

6. Braunschweiger Supraleiter – Seminar  
11. – 12.5. 2011

## Supraleitende Motoren mit AC – Supraleitern

Bernhard Oswald

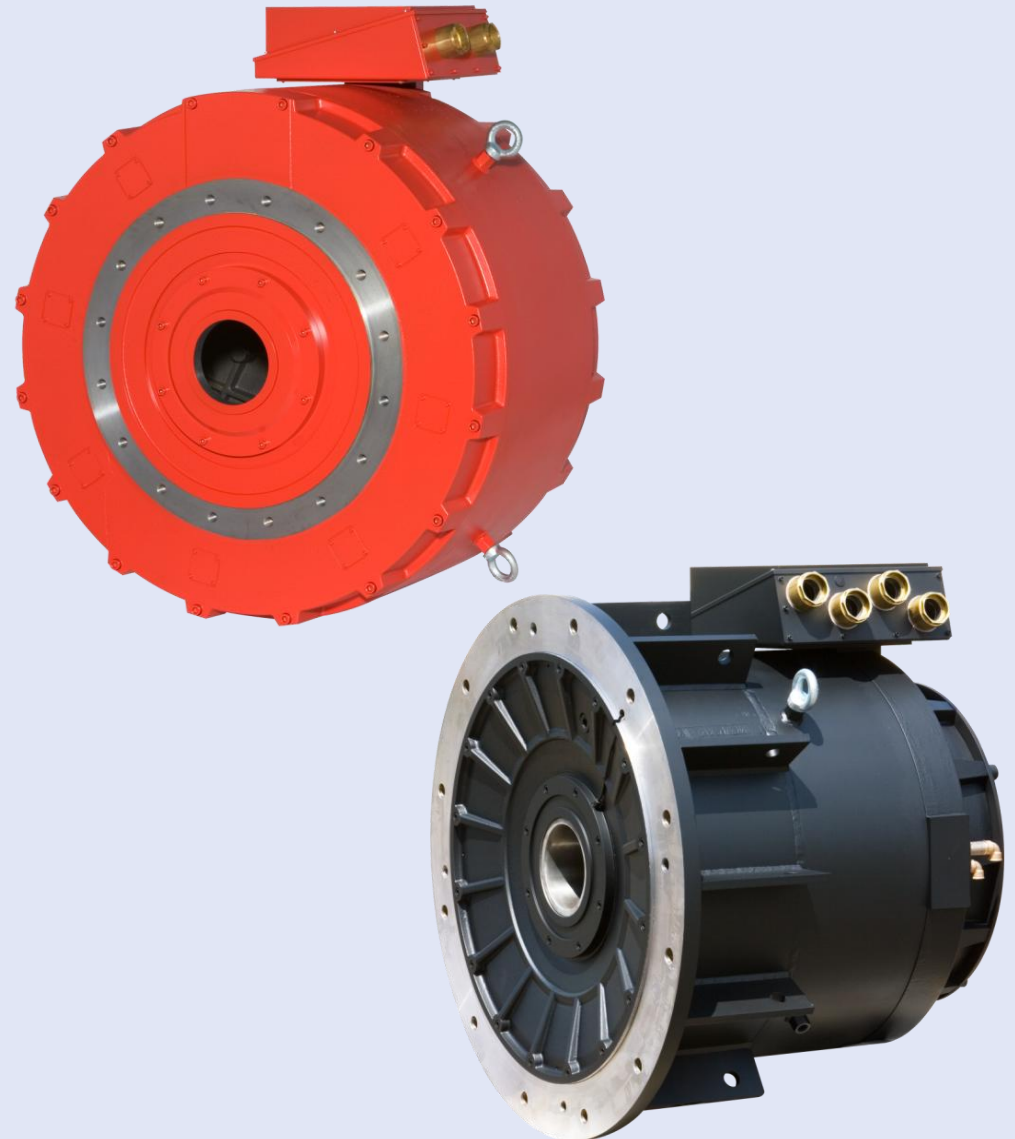
## OSWALD Torquemotoren bis 200.000 Nm Besondere Eigenschaften

**Große Drehmoment-Dichte**  
Kleines Volumen – niedriges Gewicht

**Hohe Dynamik**  
Schnelligkeit - Hohe Produktivität

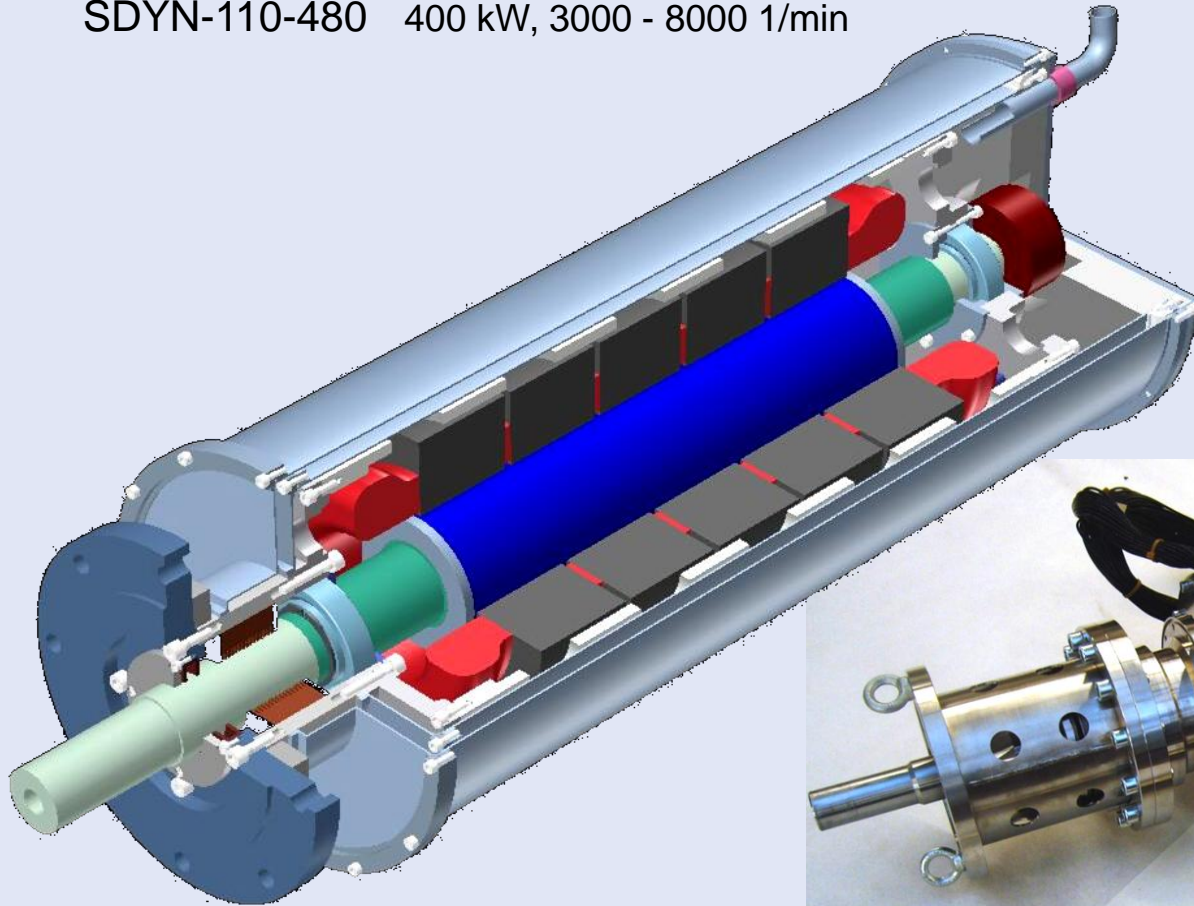
**Geringer Service**  
Direktantriebe - keine Getriebe

