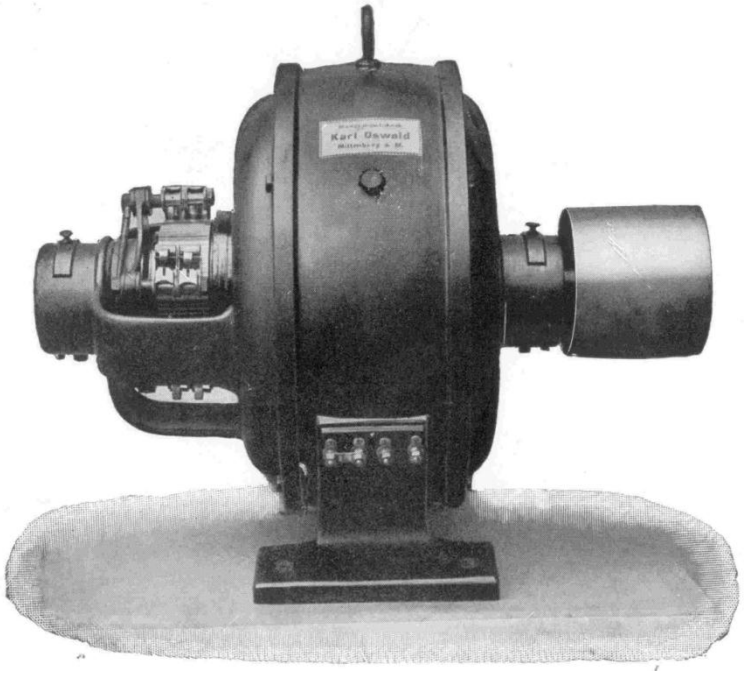
Steigerung der Dynamik und Effizienz von Motoren durch den Einsatz von Supraleitern

Thomas Reis, Bernhard Oswald, A.T.A.M. de Waele
Oswald Elektromotoren GmbH

Karl Oswald und Sohn



Gründung 1909
in Miltenberg am Main

Oswald Elektromotoren GmbH

Oswald Elektromotoren GmbH

50 kW … 2 MW **kundenspezifische Motoren/Generatoren** **… 200000 Nm**

Dynamik und Effizienz von Motoren

Dynamik

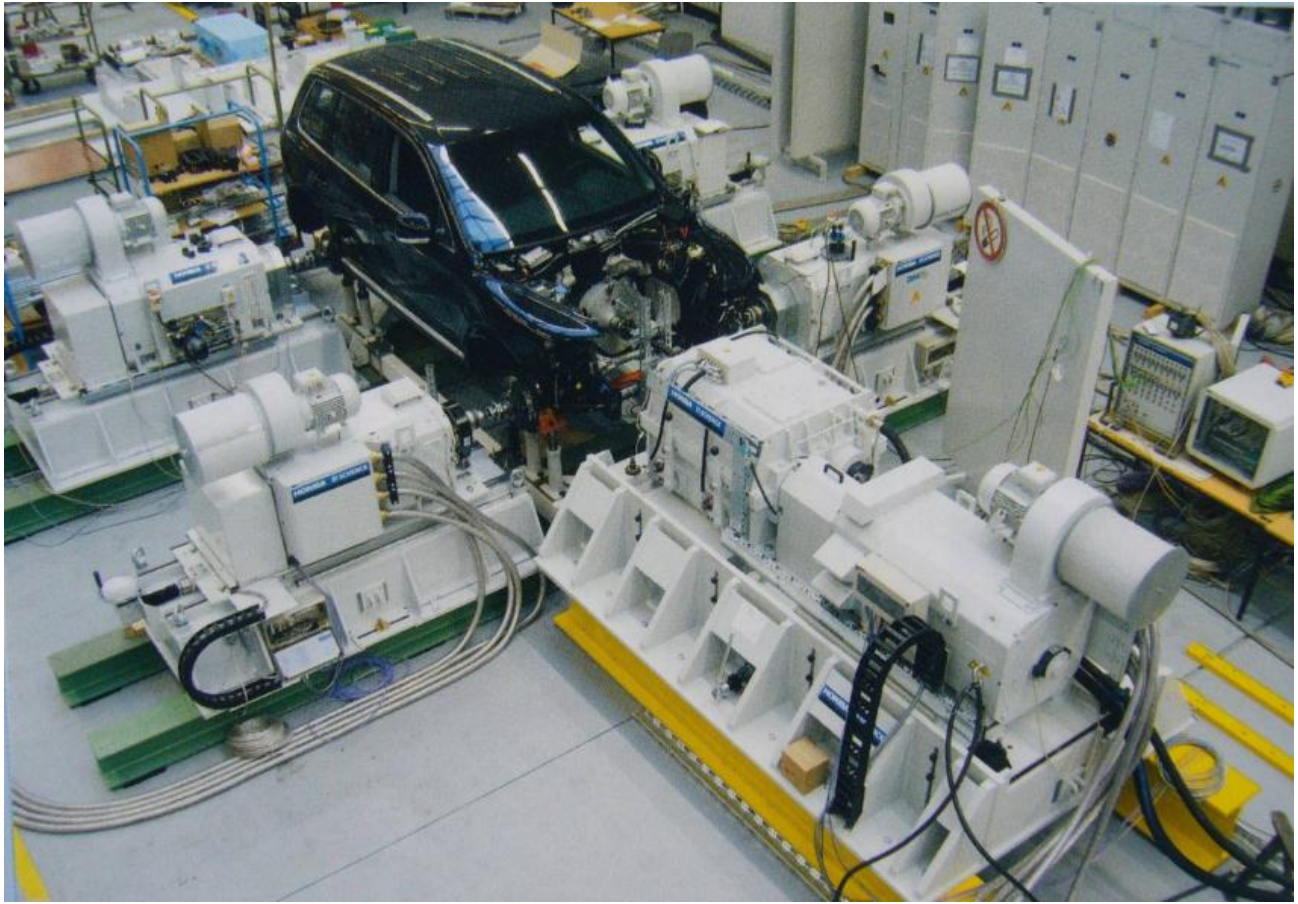
opt. Materialeinsatz

Wirkungsgrad

Wirtschaftlichkeit

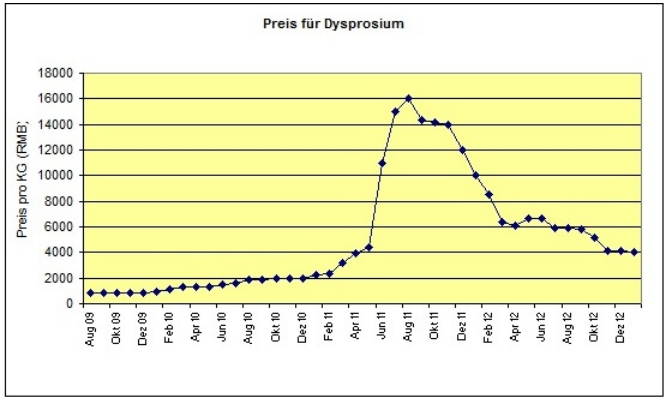
Energieeffizienz

Motivation Dynamik

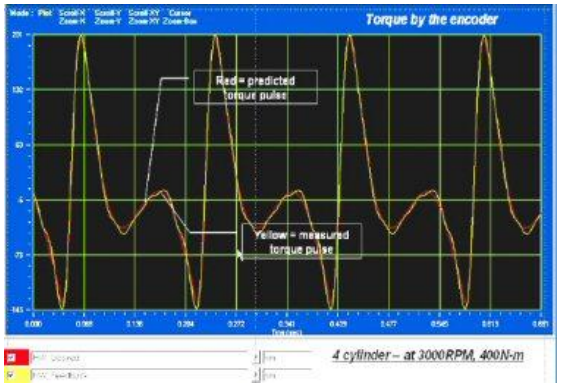


Motivation Dynamik

- Erschließung neuer Anwendungsfelder
- Verwendung neuer Technologien und Materialien im Motorbau

