

Neue Technologien bei elektrischen Energiewandlern

Ziel der Vorlesung:

Der Einsatz neuer Technologien bei der elektrischen Energiewandlung wird vorgestellt, nämlich

- Supraleitung,
- magnetische Schwebetechniken,
- magnetohydrodynamische Wandlerprinzipien und der
- technischer Stand der Fusionsforschung.

Die prinzipielle physikalische Wirkungsweise, ausgeführte Prototypen und der aktuelle Stand der Entwicklung werden ausführlich erläutert.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Supraleitertechnik für Energiesysteme	1.1
1.1 Grundlagen der Supraleitung	1.1
1.1.1 <i>Bardeen-Cooper-Schrieffer</i> -Theorie (BCS-Theorie)	1.1
1.1.2 <i>Meissner-Ochsenfeld</i> -Effekt	1.2
1.1.3 <i>Meissner</i> - und <i>Shubnikov</i> -Phase	1.4
1.1.4 „Harte“ (= technische) Supraleiter	1.7
1.2 Technische Gestaltung von Supraleitern	1.8
1.2.1 Thermische Eigenstabilität	1.8
1.2.2 Kryogene Stabilisierung des Supraleitungszustands durch gekühlte normalleitende Matrix	1.9
1.2.3 Verdrillung von Supraleiterfilamenten	1.11
1.2.4 Wechselstromverluste in Supraleitern	1.12
1.3 Supraleiter für den technischen Einsatz	1.13
1.3.1 Tieftemperatur-Supraleiter (LTSL = Low Temperature-SL)	1.13
1.3.2 Hochtemperatur Supraleiter (HTSL = High Temperature-SL)	1.13
1.3.3 Einsatzgrenzen technischer LTSL- und HTSL-Supraleitern	1.15
1.3.4 Herstellverfahren technischer LTSL- und HTSL-Supraleiter	1.16
1.4 Kühlverfahren	1.22
1.4.1 Kühlmittel	1.22
1.4.2 Helium-Bad-Kühlung	1.23
1.4.3 Wärmeübergang bei Zwangsströmung von überkritischem Helium	1.24
1.4.4 Wärmeübergang an suprafluides Helium He II	1.25
1.4.5 Wärmeübergang (Badkühlung) an flüssigen Stickstoff LN ₂ und flüssigem Wasserstoff LH ₂	1.26
1.5 Kryostate	1.26
1.5.1 Aufbau von Kryostaten	1.26
1.5.2 Thermische Kryostatverluste	1.27
1.5.3 Wärmezustrom in den Stromzuführungen	1.29
1.5.4 Technisch ausgeführte Stromzuführungen	1.31
1.6 Kryotechnische Versorgung	1.32
1.6.1 Physikalische Effekte der Kältetechnik	1.32
1.6.2 Methoden zur He-Verflüssigung	1.35
1.6.3 Methoden zur N ₂ - und H ₂ -Verflüssigung	1.37
1.6.4 Wirkungsgrad von Kälteanlagen	1.38

2.	Anwendung der Supraleiter für elektrische Energiewandler	2.1
2.1	Einsatzmöglichkeiten technischer Supraleiter in Forschung und Technik	2.1
2.2	Supraleitung in der elektrischen Energietechnik	2.2
2.2.1	Kurzschlussstrombegrenzer	2.2
2.2.2	Supraleitende Energiekabel	2.7
2.2.3	Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES)	2.11
2.2.4	Supraleitende Netz- und Bahntransformatoren	2.17
2.2.5	Rotierende elektrische Maschinen mit Supraleiter-Wicklung	2.23
2.2.6	Kryomaschinen und rotierende elektrische Maschinen mit Massivsupraleitern	2.46
3.	Magnetische Lagerung („magnetisches Schweben“)	3.1
3.1	Grundlagen der magnetischen Schwebetechnik	3.1
3.2	Elektromagnetisches Schweben	3.2
3.2.1	Prinzipielle Wirkungsweise eines aktiven Magnetlagers	3.3
3.2.2	Linearisierung der Lagerkraft	3.5
3.2.3	Ausführung magnetisches Lager	3.8
3.2.4	Regelung von Magnetlagern mit Stromsteuerung	3.10
3.2.5	Spannungssteuerung	3.15
3.2.6	Komponenten der aktiven Magnetlager	3.17
3.2.7	Passive Permanentmagnetlager	3.19
3.2.8	Ausführungsbeispiele magnetgelagerter Antriebe	3.20
3.3	Elektrodynamisches Schweben	3.30
3.3.1	Funktionsprinzip des elektrodynamischen Schwebens	3.30
3.3.2	Bewegte gleichstromerregte Spulen im elektrodynamischen Schwebestand	3.32
3.4	Hochgeschwindigkeitsbahnen in Magnetschwebetechnik	3.35
3.4.1	Elektromagnetische Schwebebahn TRANSRAPID	3.37
3.4.2	Japanisches Projekt: Elektrodynamische Schwebebahn <i>Yamanashi</i>	3.41
3.5	Supraleitende magnetische Lager	3.44
3.5.1	Funktionsweise supraleitender magnetische Lager	3.44
3.5.2	HTSL-Lager in Schwungradspeichern	3.48
3.6	Lagerlose Drehfeldmaschinen	3.52
4.	Magnetohydrodynamische (MHD) Energiewandlung	4.1
4.1	Physikalisches Wirkprinzip der MHD	4.1
4.2	FARADAY- und HALL-Generator	4.5
4.3	Stand der Technik/Perspektiven von MHD	4.11
4.4	Ionenantriebe für Satelliten	4.15
5.	Fusionsforschung	5.1
5.1	Fusionsreaktionen	5.1
5.2	Stabiler Fusionsbetrieb	5.5
5.3	Magnetfeldanordnungen für den berührungslosen Plasmaeinschluss	5.7
5.4	TOKAMAK und STELLARATOR	5.10
5.5	Plasmaexperimente - Stand der aktuellen Forschung	5.20

Literatur:

- [1.1] Komarek, P.: Hochstromanwendung der Supraleitung, Teubner, Stuttgart, 1995
- [1.2] Buckel, W.: Supraleitung, VHC-Verlag, Weinheim, 1994
- [1.3] Rödel, J.: Funktionswerkstoffe, Vorlesungs-Skript, TU Darmstadt, FB Materialwissenschaften, 1997
- [1.4] Vogel, H.: Gerthsen Physik, Springer, Berlin, 1999
- [1.5] Lynn, J. W. (ed.): High Temperature Superconductivity, Springer, New York, 1990
- [1.6] Gamble, B.B. et al.: Propects for HTS Application, IEEE Trans. on Magnetics (32), No.4, July 1996, p.2714-2719
- [1.7] Balachandran, U.: Superpower, IEEE Spectrum 1997, p.18-19
- [1.8] Jungnickel, H.; Agsten, R.; Kraus, W.-E.: Grundlagen der Kältetechnik, Verlag Technik GmbH, Berlin, 3. Aufl., 1990
- [1.9] Fietz, W. H.; Schauer, W.; Wühl, H. et al.: Grundlegende Untersuchungen zur Hochtemperatur-Supraleitung, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe 31, No. 4 (1999), p.233-250
- [1.10] Goldacker, W.; Eckelmann, H.; Nast, R.; Krelaus, J.: Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitung für Anwendungen in der Energietechnik, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe 31, No. 4 (1999), p.251-258
- [1.11] Walker, G.: Cryocoolers, Part 1: Fundamentals, Plenum Press, New York & London, 1992
- [1.12] Häßler, W. et al.: The Dresden SCENET node, Scenet Newsletter, No. 10, Sept. 2005, p. 3-7

- [2.1] Komarek, P.: Hochstromanwendung der Supraleitung, Teubner, Stuttgart, 1995
- [2.2] Sander, U.: Supraleitung für eine gesicherte Energieversorgung, Energiewirtschaft 100 (2001), H. 7, p.26-29
- [2.3] Leung, E.: Surge protection for power grids, IEEE Spectrim, July 1997, p.26-30
- [2.4] Fischer, S.; Sämann, D.: Supraleitende Strombegrenzer – Eine Revolution in der Energietechnik ?, Elektrizitätswirtschaft 99 (2000), H.25, p.24-29
- [2.5] Leung, E.: Superconducting Fault Current Limiters, IEEE Power Engineering Review, August 2000, p.15-18/30
- [2.6] Hassenzahl, W.: Applications of Superconductivity to Electric Power Systems, IEEE Power Engineering Review, May 2000, p.4-7
- [2.7] Hassenzahl, W.: More Applications of Superconductivity to Electric Power Systems, IEEE Power Engineering Review, June 2000, p.4-6
- [2.8] Rahman, M.; Nassi, M.: High-capacity cable´s role in once and future grids, IEEE Spectrum, July 1997, p.31-35
- [2.9] Willis, J.: Superconducting Transmission Cables, IEEE Power Engineering Review, August 2000, p.10-14
- [2.10] Hennig, E.; Stephanblome, T.: Speichertechnologien für die elektrische Energieversorgung, Elektrische Bahnen 98 (2000), H.11-12, p.459-462
- [2.11] Schöttler, R.; Pailer, G.; Wels, P.: Supraleiter optimiert Spannungsqualität, Elektrizitätswirtschaft 99 (2000), H.7, p.18-23
- [2.12] Schöttler, R.; Coney, R.: Betriebserfahrungen mit Mikro-SMES im kommerziellen Industrieinsatz, VDI-Berichte Nr.1404, 1998, p.221-230
- [2.13] Buckles, W.; Hassenzahl, W.: Superconducting Magnetic Energy Storage, IEEE Power Engineering Review, May 2000, p.16-20
- [2.14] Mehta, S.; Aversa, N.; Walker, M.: Transforming transformers, IEEE Spectrum, July 1997, p.43-49

- [2.15] Henning, U.; Schlosser, D.; Meinert, M.: Traction Superconducting Transformer, Proc. of Symp. On Power Electronics, Electr. Drives, Automation & Motion (SPEEDAM), June 2000, Ischia, Italy, p.C1-15...C1-18
- [2.16] Henning, U.; Neitzke, M.; Schlosser, R.: Supraleitender Bahntransformator, VDI Berichte Nr. 1488, 1999, p.263-279
- [2.17] McConnel, B.; Mehta, S.; Walker, M.: HTS Transformers, IEEE Power Engineering Review, June 2000, p.7-11
- [2.18] Liese, M.: Entwicklung und Perspektive supraleitender Generatoren, Elektrie 52, 1998, Heft 7-9, p.188-193
- [2.19] Blaugher, R.: Low-calorie, high-energy generators and motors, IEEE Spectrum, July 1997, p.36-42
- [2.20] Immendörfer, I.: Bemessung flüssigstickstoffgekühlter Drehfeldmaschinen des IEC-Baugrößenbereichs, Dissertation, Univ. Stuttgart, 1996
- [2.21] Rabinowitz, M.: Superconducting Power Generation, IEEE Power Engineering Review, May 2000, p.8-11
- [2.22] Driscoll, D.; Dombrowski, V.; Zhang, B.: Development Status of Superconducting Motors, IEEE Power Engineering Review, May 2000, p.12-15
- [2.23] Gutt, H.-J., Grüner, A.: Hochtemperatursupraleiter – Anwendungsnahe Forschung im Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, Univ.Stuttgart, Druckschrift, 1999
- [2.24] Oswald, B. et al: Optimization of Superconducting Motors with YBCO Bulk Material, Proc. of the Cryogenic Engineering Conf./Int. Cryogenic Materials Conf. ICEC/ICMC, Montreal, Canada,1999, 5 pages
- [2.25] Oswald, B. et al: Superconducting Motors with HTS Bulk Material for Medium Power Range, Proc. of the Europ. Conf. on Applied Superconductivity EUCAS, 1999, Sitges, Spain, 4 pages
- [2.26] Moore, T.: Power Applications for Superconductivity, EPRI Journal, July/August 1996, 10 pages
- [2.27] Noe, M.; Juengst, K.-P.: Supraleitende Strombegrenzer, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe 31, No. 4 (1999), p.309-315
- [2.27] Juengst, K.-P.: Supraleitende magnetische Energiespeicher, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe 31, No. 4 (1999), p.316-324
- [2.28] Bock, J.; Kleimaier, M.: Supraleitung steht vor dem Einsatz im Netz – Supraleitende 110-kV-Strombegrenzer in Entwicklung, Energiewirtschaft (ew) 194 (2005), H. 25, p. 26-29
- [2.29] Moscovic, J.: Superconducting cable connects the grid, transmission&distribution world, March 2007, p. 46-50, www.tdworld.com