**Einsparung von Energie**  
Anpassung an spez. Arbeitsbedingungen

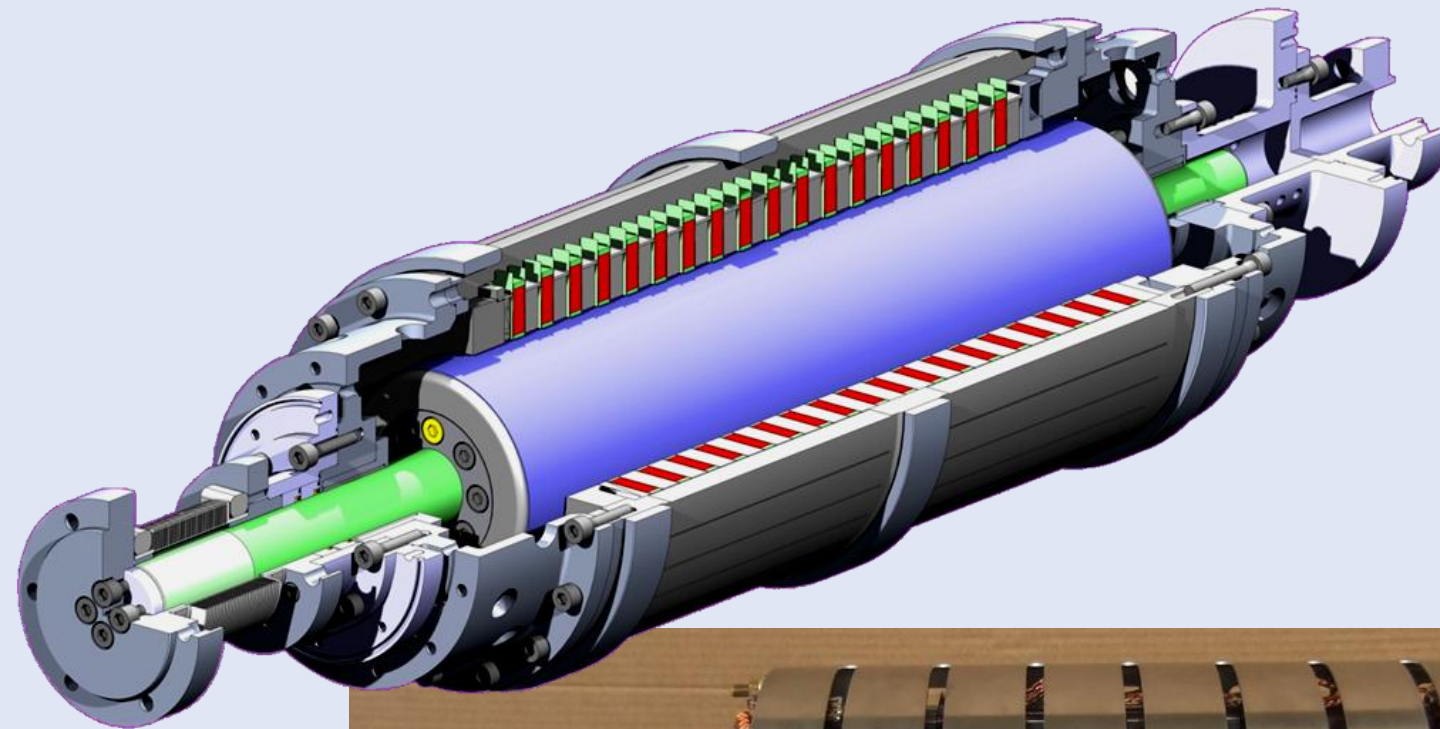


# Supraleitender Motor mit Massiv-Supraleitern im Läufer

SDYN-110-480 400 kW, 3000 - 8000 1/min



HTS - LINEARMOTOR SLIN 100 45 kN Supraleitende  
Statorwicklung aus BSCCO tapes



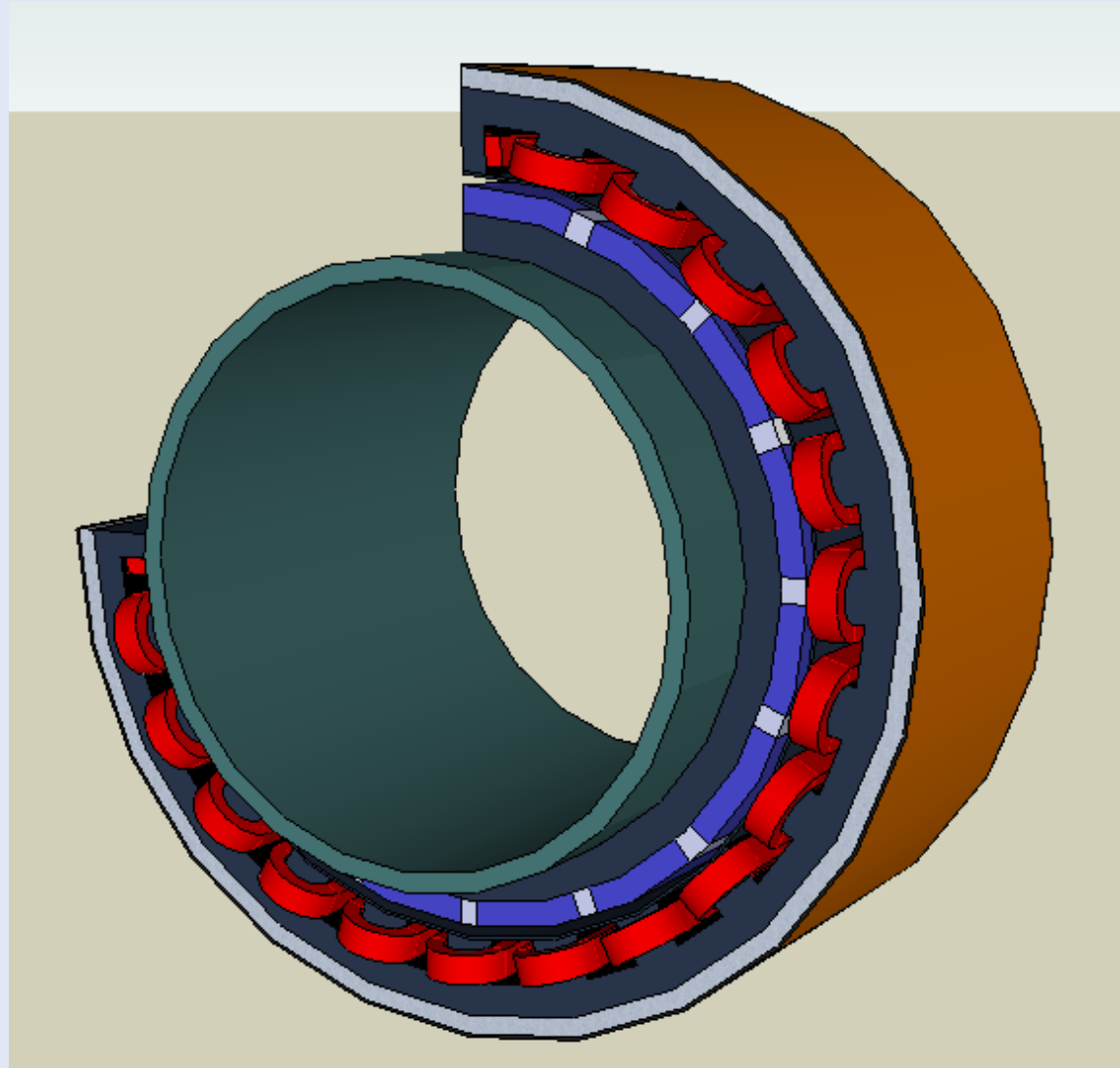
# Projekt SUTOR

Gefördert vom BMWI unter FKZ 0327866A