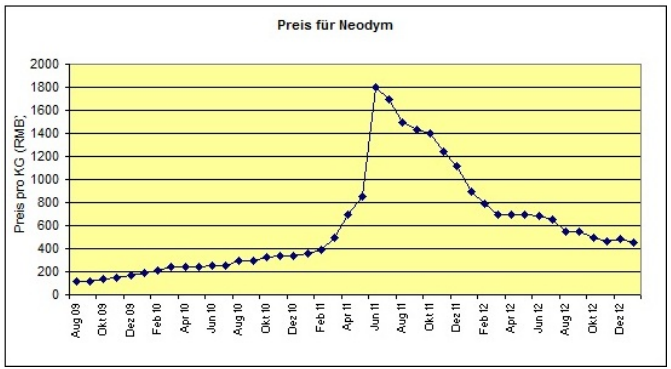


- Erreichen bislang unerfüllbarer Anforderungen



- Verbesserung der Maschinenparameter
- …

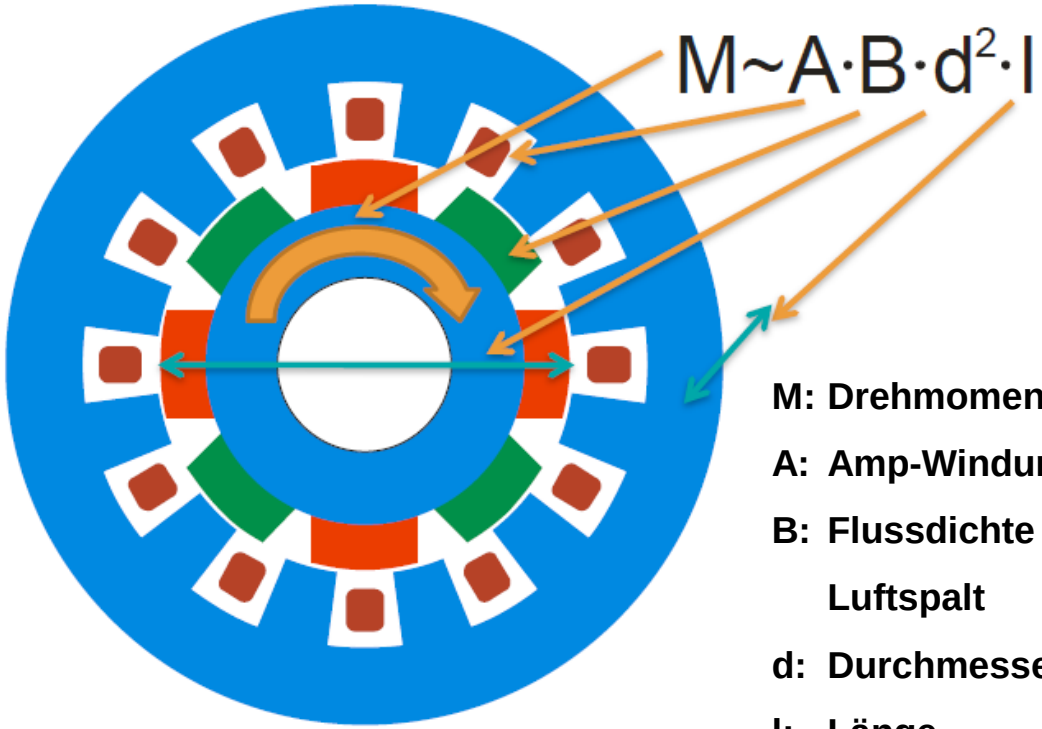
- Unabhängigkeit von krit. Resourcen



Motivation Effizienz

Quelle: Schuler/BMW

Effizienz / Dynamik



M: Drehmoment

A: Amp-Windungen

B: Flussdichte im Luftspalt

d: Durchmesser

l: Länge

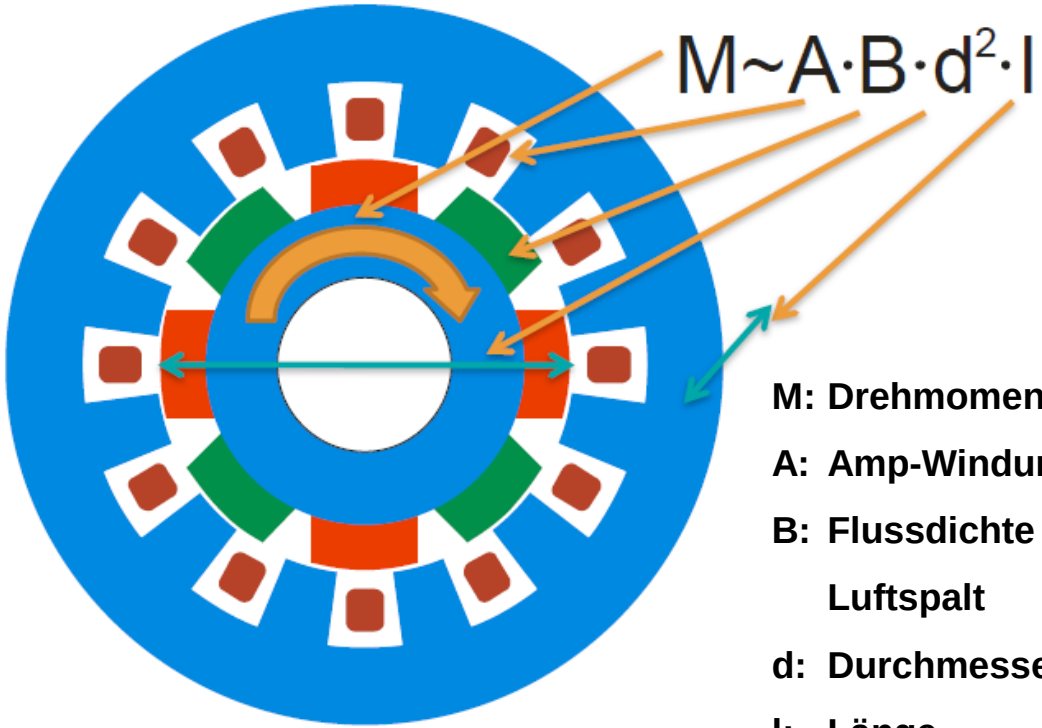
d^2l = konstant

Wirkungsgrad, Energieeffizienz ↑
► A, B ↓

Dynamik ↑
► M ↑ (J=konst.)

Wirtschaftlichkeit, Materialeinsatz
► d^2l, Bauart, …

Stand der Technik



M: Drehmoment

A: Amp-Windungen

B: Flussdichte im Luftspalt

d: Durchmesser

l: Länge

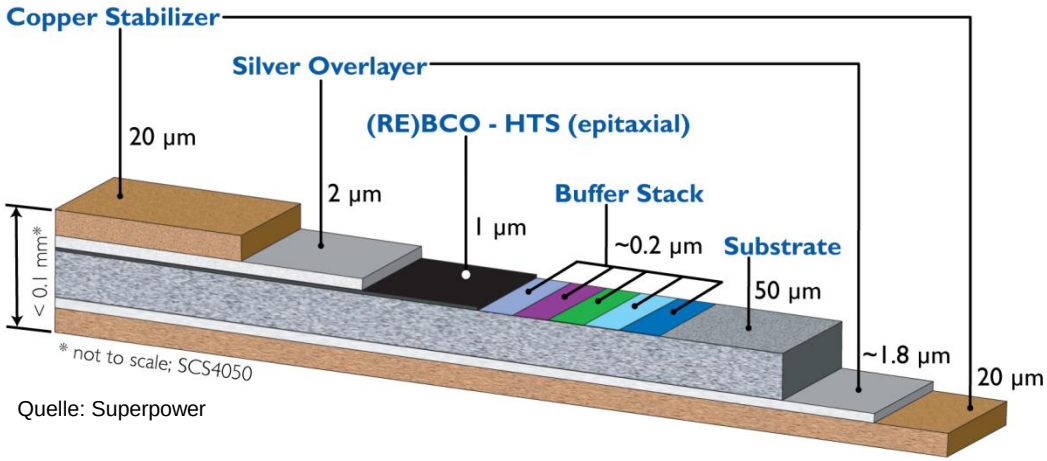
Grenze bei Stator-Windungen:
- Kühlung (Wasser, Luft, …)
- Bauraum
- Isolation
- Stromverdrängung (Freq.)
- …

Grenze bei Rotor-Feld:
- Flussdichte bei PM
- Kühlung, Bauraum bei fremderregten Motoren
- Leistungsübertragung in Rotor
- …

Allgemein: Sättigung des Eisen in Joch, Zahn, …

⇨ **Nur Verbesserungen, kein Technologiesprung**

Einführung der SL im Motorenbau



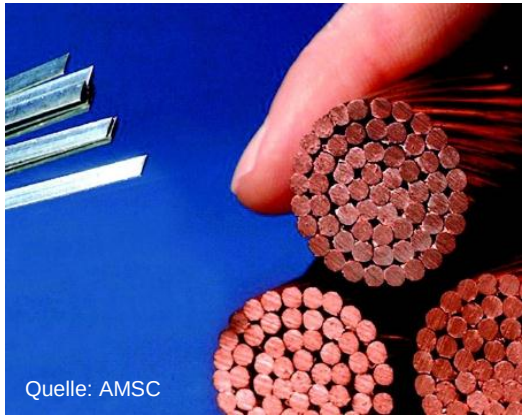
Quelle: Superpower

Stromdichten:

Im Supraleiter
> 60.000 A/mm²

Im Draht
> 600 A/mm²

Engineering
> 150 A/mm²



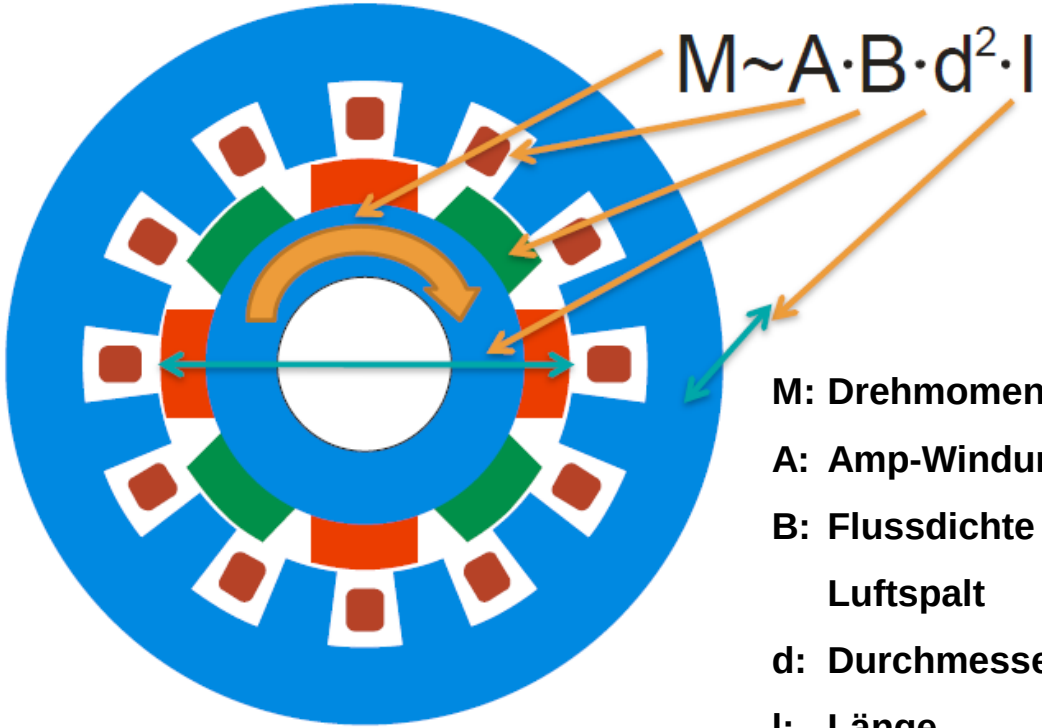
Quelle: AMSC

10-15 fache Stromdichten
im Vergleich mit
konventionellen Technologien

Cu: 10..15 A/mm²

Anwendung der SL im Motor

Erhöhung des „B“ durch SL-Erregerspulen im Rotor



M: Drehmoment

A: Amp-Windungen

B: Flussdichte im Luftspalt

d: Durchmesser

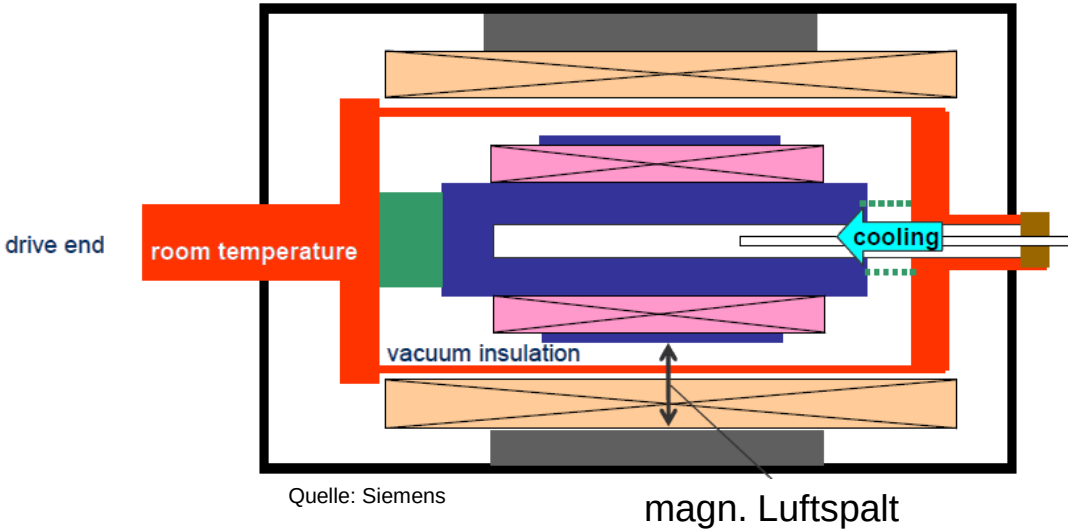
l: Länge

Elektromagnetisch zu beachten:

- „R=0“, nur Induktivität bei Erregerwicklung
- Zuleitung der hohen Rotorströme
- Flussführung im Joch und in Stator (Sättigung!)
- Kraftübertragung
- …

Anwendung der SL im Motor

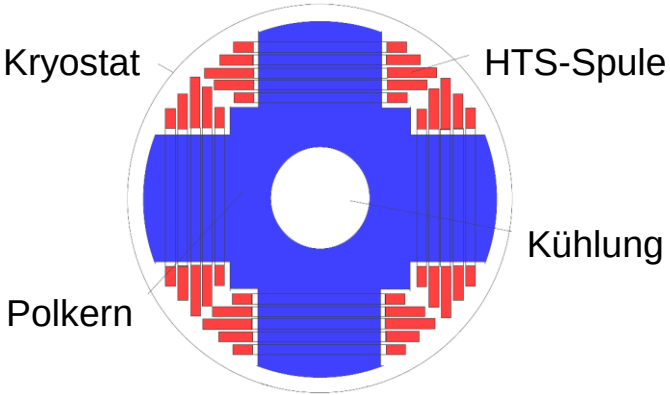
Erhöhung des „B“ durch SL-Erregerspulen im Rotor



Quelle: Siemens

Mechanisch zu beachten:

- **Thermische Isolierung des Rotor**
- **Zuführung der Kühlung**
- **Temperaturdifferenz > 200K**

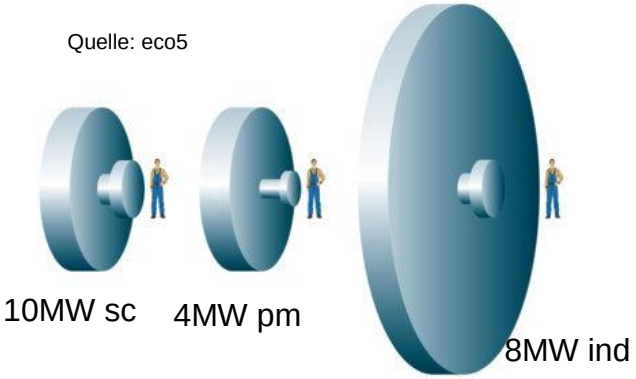


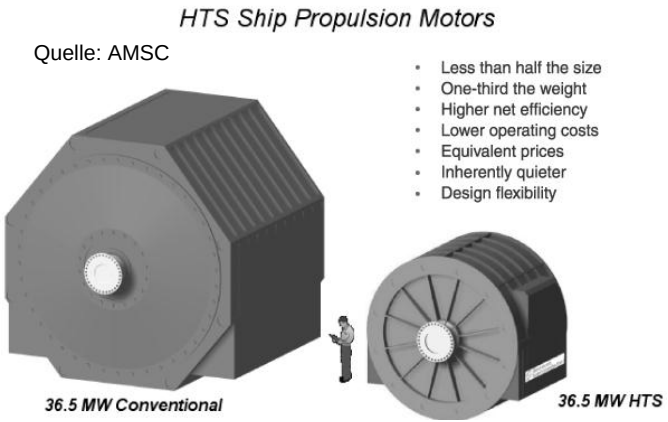
Vorteil: DC-Anwendung

⇨ **keine Verluste im SL**

SL – Motoren:
DC-Anwendung im Rotor

Quelle: eco5





Quelle: AMSC

Vorteile SL Motoren:

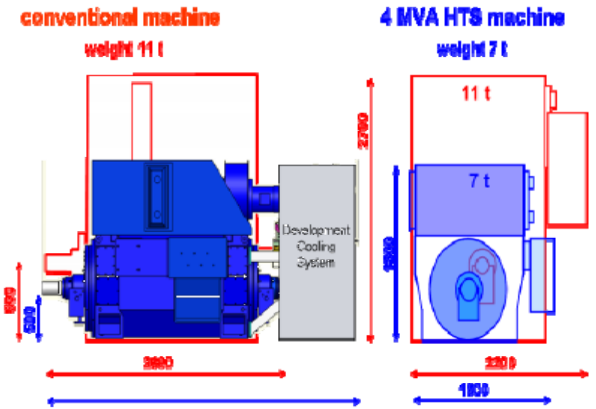
Volumen
-40…60%

Gewicht
-50…70%

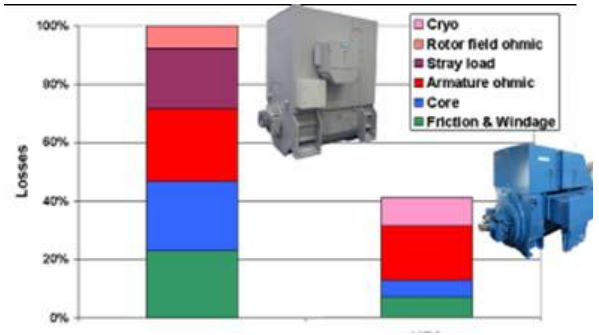
Leistungsdichte
+100…150%

Dynamik
+150…200%

Wirkungsgrad
…99,9%

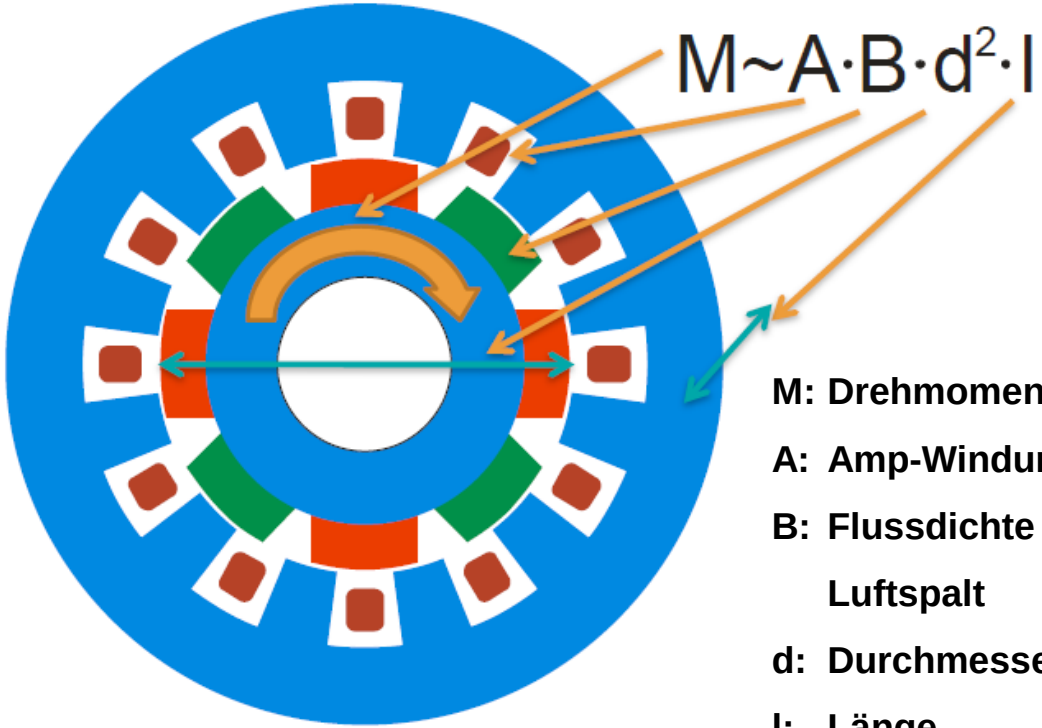


Quelle: Siemens



Anwendung der SL im Motor

Erhöhung des „A“ durch SL-Feldspulen im Stator



M: Drehmoment

A: Amp-Windungen

B: Flussdichte im Luftspalt

d: Durchmesser

l: Länge

Mechanisch zu beachten:

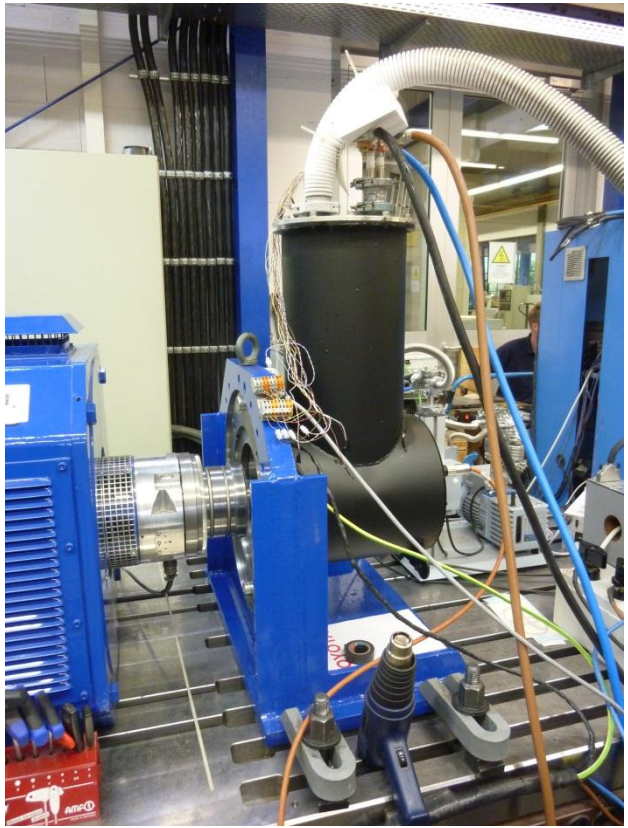
- **Kühlung im stehenden Maschinenteil**

Elektromagnetisch zu beachten:

- **AC-Anwendung von SL:**

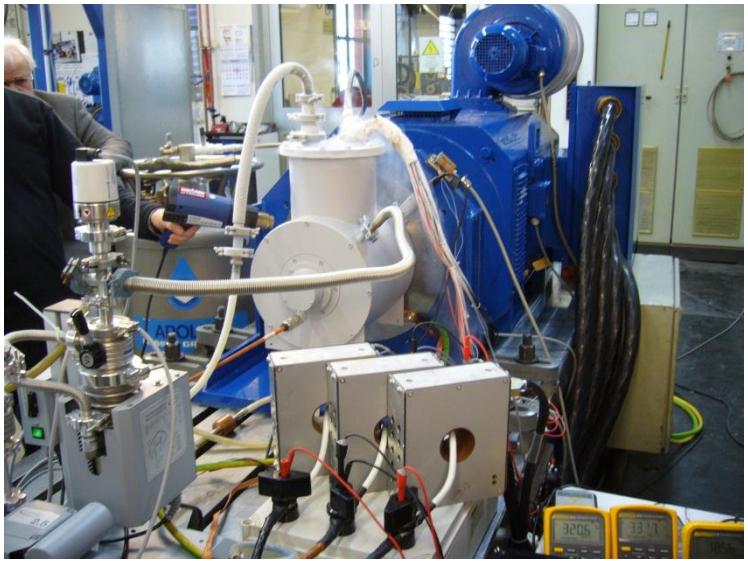
  Viele Randbedingungen!

SL – Motoren:
AC-Anwendung im Stator



SMFS:

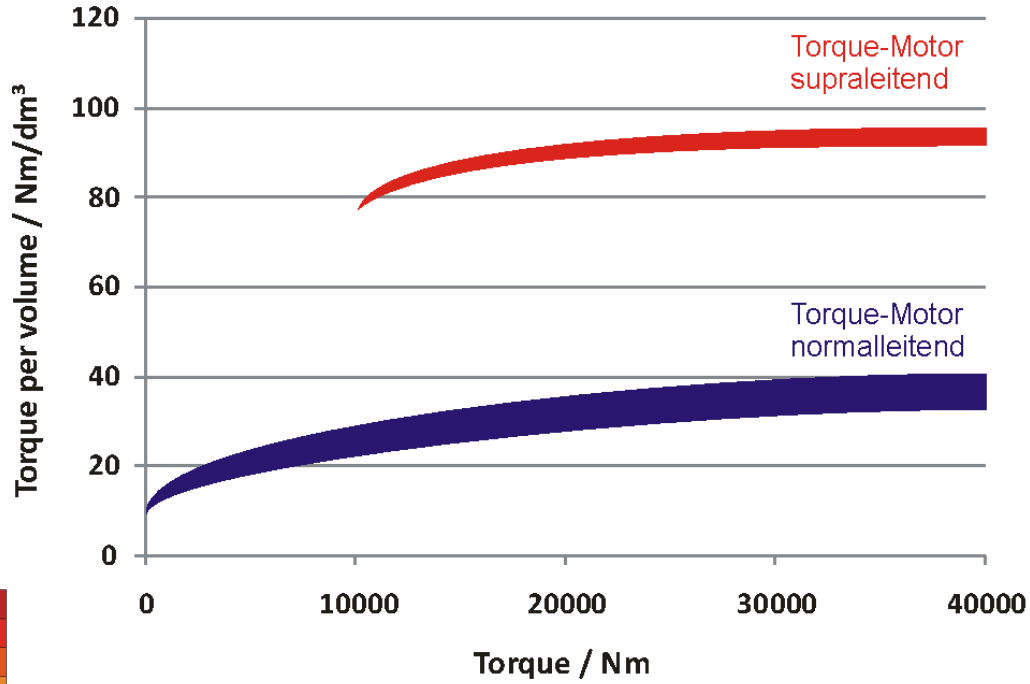
40 kW, 665 rpm, 575 Nm
77 K, lN_2
PM-Motor mit SL-Stator
Kraftdichte 200% PM-Motor

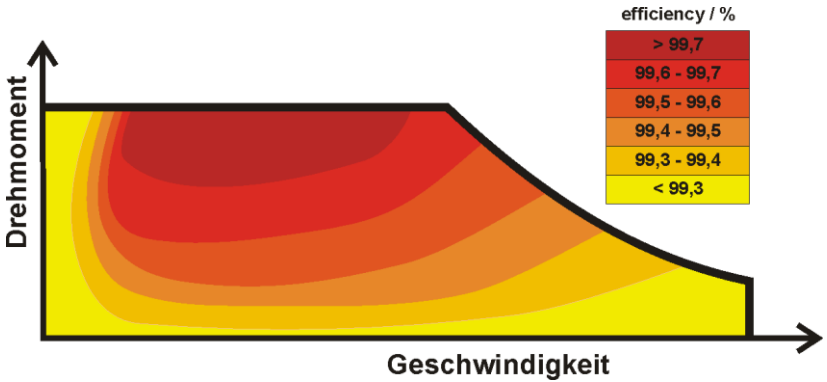


SL-Motoren

Potential von SL-Motoren:

- Kraftdichte > 200%
- Dynamik > 300%
- Gewicht/Größe 40…60%
- Wirkungsgrad …99,7%
- Materialverfügbarkeit

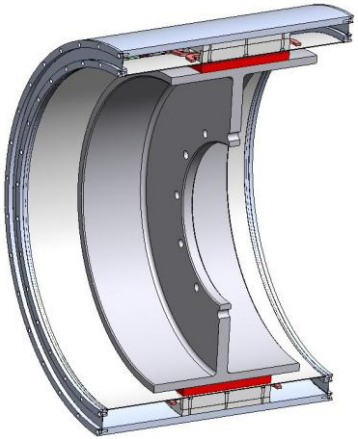




Anwendungen:

- Mobility (Flugzeug, Schiff, Fahrzeug)
- Generatoren
- Industrieantriebe

SuTor



Leistung:	**156**	**kW**
Geschwindigkeit:	**57**	**rpm**
Drehmoment:	**26.000**	**Nm**
Wirkungsgrad:	**99,6**	**%**
Dynamik:	**>10.000**	**rpm/s**
YBCOcc-Band:	**4**	**km**