- [3.1] Komarek, P.: Hochstromanwendung in der Supraleitung, Teubner, Stuttgart, 1995
- [3.2] Schweitzer, G.; Traxler, A.; Bleuler, H.: Magnetlager, Springer, Berlin, 1993
- [3.3] N.N.: Hochtechnologie für den „Flug in Höhe 0“ – Magnetschnellebahn TRANSRAPID, Druckschrift, Transrapid International GmbH&Co KG, Berlin 9/2000
- [3.4] Fürst, R.: Anwendungsnahe Dimensionierung und messtechnische Überprüfung von Langstator-Linearmotoren für Magnetschnellbahnen, Dissertation, TU Berlin, 1993
- [3.5] Sander, M.; Sutter, U.; Koch, R.; Kläser, M.: Pulsed magnetization of HTS bulk parts at $T < 77$ K, Supercond. Sci. Technol. 13 (2000), p.841-845
- [3.6] Gutt, H.-J., Grüner, A.: Hochtemperatursupraleiter – Anwendungsnahe Forschung im Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, Univ.Stuttgart, Druckschrift, 1999
- [3.7] N.N.: MLX 01 – Vehicle for the Yamanashi Maglev Test Line, Druckschrift, JR-Central, 1999

- [3.8] Raschbichler, H. G.: Die Magnetschnellbahn Transrapid – Ein neues Verkehrssystem für den Personen- und Gütertransport, Sonderdruck aus: Glasers Annalen 8-9, 1992, p.2-7
- [3.9] Mayer, W.J.: Weitere Fortschritte der Magnetfahrtechnik in Japan, Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000), p.262-263
- [3.10] Koch, R.; Wagner, R.; Sander, M.; Gutt, H.-J.: Development and Test of a 300Wh/10kW Flywheel Energy Storage System, Inst. Phys. Ser. No. 167, Proc. of the Europ. Conf. on Applied Superconductivity EUCAS, 1999, Sitges, Spain, p. 1055-1058
- [3.11] Sutter, U.; Adam, M. et al.: Characterization of Melt-Textured YBCO for Superconducting Magnetic Bearings, Inst. Phys. Ser. No. 167, Proc. of the Europ. Conf. on Applied Superconductivity EUCAS, 1999, Sitges, Spain, p. 1059-1062
- [3.12] Gunselmann, W.; Höschler, P.; Reiner, G.: Energiespeichereinsatz im Stadtbahnnetz Köln, Elektrische Bahnen 98, 2000, H.11-12, p.463-468
- [3.13] Hellinger, R.; Mazur, T.; Nothaft, J.: Stationary components of the long-stator propulsion system for high-speed maglev systems, REE, Oct. 1998, No.9 (1998), 10 pages
- [3.14] Andersen, S.: Verborgene Mängel im Betriebssystem der Magnetschnellbahn Transrapid, Eisenbahn-Revue International 5 (1998), p.213-215
- [3.15] Sander, M.: Massive Hochtemperatursupraleiter für Anwendungen in der Energietechnik, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe 31, No. 4 (1999), p. 270-276
- [3.16] Nijhuis, A. B. M.; Schmied, J.; Schultz, R. R.: Rotordynamic Design Considerations for a 23 MW Compressor with Magnetic Bearings, Proc. Of the „Fluid Machinery Symposium“, Den Hague, April 1999, 12 pages, www.delta-js.ch/Deutsch/DeltaWNPpress.htm
- [3.17] Dangel, G.; Engel, J.; Glass, D.; Mauersberger, R.: Mit aktiven Magnetlagern tonnenschwere Rotoren schwebend lagern, dämpfen und wuchten, ABB Technik 8/9 (1989), p. 17-22
- [3.18] Mayer, W.: Meilensteine zur Entwicklung der Magnetbahnen in Deutschland, ETR 46 (1997), H.11 November, p. 759-762
- [3.19] Ellmann, S.; Kunz, S.; Wegerer, K.: Vorserienfahrzeug TRANSRAPID 08, Elektrische Bahnen (eb) 97 (1999), H. 3, p. 108-113
- [3.20] Fürst, R.: Energiebedarf für die Magnetschnellbahn Berlin-Hamburg, ZEV+DET Glasers Annalen 123 (1999), H.4 April, p. 153-15
- [3.21] Schneider, T.; Binder, A.; Chen, L.: Design Procedure of Bearingless High-Speed Permanent Magnet Motors, Int. Symp. on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF), 15-17 Sept. 2005, Baiona, Spain, CD-ROM, paper no. EE-3.12, 6 pages
- [3.21] Bikle, U.: Die Auslegung lagerloser Induktionsmaschinen, Dissertation, ETH Zürich, Switzerland, 1999
- [3.22] Schöb, R.; Barletta, N.; Hahn, J.: The bearingless centrifugal pump – a perfect example of a mechatronics system, Proc. of. 1st IFAC-Conference on Mechatronic Systems, 6 pages, Darmstadt, Germany, 18-20 Sept. 2000
- [3.23] Schöb, R.: Centrifugal pump without bearings or seals, WORLD PUMPS, p. 2-5, 2002
- [3.24] Redemann, C.; Meuter, P.; Ramella, A.; Gempp, T.: 30 kW bearingless canned motor pump on the test bed, Proc. of 7th International Symposium on Magnetic Bearings, p. 189 - 194, Zürich, Switzerland, Aug. 23-25, 2000

