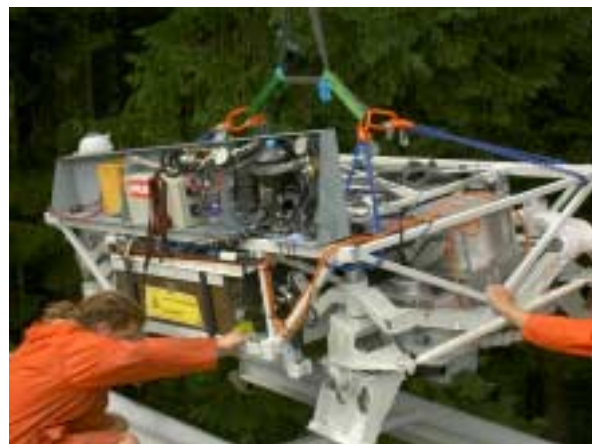
Bild: Getriebetest

Im 2. Quartal 2004 wurden die festgestellten Mängel an Fahrwerk und Getriebe zum Teil über Redesignschritte behoben.

Zu Beginn des 3. Quartals 2004, ein großer Teil der Strecke ist mittlerweile fertiggestellt, begannen erste Fahrversuche. Davor mussten auch einige logistische Probleme wie Transport und Aufgleisen gelöst werden.



Bild: Abtransport der Coaster-Plattform



Aufgleisen auf der Strecke

Die erste Fahrt fand auf der Strecke im August 2004 statt, die zu kleineren Korrekturen am Fahrwerk führten.



Bild: Feinjustage des Triebstockes



Bild: Kraftschluss mit dem Triebstock

Parallel dazu findet seit Anfang 2004 die Entwicklung der übergeordneten Fahralgorithmen statt, die Schritt für Schritt in den Testbetrieb eingebunden werden.



7 Validierung am Prüfstand

7.1 Ziele

7.1.1 Wirkungsgradoptimierung

Die durchgeführten Messungen sollen den Nachweis erbringen, dass sich die durchgeführten konstruktiven Maßnahmen auch tatsächlich positiv auf den Antriebswirkungsgrad auswirken.

- Ermittlung der Betriebswirkungsgrade bei unterschiedlichen Lastzuständen
- Quantifizierung der Zusatzverluste aus dem Umrichterbetrieb
- Ermittlung einer optimalen Feldstellkennlinie

7.1.2 Prozessoptimierung

Der Motor wurde zur Gewichtsoptimierung für den Coaster maßgeschneidert. Daher ist die Verifikation der Motorparameter und die Abweichung von den Zielwerten ein Qualitätskriterium für den Entwicklungs- und Fertigungsprozess

- Bestimmung der Motorparameter und Vergleich mit den errechneten Werten

7.1.3 Gewinnung von Erfahrung mit schnelllaufenden Hochdrehmomentmotoren

Für den Prüfstand wurden zwei den Coaster-Antriebsmotore über eine Drehmomentmesswelle verbunden. Die Prüfstandteile müssen sowohl die Betriebsdrehmomente bis 300 Nm aufnehmen können, als auch genügend Stabilität im Falle einer unerwarteten Blockierbremsung eines Rotors.

Beispielsweise bei Lagerschaden im Hochgeschwindigkeitsbereich können Verzögerungen auftreten, die bei einem Trägheitsmoment von $0,18 \text{ kgm}^2$ pro Rotor sehr große Bremsmomente erzeugen können. Wenn die gespeicherte Rotationsenergie bei 6000Upm plötzlich frei wird, entspricht das einem Auto mit 1200kg Masse, das mit 40km/h gegen eine Wand fährt.

Aus diesem Grund muss die Mechanik mit entsprechenden Sicherheiten ausgelegt werden.



Bild: Prüfstand

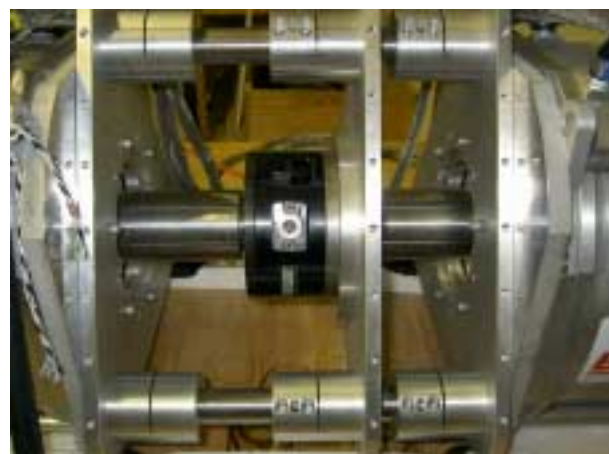


Bild: Drehmomentmesswelle

7.2 Überprüfung der Motorparameter

7.2.1 Ergebnisse aus der Motorberechnung

Parameter	Bez.	Rechnung	Messung	Einheit	Mögliche Ursache(n)
Nenn-Polspulenfluss	Ψ_0	0,22	0,228	Vs	Gute Stanzpräzision
Stator-Streuinduktivität	$L_{\sigma 1}$	180	160	μH	Sehr enge Wickelköpfe
Wicklungs-Widerstand	$R_{\text{Cu}1}$	25,9	25	$\text{m}\Omega$	
Rotor-Streuinduktivität	$L_{\sigma 2}$	160	150	μH	
Rotor (Ersatz)widerstand	$R_{\text{Alu}2}$	16,5	19	$\text{m}\Omega$	Guss-Legierung
Nenn-Erregerstrom	$I_{\mu 0}$	68	70	A_{peak}	Luftspaltunsicherheit

7.2.2 Aufnahme der Leerlaufkennlinie

In der Leerlaufkennlinie zeigt sich die Qualität des Magnetkreises. Ideal ist ein möglichst lang linear verlaufender Zusammenhang zwischen Magnetisierungsstrom und Klemmenspannung.

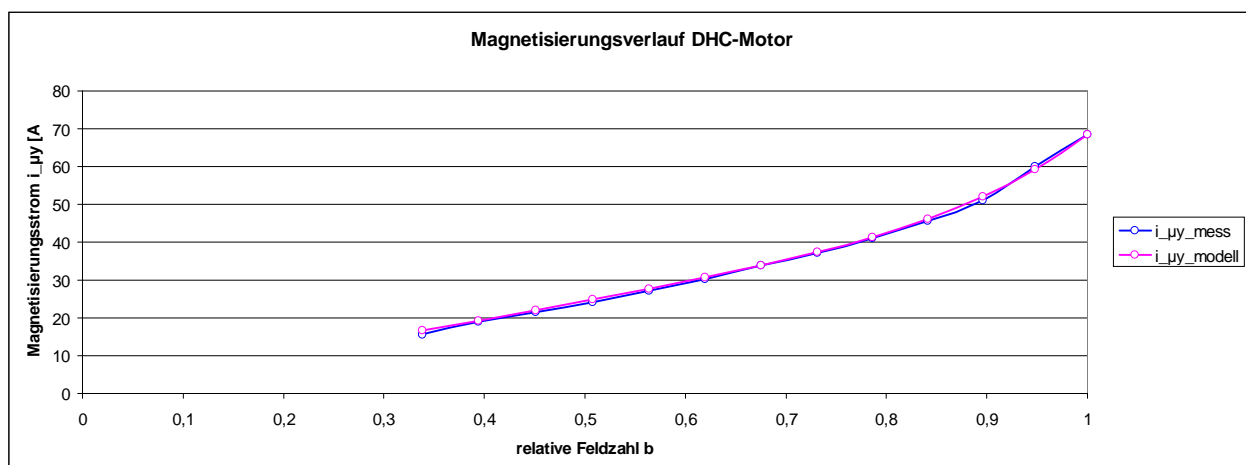
Die Leerlaufkennlinie wird positiv beeinflusst durch

