

# Supraleitung in der Energietechnik: Welche Perspektiven eröffnen sich?

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe, Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Technische Physik

17. März 2014, DPG Frühjahrstagung 2014

KIT-ZENTRUM ENERGIE

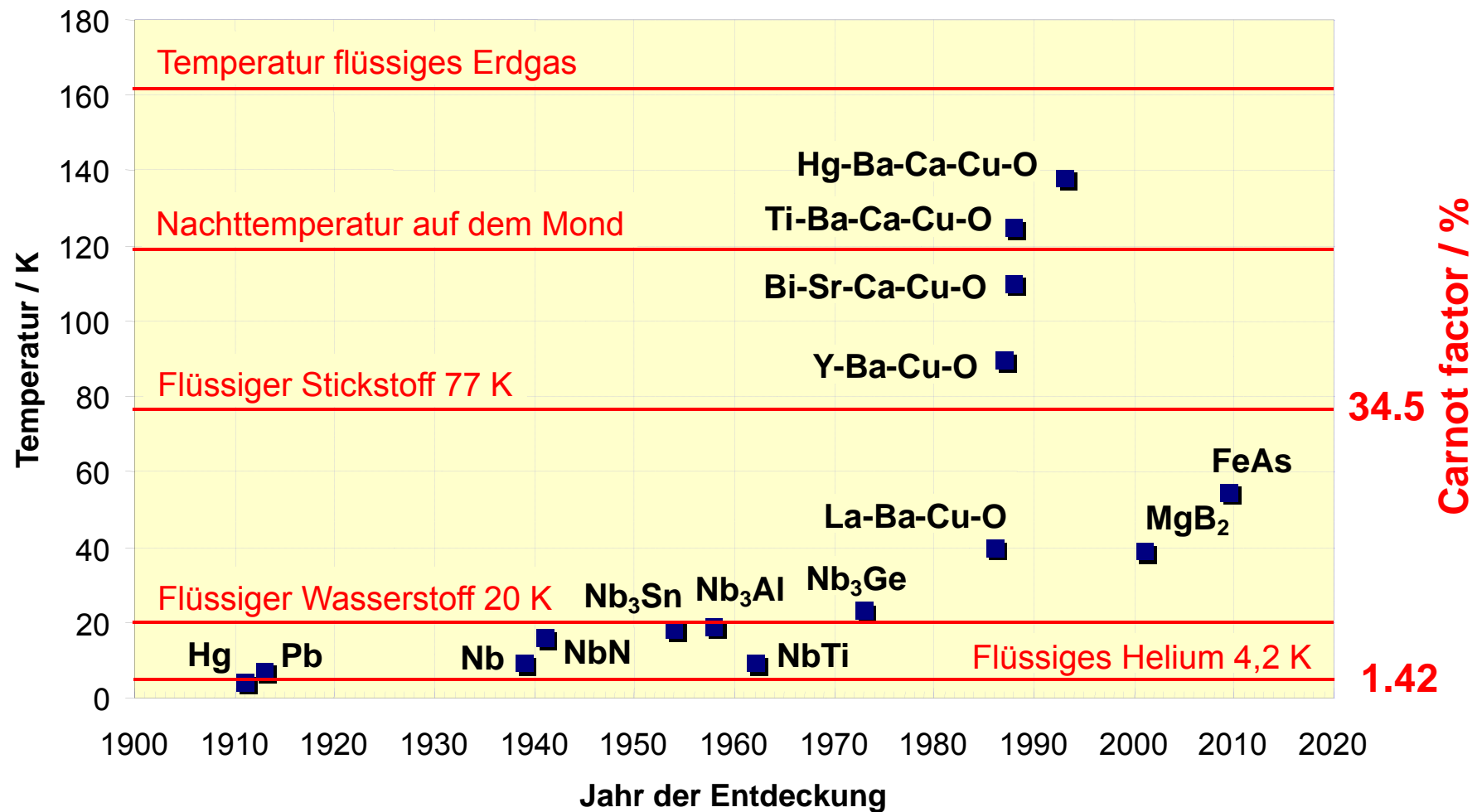


## Inhaltsübersicht

- Hochtemperatur-Supraleiter
- Supraleitende Kabel
- Supraleitende rotierende Maschinen
- Supraleitende Strombegrenzer
- Supraleitende Transformatoren
- Supraleitende magnetische Energiespeicher
- Zusammenfassung

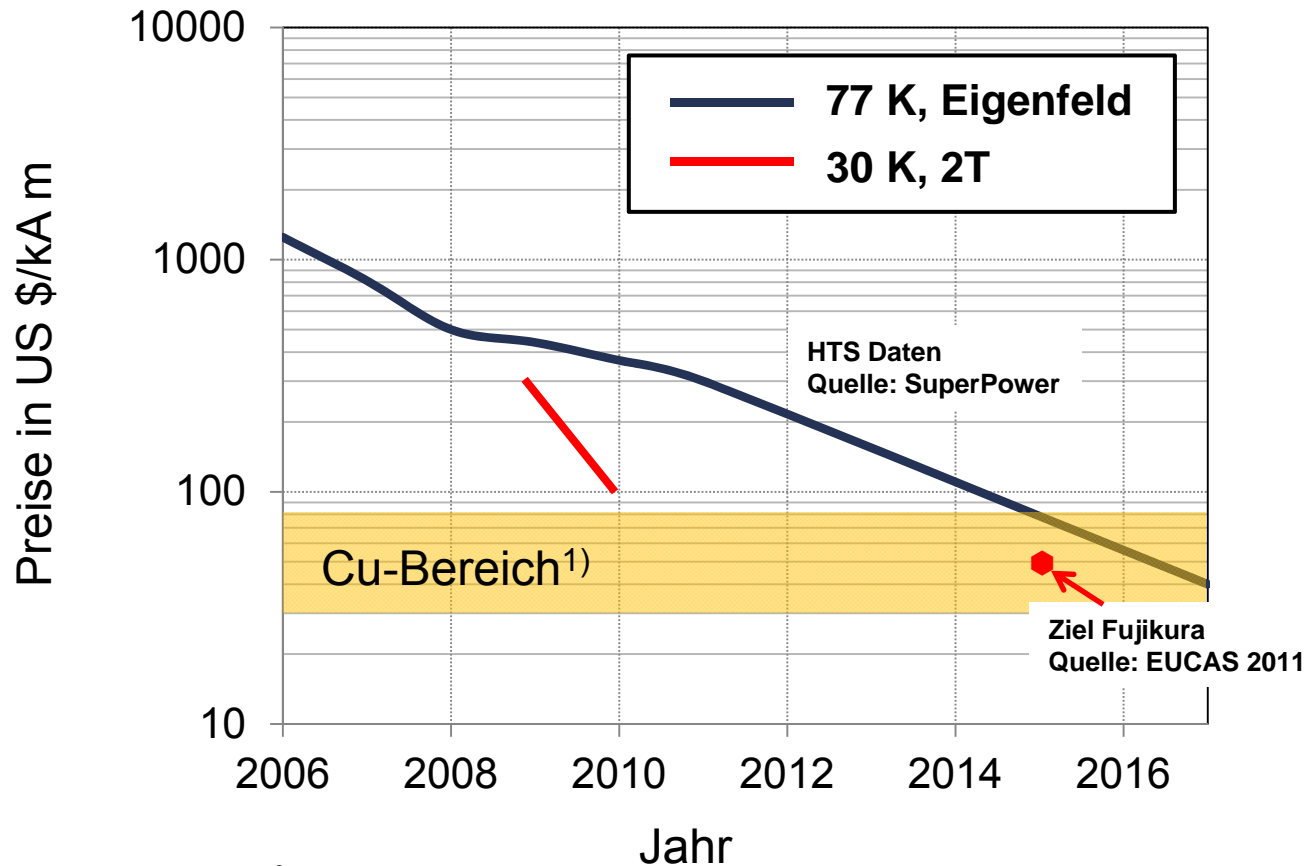
## Stand der Entwicklung und Anwendungsmöglichkeiten

# Die Entdeckung von Supraleitern



Hochtemperatur-Supraleiter sind unerlässlich für Anwendungen in der Energietechnik

# Preisentwicklung HTS Leiter der 2. Generation



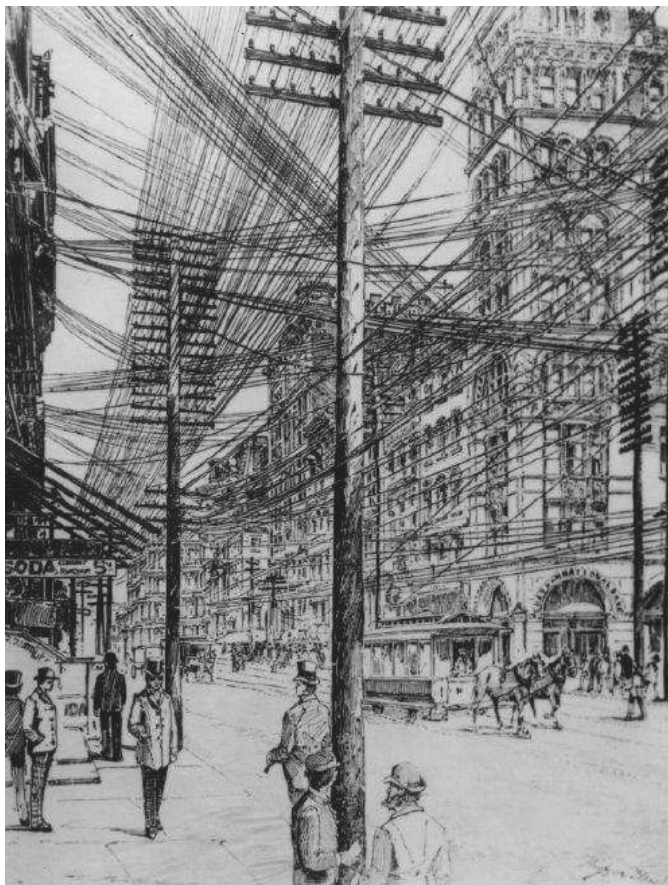
1) Reine Cu Materialpreise mit 1 A/mm<sup>2</sup>

Das Preis zu Stromtragfähigkeitsverhältnis von Kupfer kann von HTS der 2. Generation in einigen wenigen Jahren unterschritten werden

# Inhaltsübersicht

- Hochtemperatur-Supraleiter
- **Supraleitende Kabel**
- Supraleitende rotierende Maschinen
- Supraleitende Strombegrenzer
- Supraleitende Transformatoren
- Supraleitende magnetische Energiespeicher
- Zusammenfassung

