

ELEKTRISCHE RADNABENANTRIEBE IN AXIALFLUSSBAUWEISE FÜR ANWENDUNGEN DER MIKROMOBILITÄT

Vanessa Linda Claus
M. Sc. Automotive Systems
31.03.2023



Radnabenantriebe

E-Motoren als Radnabenantriebe

[1]

Ein Ziel der Mikromobilität ist die Bereitstellung bedarfsoptimierter, bedarfsgerechter und ressourceneffizienter Fahrplattformen.



E-Motoren als Radnabenantriebe

- [1]
[77]
- durch Einsatz von elektrischen Maschinen ergeben sich neue Antriebskonzepte
 - statt einem Zentralsmotor nun verteilte Antriebe
 - neue Bauraumauslegung: Potenzial für größere Fahrgastzellen und minimale Fahrzeuglängen
 - von Antrieb losgelöste Konstruktion des Fahrzeuges
 - universelle Lösung für Vielzahl denkbarer Applikationen: 1 Motor für mehrere Fahrzeuge



© Citytransformer Ltd. <https://www.citytransformer.com/>

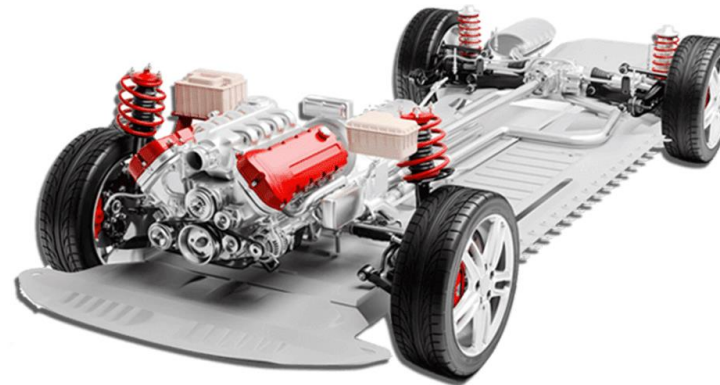


© REE Automotive Ltd. <https://ree.auto/>

E-Motoren als Radnabenantriebe

[77] • Bestandteile eines Antriebsstranges:

- Motor
- Reibkupplung
- Schaltgetriebe
- Übertragungswelle
- Differential
- Übertragungswelle
- Rad
- Abgasanlage

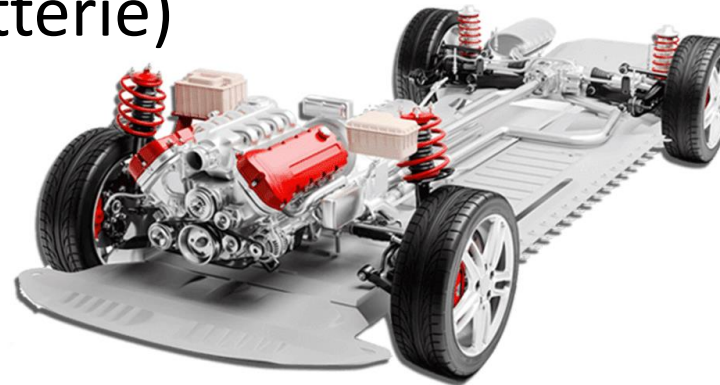


© REE Automotive Ltd. <https://ree.auto/>

E-Motoren als Radnabenantriebe

[77] • Bestandteile eines Antriebsstranges:

- Motor
 - ~~Reibkupplung~~
 - ~~Schaltgetriebe~~
 - Übertragungswelle
 - Differential
 - Übertragungswelle
 - Rad
 - (+feste Getriebestufe)
 - ~~Abgasanlage~~
- (Batterie)

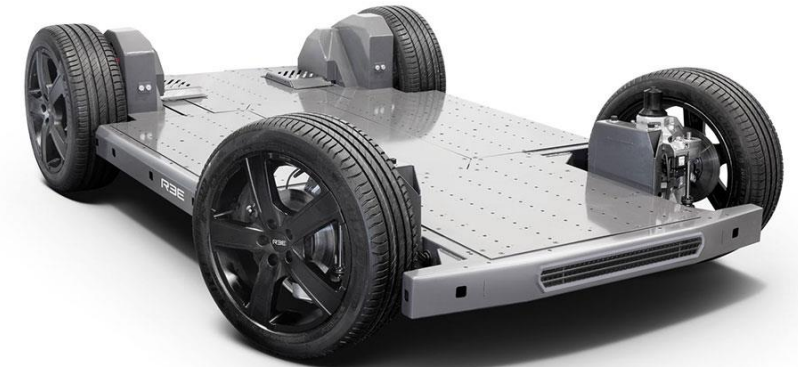
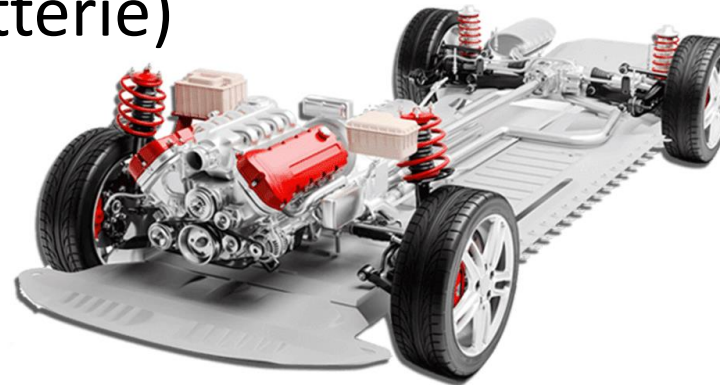


© REE Automotive Ltd. <https://ree.auto/>

E-Motoren als Radnabenantriebe

[77] • Bestandteile eines Antriebsstranges:

- Motor
 - ~~Reibkupplung~~
 - ~~Schaltgetriebe~~
 - ~~Übertragungswelle~~
 - ~~Differential~~
 - ~~Übertragungswelle~~
 - Rad
 - (+feste Getriebestufe)
 - ~~Abgasanlage~~
- (Batterie)



© REE Automotive Ltd. <https://ree.auto/>

E-Motoren als Radnabenantriebe

- [1] • Vereinfachung Systemtopologie
- [77] • kein mechanischer Antriebstrang,
 - Wegfall von Antriebswellen, Schaltgetriebe, Verteilergetriebe
 - Reduzierung Konstruktionsaufwand, rot. Massen, Gewicht
- verteiltes Gewicht = optimaler Schwerpunkt
- verteilte Verluste = einfachere Wärmeabfuhr
- genauere Positionierbarkeit:
 - höhere Steifigkeiten, geringere Drehträgheiten
 - Getriebestufe kann durch E-Motor gänzlich entfallen
- erhöhte Wendigkeit da jedes Rad lenkbar durch Wegfall von Antriebswellen



© Citytransformer Ltd. <https://www.citytransformer.com/>



© REE Automotive Ltd. <https://ree.auto/>

E-Motoren als Radnabenantriebe

- [1]
[77]
- Vorteile in Fahrdynamik & neue Freiheiten im Design von Fahrassistenzsystemen:
 - bei vier Radnabenantrieben: Allrad
 - elektronisches Differential
 - elektronisch gesteuerte Drehmomentenverteilung
 - Bremsvorgang durch separate Ansteuerung von Bremsen und Motoren
 - Bremsunterstützung durch Rekuperation
 - ...