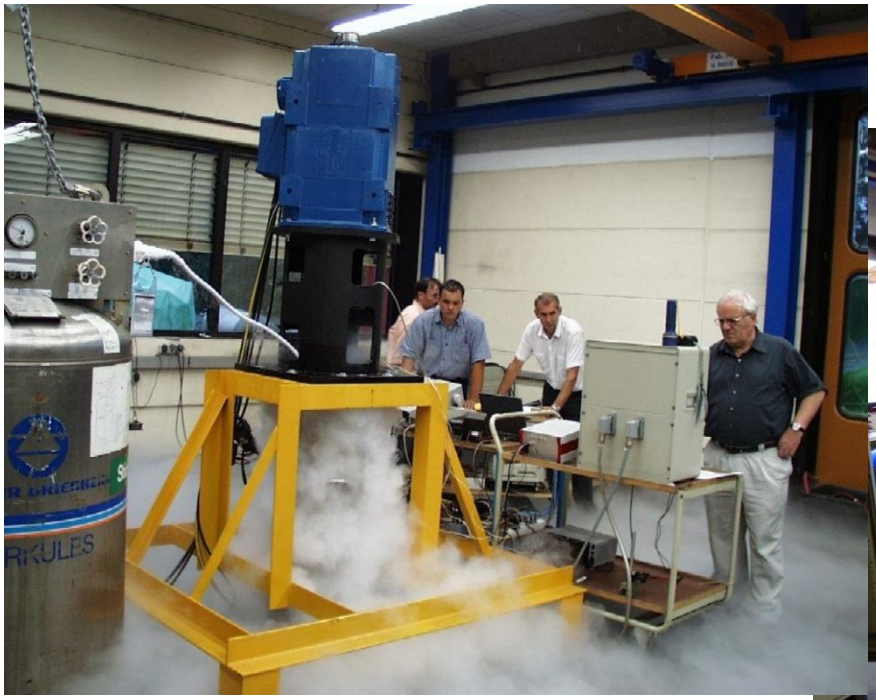
gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie FKZ 0 327 866 A

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Oswald Elektromotoren GmbH:
Entwicklung und Bau des supraleitenden Motors mit Kryostat

Hochschule Aschaffenburg:
Entwicklung und Bau eines modularen Umrichters zum optimierten Betrieb von supraleitenden Maschinen

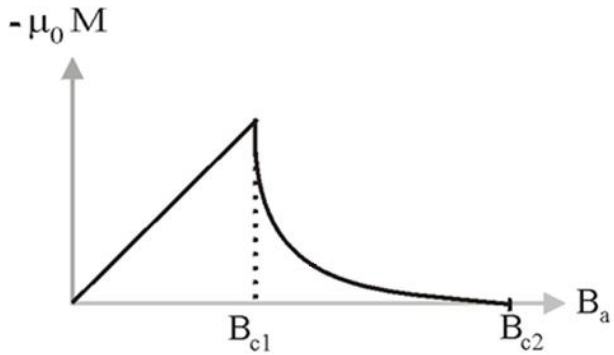
SuTor



Ziel: Industrienahe Funktionalität

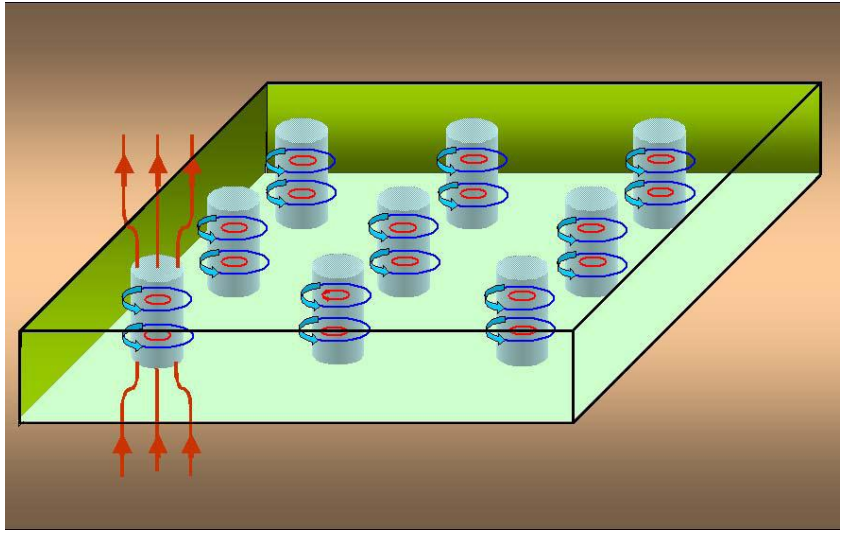
Kühlung als „Black Box“ statt „white fog“

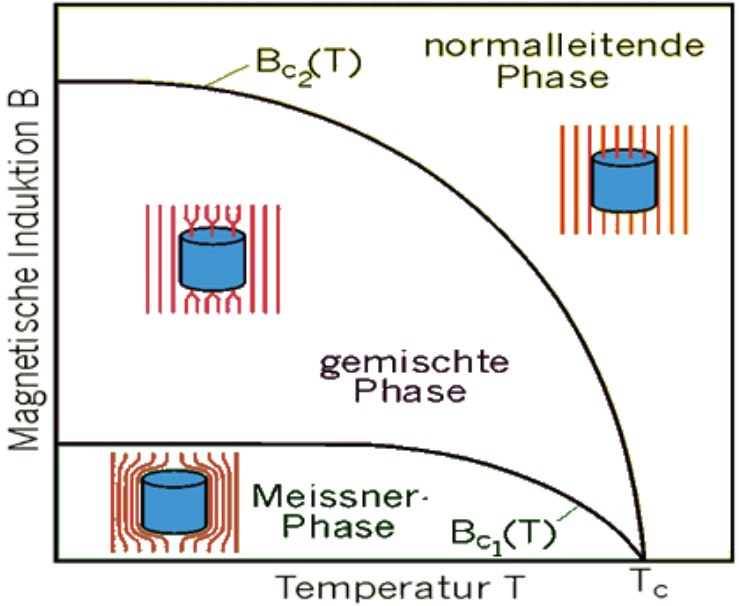
Grundlagen der SL



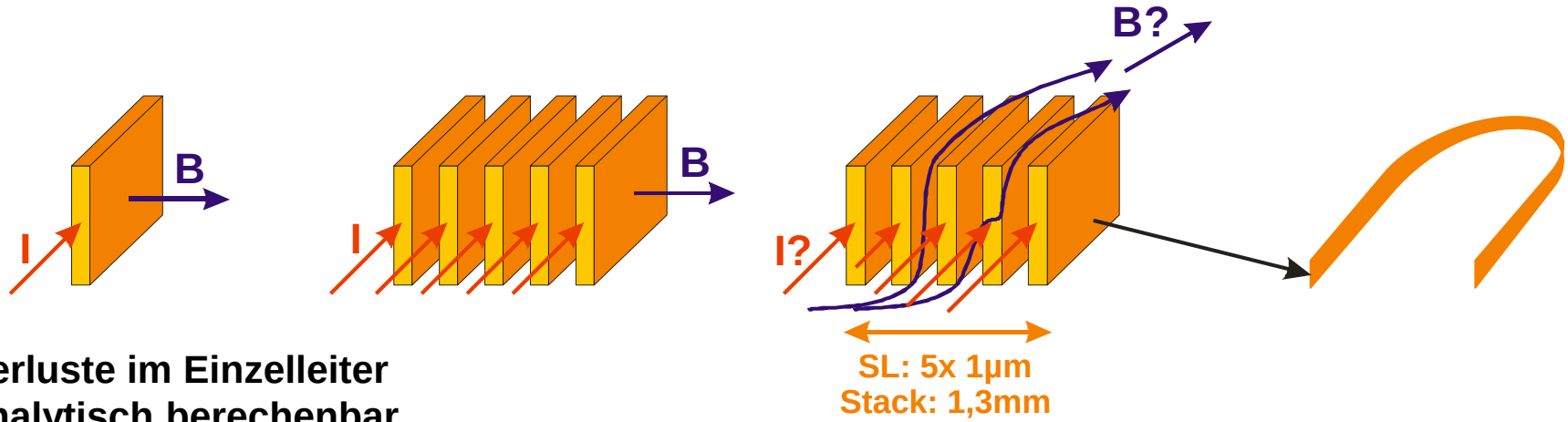
Hochtemperatur – SL:

In gemischter Phase Flusslinien durch SL mit je elementarem Flussquantum:
h/2e = 2,07 10-15 Tm²