# Warum Supraleitende Kabel?



Manhattan „überirdisch“ um 1880



Manhattan „unterirdisch“ 2003

Supraleitende Kabel ermöglichen eine deutlich höhere Übertragungsleistung bei gleichem Kabeldurchmesser

# Systemvorteile Supraleitender Kabel

## Legung

- Geringerer Flächen- und Trassenbedarf (Innenstädte, Teilerdverkabelung)
- Geringerer Aufwand bei der Kabellegung

## Umwelt und Marketing

- Keine elektromagnetischen Streufelder und Bodenerwärmung
- Hohe Energie- und Ressourceneffizienz

## Betrieb

- Höhere Übertragungsleistung
  - bei niedrigerer Spannungsebene (Substitution von Hochspannung)
  - bei gleichem Außendurchmesser (Wegerecht bei Retrofit)
- Niedrigere Impedanz
  - Niedrigere Spannungsüberhöhung im Leerlauf
  - Niedrigerer Spannungsfall
  - Betrieb mit natürlicher Leistung möglich

# Stand der Entwicklung Supraleitender AC Kabel

## Columbus



**Ultera**  
 13.2 kV, 3 kA, 200 m  
 Triaxial™ Design  
 BSCCO 2223  
 Inbetriebnahme 2006  
 Sehr hohe Verfügbarkeit

Bild:  
 Ultera

## LIPA



**Nexans**  
 138 kV, 2.4 kA,  
 600 m  
 Single coaxial design  
 BSCCO 2223  
 Inbetriebnahme 2008

Bild:  
 Nexans

## Gochang



Figure: LS Cable

**LS Cable**  
 22.9 kV, 50 MVA, 100 m  
 BSCCO 2223  
 Inbetriebnahme 2007  
 500 m Feldtest mit YBCO  
 in 2011



# Stand der Entwicklung Supraleitender AC Kabel

Hersteller	Ort/Land/Jahr	Typ	Daten	HTSL
Innopower	Yunnan, CN, 2004	WD	35 kV, 2 kA, 33 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2006	CD	34.5 kV, 800 A, 350 m, 3-ph.	Bi 2223
Ultera	Columbus, US, 2006	Triax	13.2 kV, 3 kA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Gochang, KR, 2006	CD	22.9 kV, 1.25 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
LS Cable	Gochang, KR, 2007	CD	22.9 kV, 1.26 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2007	CD	34.5 kV, 800 A, 30 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Hannover, D, 2007	CD	138 kV, 1.8 kA, 30 m, 1-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, 2008	CD	138 kV, 1.8 kA, 600 m, 3-ph.	Bi 2223
Nexans	Spain, 2008	CD	10 kV, 1 kA, 30 m, 1-ph	YBCO
Ultera	New York, US, 2013	Triax	13.8 kV, 4 kA, 240 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, 2011	CD	138 kV, 2.4 kA, 600 m, 1-ph.	YBCO
LS Cable	Gochang, KR, 2011	CD	154 kV, 1 GVA, 100 m, 3-ph.	YBCO
LS Cable	Seoul, KR, 2011	CD	22.9 kV, 50 MVA, 500 m, 3-ph.	YBCO
Sumitomo	Yokohama, JP, 2012	CD	66 kV, 200 MVA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	TEPCO, JP	CD	66 kV, 5 kA	to be defined
Furukawa	TEPCO, JP	CD	275 kV, 3 kA	Bi 2223
Sumitomo	Chubu U., JP, 2010	CD	10 kV, 3 kA DC, 20 m, 200 m	Bi 2223
VNIIEP	Moscow, RU, 2010	CD	20 kV, 200 m	Bi 2223
Nexans	Essen, D, 2013	CD	10 kV, 2.4 kA, 1000 m, 3 ph.	Bi 2223

# Ampacity Projekt, 40 MVA, 10 kV, 1 km

**Projektpartner:** RWE, Nexans, KIT

**Projektziel:** Entwicklung und Feldtest eines 40 MVA, 10 kV supraleitenden Kabels in Kombination mit einem supraleitenden Strombegrenzer

**Projektbeginn:** September 2011

**Start der Inbetriebnahme:** Dezember 2013

VORWEG GEHEN




AMPACITY  
Smart grids for the city



KIT  
Karlsruhe Institute of Technology

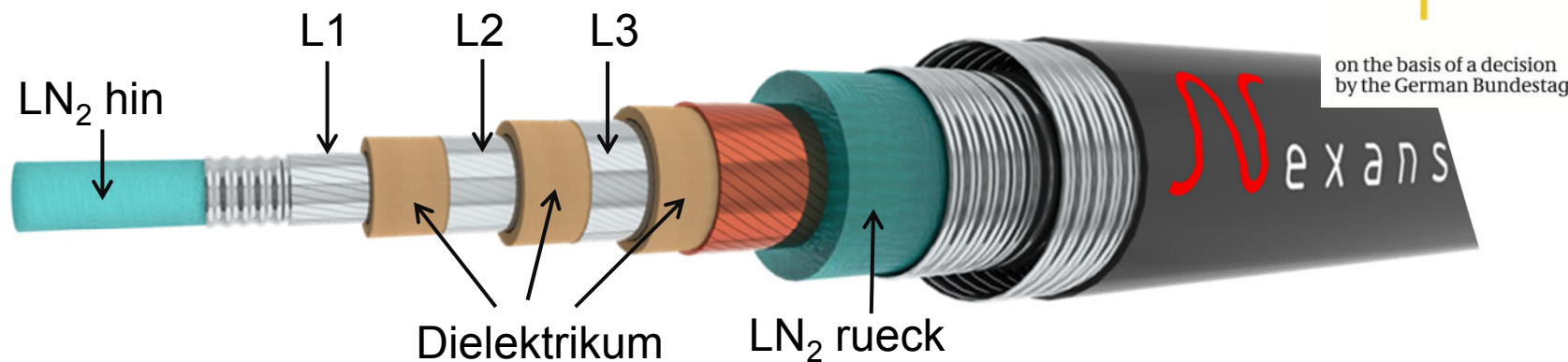


PTJ  
Projekträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich

Supported by:



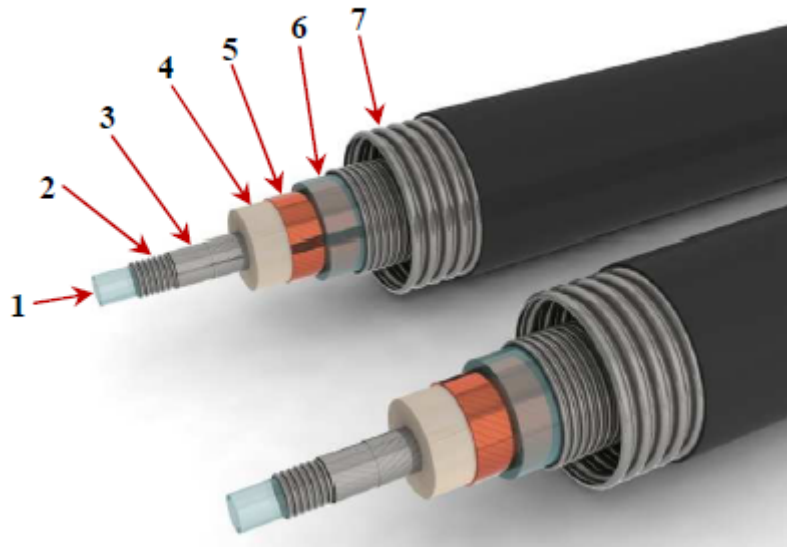
Federal Ministry  
of Economics  
and Technology



on the basis of a decision  
by the German Bundestag

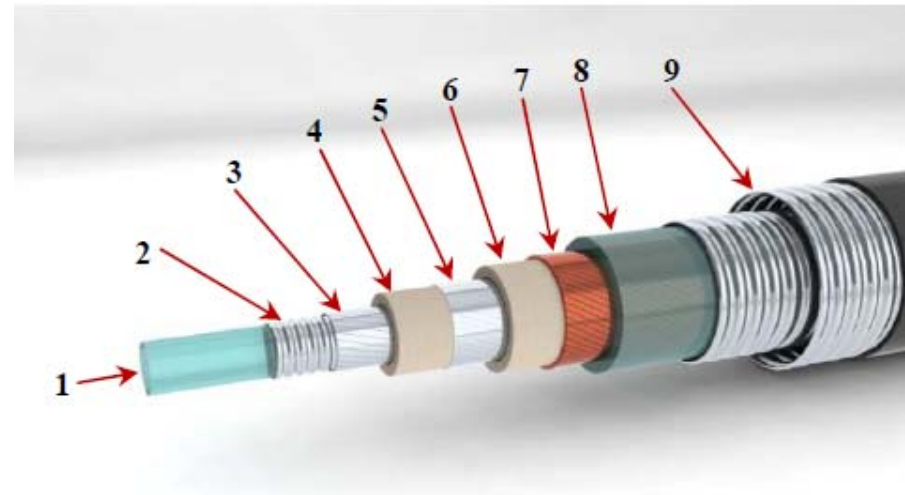
# Supraleitende HVDC Kabel

## „Single Core“ Design



- 1 LN<sub>2</sub> Kühlkanal
- 2 flexibler Former
- 3 HTS Tapes
- 4 PPLP elektrische Isolation
- 5 Kupferschirm
- 6 LN<sub>2</sub> Kühlkanal
- 7 Kryostat

## Konzentrisches Design



- 1 LN<sub>2</sub> Kühlkanal
- 2 flexibler Former
- 3/5 HTS Tapes
- 4/6 PPLP elektrische Isolation
- 7 Kupferschirm
- 8 LN<sub>2</sub> Kühlkanal
- 9 Kryostat

Quelle: M. Stemmler, B. West, E. Marzahn, N. Lallouet, F. Schmidt, High Temperature Superconducting Power Cables for HVDC Applications, CIGRE Colloquium 2012,