© Citytransformer Ltd. <https://www.citytransformer.com/>



© REE Automotive Ltd. <https://ree.auto/>

Axialflussmaschine

Radial- vs. Axialflussmaschine

- Radialflussmaschine:
Magnetische Fluss tritt in **radialer** Richtung durch Luftspalt
- Axialflussmaschine:
Magnetische Fluss tritt in **axialer** Richtung durch Luftspalt
- Folge: Gänzlich andere Flussführung und Geometrie
- zwei Platten vs. zwei Zylinder

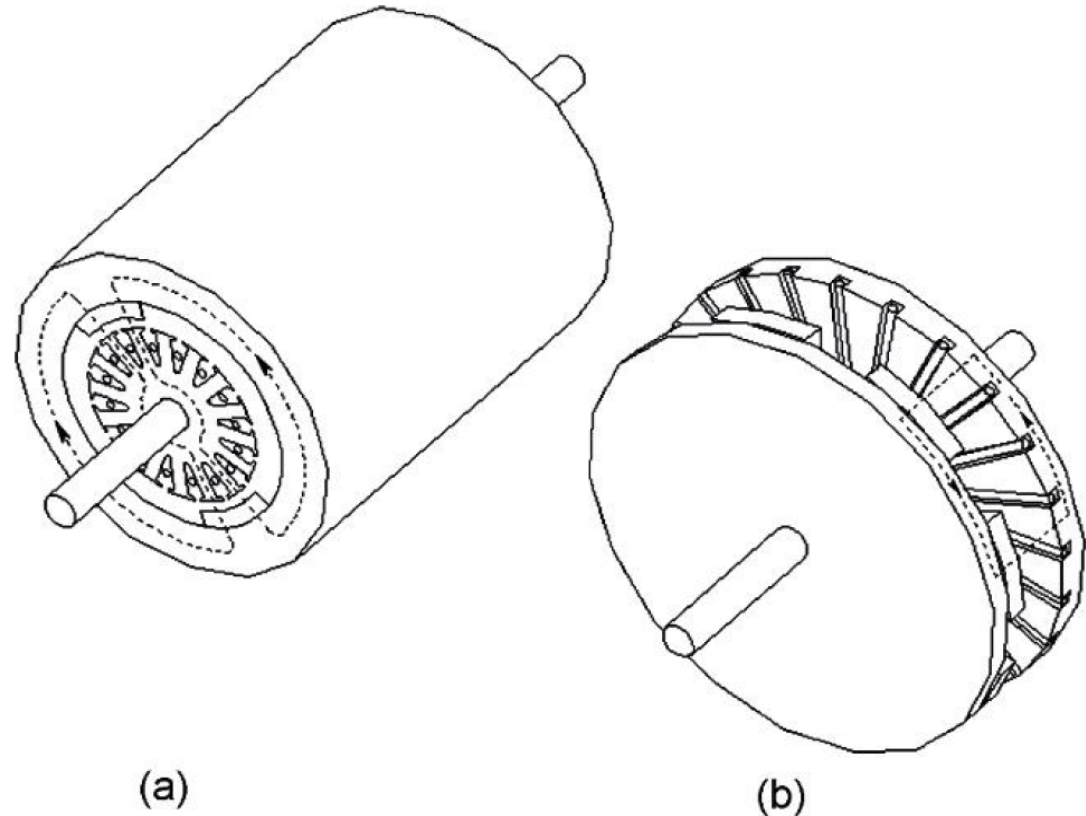
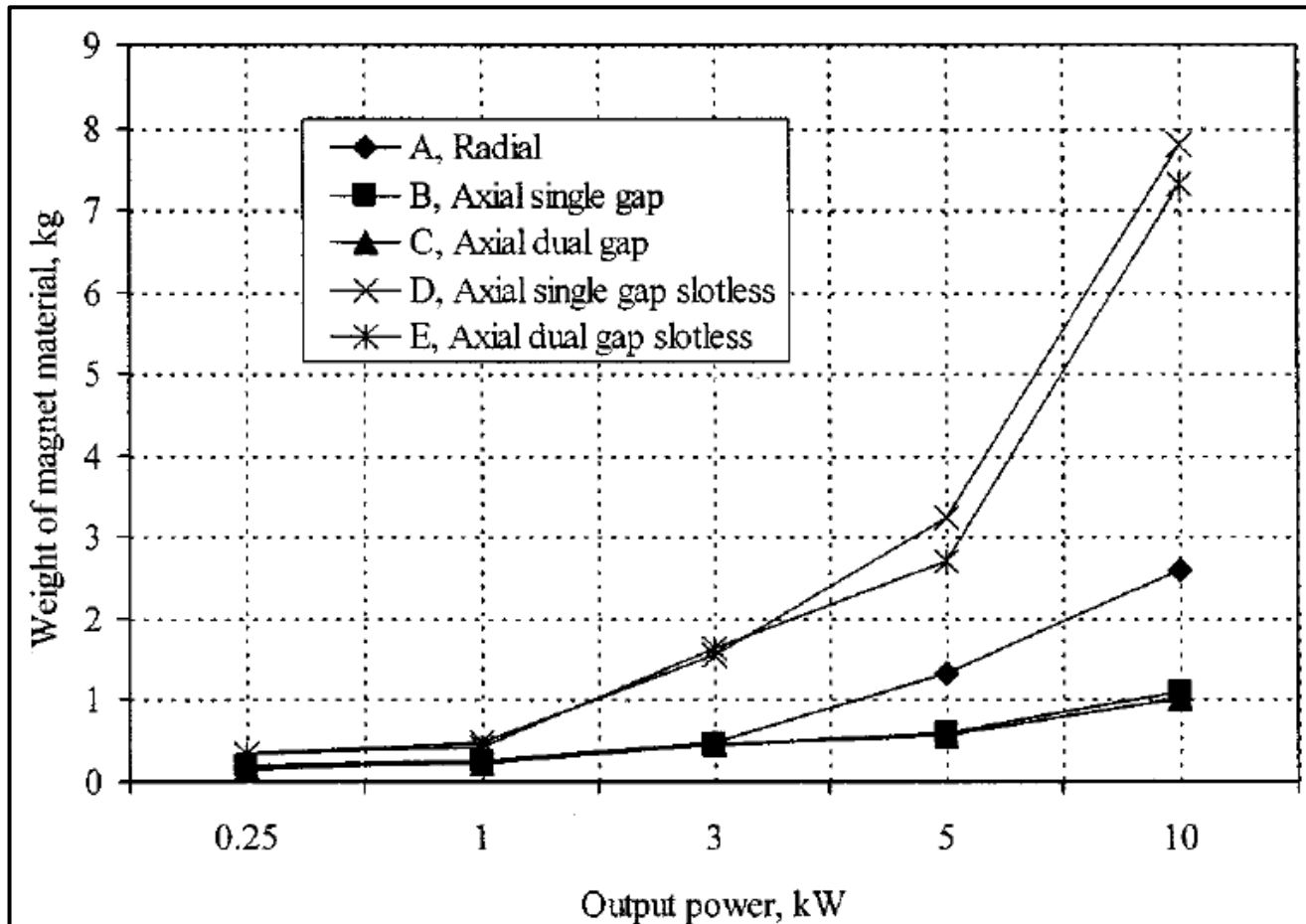


Fig. 1.11. Topologies of (a) RFPM machine (b) AFPM machine.
„Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines“ Jacek F. Gieras et al., 2008

Axialflussmaschine im Vergleich



Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines, Kartik Sitapati and R. Krishnan, 2001

Bessere Magnetmaterialausnutzung

Fig. 5. Magnet weight versus output power.