- Absolut parallele Zahnhäse (meist Stanzwerkzeug erforderlich)
- Keine Löcher oder Nuten im Joch, wie das bei Standardschnitten der Fall ist
- Sorgfältige Stanzung ohne Stanzgrate

Die gemessene Leerlaufkennlinie wird dann durch ein Polynom höherer Ordnung angenähert, das dann später leichter implementiert werden kann.

$$i_{y\mu} = -I_{y0} \cdot \frac{(u \cdot b + v \cdot b^n)}{u + v}$$

Die Parameter u , v und n werden durch Übereinanderlegen der Modellkurve und der Messkurve ermittelt



7.3 Ziel der Wirkungsgradmessung

Der Coaster Antrieb muss einen extremen Drehzahlbereich mit einer großen Leistungsbandbreite abdecken und sollte dabei überall einen akzeptablen Wirkungsgradaufweisen.

Besondere Aufmerksamkeit verdienen natürlich jene Betriebszustände, bei denen voraussichtlich sehr viel Energie umgesetzt wird. Es sind dies

- Steile Bergfahrt (Hohes Drehmoment, kleine Drehzahl)
- Schnelle, ebene Fahrt (Hohe Drehzahl, kleines Drehmoment)

Beim Asynchronmotor hat man ja den Parameter der Erregung in gewissen Grenzen frei wählbar. Bei einem bestimmten Erregungszustand ergibt sich für den jeweiligen Betriebspunkt das Optimum. Sind diese Optima bekannt, kann daraus eine Betriebsstrategie entwickelt werden, die Feldstellkennlinie.

Mit der Feldstellkennlinie steht ein einfacher mathematischer Zusammenhang zur Verfügung, mit dessen Hilfe ein Asynchronantrieb auf eine bestimmte Anwendung optimiert werden kann.

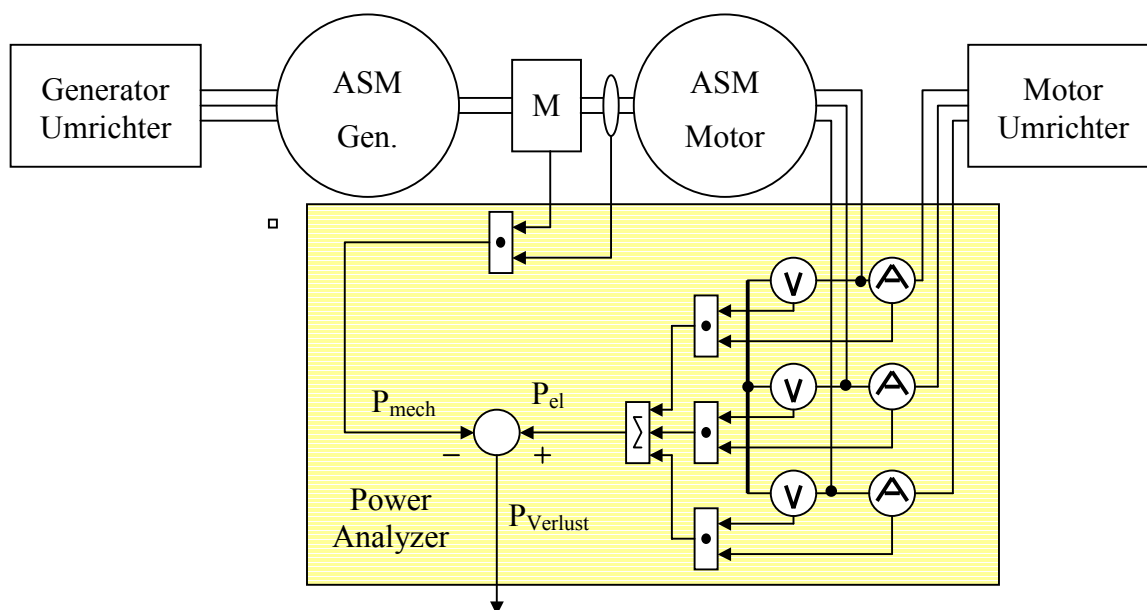
Systematische Wirkungsgradmessungen bilden die Grundlage für die Feldstellkennlinie