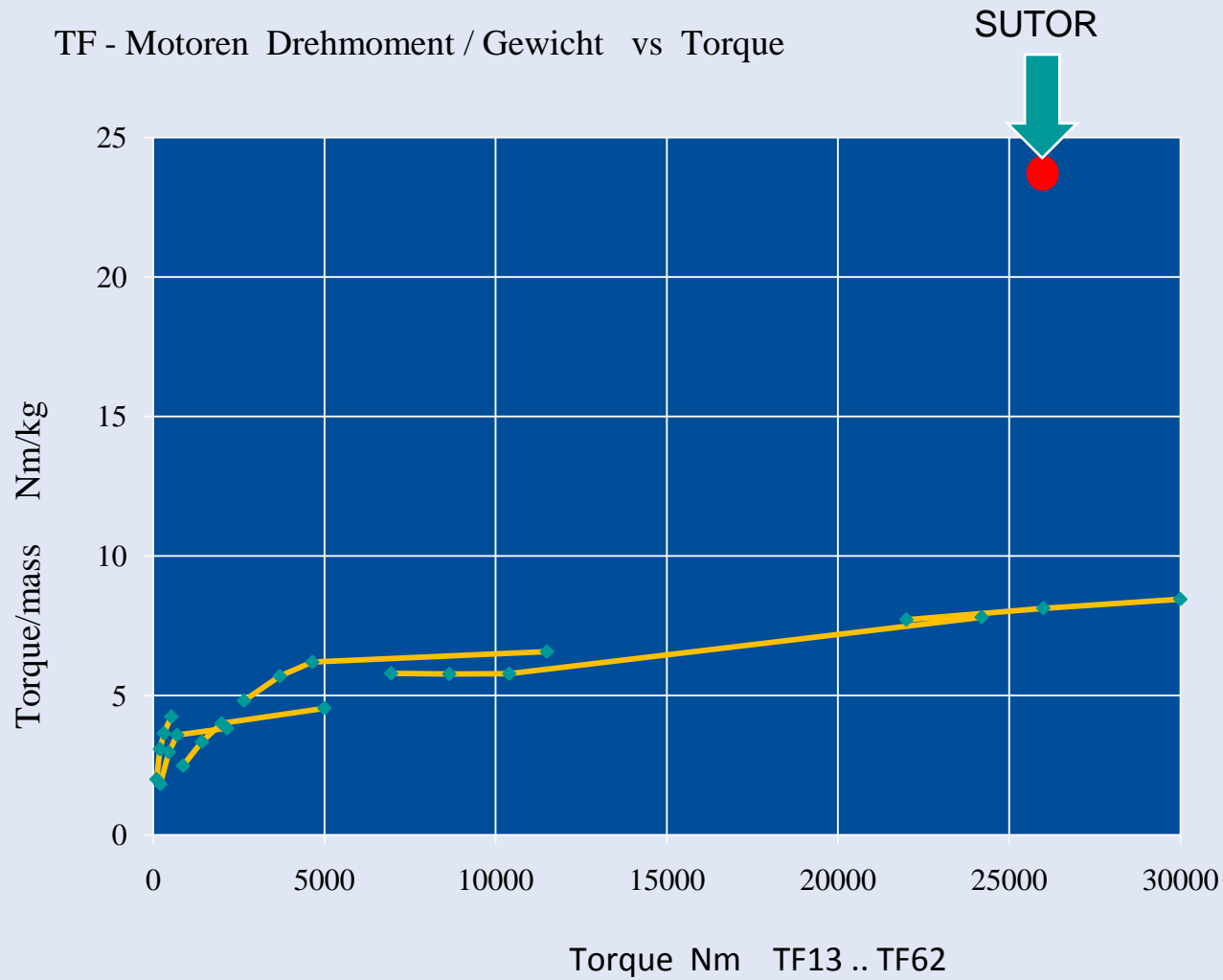
## SUTOR – Daten

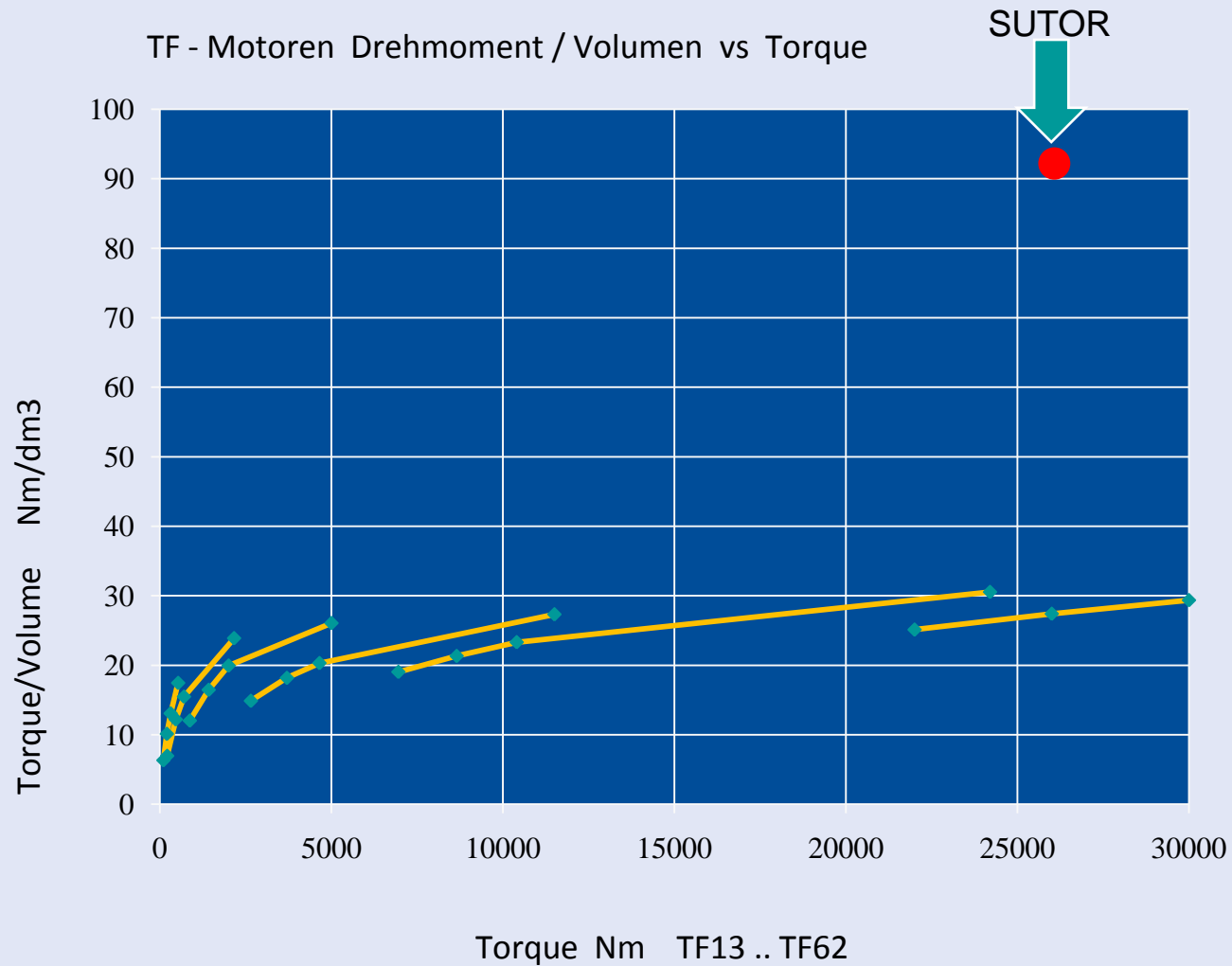
U <sub>1Y</sub>	380	V
I <sub>1</sub>	315	A
M	26000	Nm
n	0 – 56 – 100	1/min
P <sub>ab</sub>	154	kW
eta	99	%
cos	0.74	
f	15	Hz
p	16	
Masse	830	kg
Kraftdichte	11.7	N/cm <sup>2</sup>

3D – Ansicht eines  
supraleitenden  
Torque-Motors