Weniger Drehträgheit

Fig. 2. Moment of inertia versus output power.

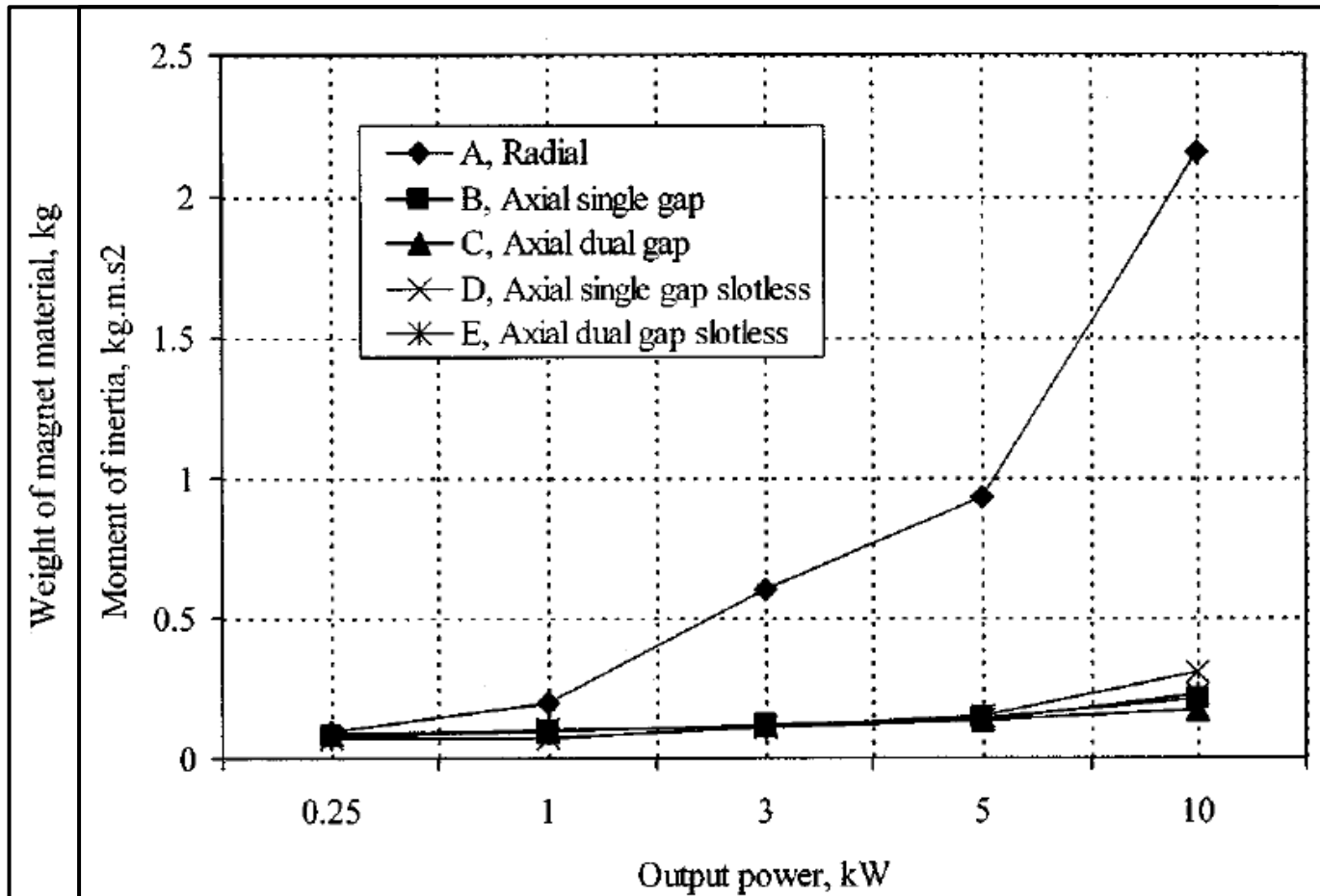
Fig. 9. Torque/moment of inertia versus output power.

Höhere Leistungsdichte

Fig. 1. Active volume versus output power.

Fig. 11. Power/active volume versus output power.

Axialflussmaschine im Vergleich



Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines, Kartik Sitapati and R. Krishnan, 2001

Bessere Magnetmaterialausnutzung

Fig. 5. Magnet weight versus output power.

Weniger Drehträgheit

Fig. 2. Moment of inertia versus output power.

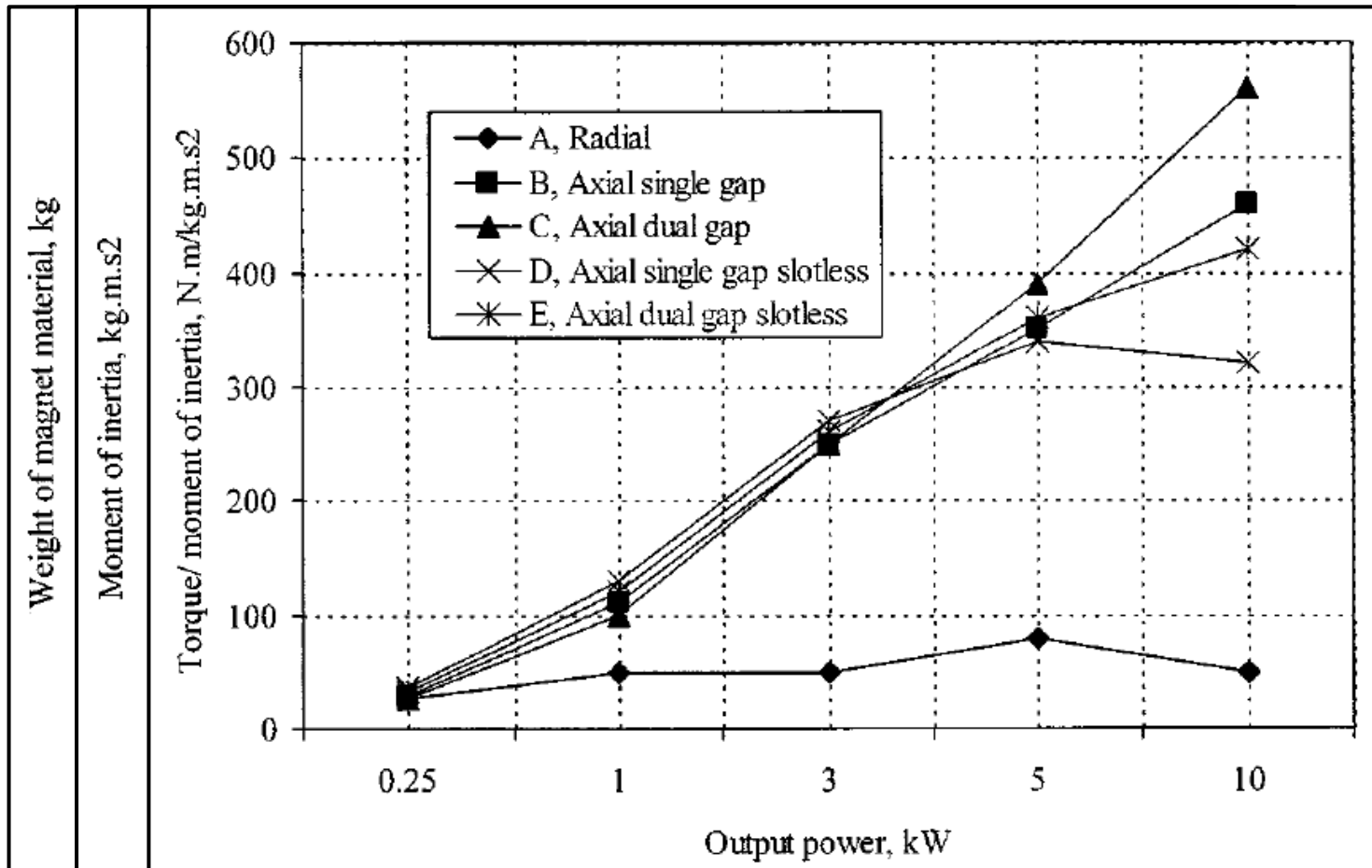
Fig. 9. Torque/moment of inertia versus output power.