- [4.1] Auweter-Kurtz, M.: Lichtbogenantriebe für Weltraumaufgaben, B. G. Teubner, Stuttgart, 1992
- [4.2] Saccoccia, G.: Review of European Activities in Electric Propulsion, REE No.8, Sept. 2000, p.79-87
- [4.3] Coste, P.; Favre, E.: Tendances dans la sélection des actionneurs et mécanismes spatiaux, REE No. 2, Feb. 2002, p. 48-57
- [4.4] Cadiou, A. : La propulsion des véhicules spatiaux, REE No. 8, Sept. 2000, p. 66-70
- [4.5] Geri, A. ; Veca, G. ; Salvini, A. : Application of 3-D Lumped Parameter Model in MHD Generator design, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 15, No.1 March 2000, p. 79-83
- [4.6] Chapman, J.: Magnethydrodynamic power plants, in: Webster, J. G. (ed.): *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1999, Vol. 12, p. 260-269, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [4.7] Löb, H.W.: Der Ionenantrieb, in: Newsletter 8/2002 der Mars Society Deutschland, p.17-19, 2002; als PDF-File verfügbar auf [Der Homepage der Mars Society Deutschland](#)
- [4.8] Jahn, R. G; Choueiri, E. Y.: Electric Propulsion, Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd Ed., Academic Press, San Diego, 2002, als PDF-File verfügbar auf [alfven.princeton.edu](#)
- [4.9] Uffrecht, U.; Poppe, T.: Himmelsmechanik und Raumfahrt, Klett Verlag, Stuttgart, 2002
- [4.10] Messerschmid, E.; Fasoulas, S.: Raumfahrtsysteme, Springer, Berlin, 2000
- [4.11] Elsner, E.: Raumfahrt in Stichworten, Hirt-Verlag, Kiel, 1973
- [4.12] Löb, H.; Freisinger, J.: Ionenraketen, Vieweg, Braunschweig, 1967
- [4.13] Stuhlinger, E.: Ion Propulsion for Space Flight, McGraw-Hill, New York, 1964
- [4.14] Giannini, G.: Electrical Propulsion in Space, Scientific American **204**, 57 (1961) H.
- [4.15] Oberth, H.: Wege zur Raumschiffahrt, Oldenbourg, München, 1929
- [4.16] Goddard, R. H.: An Autobiography, Astronautics **4**, 24, 106, 1959
- [4.17] Schmidt, E.: Unkonventionelle Energiewandler, AEG-Elitera-Verlag, Berlin, 1982

- [5.1] Nyilas, A. ; Ulbricht, A. : Werkstoffe im supraleitenden Magnetbau, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe 31, No. 4 (1999), p.277-291
- [5.2] Maurer, W.; Ulbricht, A.: Supraleitende Magnete für die Kernfusion, Nachrichten-Forschungszentrum Karlsruhe 31, No. 4 (1999), p.293-308
- [5.3] Conn, R.; Tschujanov, W.; Nobuyuki, I.; Sweetman, D.: Der Internationale Thermonukleare Experimental-Reaktor (ITER), Spektrum der Wissenschaft, Juni 1992, p. 62-69
- [5.4] Conn, R.: Die Technik von Fusionsreaktoren, Spektrum der Wissenschaft, Dez. 1983, p. 50-66
- [5.5] Craxton, R. S.; McCrory, R. L.; Sources, J. M.: Laser-induzierte Kernfusion, Spektrum der Wissenschaft, Okt. 1986, p. 98-110
- [5.6] Furth, H.: Wie weit ist der Tokamak-Fusionsreaktor?, Spektrum der Wissenschaft, Okt. 1979, H. 10, p. 103-111
- [5.7] Buck, K.-E.; Klee, P.; Mathis, R.: Festigkeitsnachweis für die großen Spulen des Plasmaexperiments Wendelstein VII-AS, ABB Technik, H. 2 (1989), p. 17-24
- [5.8] Klunker, H.; Kronhardt, H.: Demonstrationsspule für den Fusionsreaktor Wendelstein 7-X – Anforderungen und Fertigung, konstruieren+giessen 24 (1999), Nr.2, p. 4-9

- [5.9] Fillunger, H.; Maix, R.: Konzept des supraleitenden Magnetsystems für die Kernfusionsanlage ITER, Elektrotechnik & Informationstechnik (e&i) 123 (2006), H. 12, p. 584-589
- [5.10] Fillunger, H.; Maix, R.: Technische Erprobung eines supraleitenden Magnetsystems für die Kernforschungsanlage ITER, Elektrotechnik & Informationstechnik (e&i) 123 (2006), H. 12, p. a21-a30
- [5.11] Milch, I.; Hedderich, R.; Schorn, R. (Red.): Kernfusion im Forschungsverbund, Sonderheft, Hrsg.: Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Garching, 1996
- [5.12] Hofmann, H.: Das elektromagnetische Feld, Springer-Verlag, Wien - New York, 1981

Das griechische Alphabet:

$A \alpha$	Alpha	$B \beta$	Beta	$\Gamma \gamma$	Gamma	$\Delta \delta$	Delta
$E \varepsilon$	Epsilon	$Z \zeta$	Zeta	$H \eta$	Eta	$\Theta \vartheta$	Theta
$I \iota$	Jota	$K \kappa$	Kappa	$\Lambda \lambda$	Lambda	$M \mu$	My (mue)
$N \nu$	Ny (nue)	$\Xi \xi$	Xi	$O \omicron$	Omikron	$\Pi \pi$	Pi
$P \rho$	Rho	$\Sigma \sigma$	Sigma	$T \tau$	Tau	$Y \upsilon$	Ypsilon
$\Phi \varphi$	Phi	$X \chi$	Chi	$\Psi \psi$	Psi	$\Omega \omega$	Omega

Kontrollfragen für das Erlernen des Prüfungsstoffs

Grundlagen der Supraleitung

- Beschreiben Sie die wesentlichen Unterschiede zwischen Supraleitung und Normalleitung!
- Welche Stoffe sind typischerweise Supraleiter und warum?
- Was versteht man unter dem *Meissner-Ochsenfeld*-Effekt?
- Kennzeichnen Sie die *Meissner*- und die *Shubnikov*-Phase!
- Geben Sie die Unterschiede zwischen Supraleitern 1. und 2. Art und "harten" Supraleitern an!