7.4 Messung der Betriebsdaten

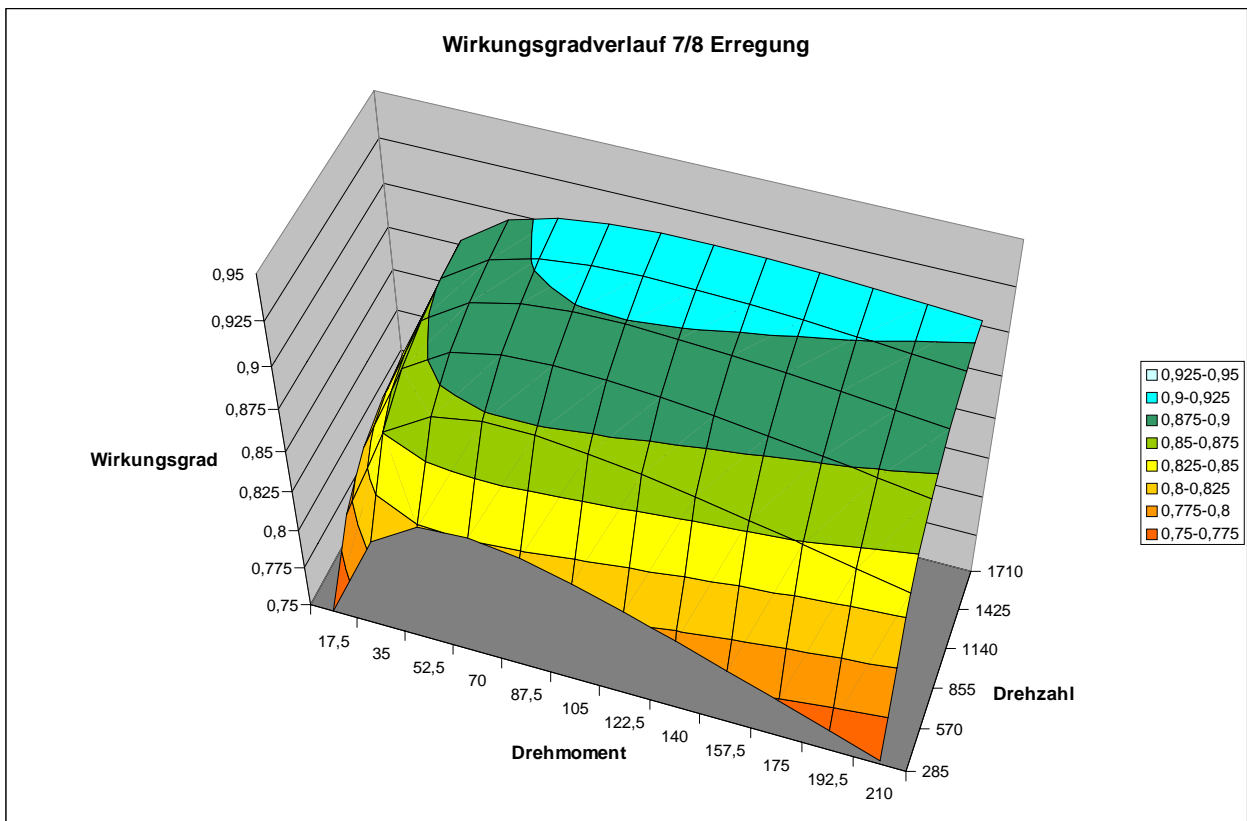
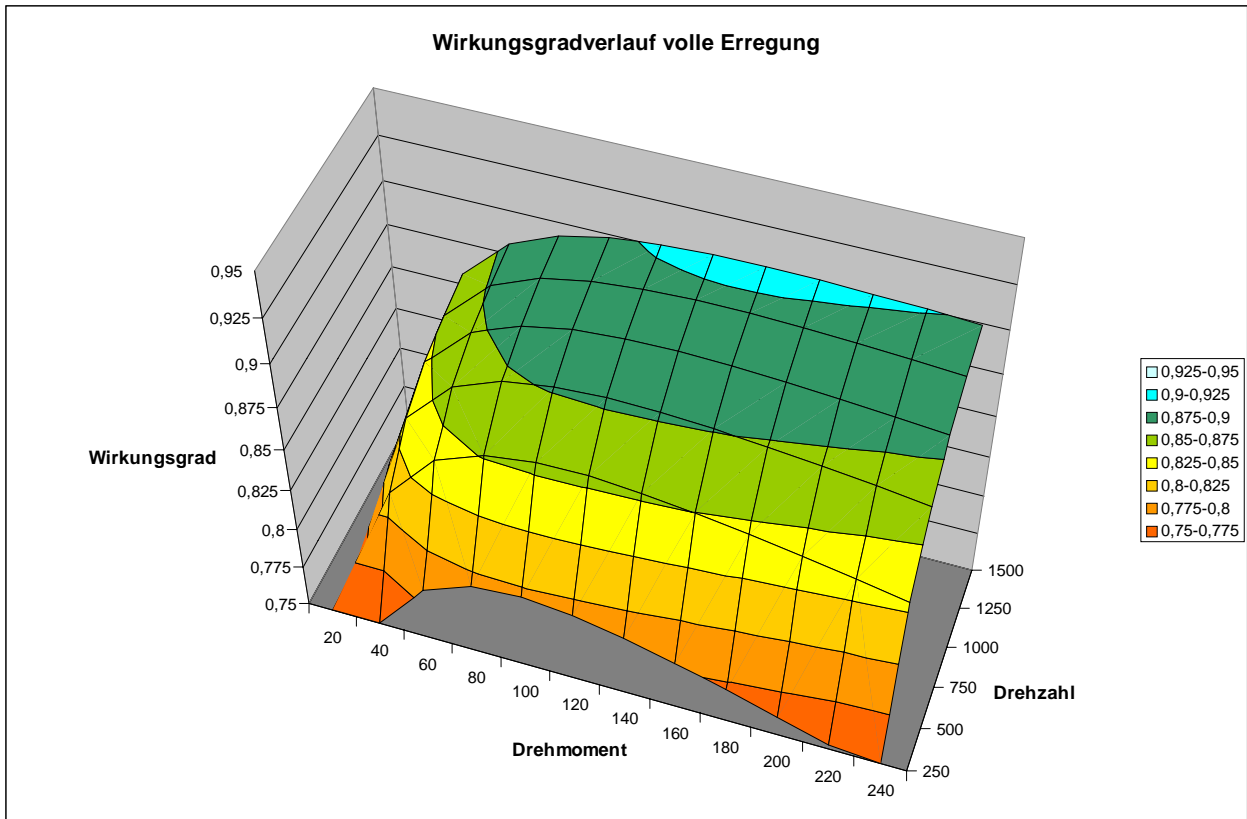
7.4.1 Prüfaufbau

Bei der Messung des Wirkungsgrades soll vor allem auch der Einfluss des Umrichterbetriebes, der die so genannten Zusatzverluste hervorruft, quantifiziert werden. Dazu ist eine breitbandige Leistungsmessung an der Motorklemme im Umrichterbetrieb erforderlich.