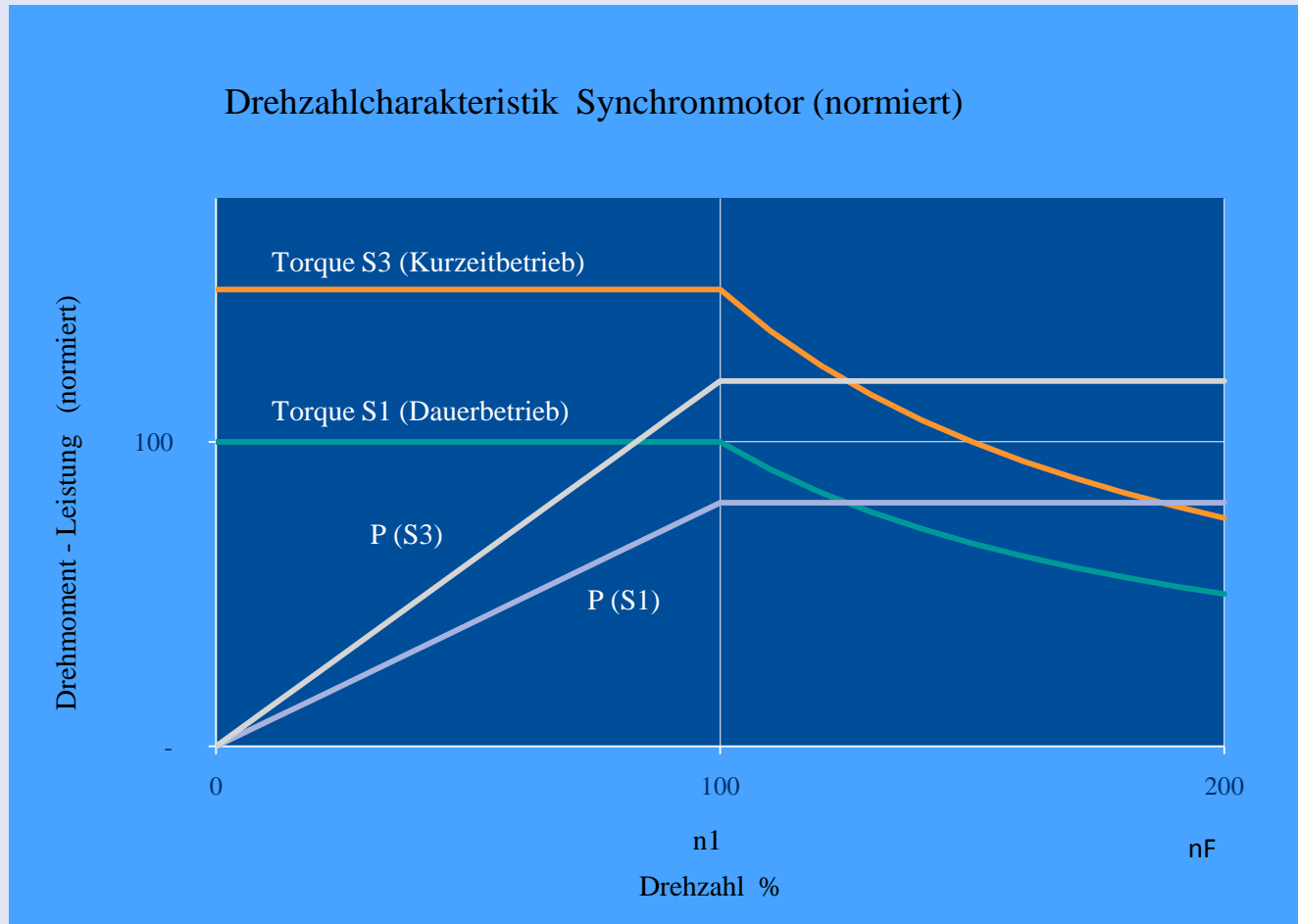
TF - Motoren Drehmoment / Gewicht vs Torque







## Drehzahlcharakteristik Synchronmotor



## Besondere Betriebsbedingungen für Torquemotoren mit supraleitender Drehfeldwicklung

### Kurzzeit-Überlast:

Supraleitende Torquemotoren können kurzzeitig nicht überlastet werden. Der kritische Wert von  $I_c$  gibt die Grenze vor.