Höhere Leistungsdichte

Fig. 1. Active volume versus output power.

Fig. 11. Power/active volume versus output power.

Axialflussmaschine im Vergleich



Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines, Kartik Sitapati and R. Krishnan, 2001

Bessere Magnetmaterialausnutzung

Fig. 5. Magnet weight versus output power.

Weniger Drehträgheit

Fig. 2. Moment of inertia versus output power.

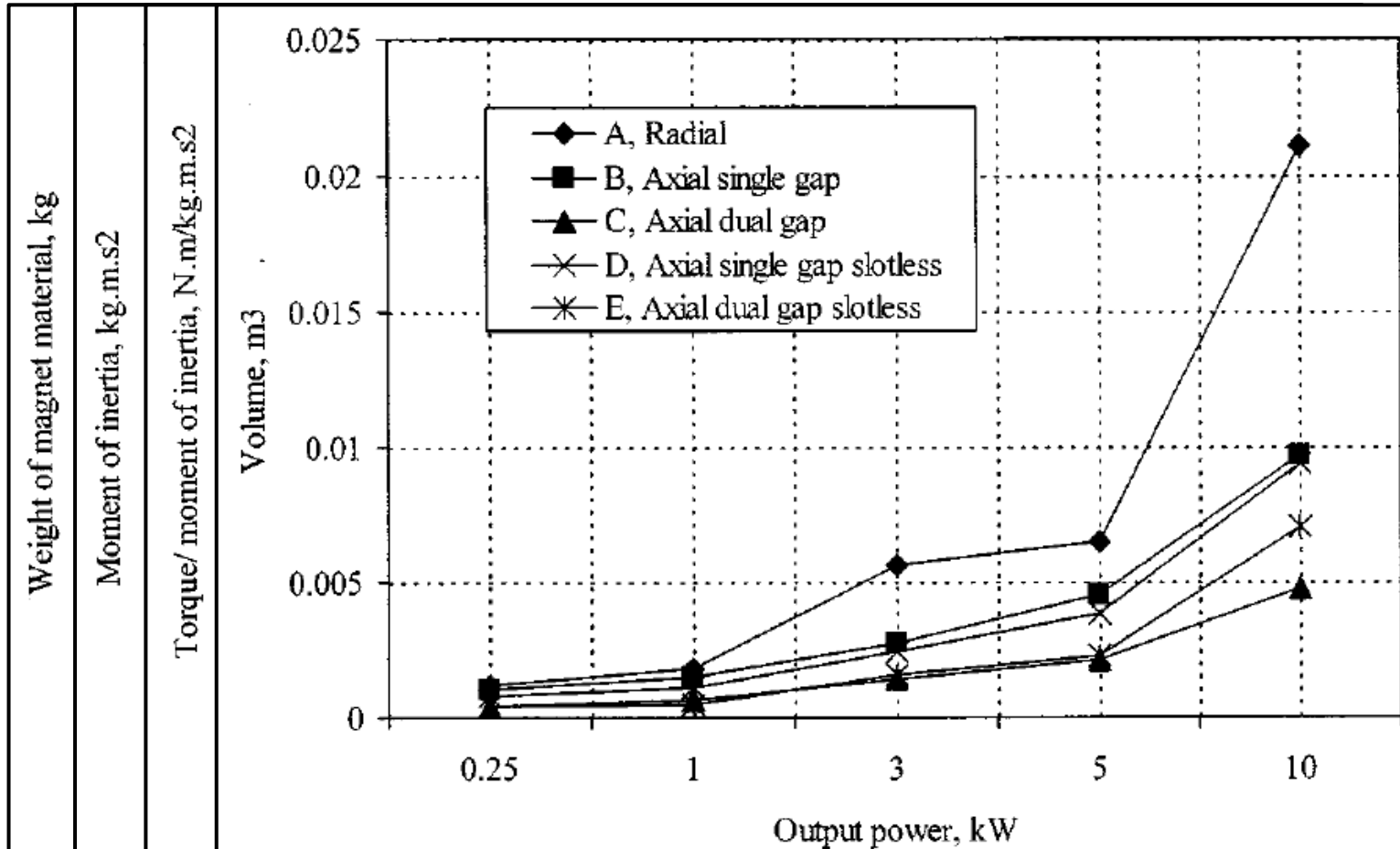
Fig. 9. Torque/moment of inertia versus output power.

Höhere Leistungsdichte

Fig. 1. Active volume versus output power.

Fig. 11. Power/active volume versus output power.

Axialflussmaschine im Vergleich



Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines, Kartik Sitapati and R. Krishnan, 2001

Bessere Magnetmaterialausnutzung

Fig. 5. Magnet weight versus output power.

Weniger Drehträgheit

Fig. 2. Moment of inertia versus output power.