Technische Gestaltung von Supraleitern

- Was versteht man unter thermischer und kryogener Stabilisierung?
- Wie müssen Supraleiter für Wechselstrom aufgebaut sein und warum?
- Nennen Sie die technisch im Einsatz befindlichen Tief- und Hochtemperatursupraleiter mit ihren wesentlichen Eigenschaften!
- Welche elektrischen Verluste treten in Supraleitern bei Gleich- und Wechselstromleitung auf?

Supraleiter für den technischen Einsatz

- Welche Einsatzgrenzen kennen Sie für technisch eingesetzte Supraleiter?
- Geben Sie einen Überblick über die gängigen Fertigungsverfahren für technisch eingesetzte LT- und HT-Supraleiter!
- Geben Sie das Betriebsdiagramm eines Supraleiter in Abhängigkeit von T , J , B qualitativ an!

Kühlverfahren

- Welche Kühlmittel werden für den Betrieb von Supraleitern verwendet? Nennen Sie wesentliche physikalische Eigenschaften!
- Skizzieren und beschreiben Sie qualitativ das Phasendiagramm von Helium bei tiefen Temperaturen!
- Diskutieren Sie die unterschiedlichen Kühlverfahren mit flüssigem Helium!
- Vergleichen Sie für die Siedebadkühlung den Wärmeübergang bei Verwendung von flüssigem Helium, Stickstoff und Wasserstoff.

Kryostate

- Was ist ein Kryostat? Beschreiben Sie den Aufbau (Skizze!) und die Funktionsweise!
- Geben Sie die wichtigsten thermischen Kryostat-Verluste an!
- Welche wesentlichen Effekte sind bei der Gestaltung von Stromzuführungen zu beachten?

Kryotechnische Versorgung

- Welche physikalischen Effekte stehen zur Erzeugung von "Kälte" zur Verfügung?
- Beschreiben Sie den *Joule-Thomson*-Effekt und seine Anwendung in der Kältetechnik!
- Welche Verfahren werden zur Verflüssigung von Stickstoff und Wasserstoff eingesetzt?
- Was versteht man unter dem "Wirkungsgrad" für Kälteanlagen? Geben Sie Beispiele an!

Einsatzmöglichkeiten technischer Supraleiter in Forschung und Technik

- Wo werden heute technische Supraleiter bereits großtechnisch eingesetzt?
- Welche Chancen ergeben sich durch den künftigen Einsatz von Supraleitern in der Energietechnik? Unterscheiden Sie dabei mehrere Gruppen!

Supraleitung bei der elektrischen Energieübertragung

- Erläutern Sie das Funktionsprinzip *ohm'scher* Kurzschlussstrombegrenzer mit Supraleitung!
- Beschreiben Sie die Funktion des induktiver Kurzschlussstrom-Begrenzers mit Supraleitern!
- Welche zwei unterschiedlichen Typen von supraleitenden Energiekabeln wurden bisher entwickelt? Diskutieren Sie die Eigenschaften!
- Warum ist es möglich, funktionstüchtige Energiekabel mit den heute verfügbaren HT-Supraleitern für Wechselstrom zu bauen?
- Wie funktioniert der supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES), und wie ist er aufgebaut?
- Nennen Sie Einsatzbereiche von SMES und diskutieren Sie dabei die Speichergröße! Welche Speichergrößen wurden bereits realisiert?
- Welche Spulenformen sind für SMES denkbar? Nennen Sie Vor- und Nachteile!
- Warum sind bei SMES eisenlose Anordnungen (Luftpulen) die vorherrschende Bauart?
- Welche Bauformen supraleitender Transformatoren kennen Sie? (Vor-, Nachteile?)
- Welche Vorzüge und Nachteile haben supraleitende gegenüber normal leitenden Transformatoren?
- Warum ist es möglich, funktionstüchtige Transformatoren mit den heute verfügbaren HT-Supraleitern zu bauen, während die für SMES nicht der Fall ist?
- Wie beeinflusst die Supraleitung den transienten Betrieb von Transformatoren?

Einsatz von Supraleiter-Wicklungen bei rotierenden elektrischen Maschinen

- Nennen Sie Möglichkeiten des Einsatzes von Supraleitung bei elektrischen Maschinen!
- Warum ist es nicht möglich, Drehfeldwicklungen mit ausreichender Ausnützung mit den heute verfügbaren HT-Supraleitern zu bauen, während dies für Transformatorwicklungen schon der Fall ist?
- Beschreiben Sie die Funktion und den Aufbau einer einfachen supraleitenden Unipolarmaschine!
- Warum konnten sich supraleitende Unipolarmaschinen bis dato nicht durchsetzen?
- Skizzieren Sie grob das Kühlprinzip rotierender DC-Wicklungen in flüssigem Helium mit Siedebad!
- Beschreiben Sie den Aufbau einer LTSL-Synchronmaschine mit elektrischer Erregung!
- Um wieviel kann in etwa ein LTSL-Synchrongenerator höher ausgenutzt werden als ein konventioneller Generator? Geben Sie Kennwerte für A und B an!
- Warum ist die Luftspaltflussdichte eines LTSL-Generators nicht etwa ebenso groß wie Flussdichte in einer SMES-Spule ?
- Wie beeinflusst die Ausführung des LTSL-Generators das stationäre Überlastverhalten?
- Ab welcher Bemessungs-Leistung ist es aus energetischer Sicht sinnvoll, SL-Generatoren zu verwenden? Welche Vorteile zeigt die HTSL-Ausführung gegenüber der LTSL-Ausführung in diesem Zusammenhang?
- Beschreiben Sie den Aufbau einer HTSL-Synchronmaschine mit elektrischer Erregung!
- Welche Eigenschaften und Besonderheiten hat eine HTSL- gegenüber einer LTSL-Synchronmaschine?