### AC-Verluste unter $n_1$ (niedrige Drehzahlen):

Die AC-Verluste steigen mit der Frequenz an, deshalb sind hinsichtlich der AC-Verluste im niedrigen Drehzahlbereich höhere Belastungen möglich.

Supraleitende Torquemotoren sollten möglichst für niedrige Frequenzen ausgelegt werden.

### Feldschwächbereich:

Die Feldschwächung bei Torquemotoren mit Permanentmagneten wird mit einem negativen  $i_d$  Strom erreicht. Im Feldschwächbereich steigen die AC-Verluste mit der Frequenz an. Gleichzeitig gehen das Magnetfeld und damit die Hystereseverluste zurück.

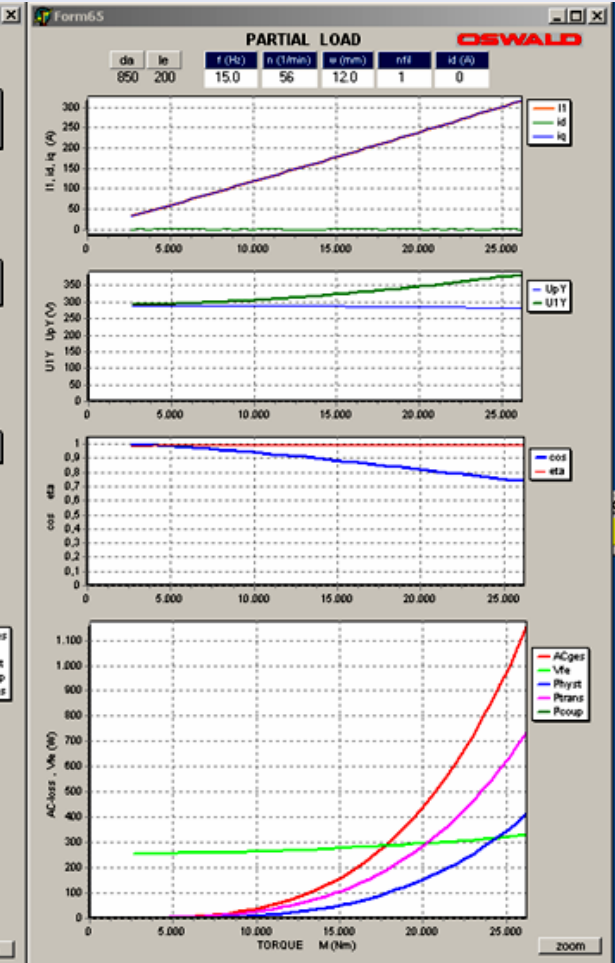
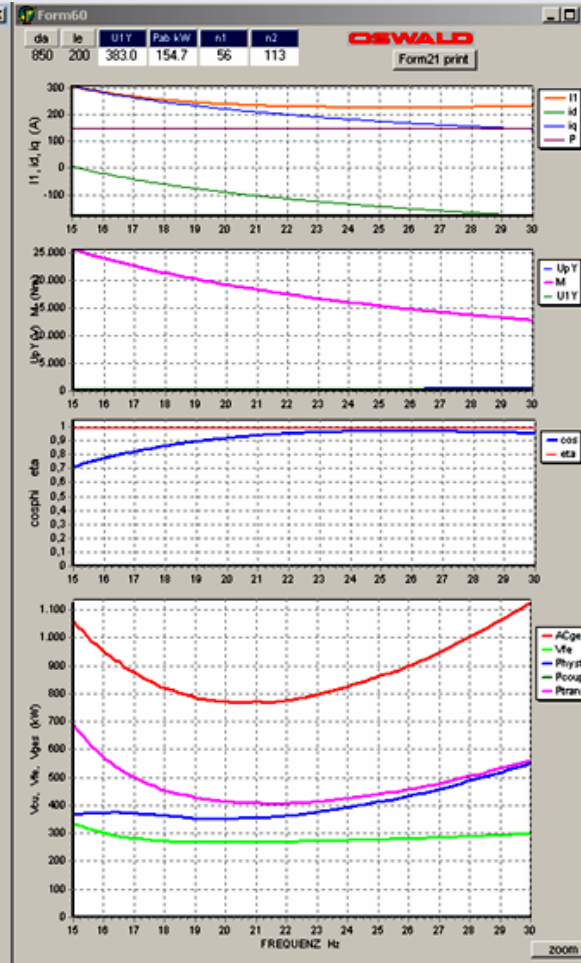
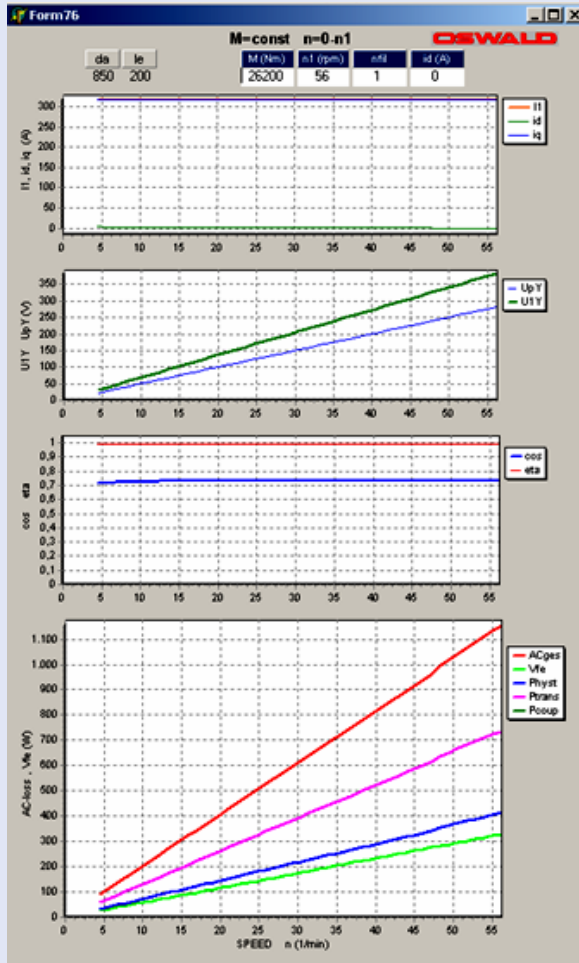