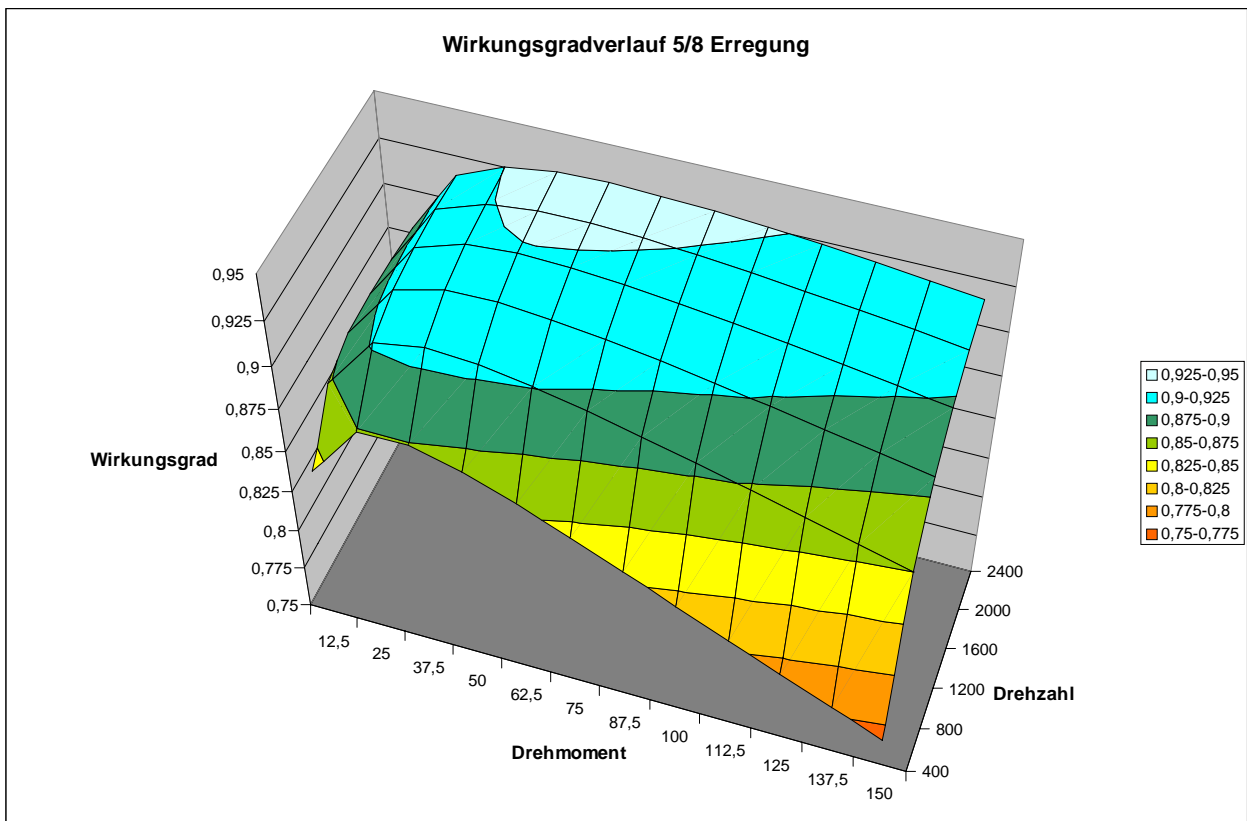
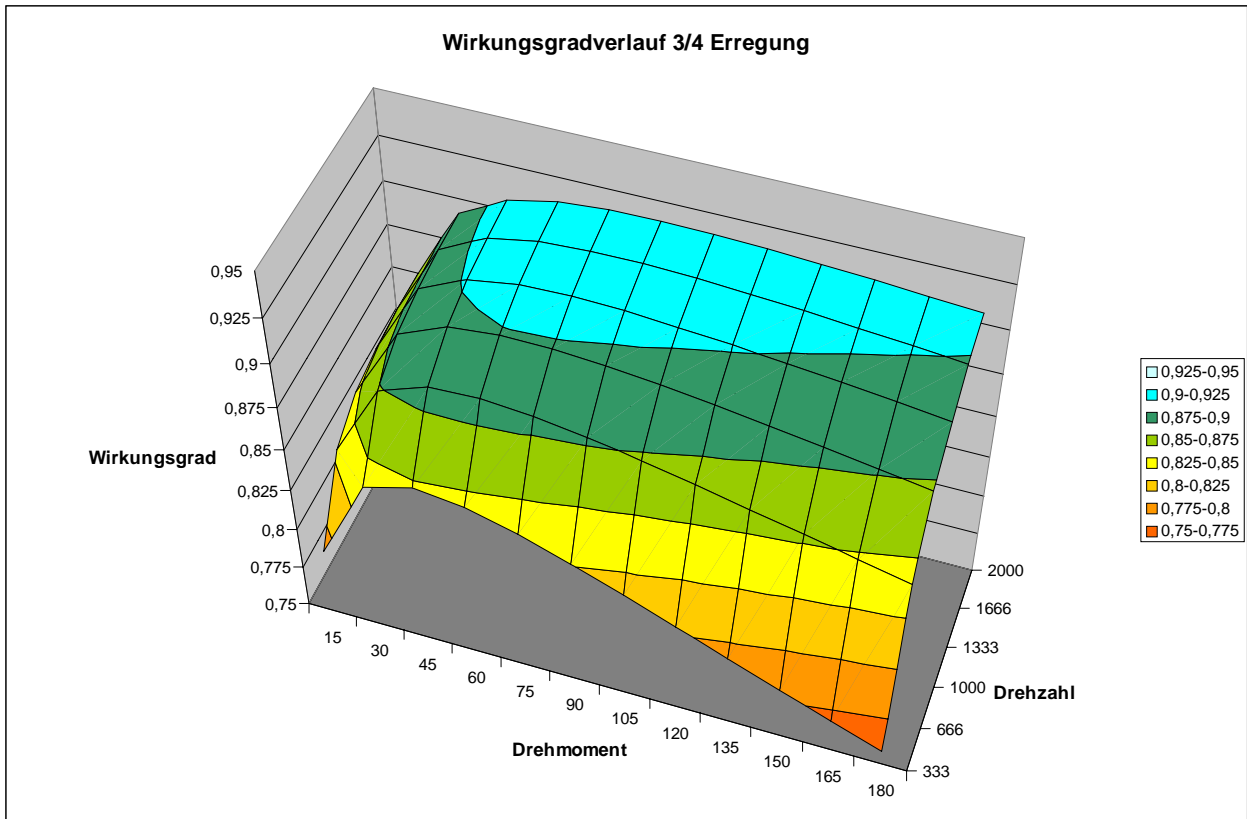
Zur Leistungsmessung wurde ein Gerät der Firma Norma Metrawatt mit 1 MHz Messbandbreite verwendet.