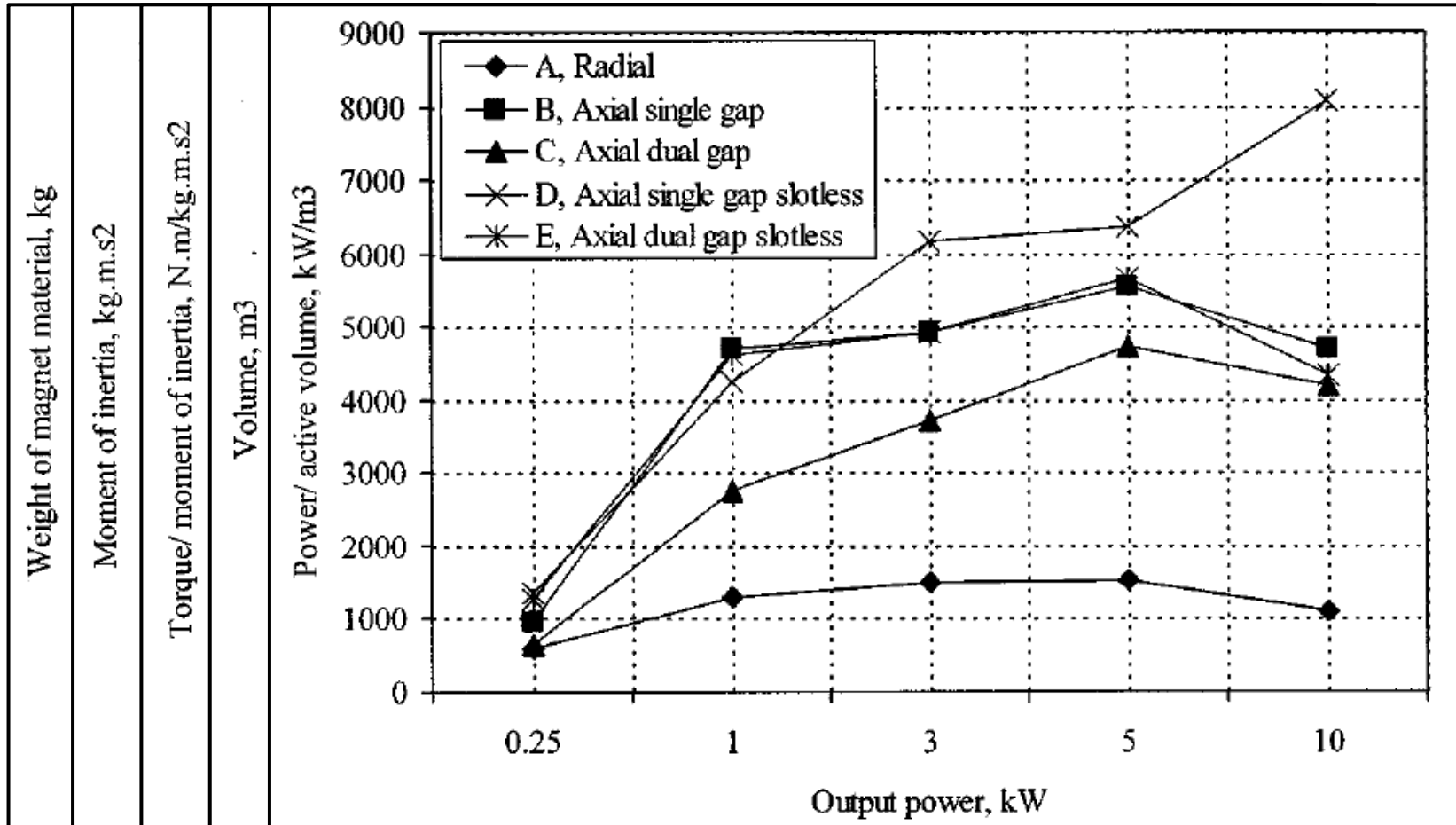
Fig. 9. Torque/moment of inertia versus output power.

Höhere Leistungsdichte

Fig. 1. Active volume versus output power.

Fig. 11. Power/active volume versus output power.

Axialflussmaschine im Vergleich



Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines, Kartik Sitapati and R. Krishnan, 2001

Bessere Magnetmaterialausnutzung

Fig. 5. Magnet weight versus output power.

Weniger Drehträgheit

Fig. 2. Moment of inertia versus output power.

Fig. 9. Torque/moment of inertia versus output power.

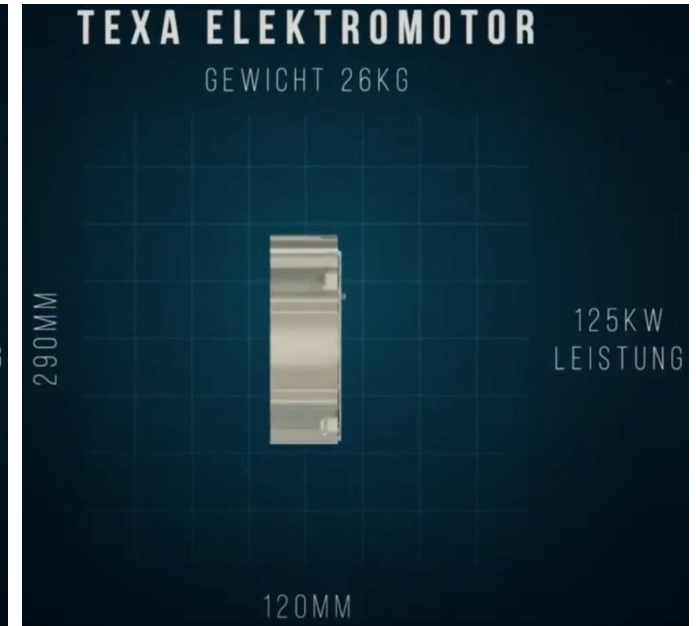
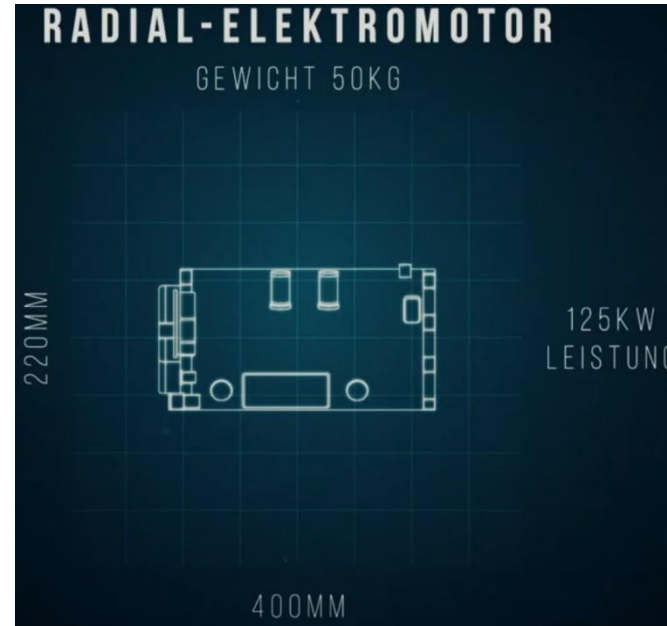
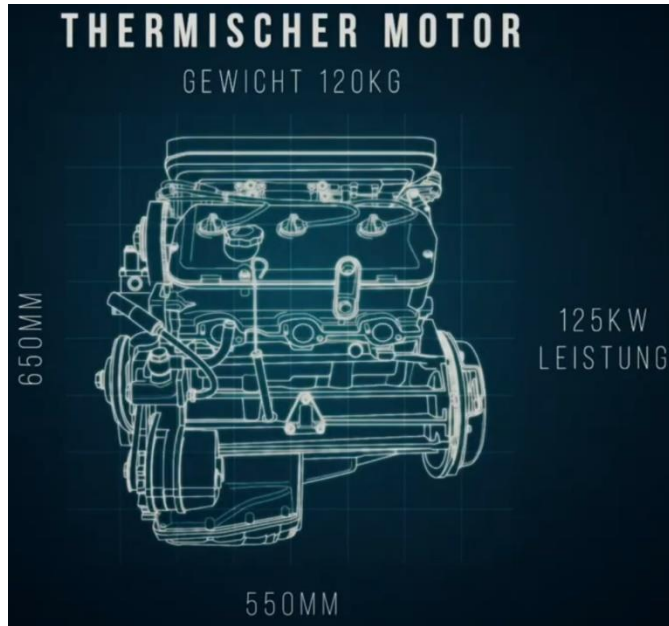
Höhere Leistungsdichte

Fig. 1. Active volume versus output power.