# Betriebscharakteristik - Drehzahlbereiche

M=const n = 0 – n1

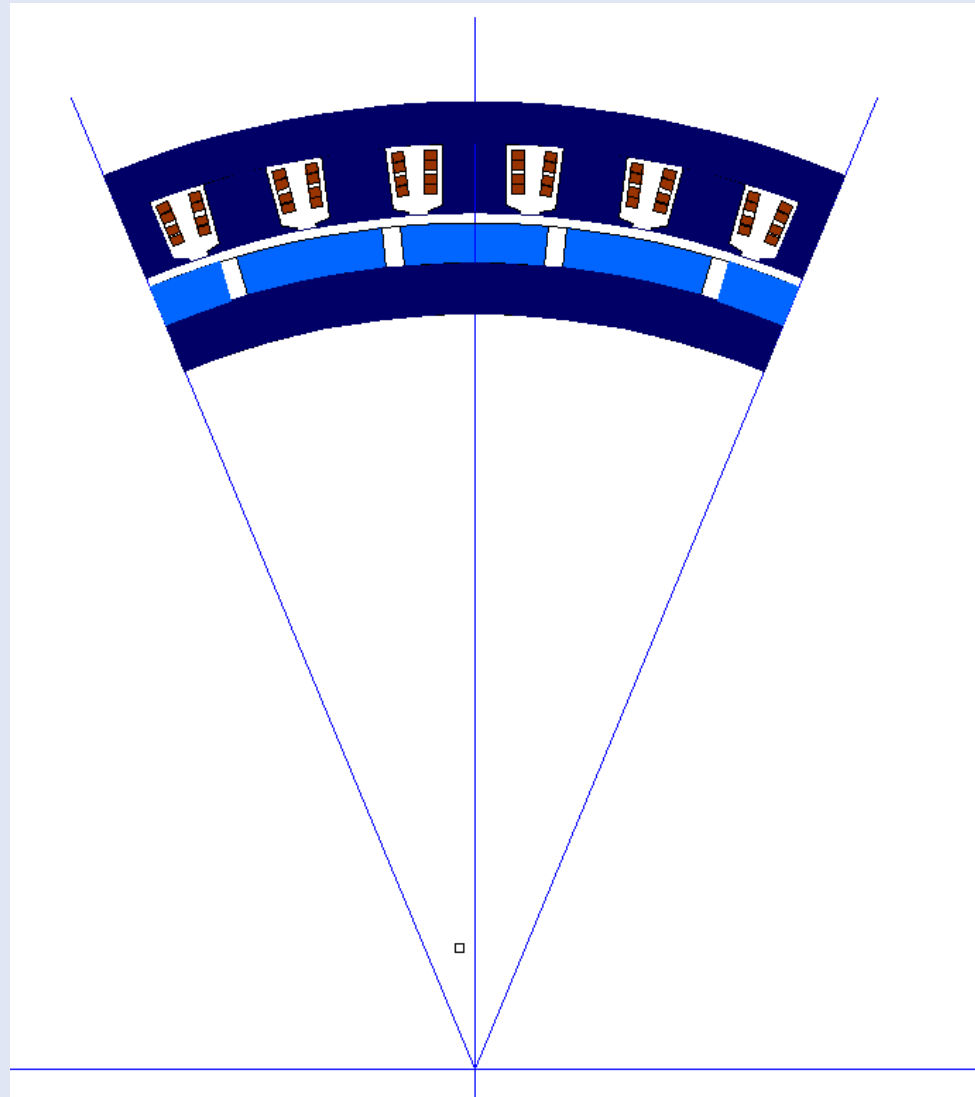
Feldschwächung f = 15 – 30 Hz

Teillast von M = 0 – 26000 Nm

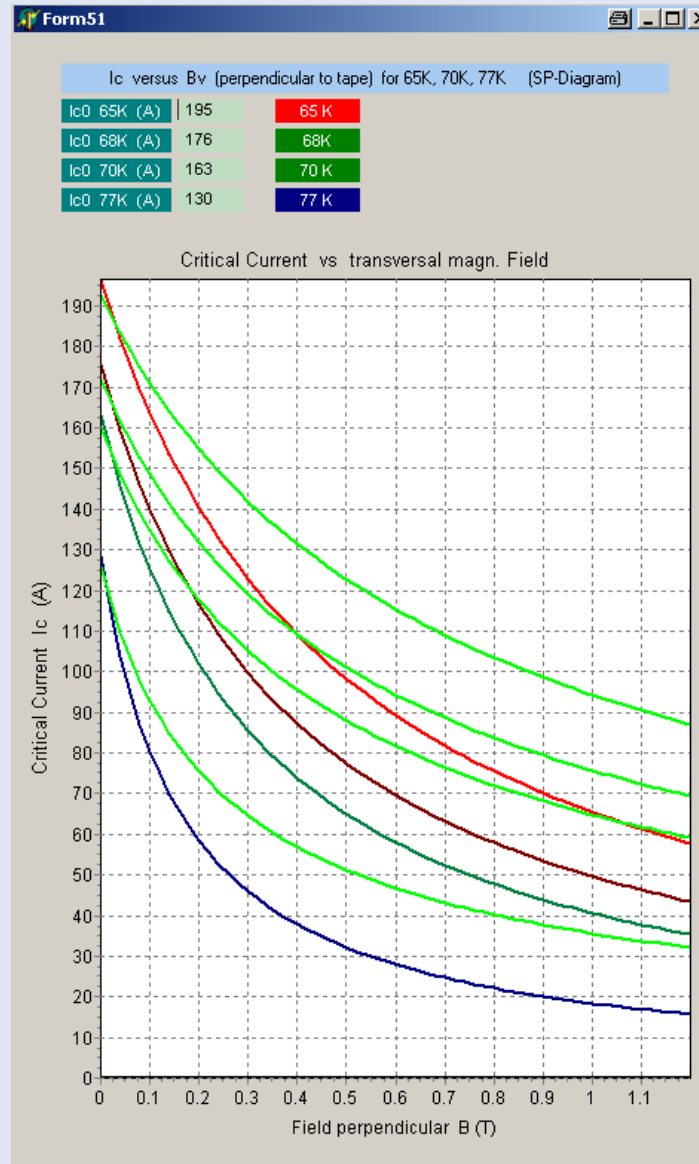


## Querschnitt SUTOR

Supraleitende  
Zahnwicklung aus  
YBCO<sub>c</sub>c tapes



# Double – Pancake Spule



Kritischer Strom über  
transversalem Feld

65 K

70 K

77 K

# AC – Verluste in YBCO<sub>cc</sub> Tapes

## Hysterese Verluste

B//c (Feld senkrecht zur Tape-Ebene B//c)