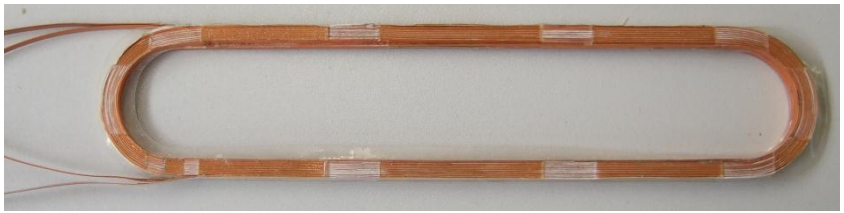


AC-Anwendung der SL



Verluste im Einzelleiter analytisch berechenbar

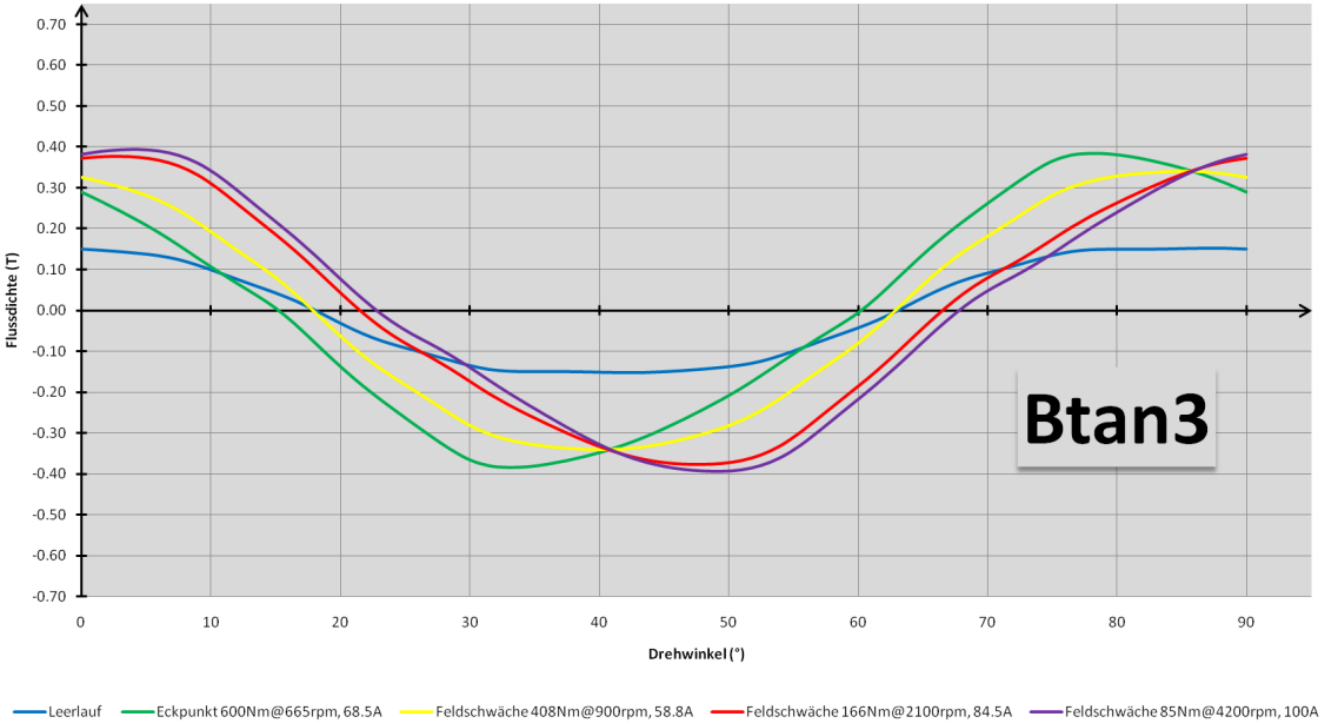
Gute analytische Näherungen für idealen Stack



Verhalten in Spulenform, ext. Feldern, unterschiedl. Strömen, Abschirmung, …?

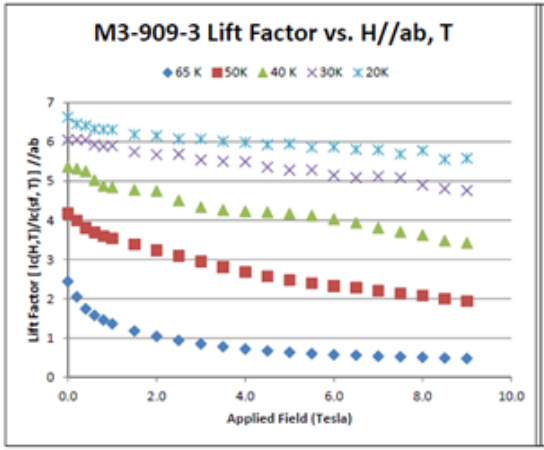
AC-Anwendung der SL

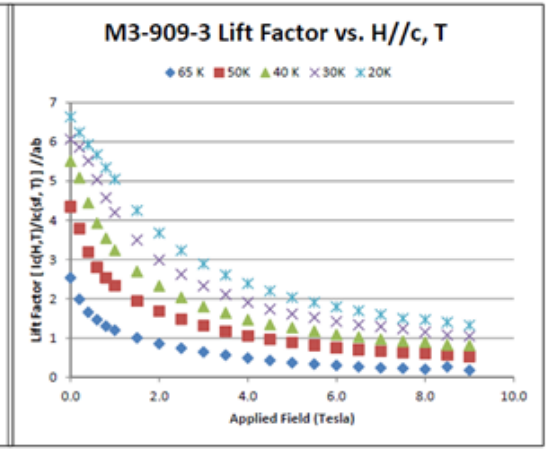
Numerische Feldberechnung des Querfeldes

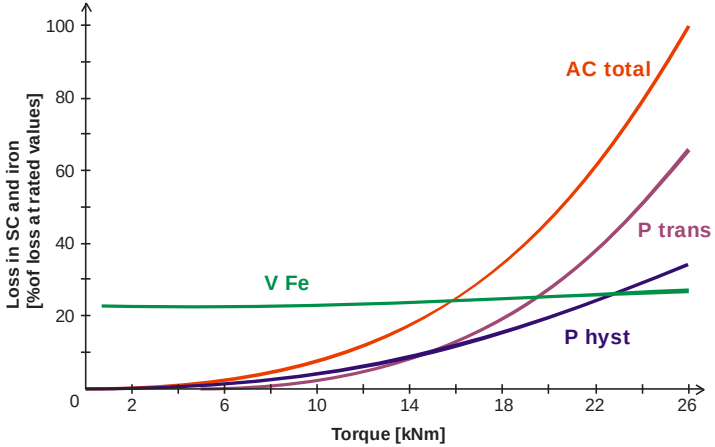


AC-Anwendung der SL

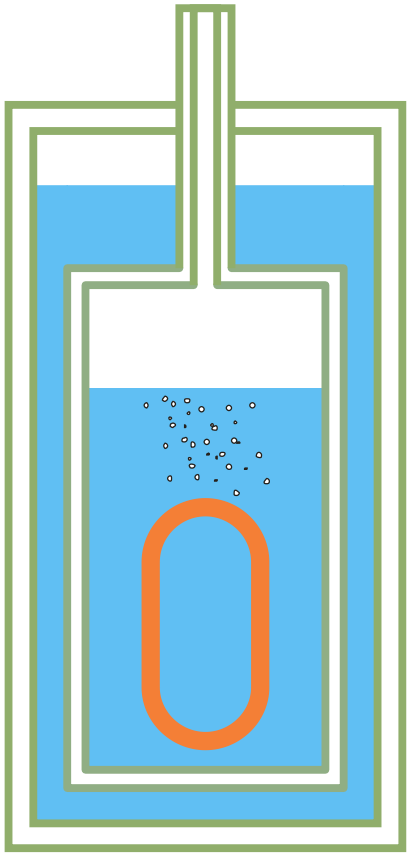
Aus Materialdaten und Rahmenbedingungen (ext. Feld, Strom, Temperatur, …) können Verluste im SL abgeschätzt werden.







AC-Anwendung der SL

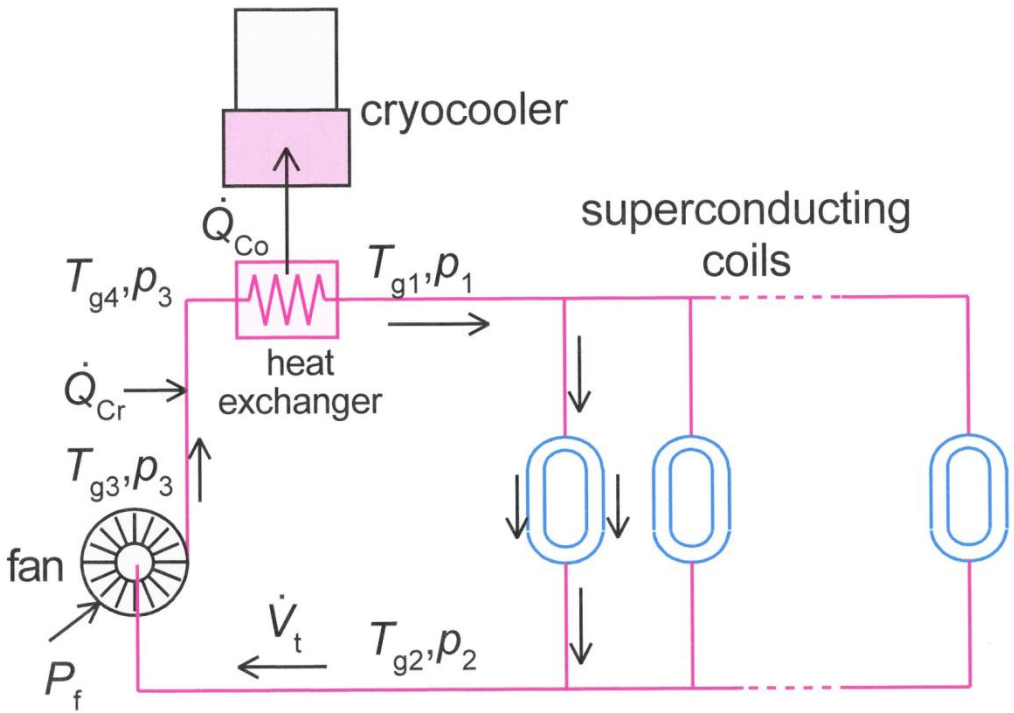


Kalorimetrische Messung der SL-Verluste:

- **ext. Felder**
- **Stromtransport**
- **Eigenfeld**

Temperaturabhängigkeit bis 20K im Aufbau

Kühlung der SL im Stator

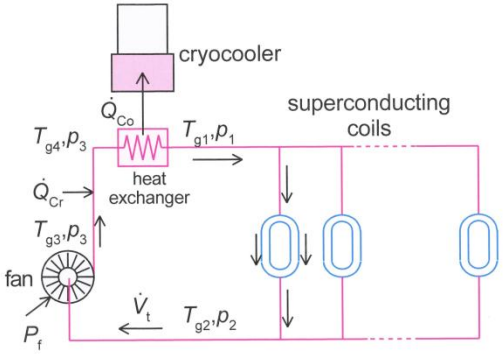


Optimaler Arbeitspunkt bei 40-50K

Abhängig von:

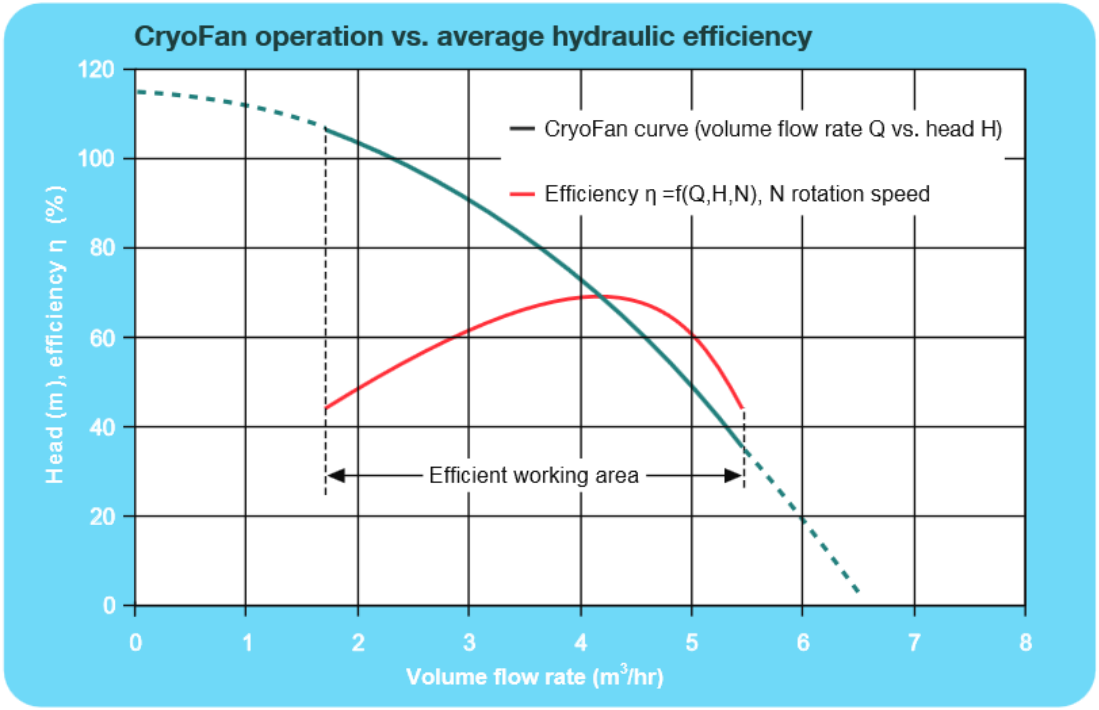
- **Materialdaten der SL**
- **Rückkühlung der Verlustwärme**
- **Material des Kryostaten**
- **Anforderungen**
- **Baugröße**
- **…**