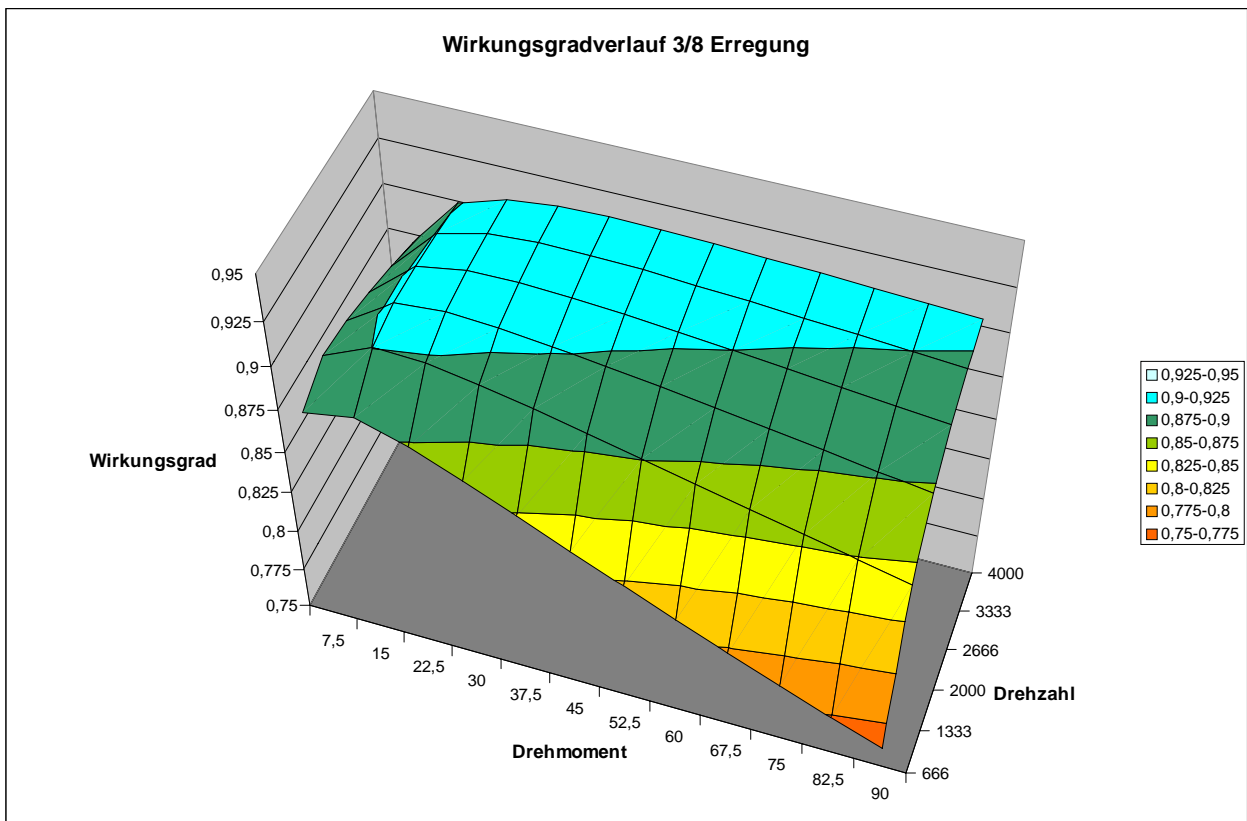
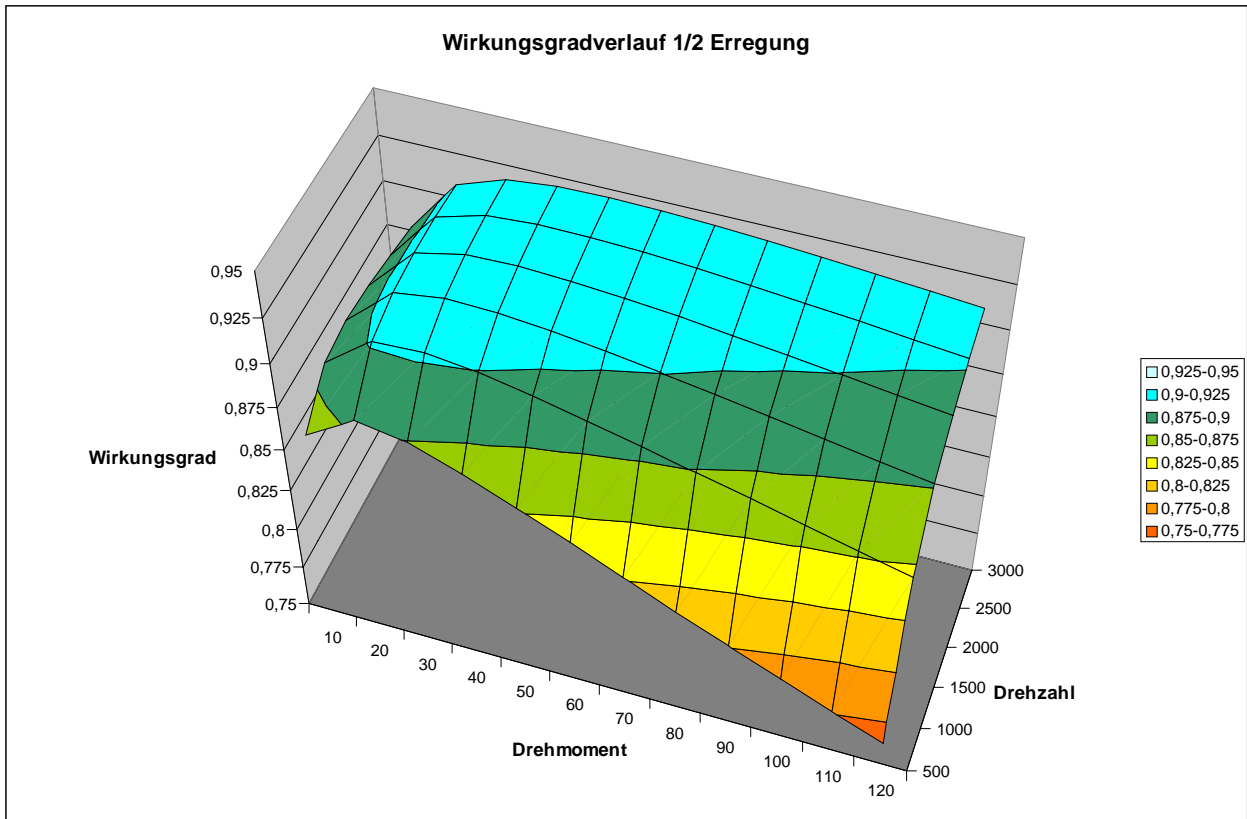
7.4.2 Wirkungsgrad bei sehr hohen und hohen Erregungszuständen



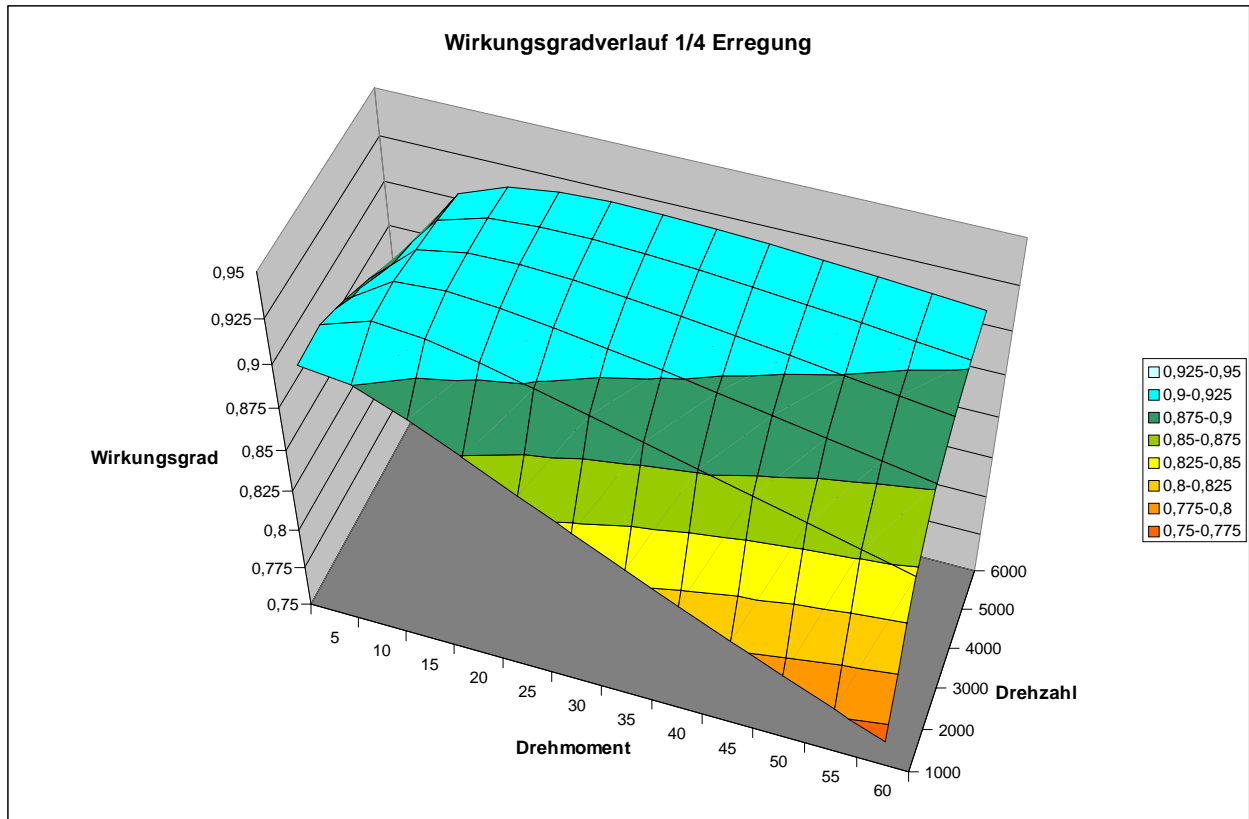
7.4.3 Wirkungsgrad bei leichter Feldschwächung