## Strom-Transport-Verluste

## Kopplungsverluste

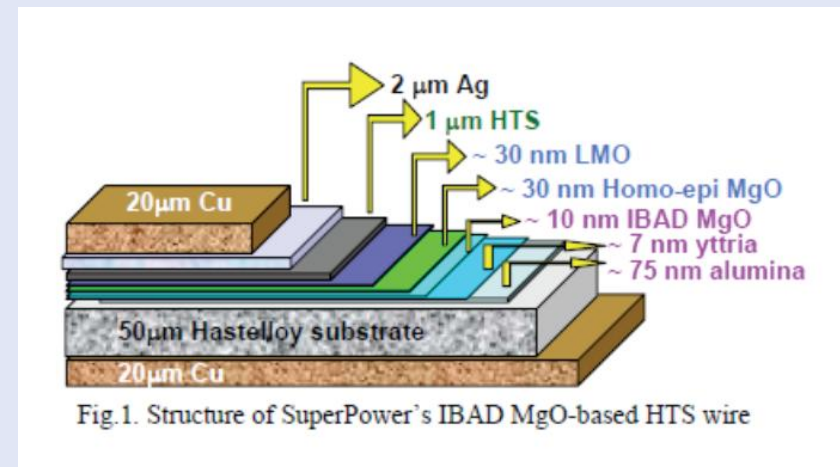
bei parallelen Tapes B//ab

## Kopplungsverluste

Zwischen Filamenten

## Wirbelstrom-Verluste

Im Substrat und im Kupferlayer



## Zur Berechnung der AC-Verluste

Das tangentielle und radiale AC-Magnetfeld variiert im gesamten Wicklungsvolumen. Maßgebend für den kritischen Strom ist das Maximalfeld am innersten Radius der Wicklung.

Maßgebend für die AC-Verluste (Hysterese- und Kopplungsverluste) ist ein mittleres Magnetfeld bezogen auf das gesamte Wicklungsvolumen. Beide Werte können analytisch approximiert werden.

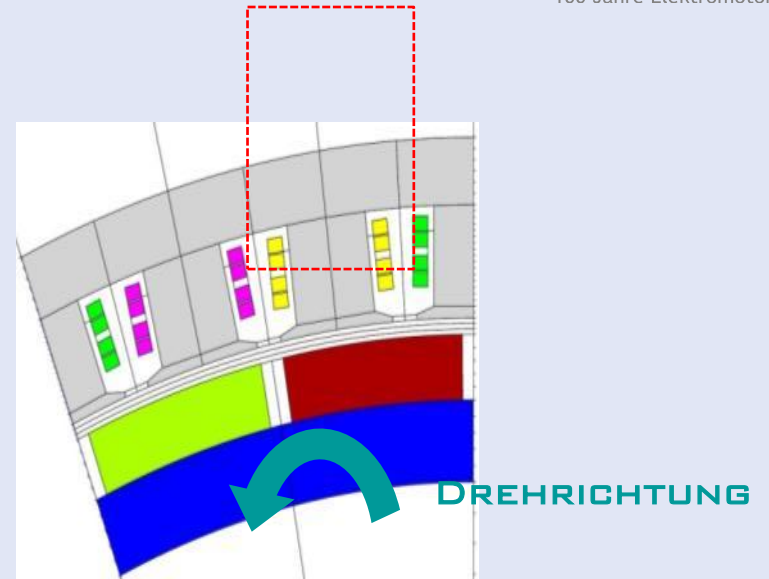
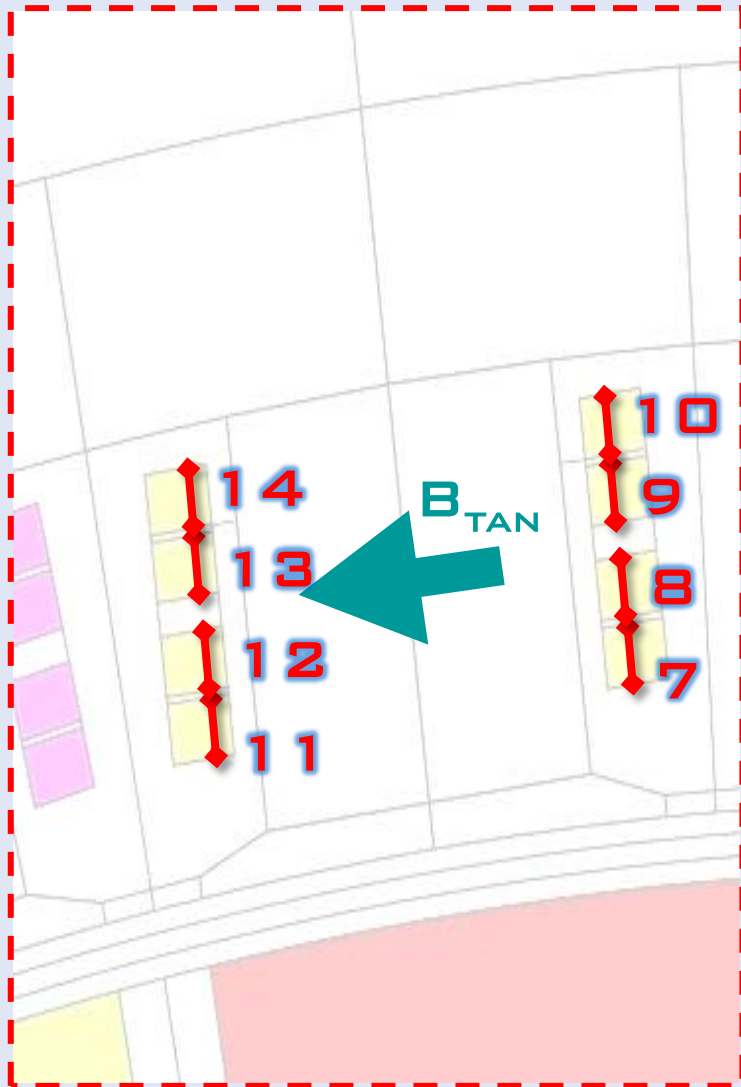
Zur Unterstützung der analytischen Annäherung werden FEM Berechnungen durchgeführt.

Zur weiteren Bestätigung werden experimentelle Untersuchungen an Musterspulen durchgeführt zur Messung der AC-Verluste, abhängig von Frequenz und (winkelabhängigem) transversalem Magnetfeld.