# Anwendungen Supraleitender DC Kabel

## Industriehochstromschienen



Bild: Vision Electric

## Einbindung regenerativer Energien

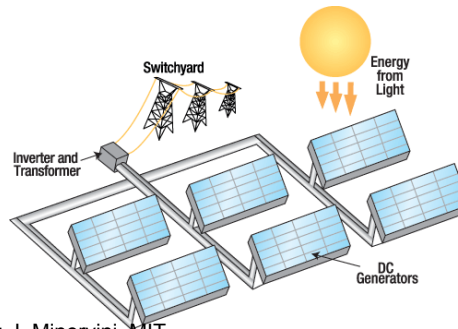


Bild: J. Minervini, MIT

## Anbindung von Datacentern



Bild: J. Minervini, MIT

## Teilerdverkabelung von HVDC Leitungen

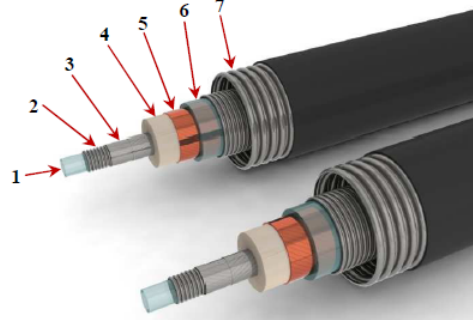


Bild: Nexans

## Fernübertragung großer Energiemengen

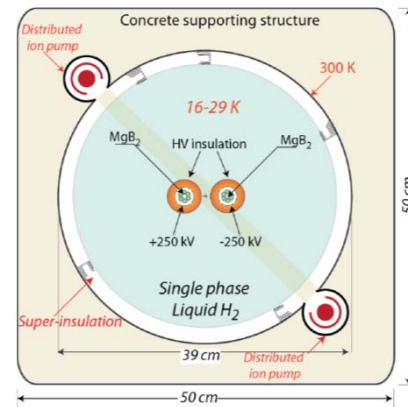


Bild: C. Rubbia, IASS

## Degaussing von Schiffen

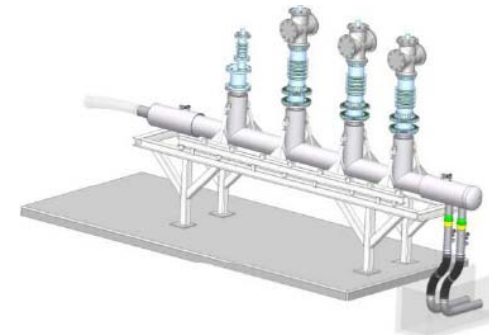


Bild: B. Fitzpatrick, HTS Peerreview2010

## Inhaltsübersicht

- Hochtemperatur-Supraleiter
- Supraleitende Kabel
- **Supraleitende rotierende Maschinen**
- Supraleitende Strombegrenzer
- Supraleitende Transformatoren
- Supraleitende magnetische Energiespeicher
- Zusammenfassung

# Systemvorteile supraleitender rotierender Maschinen

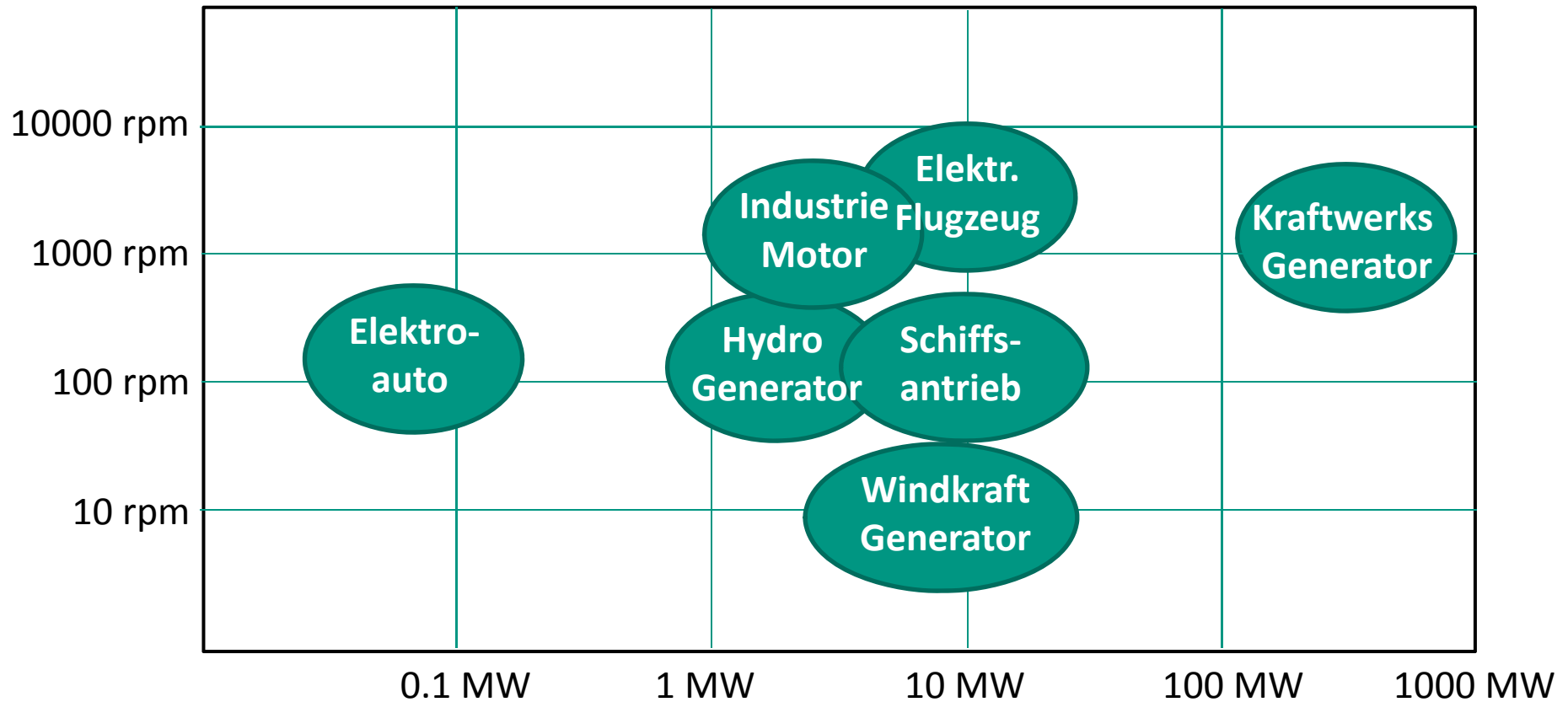
## Supraleitung ermöglicht

- Höhere Stromdichte
- Höhere Flussdichte im Luftspalt
- Verzicht auf Eisen

## Vorteile supraleitender rotierender Maschinen (z.B. Synchronmaschine)

- Kleineres Bauvolumen und Gewicht ( $V_{SL}/V_{KONV} \approx 0,5$ )
- Kleinere synchrone Reaktanz ( $X_{dSL}/X_{dKONV} \approx 0,2$ )
  - Größerer Stabilitätsbereich
  - Höherer kapazitiver Blindleistungsbereich
  - Höhere Überlastbarkeit ( $(M_{KIPP}/M_{nenn})_{SL} > 3$ )
  - Unempfindlicher gegen Lastschwankungen
- Höherer Wirkungsgrad (Vernachlässigbare Erregerverluste)
- Geringere Geräusentwicklung und weniger Vibrationen
- Hohe Dynamik und höhere Geschwindigkeiten

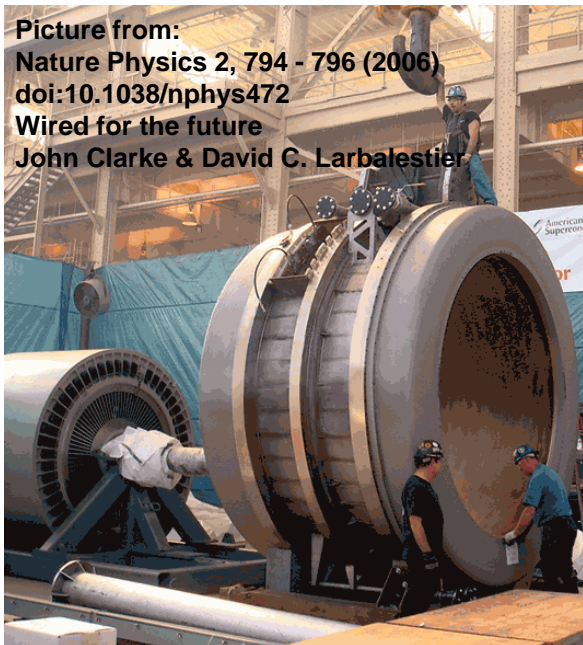
# Anwendungsmöglichkeiten supraleitender rotierender Maschinen



Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen für supraleitende rotierende Maschinen.

# Stand der Entwicklung supraleitender rotierender Maschinen

## Schiffsantrieb



AMSC  
 36.5 MVA, 6 kV  
 120 rpm  
 8 pole, 75 to  
 Wirkungsgrad > 97 %  
 Abmessungen: 3,4m x 4,6m x 4,1m

## EU „Hydrogenie“ Wasserkraftgenerator



GE/Converteam  
 1.790 MW, 5.25 kV  
 214 rpm, 77.3 kNm  
 28 pole, 32.7 to  
 4.7 m x 5.2 m x 3.5 m  
 Tests in 2012

## Schiffsantrieb



Siemens  
 4 MW, 3.1 kV  
 120 rpm, 320 kNm  
 37 to  
 50 km HTSL  
 Test in 2010



# Stand der Entwicklung supraleitender rotierender Maschinen

Hersteller / Land	Maschine	Zeit
AMSC (US)	5 MW demo-motor	2004
	8 MVA, 12 MVA synchronous condenser	2005/2006 ( <b>Feldtest</b> )
	40 MVA generator design study	2006
	36 MW ship propulsion motor 8 MW wind generator design study	2008 2010
GE (US)	100 MVA utility generator	2006 (beendet)
	5 MVA homopolar induction motor	2008
LEI (US)	5 MVA high speed generator	2006
Reliance Electric (US)	10.5 MVA generator design study	2008
Kawasaki (JP)	1 MW ship propulsion	200?
IHI Marine, SEI (JP)	365 kW ship propulsion motor	2007
	2.5MW ship propulsion motor	2010
Doosan, KERI (Korea)	1 MVA demo-generator	2007
	5 MW motor ship propulsion	2011
Siemens (Germany)	4 MVA industrial generator	2008 ( <b>Feldtest</b> )
	4 MW ship propulsion motor	2010
Converteam (UK), now GE	1.25 MVA hydro-generator	2012
	500 kW demo-generator	2008
	8 MW wind generator design study	2010