7.4.4 Wirkungsgrad bei starker Feldschwächung

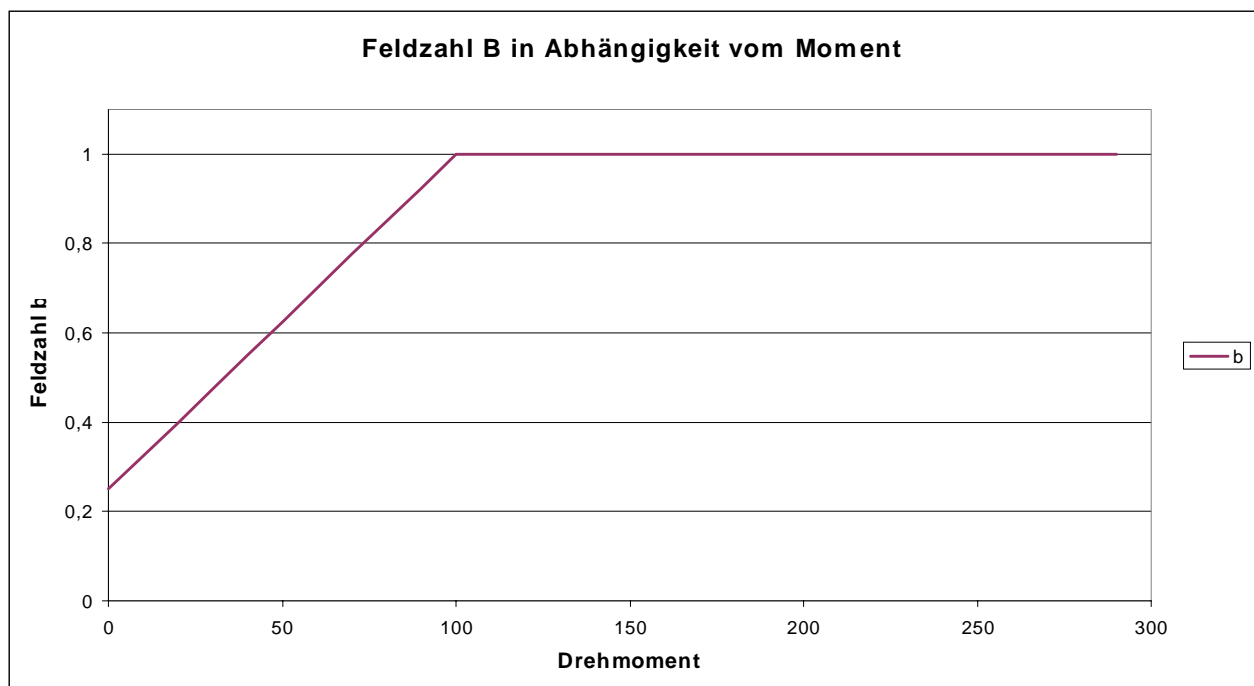


7.4.5 Betriebsverhalten bei sehr hohen Drehzahlen und extremer Feldschwächung



Die 60 Nm bei 6000Upm sind auch nur noch mit Batteriespannungen über 320V erreichbar.

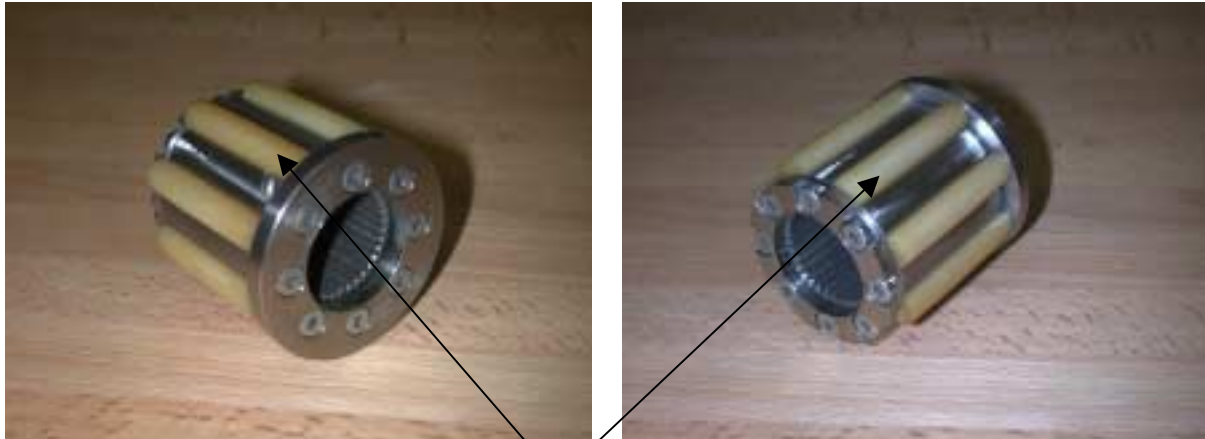
7.4.6 Feldstellkennlinie



7.5 Mechanische Untersuchungen:

7.5.1 Integrierte Kupplung:

Die im Motor integrierte Kupplung soll Fluchtungsfehler zwischen Getriebe und Motor ausgleichen. Als ausgleichendes Element sind Kunststoffbolzen vorgesehen, die in die vorgesehenen Ausnehmungen geschoben werden.



Bolzen zum Toleranzausgleich der Fluchtungsfehler

Da die Wahl des richtigen Werkstoffes nur bedingt auf Berechnungen gestützt werden kann wurden mehrere Versuche mit verschiedenen Materialien durchgeführt.

Eigenschaften	Teflon	Vulkollan
Temperaturbeständigkeit	-100 bis 260 Grad	-30 bis 80 Grad
Härte	55 Shore D	90 Shore A
Reissdehnung	350 %	660 %

Erkenntnisse am Prüfstand:



Nach einigen Betriebsstunden am Prüfstand stellte sich heraus, dass die Vulkollanstäbe nicht für den Einsatz geeignet sind. Gründe dafür sind:

- 1.) unzureichender Temperaturbereich
- 2.) Hydrolysenalterung (H₂O unverträglich)

Darauf folgende Versuche mit Teflonstäben (PTFE) waren hingegen erfolgreicher, sie sind jedoch nicht im gleichen Masse in der Lage Fluchtungsfehler auszugleichen wie Vulkollanstäbe.