Die Messung der AC-Verluste ist sowohl aus den elektrischen Daten als auch über den Gasflow (Verdampfungswärme) vorgesehen.



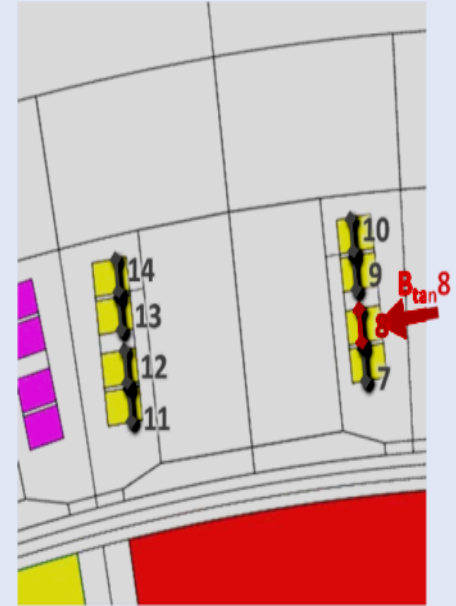
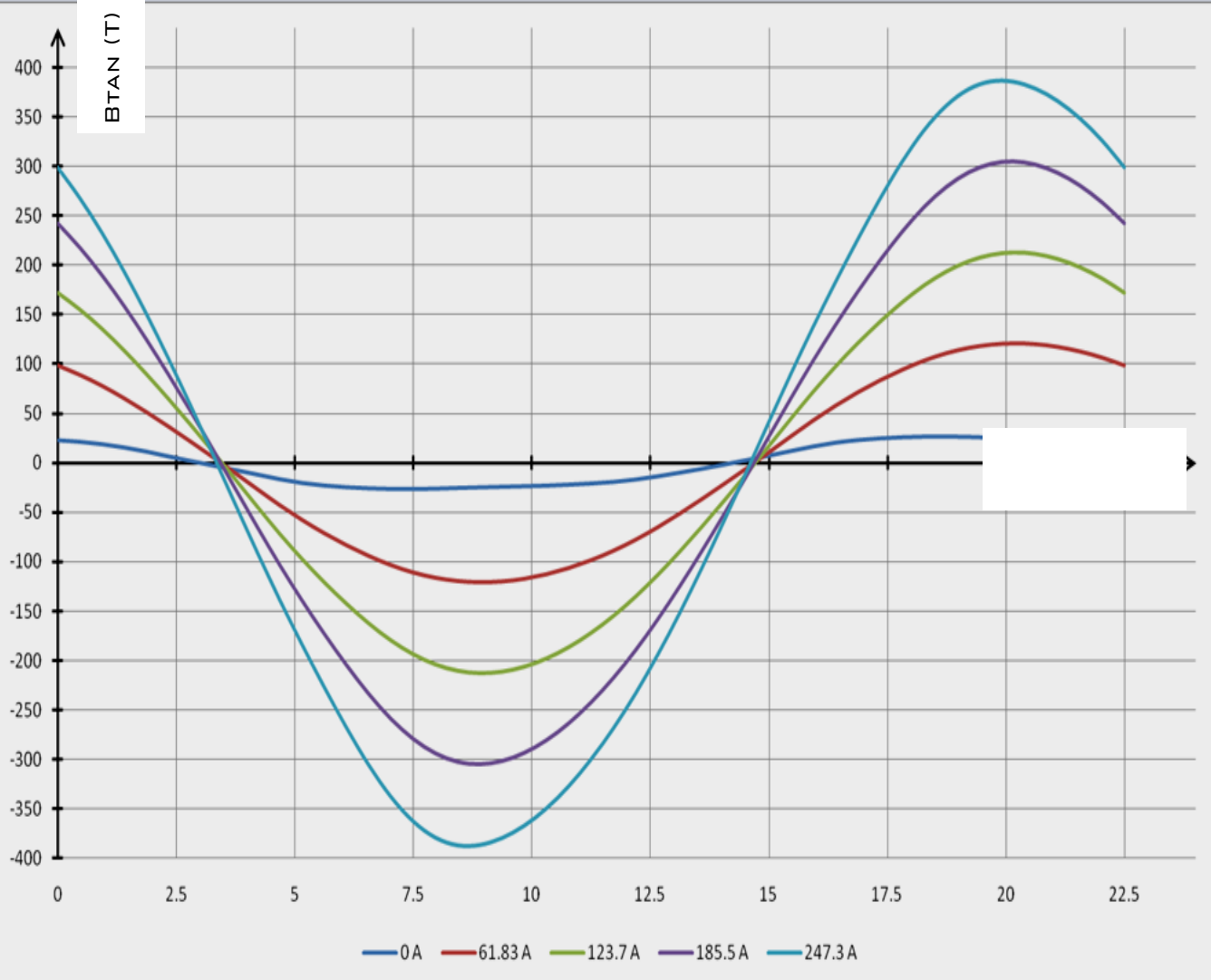
# Integrationspfade Tangentialkomponente $B_{tan}$



Fluss  $F$  [Vs] senkrecht  
durch die Integrationspfade

$B_r$  wird berechnet:  $B_r = F / A$ ;  
( $A$ = Fläche des Doppelpancakes, durch die der  
Fluss geht)

# Verlauf Radialkomponente $B_{\tan 8}$



## Maximalwerte:

0 A	26 mT
62 A	121 mT
124 A	213 mT
186 A	305 mT
247 A	386 mT

# Besondere Anforderungen an supraleitende Torquemotoren

Verluste auf tiefer Temperatur müssen minimiert werden.

AC-Verluste in den Wicklungen,  
evtl. Eisenverluste (möglichst therm. Isolation des Eisens),  
Wärmeverluste des Kryostaten, Drehmomentübertragung,  
Ohmsche Verluste der Zuleitungen,  
Zusatzverluste durch Oberwellen,

## Kühlung

Wärmeübergang Wicklung - Kühlmedium  
Primärleistung für einen geschlossenen Kühlkreis mindert den  
Gesamt-Wirkungsgrad, Entwicklung billiger Kryokühler erforderlich,  
evtl. Kontaktkühlung,

## Betriebssicherheit - Betriebsverfahren

Temperaturkontrolle – Quenchedetection,  
Abkühlung – Standby,

## Wünsche und Erwartungen

Supraleiter mit hohem  $J_c$  (B)

Supraleiter mit hohen Stromstärken zur Vermeidung von Parallelschaltungen

Filamentierte Supraleiter zur Reduktion der AC-Verluste

Niedrigere Preise (Euro / kA / m)

Billigere Cryo-cooler

Wer immer tut, was er schon kann, wird  
immer bleiben, was er ist.

Henry Ford