Einsatz von HTSL-Massiv-Supraleitern bei rotierenden elektrischen Maschinen

- Welche Eigenschaften zeigen normal leitende Asynchronmaschinen bei tiefen Temperaturen?
- Wie funktioniert die Hysterese-Maschine? Gibt es auch einen Synchronbetrieb für diesen Maschinentyp?
- Wie sind supraleitende Hysterese-Maschinen ausgeführt? Nennen Sie wesentliche elektrische Eigenschaften und Grenzen!

- Wie wirkt HTSL-Massivmaterial in synchronen Reluktanzmaschinen? Welche Bauweisen werden unterschieden?
- Was versteht man unter "Kryo-Permanentmagnet"-Motoren?

Grundlagen der magnetischen Schwebetechnik

- Welches sind die wichtigsten magnetischen Schwebeprinzipien? Erläutern Sie deren Funktionsweise!
- Was besagt das *Earnshaw*-Theorem? Diskutieren Sie seine Auswirkung auf die unterschiedlichen Schwebeprinzipien!

Elektromagnetisches Schweben

- Erläutern Sie das Funktionsprinzip des elektromagnetischen Schwebens!
- Diskutieren Sie die magnetische Lagerkraft in ihrer Abhängigkeit von den wesentlichen Gestaltungsparametern!
- Was versteht man unter dem "Kraft-Weg-" und dem "Strom-Weg-Parameter"?
- Wie kann man durch Differenzschaltungen bzw. -ansteuerungen Magnetlager linearisieren? Beschreiben Sie die Methoden und nennen Sie Vor- und Nachteile!
- Skizzieren Sie Ausführungsformen magnetischer Radial- und Axiallager!
- Wie dimensioniert man Magnetlager mit dem Kennwert der "spezifischen Lagerkraft"?
- Geben Sie Fliehkraftgrenzen von Magnetlagern für rotierende Strukturen an!
- Zeigen Sie anhand der Kraft-Weg-Kennlinie des unregulierten Magnetlagers dessen Instabilität qualitativ!
- Wie wirken P-, PD- und PID-Regler auf das dynamische Verhalten von Magnetlagern? Beschreiben Sie die Wirkung dieser Regler anschaulich in Worten und mit skizzierten Zeitverläufen der Lageposition des Schwebekörpers!
- Wie kommt die "statische" und "dynamische" Steifigkeit von Magnetlagern zustande? Wie verhält sie sich im Vergleich zu mechanischen Lagern?
- Vergleichen Sie "Strom-" und "Spannungssteuerung" von Magnetlagern! Wie werden diese Methoden realisiert? Nennen Sie Vor- und Nachteile!
- Welche elektrischen Leistungssteller kommen bei Magnetlagern zum Einsatz? (Vor-, Nachteile? Einsatzgrenzen?)
- Geben Sie einen Überblick über die verwendeten Sensorprinzipien zur Messung der Lage von Schwebekörpern! Wie funktionieren sie? Nennen Sie Vor- und Nachteile!
- Skizzieren Sie mögliche Anordnungen passiver Magnetlager und geben Sie die stabilen und instabilen Freiheitsgrade an!
- Welchen Einfluss hat die elastische Verformung von Rotoren auf die magnetische Schwebetechnik? (Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit von Schwingungsformen !)
- Was sind Fanglager? Wie werden sie dimensioniert?
- Diskutieren Sie die "Gleich"- und "Gegentaktschwingungen" im Vergleich zu elastischen Schwingungsformen !
- Welche Bemessungsgrößen bestimmen die maximal erforderliche Verstärkerscheinleistung?
- Sind Magnetlager verlustfrei? Falls nein, mit welchen Verlusten ist zu rechnen?

Elektrodynamisches Schweben

- Skizzieren Sie das Funktionsprinzip des elektrodynamischen Schwebens!
- Wie kann das Spiegelprinzip zur Berechnung von Feldern und Kräften beim elektromagnetischen und elektrodynamischen Schweben verwendet werden?
- Diskutieren Sie die Stabilität beim elektrodynamischen Schweben?
- Wie kann das elektrodynamische Schweben bei linear bewegten Körpern sinnvoll eingesetzt werden?

- Welche Kräfte wirken auf eine linear bewegte, elektrodynamisch schwebende Spule? Skizzieren Sie den Prinzipverlauf der Kräfte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Spule!
- Welche Bedeutung hat die "magnetische" *Reynolds*-Zahl für die Dimensionierung von linear bewegten, elektrodynamisch schwebenden Körpern?

Hochgeschwindigkeitsbahnen mit Magnetschwebetechnik

- Skizzieren Sie die Anordnung von Schweben- und Vortriebssystem beim TRANSRAPID!
- Beschreiben Sie die Funktionsweise des Antriebsmotors des TRANSRAPID! Geben Sie eine Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs an!
- Beschreiben Sie die Funktionsweise des Generators zur Bordversorgung des TRANSRAPID!

Elektrodynamische Schwebebahnen

- Wie werden beim *Yamanashi*-Projekt in Japan die Schwebespulen zum Tragen und Führen angeordnet und warum? (Skizze!)
- Diskutieren Sie die Hauptunterschiede zwischen dem deutschen TRANSRAPID-System und dem japanischen *Yamanashi*-Projekt!
- Warum sind beim *Yamanashi*-Projekt keine Eisenteile als magnetische Rückschlussjoche in Verwendung? Welche Auswirkungen ergeben sich daraus?

Supraleitende magnetische Lager

- Erläutern Sie das Funktionsprinzip supraleitender magnetischer Lager!
- Vergleichen Sie die Tragkräfte und Reibungsverluste konventioneller elektromagnetischer und supraleitender magnetischer Lager! Welche Reibungsverluste haben im Vergleich dazu mechanische Lager?
- Welche Möglichkeiten gibt es, einen magnetischen Fluss "einzufrieren"?