# Stand der Entwicklung 4 MW Synchrongenerator, Siemens

## 4 MW HTS II – Langzeittest in der Siemens Motorenfabrik in Nürnberg



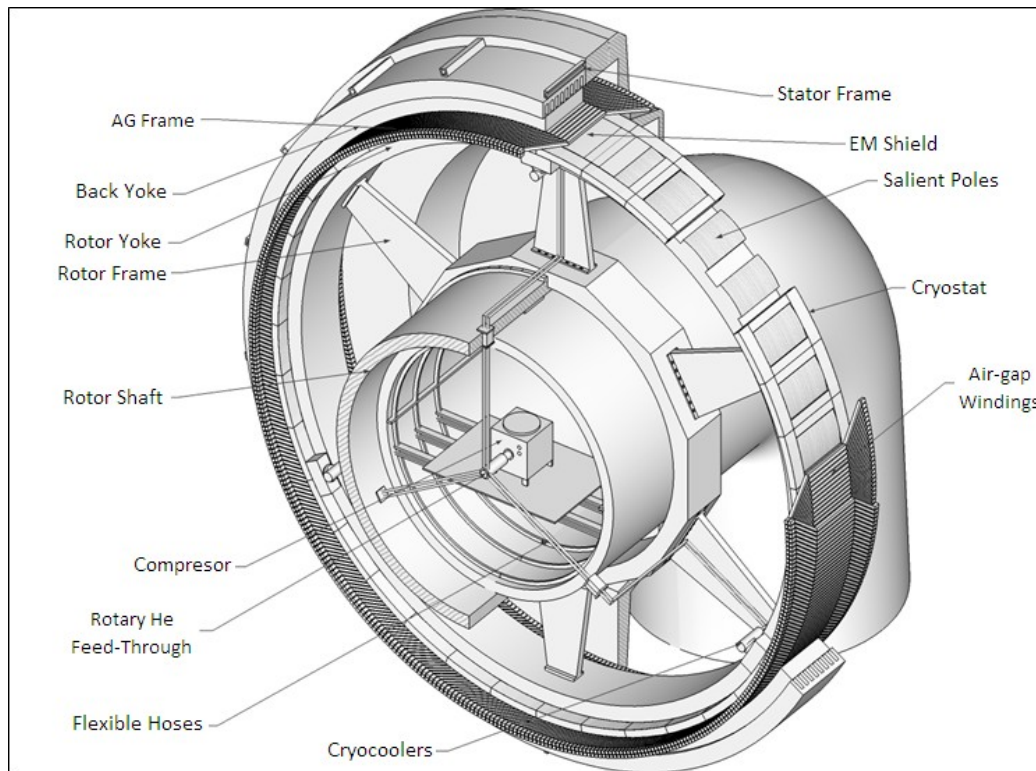
Figure: Siemens

### Test Ergebnisse:

- Verluste reduziert um 50 %
- 100 % kapazitive Leistung
- Hohe Überlaststabilität
- Geringer Spannungsfall
- Geringe Netzurückwirkungen
- Mehr als 7500 h Betriebsstunden
- Sicherer Betrieb

Durch HTSL und Kühlung wurde kein Ausfall verursacht!  
Alle Betriebszustände und Schalthandlungen wurden von dem System toleriert!

# Stand der Entwicklung Suprapower Projekt ([www.suprapower.fp7-eu](http://www.suprapower.fp7-eu))



## Daten:

10 MW, 8.1 rpm und 11.8 MN·m  
MgB<sub>2</sub> supraleitende Erregerspule  
60 warme Eisenpole  
230 kAm  
11.9 m Durchmesser Luftspalt  
0.52 m Länge  
Gesamtgewicht ~ 200 t  
Vollastwirkungsgrad > 95%  
Wartungsintervall 1 Jahr

Projektziel: Entwicklung eines Designs für 10 MW supraleitender Windkraftgenerator und Bau und Test eines 500 kW Demonstrators