Fig. 11. Power/active volume versus output power.

Axialflussmaschine

[74]

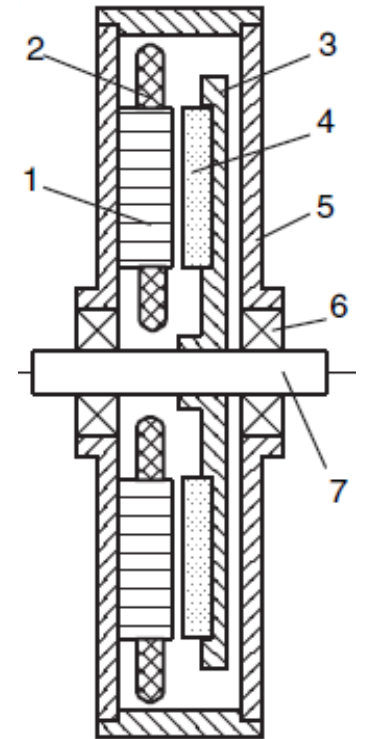


Leistung	125kW	125kW	125kW
Volumen	650mm x 550mm	220mm x 400mm	290mm x 120mm
Gewicht	120kg	50kg	26kg

Axialflussmaschine

Double-Gap und Multi-Stacking

- einzigartig für AFM: nahezu beliebige Erweiterung der Geometrie um weitere Luftspalte
- mit jedem Luftspalt: Zunahme an Leistung und Drehmoment
- Single-Gap generell unvorteilhaft durch
 - starke axiale Anziehungskräfte zwischen den Platten
 - Dadurch zusätzliche Lagerbelastung
 - Im Vergleich weniger Leistungsausbeute
- Double-Gap-Typen daher am meisten vertreten

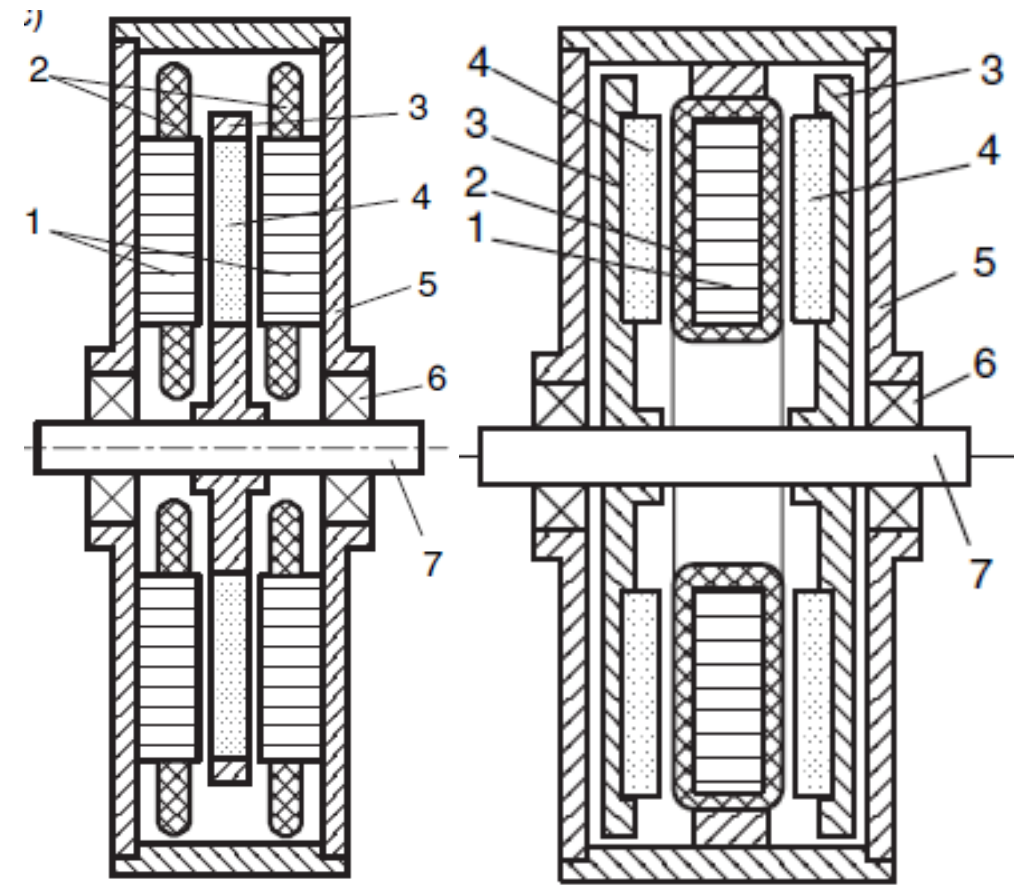


„Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines“ Jacek F. Gieras et al., 2008

Axialflussmaschine

Double-Gap und Multi-Stacking

- Double-Rotor-Single-Stator (rechts)
 - außen liegende Rotoren,
 - ein innen liegender Stator
 - doppelte PM-Anzahl, doppelte Induktion
- Double-Stator-Single-Rotor (links)
 - außen liegende Statoren
 - ein innen liegender Rotor
 - doppelte Windung, doppelte Stromstärke
- davon ausgehend Multi-Stacking
 - abwechselndes hintereinander „stapeln“ von Rotoren und Statoren möglich

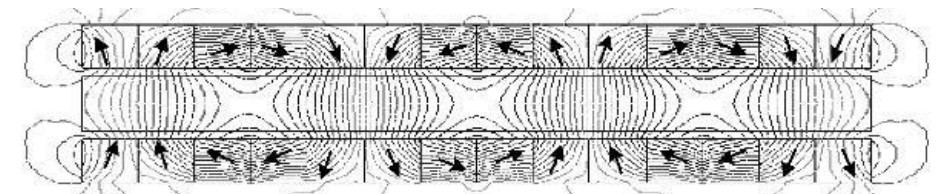
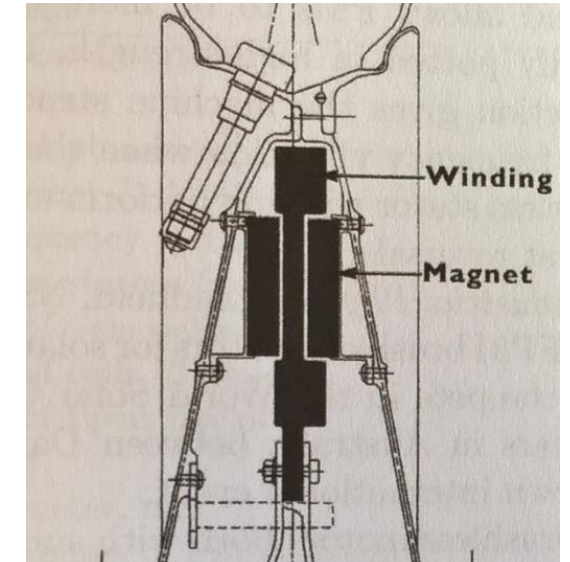


„Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines“ Jacek F. Gieras et al., 2008

Axialflussmaschine

Kernlose Topologien

- einzigartig für AFM: Reduktion von Stator- und Rotorkernen
- jedoch eher geeignet für Kleinmaschinen aufgrund Konstruktion, Verluste und erzielbare Leistung
- nur möglich bei Double-Gap: innen liegendes Element kann ohne Kernmaterial nur aus Magneten / Spulen entworfen werden
- bei Double-Rotor-Single-Stator Verzicht auf Rotorjochs der Rotoren durch Halbacharray: Joch bildet sich aus Rotormagneten
- Vorteil kernloser Topologien: Einsparung an Gewicht, Kosten und kein Rastmoment



„Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines“ Jacek F. Gieras et al., 2008

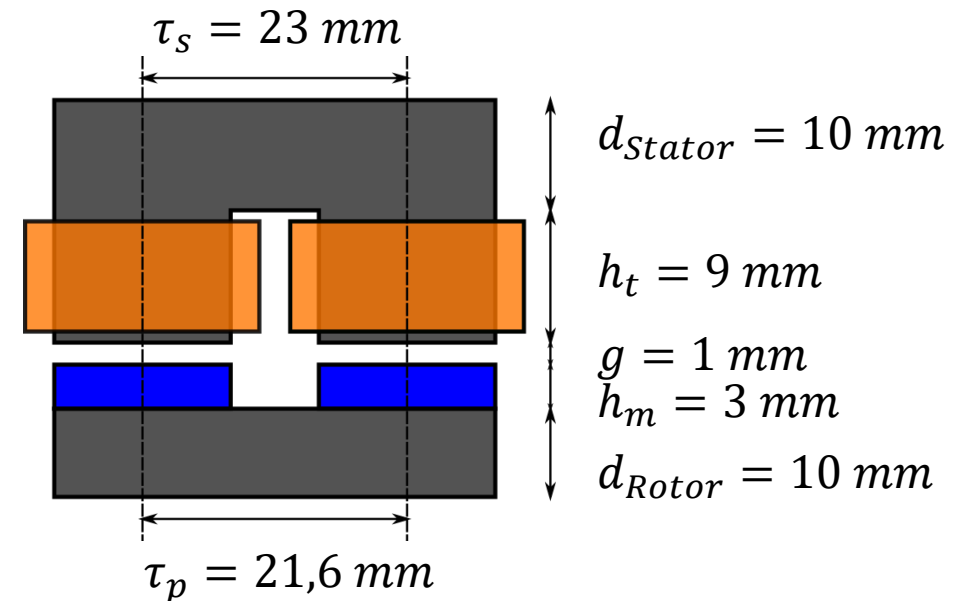
Prototyp der Forschungsgruppe Mikromobilität

AFM Prototyp

Theoretisches Design

- $T_d = \frac{1}{4} \cdot (D_a^2 - D_i^2) \cdot m \cdot N \cdot k_w \cdot \alpha_i \cdot B_{mg} \cdot I_a$
- Open-Circuit-Ansatz:
 - $\Theta = 0 = 2 \cdot (H_g \cdot g + H_m \cdot h_m)$

	Analytics	Comsol Multiphysics	Speed
$B_{g,max}$	1.1T	0.98T	1.02T
B_t	1.15T	1.05T	1.07T
B_{st}	1.04T	0.94T	0.9T
T_d	12Nm	-	10.89Nm

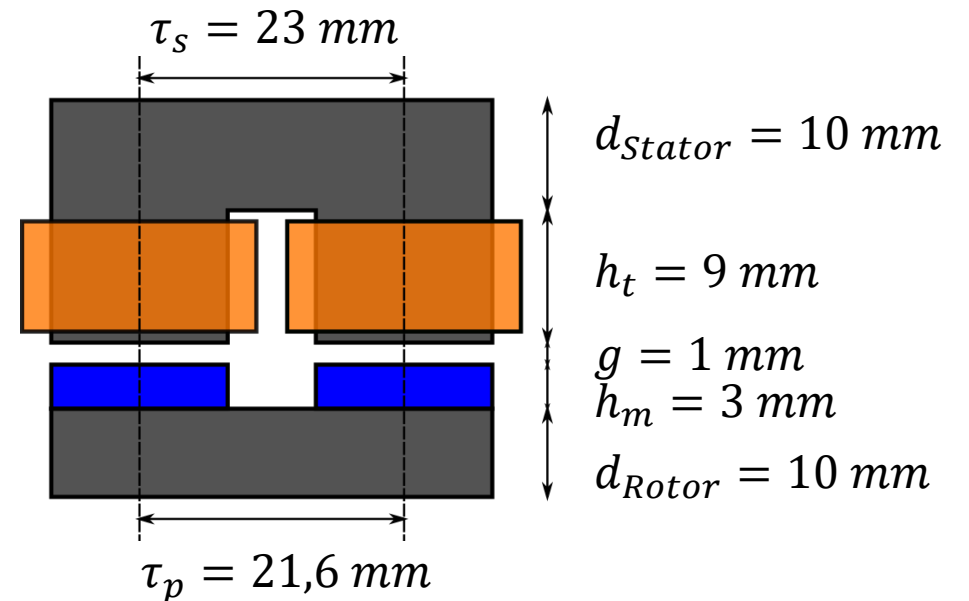


AFM Prototyp

Theoretisches Design

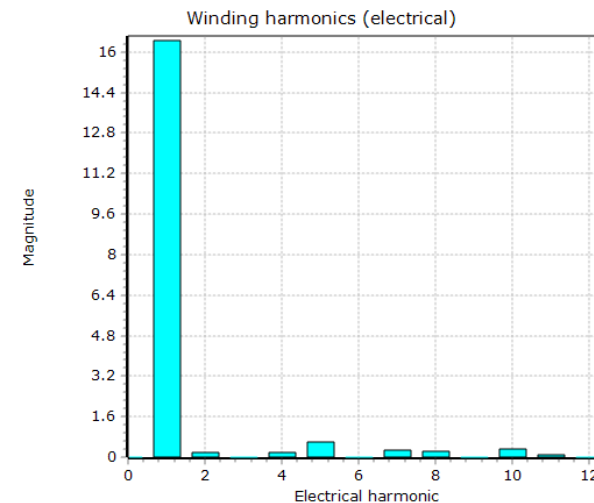
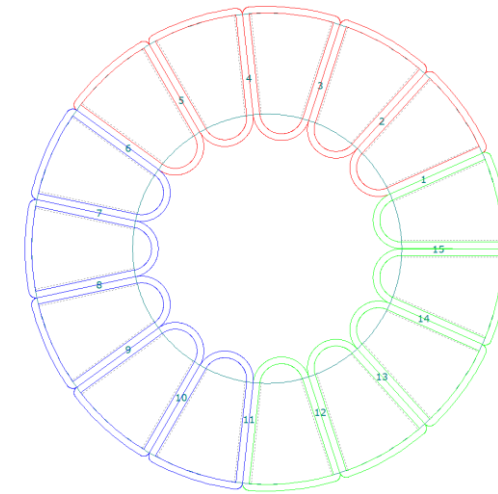
$$\bullet T_d = \frac{1}{4} \cdot (D_a^2 - D_i^2) \cdot m \cdot N \cdot k_w \cdot \alpha_i \cdot B_{mg} \cdot I_a$$