Magnetlager in Schwungradspeichern

- Beschreiben Sie den Einsatz von HTSL-Lagern in Schwungradspeichern!
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen gespeicherter mechanischer Energiedichte und der Umfangsgeschwindigkeit von Schwungradmassen?

Lagerlose Motoren

- Beschreiben Sie das Funktionsprinzip des lagerlosen Motors!
- Nennen Sie Vor- und Nachteile des lagerlosen Schwebepinzips im Vergleich zu konventionellen Magnetlagern!

Magnetohydrodynamische Energiewandlung

- Beschreiben Sie das physikalische Wirkprinzip der MHD Energiewandlung!
- Skizzieren Sie den Aufbau und beschreiben Sie die Funktionsweise des *FARADAY*- und *HALL*-Generators!
- Beschreiben Sie die Technologie von MHD-Generatoren und nennen Sie Vor- und Nachteile gegenüber konventionellen Kraftwerken!
- Wie würde ein MHD-Kombikraftwerk funktionieren?

Elektrische Satellitenantriebe

- Geben Sie eine Übersicht über elektrische Antriebe für Satelliten!
- Beschreiben Sie die Wirkprinzipien von elektrischen Raumfahrtantrieben!
- Wie wirkt der elektrothermische Antrieb im Vergleich zum konventionellen thermochemischen Antrieb?

- Skizzieren sie den elektrostatischen Antrieb (Ionenantrieb) und beschreiben Sie die Wirkungsweise!
- Erläutern Sie die Bauart des Radiofrequenz-Ionen-Triebwerks und des Hall-Ionentriebwerks (Skizze)!
- Beschreiben Sie das Wirkprinzip des elektromagnetischen Antriebs!

Fusionsforschung

- Wie lässt sich aus Fusionsreaktionen Energie gewinnen?
- Nennen Sie die Bedingung für stabilen Fusionsbetrieb, und nennen Sie die Gründe dafür!
- Skizzieren Sie die prinzipielle Magnetfeldanordnung für den berührungslosen Plasmaeinschluss! Erläutern Sie den physikalischen Hintergrund!
- Wie funktioniert der TOKAMAK-Fusionsreaktor prinzipiell?
- Wie funktioniert der STELLARATOR-Fusionsreaktor prinzipiell?
- Skizzieren Sie eine mögliche Energieauskopplung bei künftigen Fusionsgeneratoren zur Stromerzeugung!

Vorschläge für Themen von Kurzreferaten (ca. 10- 15 Minuten)

Sie werden ermutigt, Themen selbst zu finden und zu gestalten!

- Physikalische Grundlagen der Supraleitung
- Technische Supraleiter – Eigenschaften, Einsatzgebiete und Grenzen
- Ausführungsformen und Fertigungsverfahren von technischen Supraleitern
- Physikalische Grundlagen von Kältemitteln für tiefste Temperaturen
- Kältetechnik und Kühlverfahren für Supraleiter
- Einsatzmöglichkeiten technischer Supraleiter in der elektrischen Energietechnik
- Supraleitende Kurzschlussstrombegrenzer
- Supraleitende Energiekabel
- Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES)
- Supraleitende Netz- und Bahntransformatoren
- Rotierende elektrische Maschinen mit Supraleiter-Wicklung
- Rotierende elektrische Maschinen mit Massivsupraleitern
- Überblick und Anwendungen magnetischer Schwebetechniken
- Grundlagen und technische Eigenschaften des elektromagnetischen Schwebens
- Regelungsprinzipien von Magnetlagern
- Sensortechnik für Magnetlager
- Dimensionierung einer magnetgelagerten Hochgeschwindigkeits-Frässpindel
- Physikalische Grundlagen des elektrodynamischen Schwebens
- Hochgeschwindigkeitsbahnen in Magnetschwebetechnik
- Elektromagnetische Schwebebahn TRANSRAPID
- Elektrodynamische Schwebebahn *Yamanashi*-Projekt
- Supraleitende magnetische Lager in Schwungradspeichern
- Lagerlose Motorenteknologie
- Der MHD-Generator – Chancen und Grenzen!
- Elektrische Satellitenantriebe – Funktionsprinzipien und Anwendungsbeispiele!
- Energie aus Fusion – physikalische Grundlagen und prinzipielle Generatorkonzepte!
- Projekte der Plasma-Fusionsforschung – aktueller Stand und Perspektiven!

Theory questions for examination

Fundamentals of super conductivity

- Describe the main differences between super conduction and normal conduction!
- What types of materials are typically superconductors and why?
- What is the *Meissner-Ochsenfeld*-effect?
- Explain the *Meissner*- and the *Shubnikov*-phase!
- What are the differences between superconductors of 1. and 2. type and “hard” superconductors?

Technical design of super conductors

- What is the thermal and cryogenic stabilisation?
- In which way do superconductors have to be designed for AC application and why?
- Name the technically applied low and high temperature superconductors and their major properties!
- What kind of electric losses do occur in superconductors at DC and AC conduction?

Super conductors for technical use

- What application limits do you know for technically applied superconductors?
- Give an overview over the common manufacturing methods for technically applied LT- and HT-superconductors!
- Sketch qualitatively the operation diagram of a superconductor in dependence of T , J , and B !

Cooling procedures

- Which kind of coolants are used for the operation of superconductors?
Name the major physical properties!
- Sketch and describe qualitatively the phase diagram of Helium at low temperatures!
- Discuss the different cooling methods with liquid Helium!
- Compare the heat transfer of the boiling-bath cooling for the use of liquid Helium, Nitrogen and Hydrogen!

Cryostat

- What is a Cryostat? Describe the structure (sketch!) and the working principle!
- Name the most important thermal cryostat losses!
- What major effects have to be considered for the design of the current supply?