# Zukünftige weitere Anwendungsmöglichkeiten

## All electric aircraft



Figure: EADS

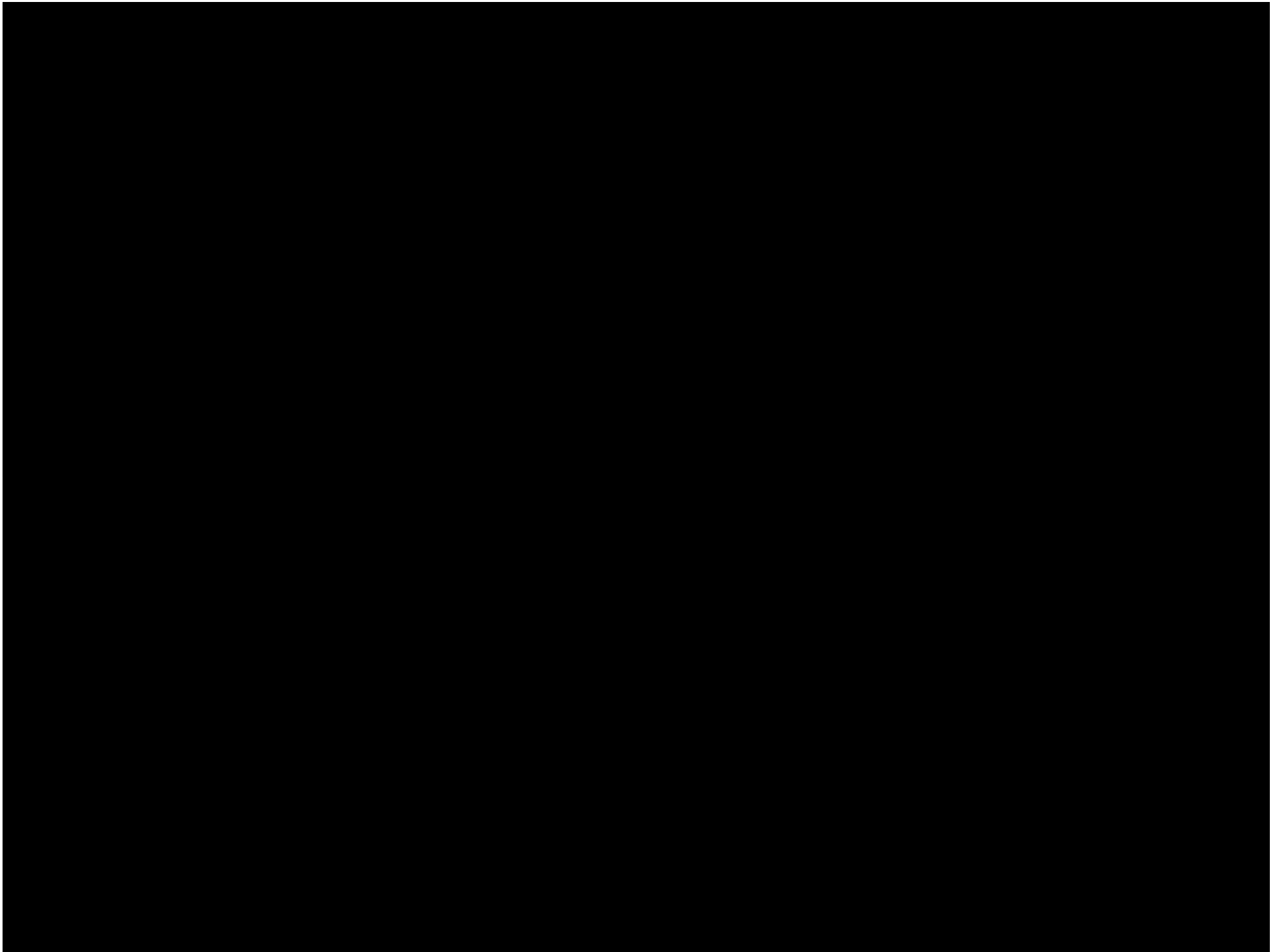
## Autoantriebe

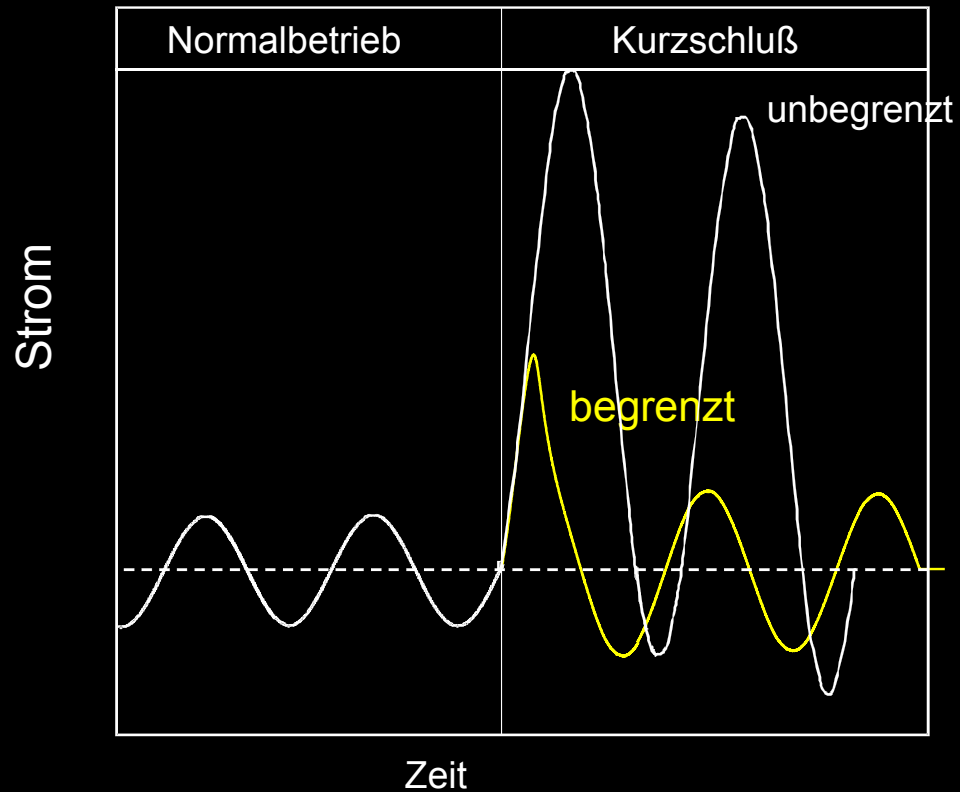


Bild: Sumitomo, Toyota

## Inhaltsübersicht

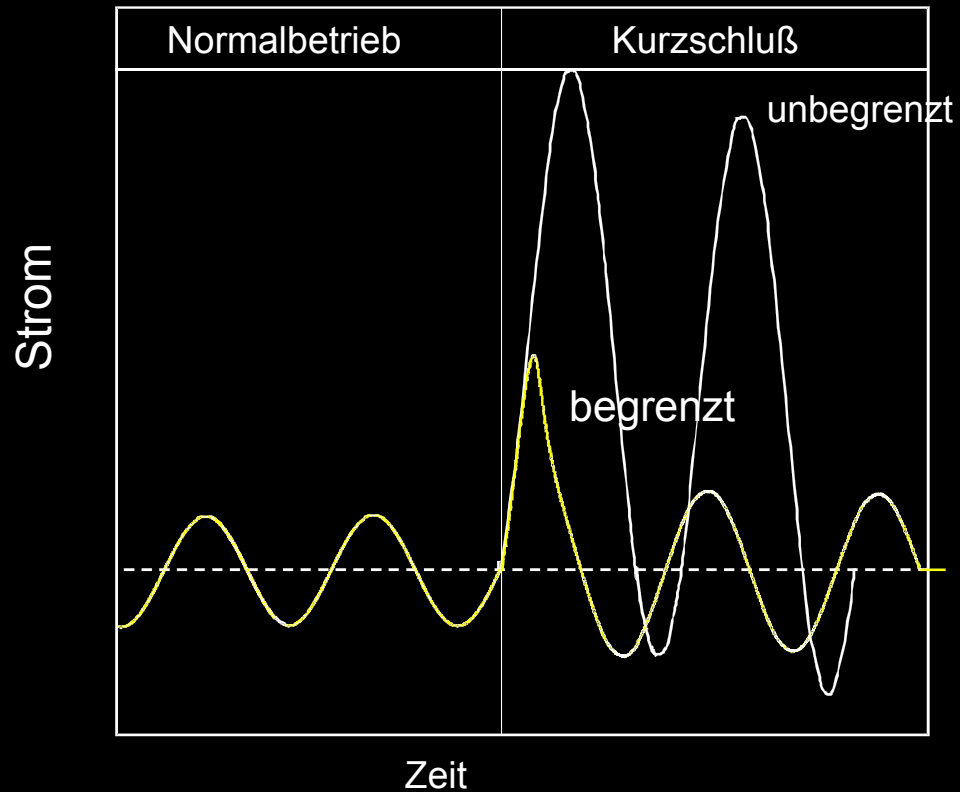
- Hochtemperatur-Supraleiter
- Supraleitende Kabel
- Supraleitende rotierende Maschinen
- **Supraleitende Strombegrenzer**
- Supraleitende Transformatoren
- Supraleitende magnetische Energiespeicher
- Zusammenfassung





### Idealer Strombegrenzer

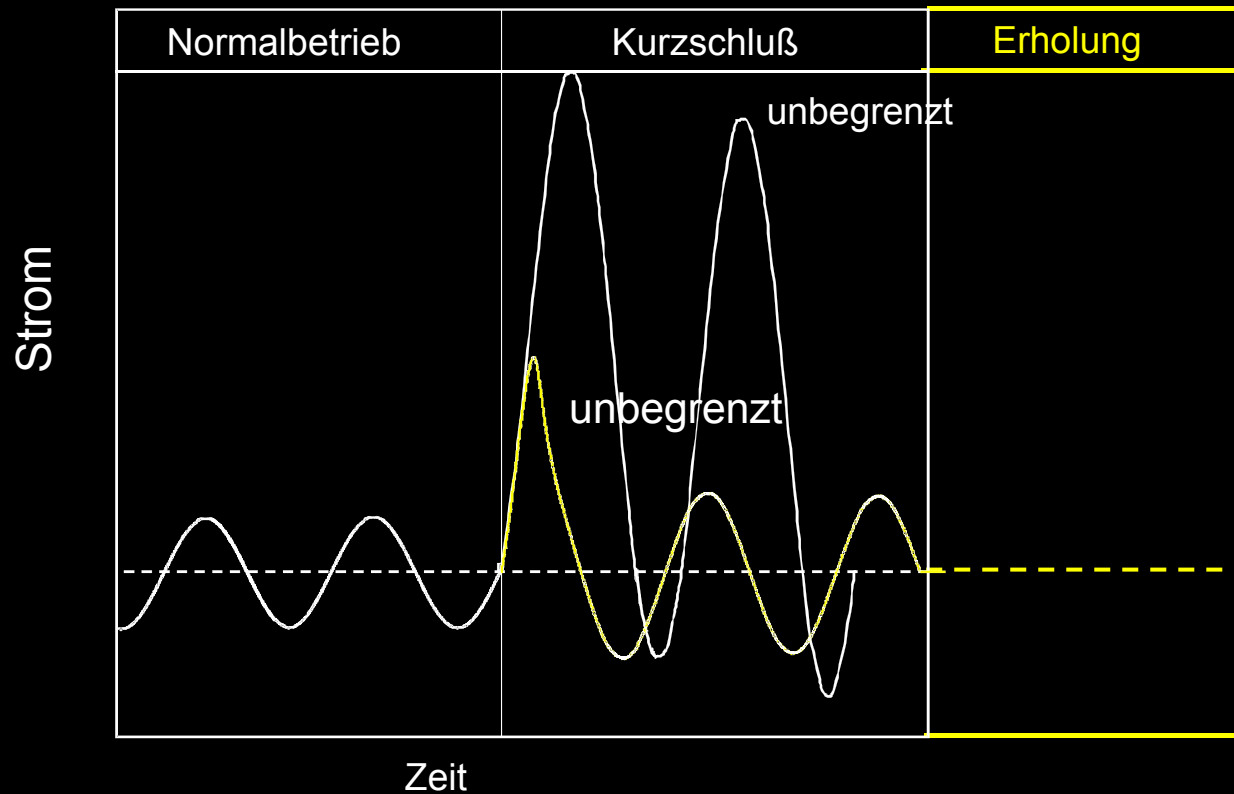
- **Schnelle Strombegrenzung**
- Vernachlässigbare Impedanz im Normalbetrieb
- Schnelle und automatische Wiedereinsatzbereitschaft
- Eigensicher
- Geeignet für Hochspannung
- Wirtschaftlich



### Idealer Strombegrenzer

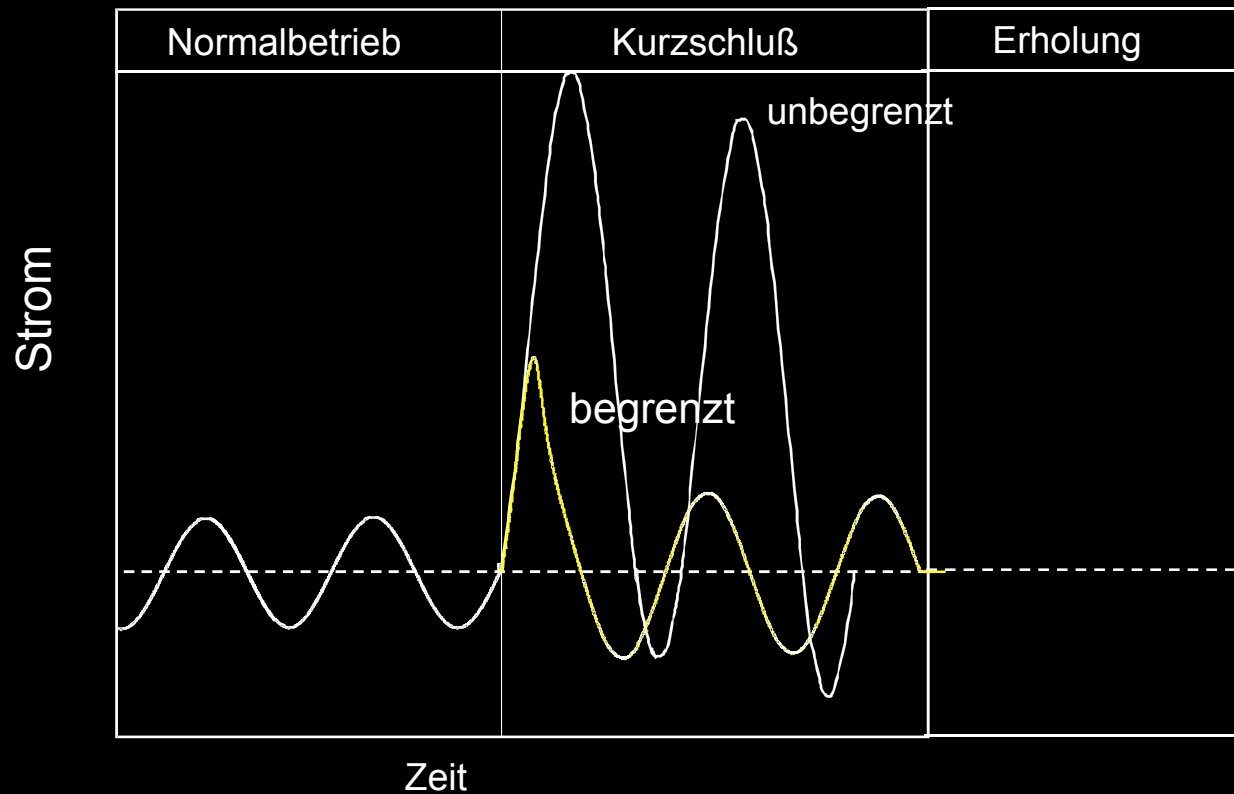
- Schnelle Strombegrenzung
- **Vernachlässigbare Impedanz im Normalbetrieb**
- Schnelle und automatische Wiedereinsatzbereitschaft
- Eigensicher
- Geeignet für Hochspannung
- Wirtschaftlich





### Idealer Strombegrenzer

- Schnelle Strombegrenzung
- Vernachlässigbare Impedanz im Normalbetrieb
- **Schnelle und automatische Wiedereinsatzbereitschaft**
- Eigensicher
- Geeignet für Hochspannung
- Wirtschaftlich



### Idealer Strombegrenzer

- Schnelle Strombegrenzung ✓
- Vernachlässigbare Impedanz im Normalbetrieb ✓
- Schnelle und automatische Wiedereinsatzbereitschaft ✓
- Eigensicher ✓
- Geeignet für Hochspannung ✓
- Wirtschaftlich ✓