D_a	140mm
D_i	80mm
m	3
N	375
B_{mg}	0,9T - 1T
I_a	4,2A



Prototyp Zahnspulen-Bruchloch-Wicklungen

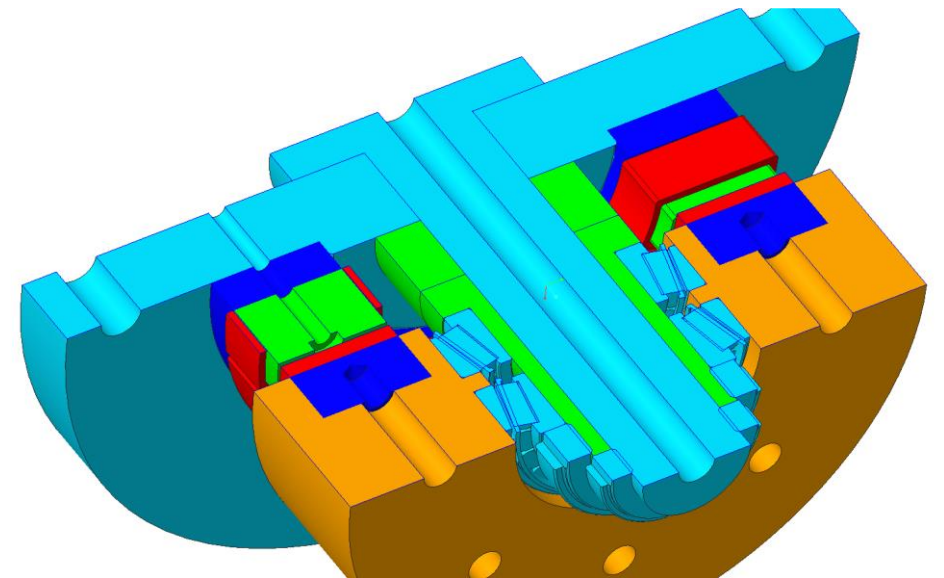
- gewählt für einfache Montage
- Reduktion der Windungsüberhänge
- Reduktion von Rastmomenten
- 16 Pole, 15 Nuten
 - Lochzahl (Nuten pro Pol pro Phase) $q = 0.3125$
- Aufgrund Spulenandordnung durch 16 Pole / 15 Nuten
 - weitere Reduktion in Spulen-Verbindungen
 - geringe induzierte Harmonische Oberwellen



Prototyp

Wirbelstromverluste & Skalierbarkeit

- Kernmaterial: Soft magnetic Powder Composite
- Reduzierung der Kosten durch separate Fertigung von Zähnen und Statorjoch
- ermöglicht gewisse Skalierbarkeit durch unterschiedliche Zahnlängen & Spulenauslegungen
- Rotor montiert auf Hülse
- Abstandshülse eröffnet variable Luftspaltlänge

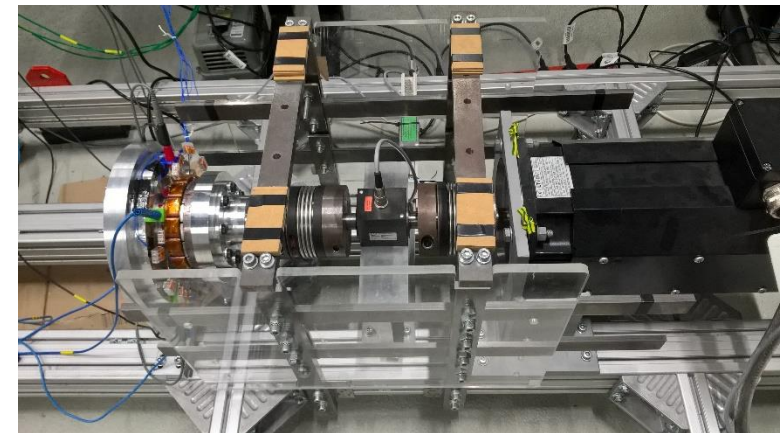
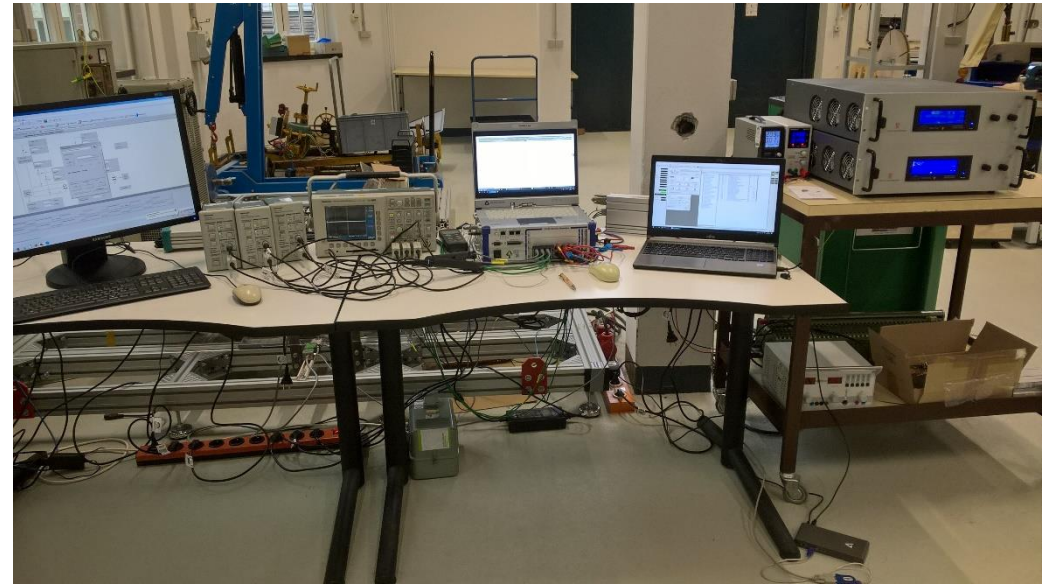


Prototyp U/f open loop Betrieb

- EMF

T_d [Nm]	1,72	3,26	4,17	5,19
L_a [mH]	8,6	8,6	8,6	8,6
ϑ [°C]	34,2	42,98	45,5	66,5
R_a [Ω]	1,88	1,94	1,96	2,11
$U_{a,rms}$ [V]	10,91	11,51	11,27	12,98
$I_{a,rms}$ [A]	2,25	2,99	3,26	4,19
φ [°]	-80,07	-77,49	-79,47	-67,99
$E_{f,rms}$ [V]	9,43	9,66	9,75	9,65
δ [°]	25,45	32,98	36,94	43,61

	E_f [V]
no-load operation (measured)	8,79
open loop U/f load operation	9,65
SPEED®	9,83



VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

Folgen Sie uns gerne auf unseren Kanälen:

 **Instagram:** hawhh_lem

 **Twitter:** @hawhh_lem

 **LinkedIn:** LABOR FÜR ELEKTRISCHE MOBILITÄT