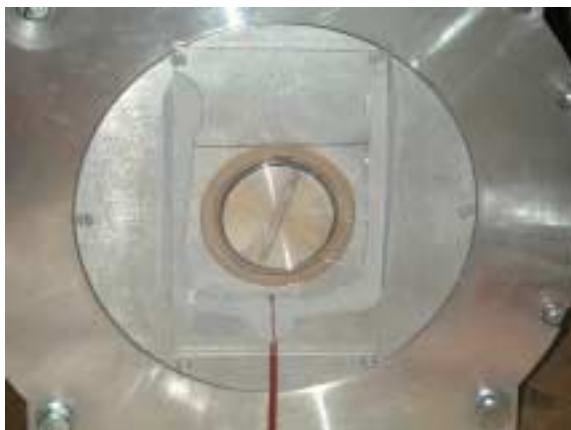
7.5.2 Dichtigkeitstest Simmerring und Hohlwelle:

Ziele:

Es soll der DHC Motor auf einen unerwünschten Wassereintritt ins Motorinnere getestet werden. Die heikelste Stelle dabei stellt der Simmerring dar, welcher die Dichtung zwischen der drehenden Hohlwelle und dem Motormantel gewährleisten muss.

Messaufbau:

Es wurde eine Plexiglasscheibe mittels Silicon auf die Geberabdeckplatte angebracht, dieses Behältnis dient zur Befüllung des destillierten Wassers.



a) Stillstand



b) Betrieb am 50Hz Netz

verwendeter Motor:

DHC-MOT-A01 Snr.: 4

eingesetzter Simmerring:

SIMRIT Type HTS II Art. Nr. 49016078 mit abgenommenem Ring

Einwirkzeit:

ca. 5min

Erkenntnisse:

Stillstand:

Ist statischen Zustand (Stillstand) wurde keine Absenkung des Wasserfüllstandes bemerkt, es tritt im Stillstand also kein Wasser ein.

Rotation:

Nach Beendigung der Rotationsbewegung (siehe Bild b) war ein leichter Rückgang des Wasserfüllstandes erkennbar. Der Wasserstand senkte sich um ca. 2mm. Beim aufgebauten Versuch entspricht dies ca. $.0,72 \text{ cm}^3$ (4mm x 90mm x 2 mm)

Genauere Analysen zeigten einen Wassereintritt sowohl in den „Innenraum Geber“ als auch in den Innenraum der Hohlwelle. Die Undichtheit ist im wesentlichen auf Fertigungsmängel zurückzuführen:

- Die Hohlwelle weist genau bei der Auflagefläche der Simmerringlippe ein kleines Loch auf durch welches das Wasser in den Geberbereich eingedrungen ist.
- Die Anpressfläche des Wellendeckel O-Ringes ist zu wenig glatt



Wasseransammlung im
Geberscheibenraum

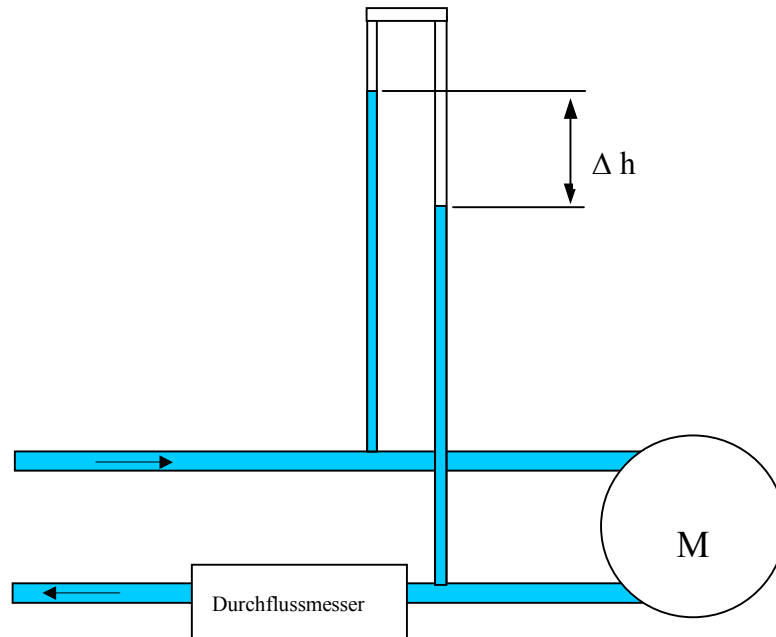
Massnahmen - Rückschlüsse:

Obwohl beim Motor nicht die Schutzart IP67 (staubdicht, zeitweiliges Untertauchen in Wasser) gefordert ist, wurden die Testbedingungen durch Anbringung des gezeigten Wasserbehältnisses dementsprechend festgelegt.

Durch Behebung der geringfügigen Fertigungsmängel würde der DHC Motor nicht nur die spezifizierte Schutzart IP54 (staubdicht, geschützt gegen Spritzwasser) sondern sogar IP67 erreichen.

7.5.3 Druckabfall Motor:

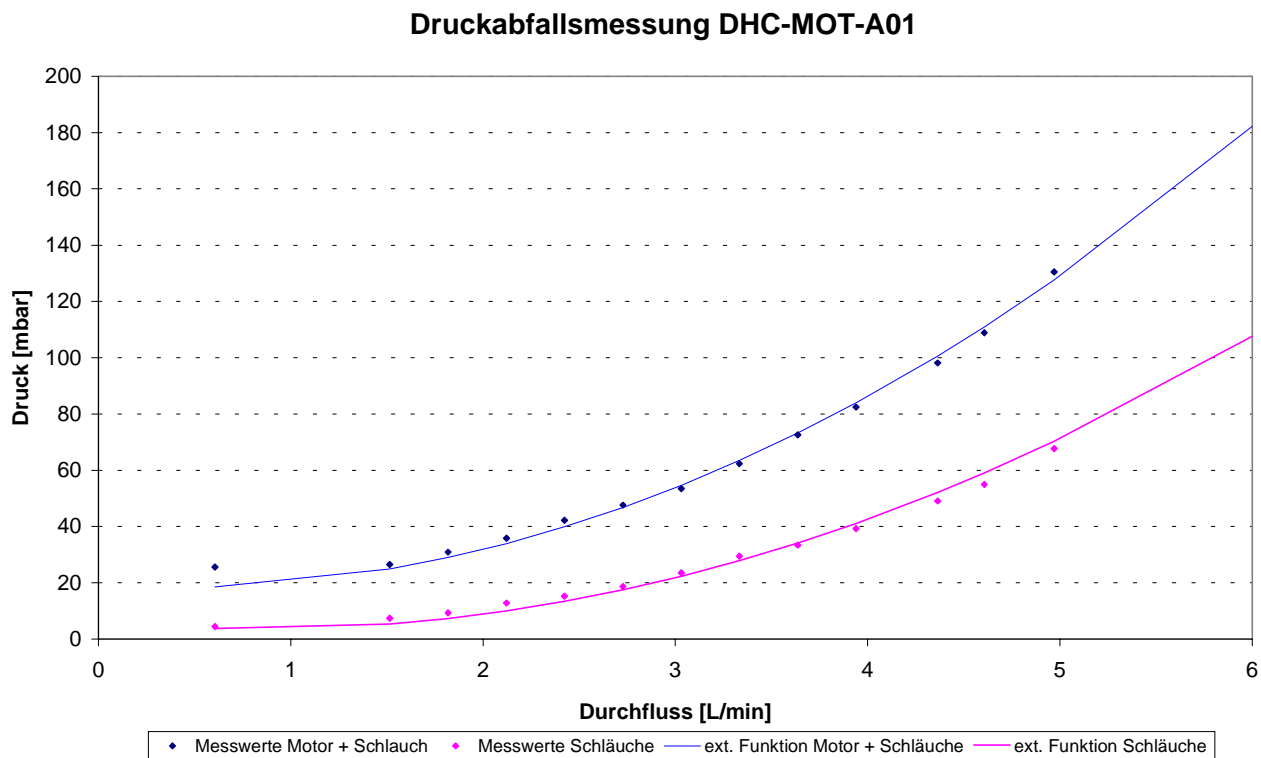
Messaufbau:



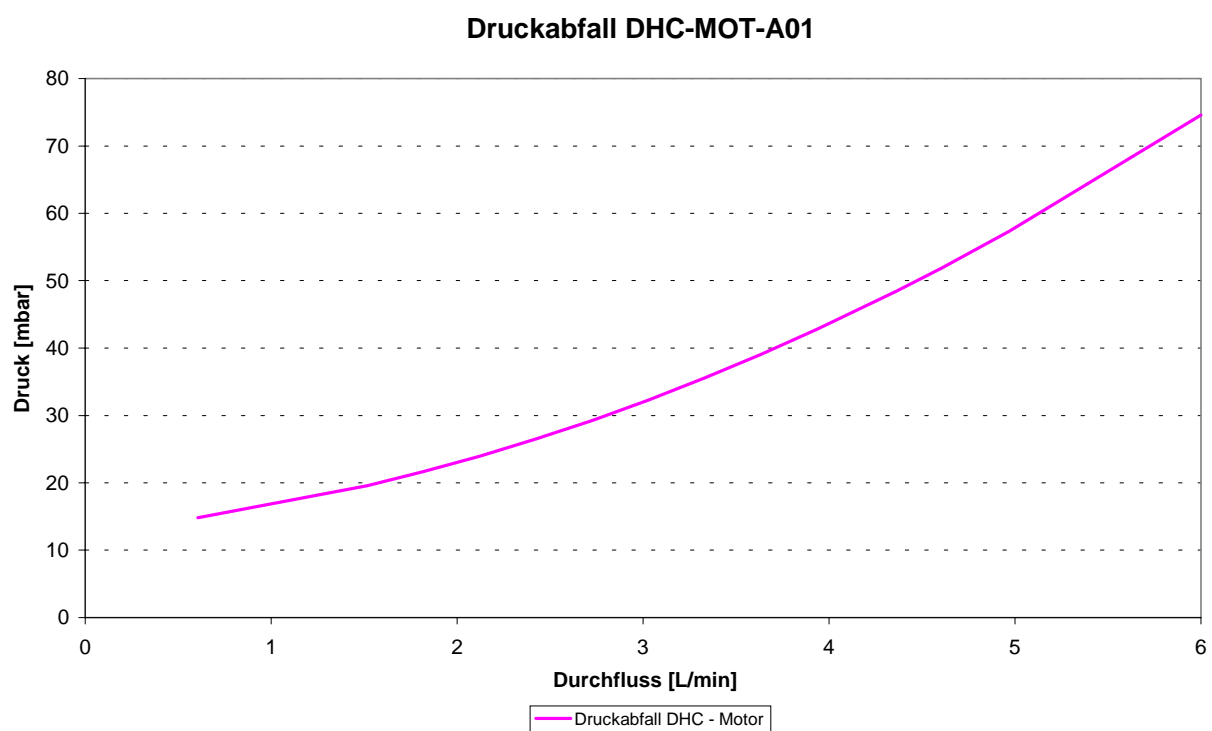
Um eine aussagekräftige Messung durchführen zu können die die Verluste in Schlauchzuleitung und Kupplungen mitberücksichtigt wird ein differenzielles Messverfahren angewandt:

1. Messung des Druckabfalles des Gesamtsystems Motor + Zuleitungen
2. Messung der Kühlwasserleitungen ohne Motor
3. durch Subtraktion der Messreihe 1 – Messreihe 2 wird der reale Druckabfall des Motors bestimmt

Messung Motor inkl. Schlauchleitungen:



Resultierender Druckabfall DHC-MOT-A01:



8 Ausblick

8.1 Zwischenstand

Das gesetzte Ziel, für den Coaster einen Antrieb zu entwickeln, der die gestellten Anforderungen erfüllt, wurde erreicht.

Die nun folgenden Dauererprobungen bei unterschiedlichsten Witterungsverhältnissen müssen nun zeigen, ob die Komponenten auch die hohen Zuverlässigkeitswerte erreichen, die für ein kommerzielles Produkt erforderlich sind. Immerhin zeugen erste Extrembelastungstests von der Robustheit der Antriebstechnik

8.2 Weitere Schritte

Die Testanlage dient nun in der Folge zum schrittweisen Implementieren der Fahrzeugsteuerung, der eigentlichen Intelligenz des Coasters.

Diese nun anstehende innere Reifung wird sich weniger offensichtlich abspielen, birgt aber mindestens genau so hohe Entwicklungsrisiken wie die vorangegangene „Hardware“-Phase.

Auch diese zweite Phase muss weitgehend abgeschlossen sein, bevor von einer Marktreife gesprochen werden kann.

8.3 Wirtschaftliches Umfeld

In der verbleibenden Entwicklungszeit besteht das größte Risiko jedoch darin, ob die für die erforderlichen Arbeiten die finanziellen Mittel in ausreichender Höhe und zu tragbaren Konditionen zur Verfügung stehen werden.

Wenn allerdings die Marktreife erreicht wird, sind wir schon jetzt sicher, dass sich der Coaster sehr rasch zu einer wirtschaftlich selbst tragenden Unternehmung entwickelt. So bestehen für fertig entwickelte Coaster-Anlagen bereits sehr konkreten Anwendungen. Mit einigen Interessenten wurde bereits über Vorprojektierungen verhandelt.

9 Schlusswort

Unser Dank gilt in besonderem Maße dem Bundesamt für Energie, das auch in einem wirtschaftlich schwierigerem Umfeld seiner Aufgabe als Förderer ressourcenschonender Technologien gerecht wird.

Wir sind sicher, dass sich diese Förderung dereinst als gute Investition erweisen wird, von der letztendlich die Volkswirtschaft profitieren wird.