**SSB**

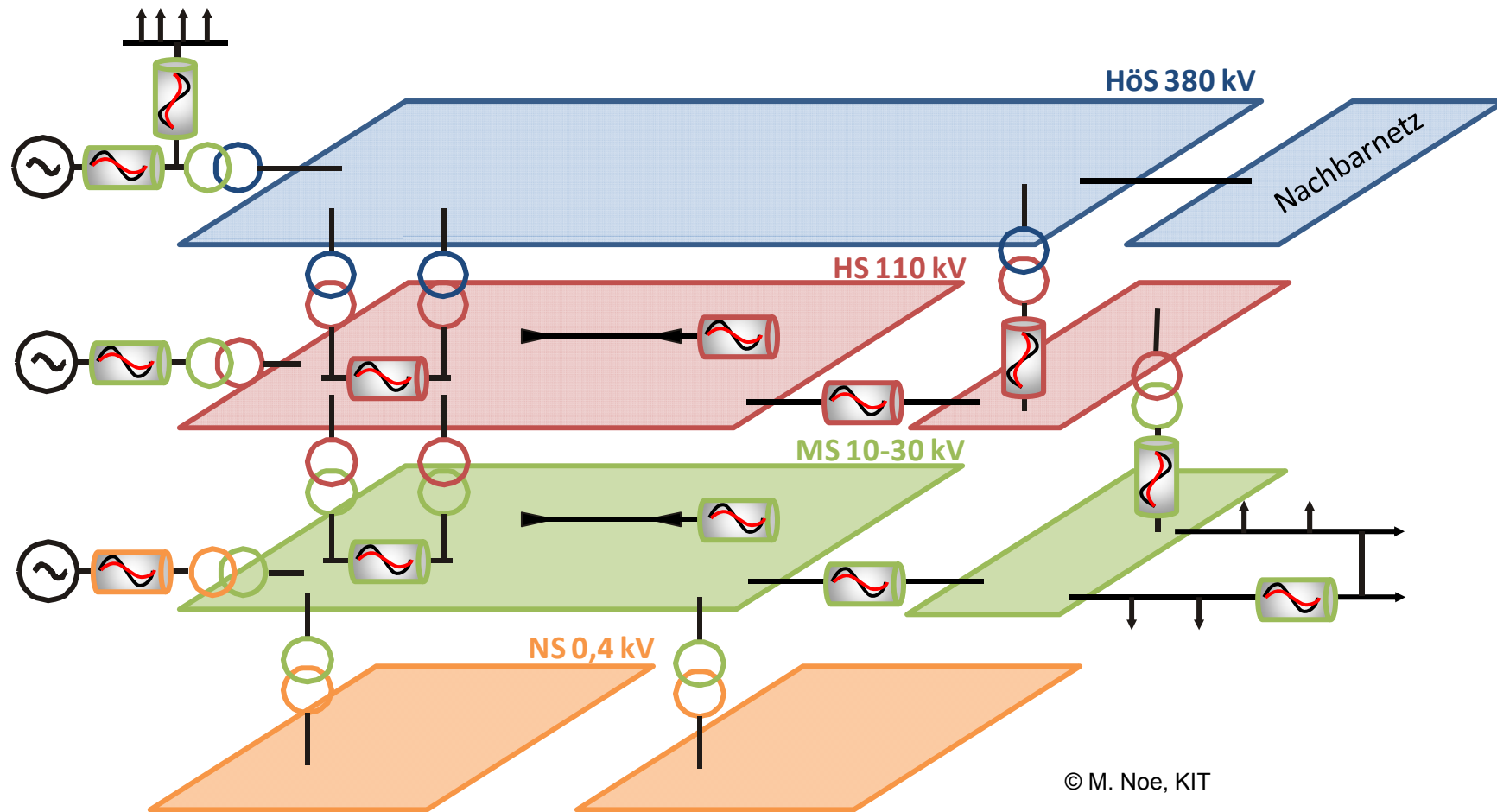
# Supraleitende Strombegrenzer

## Wirtschaftliche Vorteile

- Verzögerung von Netzausbau oder von Erneuerungsinvestitionen
  - z.B. Beim Zubau von neuen Kraftwerken durch Einhalten der zulässigen Kurzschlußleistung
  - z.B. Bei der Einspeisung erneuerbarer Energien durch Einhaltung des Spannungsbandes über Kopplung von MS-Sammelschienen
- Geringere Dimensionierung von Betriebsmitteln, Anlagen und Netzteilen
  - z.B. Im Kraftwerkseigenbarf
- Ersatz oder Wegfall von Betriebsmitteln
  - z.B. Wegfall von redundanten Einspeisungen durch Teilnetzkopplung
- Erhöhung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit
  - z.B. Durch Kupplung von Teilnetzen
- Geringere Verluste
  - z.B. durch gleichmäßige Lastaufteilung von parallel geschalteten Transformatoren

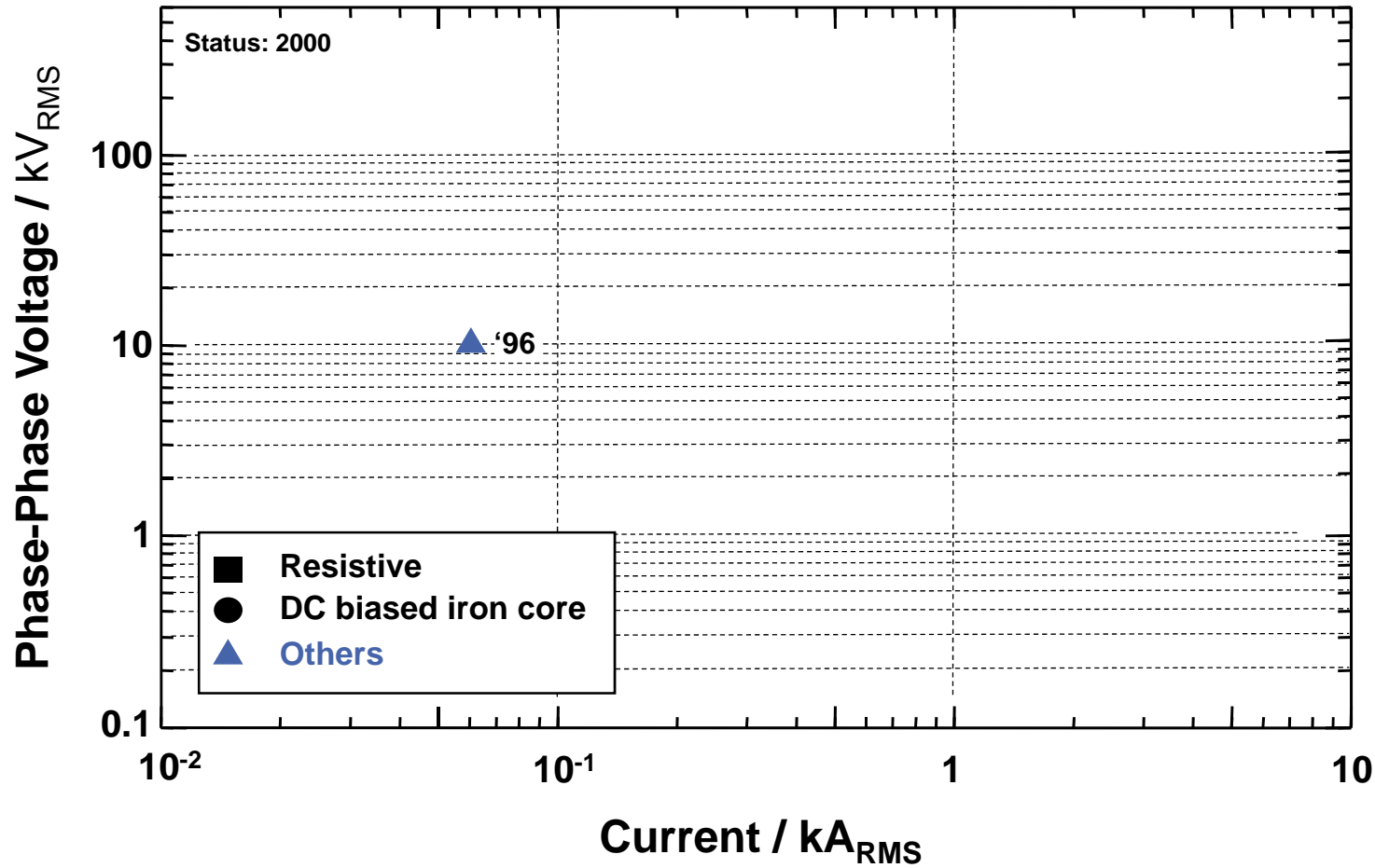
Supraleitende Strombegrenzer können Einsparungen von einigen 100 k€ in der Mittelspannungs- und einigen Mio. € in der Hochspannungsebene erzielen

# Anwendungen Supraleitender Strombegrenzer

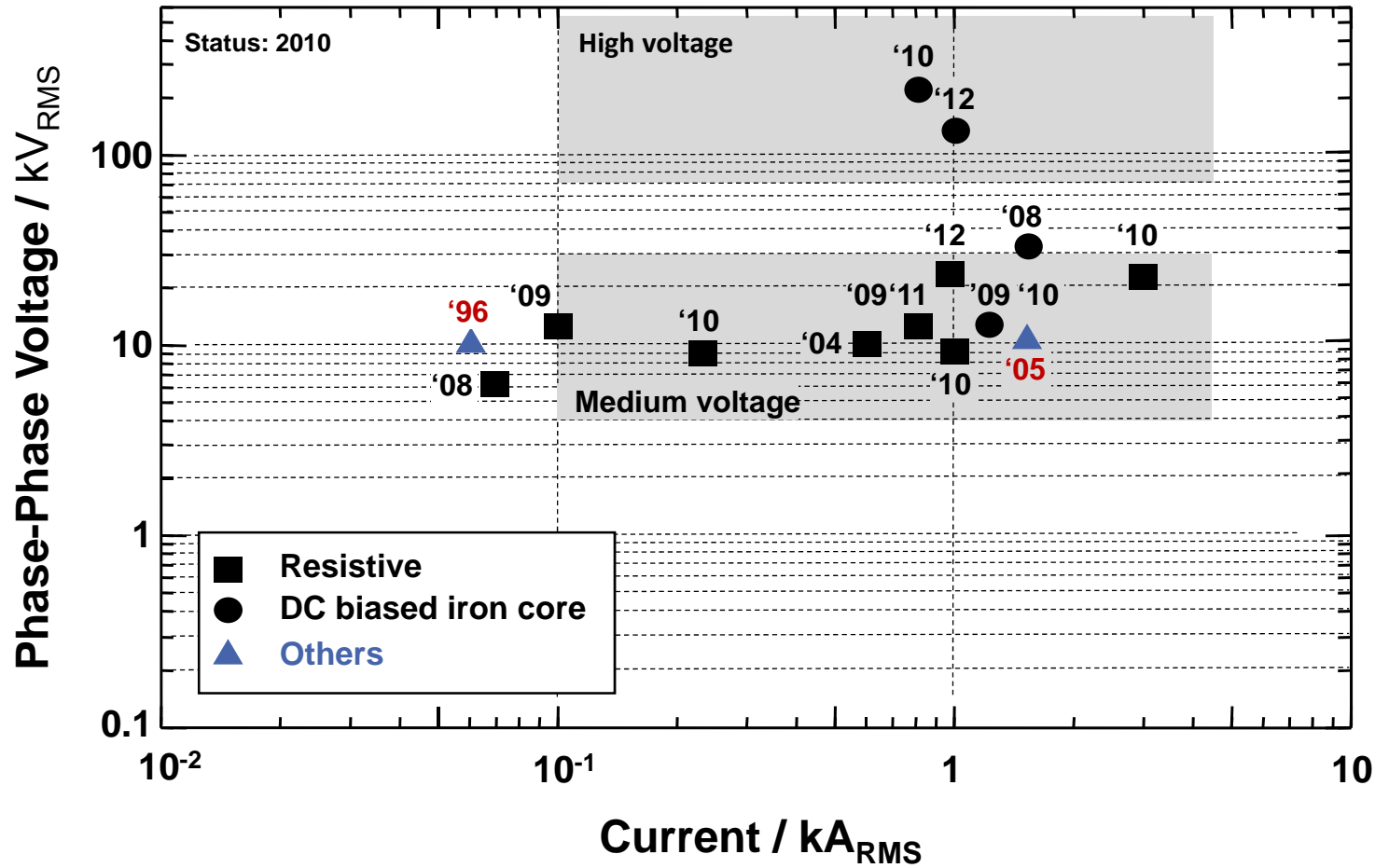


Supraleitende Strombegrenzer besitzen eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Spannungsebenen