Kühlung der SL im Stator

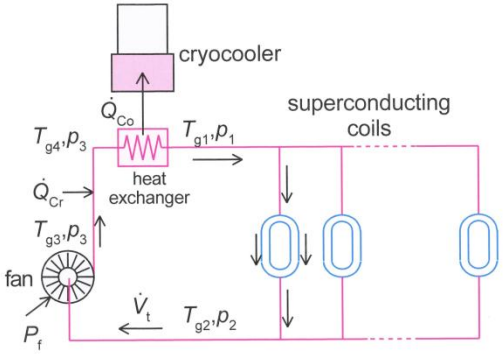


Quelle: CryoZone

Lüfter: Arbeitsbereich

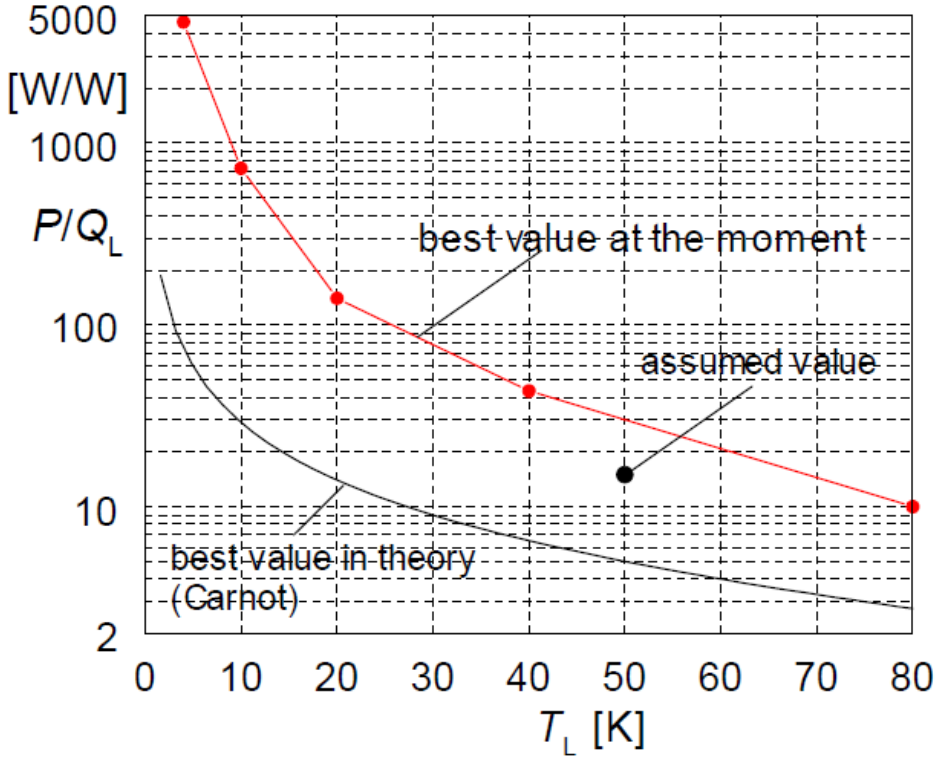


Kühlung der SL im Stator

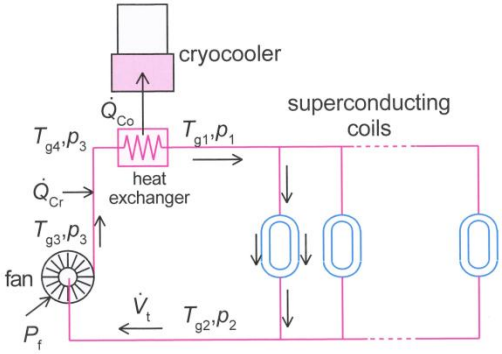


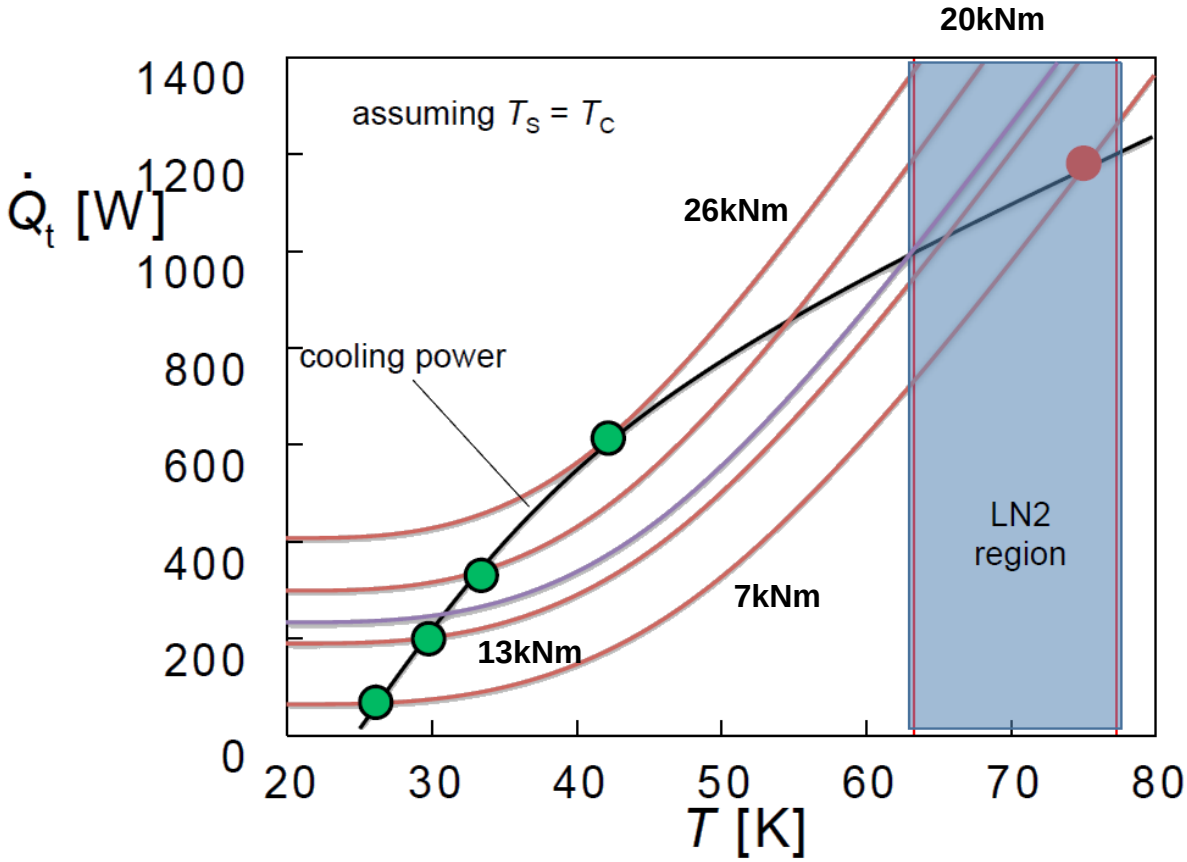
Quelle: Sumitomo

Rückkühler:
Leistungsaufnahme/Kühlleistung



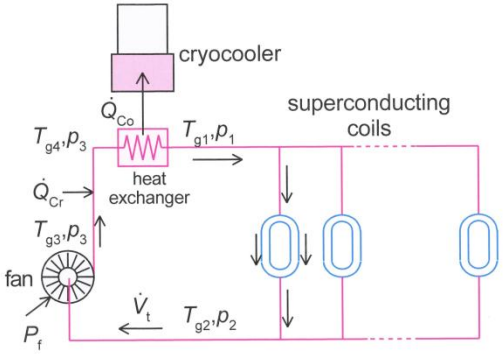
Kühlung der SL im Stator





Optimaler Arbeitspunkt bei 40-50K für div. Lastfälle

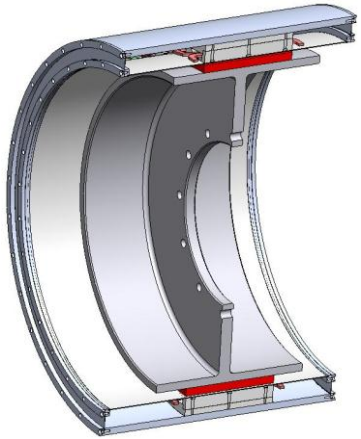
Umschichtung im SuTor-Projekt



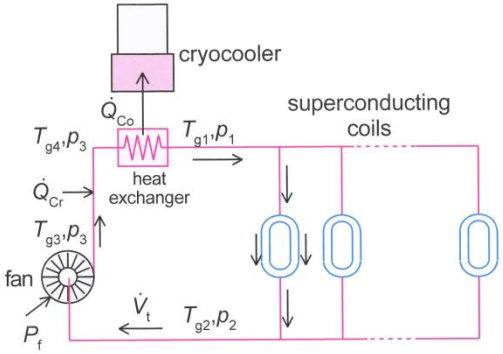
Aufwand für Kühlsystem
ca. 3x so groß wie für Motor

Umverteilung innerhalb des Projektes

Motor in vergleichbarer Größe zum lN2-System



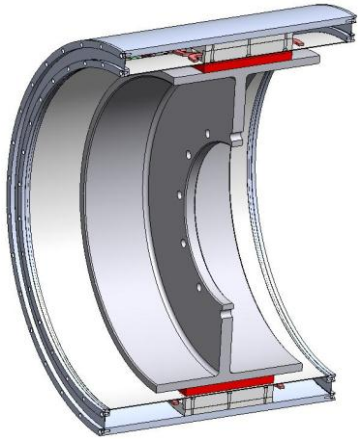
Umschichtung im SuTor-Projekt



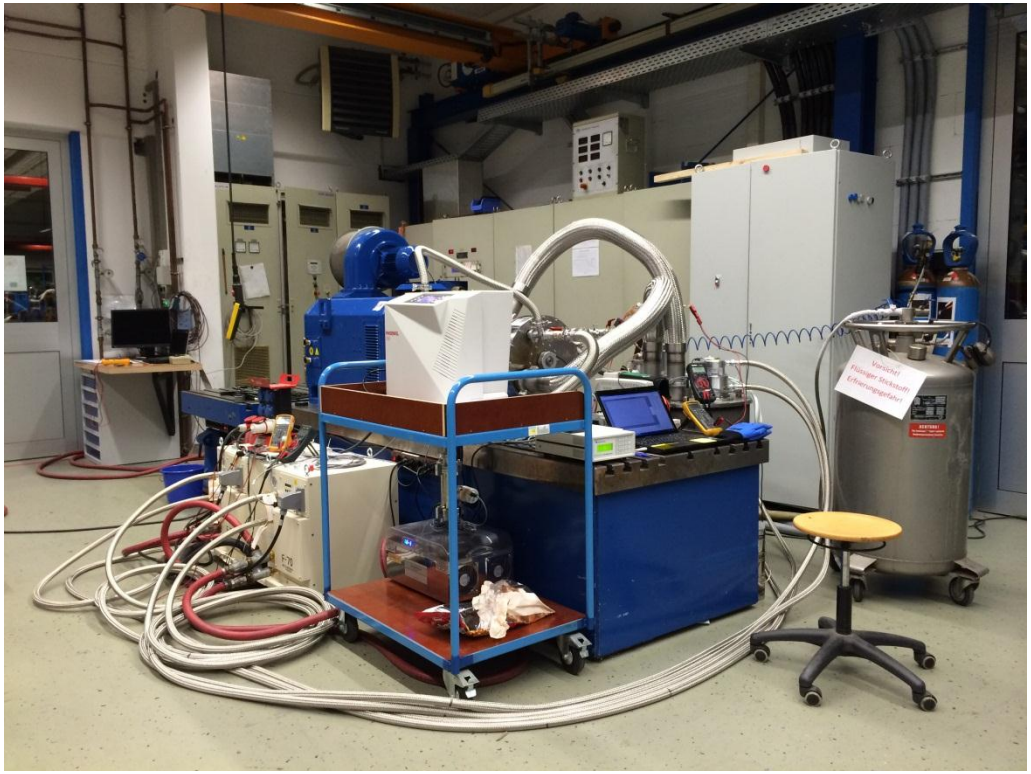
250W Kühlleistung bei 50K

Umverteilung innerhalb des Projektes

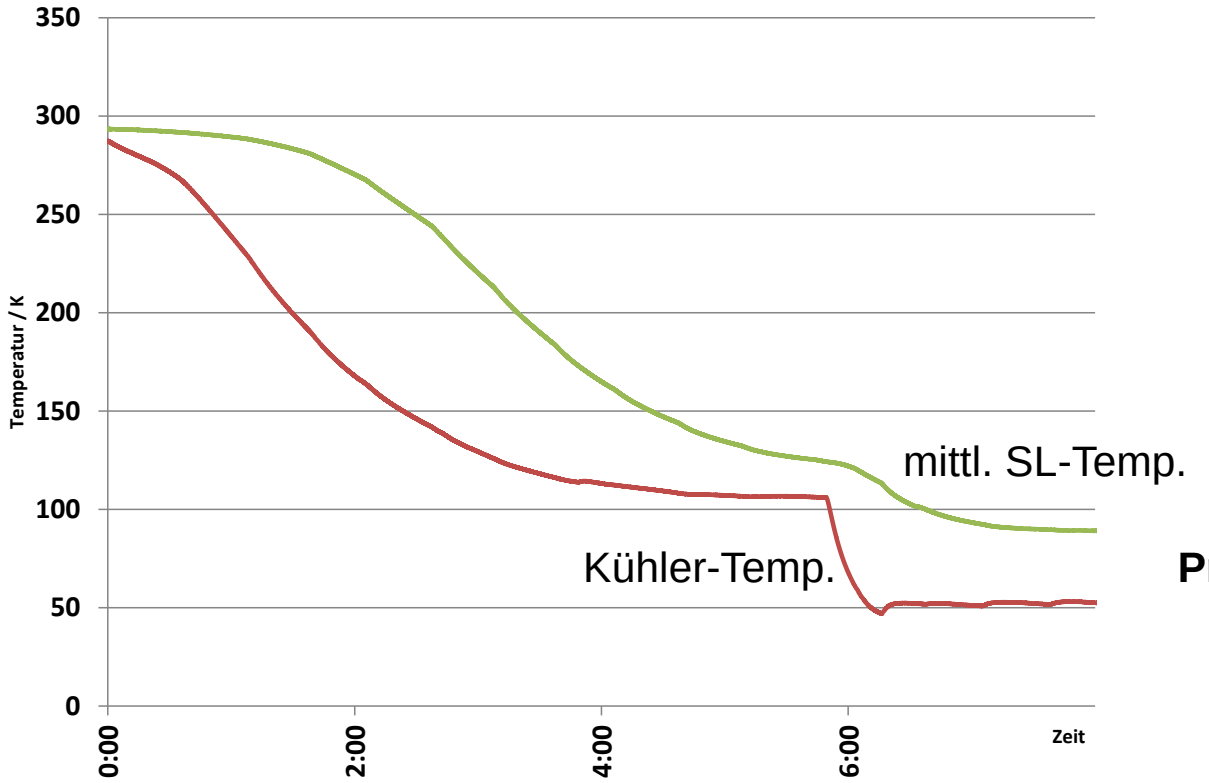
600Nm, 650rpm



mini-SuTor Prüfaufbau



Abkühlung



Erste Ergebnisse der Abkühlung

Probleme mit Lüfter

Fazit

- SuTor Prototyp im Test
- Kombination von SL im Stator und Rotor
- Untersuchung weiterer Motorkonzepte

Ausblick Steigerungspotential

Motor	SL Stator	SL Rotor	Komplexität	Umgesetzt?
Asynchron	---	< 100%	Einfach	Studie
Reluktanz	---	< 100%	Sehr Einfach	Prototypen
PM-Synchron	> 200%	---	Normal	Prototypen
Fremderregt	---	> 200%	Etw. Aufwändig	Prototypen
AC+DC	> 200%	> 200%	Aufwändig	Konzepte
Bulk	---	> 100%	Aufwändig	Prototypen
AC+Bulk	> 200%	> 100%	Sehr Aufwändig	Konzepte
Meissner	---	---		Studie
????				