# Stand der Entwicklung (Feldtest bis 2000)



# Stand der Entwicklung (Feldtest bis 2010)



# Stand der Entwicklung

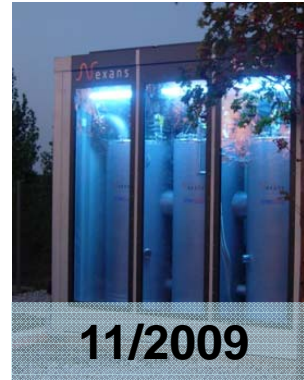
Bi 2212 Massivmaterial



12 kV, 100 A  
Bi 2212 MM



12 kV, 800 A  
Bi 2212 MM



12 kV, 400 A  
Bi 2212 MM



YBCO Bandleiter



10 kV, 600 A  
YBCO Bandleiter



20 kV, 1 kA  
YBCO Bandleiter



10 kV, 2.3 kA  
YBCO Bandleiter



## Inhaltsübersicht

- Hochtemperatur-Supraleiter
- Supraleitende Kabel
- Supraleitende rotierende Maschinen
- Supraleitende Strombegrenzer
- **Supraleitende Transformatoren**
- Supraleitende magnetische Energiespeicher
- Zusammenfassung



# Systemvorteile supraleitender Transformatoren

## Supraleitung ermöglicht:

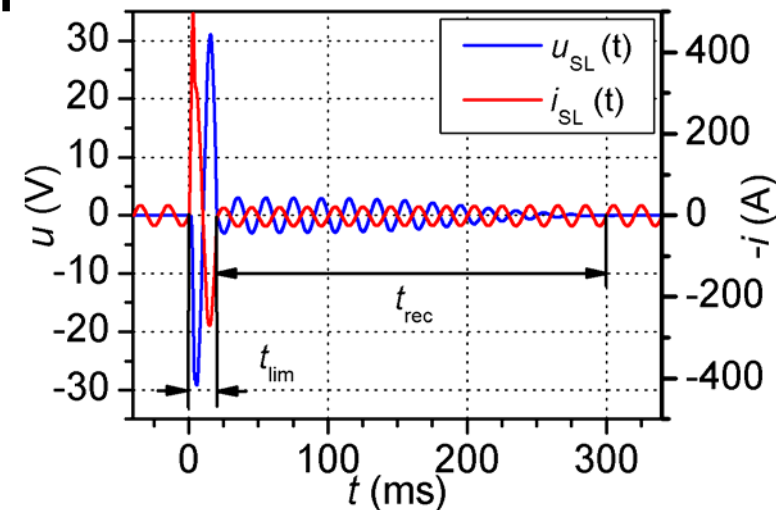
- Höhere Stromdichte
- Geringe Verluste

$$j_{NL} = 3 - 5 \text{ A/mm}^2$$

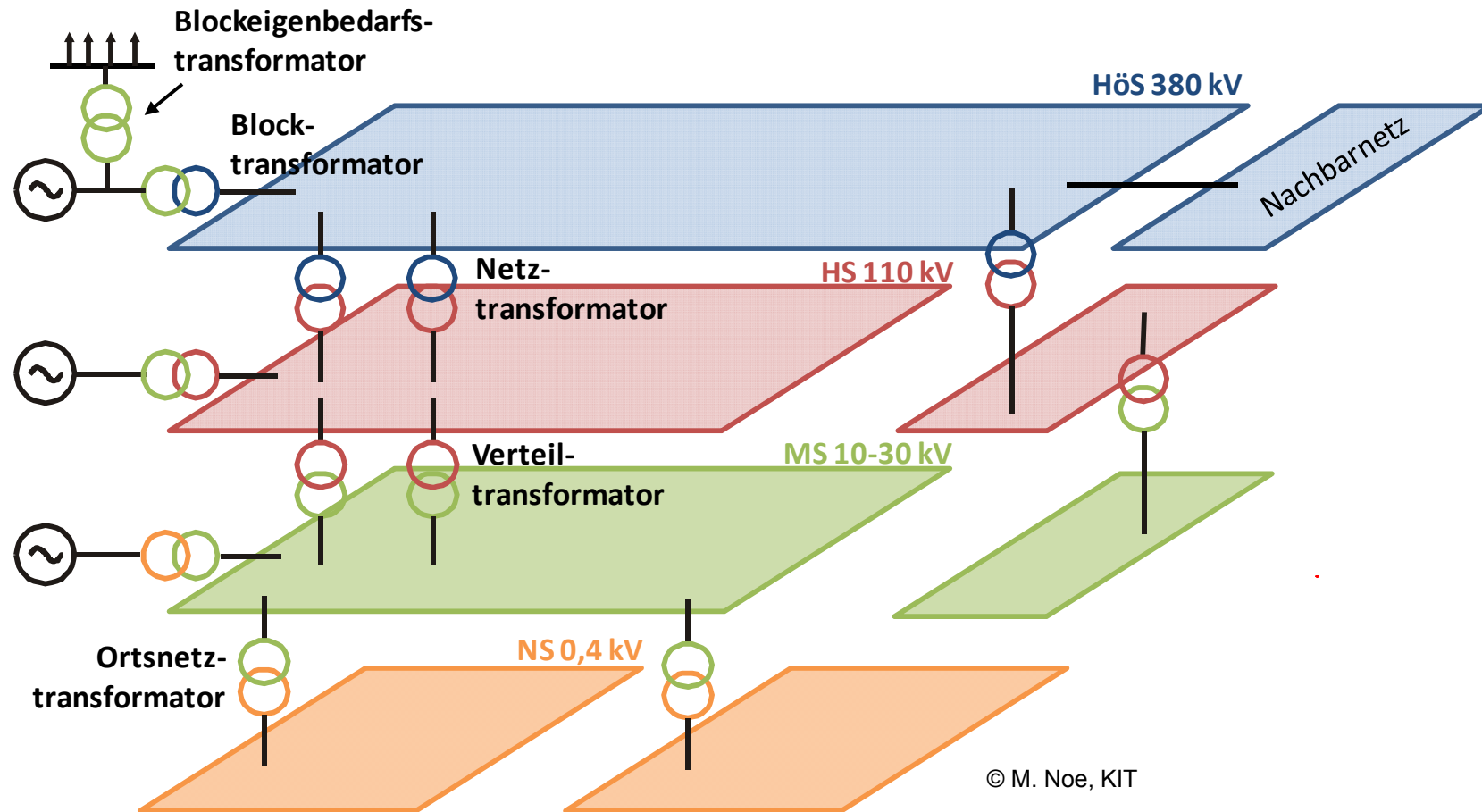
$$j_{SL} > 100 \text{ A/mm}^2$$

## Vorteile supraleitender Transformatoren

- Produktion und Transport
  - Kompakt und leicht (~50 % Reduktion)
- Umwelt und Marketing
  - Ressourcen schonend
  - Energieeinsparung (~50 % Reduktion)
  - Nicht brennbar (kein Öl)
- Betrieb
  - Geringere Kurzschlussspannung
    - Höhere Kurzschlußleistung im Normalbetrieb
  - Aktive Fehlerstrombegrenzung mit Rückkühlung unter Last
    - Schutz der Betriebsmittel
    - Reduktion von Investitionskosten



# Anwendungen Supraleitender Transformatoren



Vielfältige Möglichkeiten in Elektroenergiesystemen und bei Bahn-, Schiffs- oder Off-shore Plattform Transformatoren

# Stand der Entwicklung supraleitender Transformatoren

Nagoya University



Courtesy: N. Hayakawa

2 MVA Demonstrator  
22kV/6.6 kV  
Primär Bi 2223 Bandleiter  
Sekundär YBCO Bandleiter  
Erfolgreicher Test in 2009

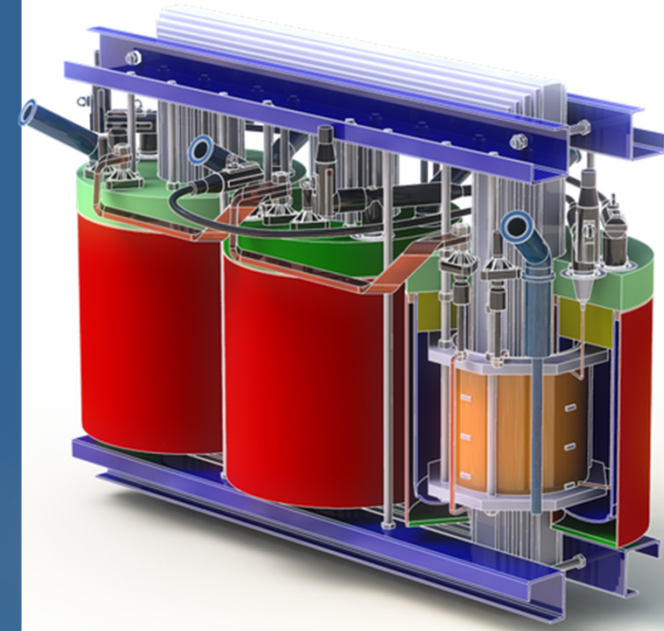
Waukesha/SuperPower



Source: Waukesha

28 MVA Prototyp  
69 kV  
Primär und sekundär mit  
YBCO Bandleitern  
Tests in 2013 geplant

Gallaghan Innovation



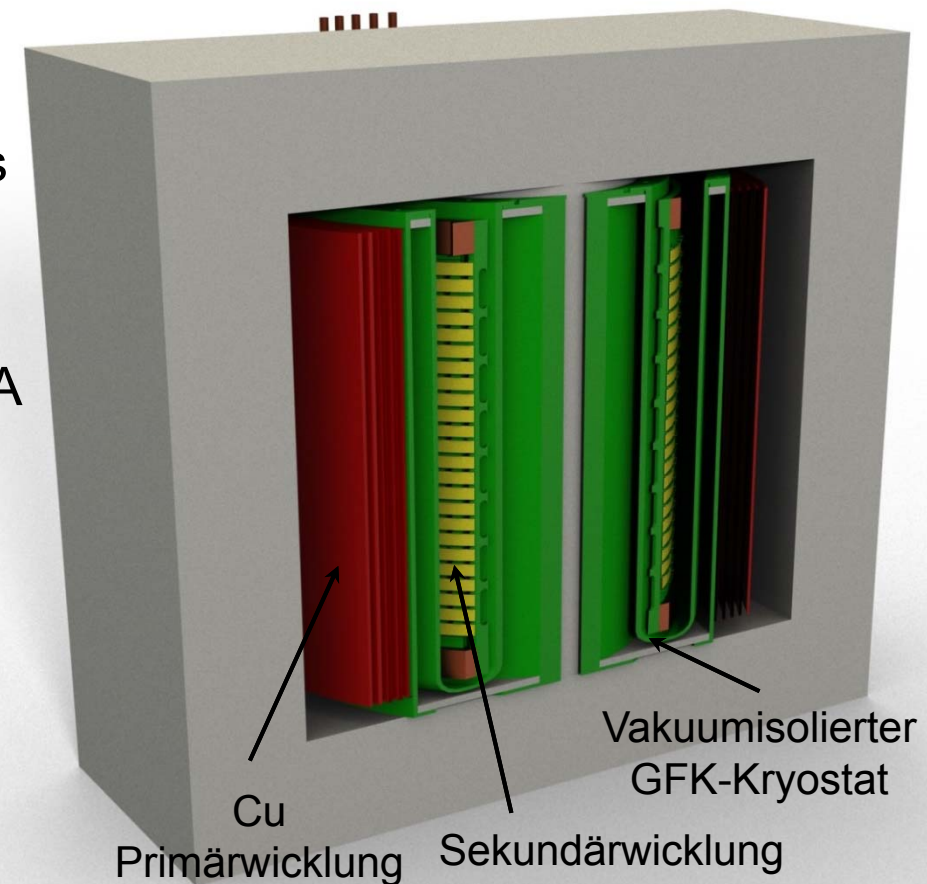
1 MVA Demonstrator  
11 kV  
Primär und sekundär mit  
YBCO Bandleitern  
Tests in 2012

# Stand der Entwicklung supraleitender Transformatoren

## Technologieentwicklung am KIT

### Daten

- Einphasige Repräsentation eines 1MVA-Drehstromtransformators
- Primärwicklung: 20kV / 28,87A
- Sekundärwicklung: 1kV / 577,35A
- Kurzschlußspannung  $u_k < 3\%$
- Warmer Eisenkern
- $B_{\max}$  im Kern = 1,5T
- Kühlung auf 77K mit LN<sub>2</sub> bei Normaldruck



# Stand der Entwicklung supraleitender Transformatoren

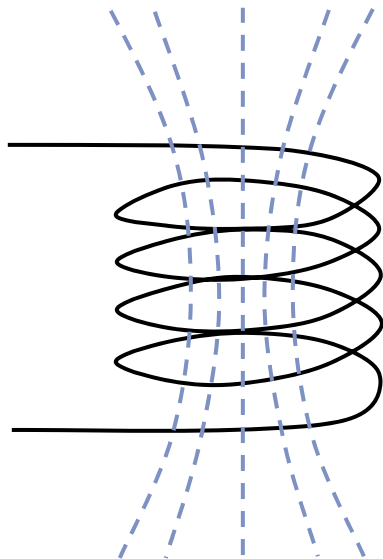
Land	Inst.	Anwendung	Daten	Phase	Jahr	HTSL
Switzerland	ABB	Distribution	630 kVA/18,42 kV/420 V	3 Dyn11	1996	Bi 2223
Japan	Fuji Electric Kyushu Uni	Demonstrator	500 kVA/6,6 kV/3,3 kV	1	1998	Bi 2223
Germany	Siemens	Demonstrator	100 kVA/5,5 kV/1,1 kV	1	1999	Bi 2223
USA	Waukesha	Demonstrator	1 MVA/13,8 kV/6,9 kV	1		Bi 2223
USA	Waukesha	Demonstrator	5 MVA/24,9 kV/4,2 kV	3 Dy		Bi 2223
Japan	Fuji Electric U Kyushu	Demonstrator	1 MVA/22 kV/6,9 kV	1	< 2001	Bi 2223
Germany	Siemens	Railway	1 MVA/25 kV/1,4 kV	1	2001	Bi 2223
EU	CNRS	Demonstrator	41 kVA/2050 V/410 V	1	2003	P-YBCO S- Bi 2223
Korea	U Seoul	Demonstrator	1 MVA/22,9 kV/6,6 kV	1	2004	Bi 2223
Japan	U Nagoya	Demonstrator	2 MVA/22 kV/6,6 kV	1	2009	P-Bi 2223 S-YBCO
Germany	KIT	Demonstrator	1 MVA, 20 kV	1	2015	P-Cu/S-YBCO
USA	Waukesha	Prototype	28 MVA/69 kV	3	2013	YBCO
Japan	Kyushu	Demonstrator	2 MVA	3	2012	YBCO
Australia	Callaghan Innovation	Demonstrator	1 MVA	3	2013	YBCO

## Inhaltsübersicht

- Hochtemperatur-Supraleiter
- Supraleitende Kabel
- Supraleitende rotierende Maschinen
- Supraleitende Strombegrenzer
- Supraleitende Transformatoren
- **Supraleitende magnetische Energiespeicher**
- Zusammenfassung

# Speicherprinzip supraleitender magnetischer Energiespeicher

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau = \frac{L}{R}$$



## Charakteristische Größen

Gespeicherte Energie  $Q = \frac{1}{2} L I^2$

Leistung  $P = U_L I$

SMES Energiedichte  $\frac{Q_{\max}}{V} = \frac{B^2}{2 \mu_0}$

z.B. 5 T = 2,7 kWh/m<sup>3</sup>

# Systemvorteile supraleitender magnetischer Energiespeicher

- Kurze Reaktionszeit in ms
- Schnelle Auf- und Entladung
- Vollentladung möglich
- Unabhängige Bereitstellung von Wirk- und Blindleistung
- Hoher Wirkungsgrad > 95%
- Keine Alterung
- Umweltfreundlich
- Sehr hohe Leistungsdichten (kW/kg)



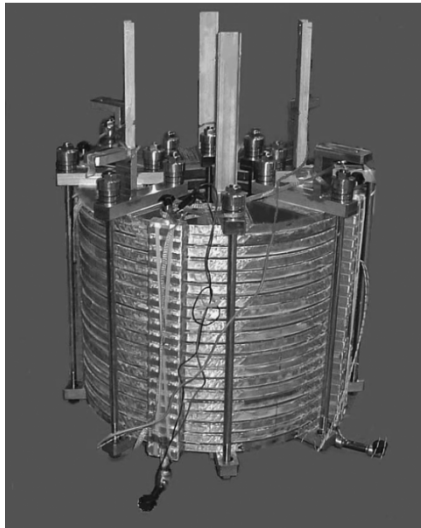
# Stand der Entwicklung supraleitender magnetischer Energiespeicher

Chubu, Japan  
Spannungsqualität

KERI, Korea  
Netzqualität

CNRS, Frankreich  
Militärische Anwendung

Figure: Chubu Electric



1 MJ , 1 MW  
Bi 2212 Bandleiter  
500 A  
5 K leitungsgekühlt  
Spannung: 2.5 kV

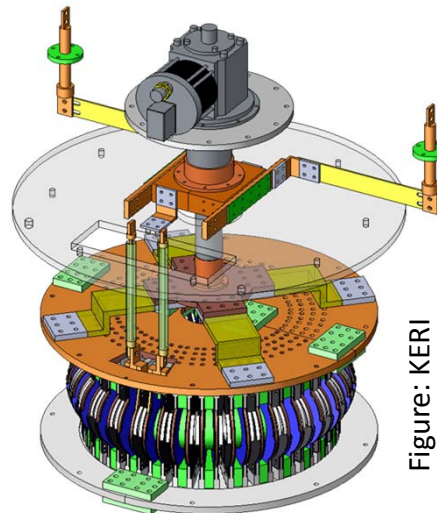


Figure: KERI

2.5 MJ  
YBCO Bandleiter, 22 km  
550 A  
20 K leitungsgekühlt  
 $B_{maxII}$  6.24 T  
Test in 2011



Figure: CNRS

814 kJ  
Bi 2212 Bandleiter  
315 A  
20 K leitungsgekühlt  
Durchmesser: 300/814 mm  
Höhe: 222 mm

# Stand der Entwicklung supraleitender magnetischer Energiespeicher

Lead Institution	Country	Year	Data	Super-conductor	Application
KIT	D	1997	320 kVA, 203 kJ	NbTi	Flicker compensation
AMSC	USA		2 MW, 2,6 MJ	NbTi	Grid stability
KIT	D	2004	25 MW, 237 kJ	NbTi	Power modulator
Chubu	J	2004	5 MVA, 5 MJ	NbTi	Voltage stability
Chubu	J	2004	1 MVA, 1 MJ	Bi 2212	Voltage stability
KERI	Korea	2005	750 kVA, 3 MJ	NbTi	Power quality
Ansaldo	I	2005	1 MVA, 1 MJ	NbTi	Voltage stability
Chubu	J	2007	10 MVA, 19 MJ	NbTi	Load compensation
CAS	China	2007	0,5 MVA, 1 MJ	Bi 2223	-
KERI	Korea	2007	600 kJ	Bi 2223	Power-, Voltage quality
CNRS	F	2008	800 kJ	Bi 2212	Military application
KERI	Korea	2011	2.5 MJ	YBCO	Power quality
BNL	USA	2013	3 MJ	YBCO	Grid storage

## Inhaltsübersicht

- Einführung und Motivation
- Hochtemperatur-Supraleiter
- Supraleitende Kabel
- Supraleitende rotierende Maschinen
- Supraleitende Strombegrenzer
- Supraleitende Transformatoren
- Supraleitende magnetische Energiespeicher
- **Zusammenfassung**

# Zusammenfassung