Cryogenic supply

- Which physical effects are available for cooling at low temperatures?
- Describe the *Joule-Thompson*-effect and its application in the refrigeration technology!
- What methods are used in order to liquefy Nitrogen and Hydrogen?
- What is the “efficiency” of refrigerating plants? Give examples!

Applications of super conductors in research and technology

- Where are technical superconductors already commercially applied?
- What chances result by the future application of superconductors in the energy technology?
Distinguish different groups!

Superconductivity for electrical power engineering

- Explain the working principle of the ohmic short circuit current limiter with superconductivity!
- Describe the function of the inductive short circuit current limiter with superconductivity!

- Which two different types of superconducting energy cables have been up to now developed? Discuss the properties!
- Why is it possible to design energy cables with the today available HT-superconductors for AC at LN₂-cooling?
- How does the superconducting magnetic energy storage (SMES) work. Describe its components!
- Name the application domains of SMES and discuss hereby the storage size! What storage sizes have already been realized?
- What coil shapes are useful for SMES? Name advantages and disadvantages!
- Why is for SMES the ironless assembly with air-cored coils the dominating construction type?
- What construction types of superconducting transformers do you know? Discuss advantages and disadvantages!
- What advantages and disadvantages do superconducting transformers have compared to normal conducting ones?
- Why is it possible to design working transformers at LN₂-cooling with the today available HT- superconductors, while it is not possible for SMES?
- How does the super-conduction influence the transient operation of transformers?

Application of superconducting windings in rotating electrical machines

- Name possibilities of the application of super-conduction in electrical machines!
- Why is it not possible to build rotating field windings with sufficiently high utilization with today's available HT-superconductors at LN₂-cooling, while this is already possible for transformer windings?
- Describe the function and the structure of a simple superconducting unipolar machine!
- Why are superconducting unipolar machines not widely used?
- Sketch roughly the cooling principle of rotating DC windings in liquid Helium with boiling-bath cooling!
- Describe the structure of a LTSC synchronous machine with electric excitation!
- By about how much more can a LTSC synchronous generator be utilized than a conventional generator?
Give values for *A* and *B*!
- Why is the air gap flux density of a LTSC generator not as big as the flux density in a SMES coil?
- How does the design of the LTSC generator influence the stationary overload behaviour?
- Above which power rating does it make sense to use SC generators?
Which advantages does the HTSC-type show, compared to the LTSC-type in this context?
- Describe the structure of a HTSC synchronous machine with electrical excitation!
- Name properties and features of a HTSC synchronous machine, compared to a LTSC synchronous machine?

Application of HTSL-massive-superconductors for rotating electrical machines

- What properties do normally conducting induction machines show at low temperatures?
- How does a hysteresis machine work?
Is there also a synchronous operation possible for this machine type?
- How are superconducting hysteresis machines designed? Name major electric properties and limits!
- How does HTSC-massive material act in synchronous reluctance machines? Which design types are distinguished?
- What are "Cryo-permanent magnet" motors?

Basics of magnetic levitation

- What are the most important principles of magnetic levitation?
Describe their working principles?
- What does the *Earnshaw*-theorem state? Discuss its impact on the different levitation principles!

Electromagnetic levitation

- Explain the working principle of electromagnetic levitation!
- Discuss the magnetic bearing force depending on the major design parameters!
- What is the “force-distance-” and “current-distance-”parameter?
- How can an active magnetic bearing be linearized by differential circuits respectively differential feeding? Describe advantages and disadvantages!
- Sketch the different types of active magnetic radial and axial bearings!
- How is an active magnetic bearing dimensioned by the characteristic value “specific bearing force”?
- Give the centrifugal force limits of active magnetic bearings for rotating structures!
- Show qualitatively the instability of the uncontrolled active magnetic bearing with the help of the force-distance-curve!
- How does a P-, PD- and PID-controller influence the dynamic behaviour of active magnetic bearings?
Describe the effect of these controllers by words and sketches of time functions of the position of the levitated body!
- Where do “static” and “dynamic” stiffness of active magnetic bearing come from?
How do they behave, compared to mechanical bearings?
- Compare “current” and “voltage control” of active magnetic bearings!
How are the methods realized? Name advantages and disadvantages!
- Which electric power amplifiers are applied for active magnetic bearings?
Discuss advantages, disadvantages, application limits!
- Give an overview over the used sensor principles for the position measurement of levitated bodies! How do they work? Name advantages and disadvantages!
- Sketch the possible assemblies of passive magnetic bearings and give the stable and unstable degrees of freedom!
- What is the influence of the elastic deformation of rotors on the magnetic levitation?
Discuss the observability and controllability of oscillation modes!
- What are auxiliary bearing? How are they dimensioned?
- Discuss the common mode and differential mode oscillation, compared to elastic oscillation modes!
- What main dimensions determine the maximum required apparent amplifier power?
- Are active magnetic bearings lossless? If no, what losses are to be considered?

Electro-dynamic levitation

- Sketch the function principle of electro-dynamic levitation!
- How can the magnetic mirror principle be applied for calculation of fields and forces for electromagnetic and electro-dynamic levitation?
- Discuss the stability of electro-dynamic levitation!
- How can the electro-dynamic levitation be applied for linear moved bodies in a useful way?
- What forces act on a linear moved, electro-dynamically levitated coil?
Sketch the principle dependence of the forces with respect to the levitated coil speed!
- What is the meaning of the „magnetic“ *Reynolds*-number for the dimensioning of linear moved, electro-dynamically levitated bodies?

High speed trains with magnetic levitation

- Sketch the assembly of levitation and thrust system of the TRANSRAPID!
- Describe the functional principle of the linear motor of the TRANSRAPID! Give a formula for calculating the speed of the vehicle!
- Describe the function principle of the generator for board supply of the TRANSRAPID!

Electrodynamically levitated trains

- How are the levitation coils arranged for the *Yamanashi*-project and why? (Sketch!)
- Discuss the main differences between the German TRANSRAPID-system and the Japanese *Yamanashi*-project!
- Why aren't any iron parts used as magnetic back yokes for the *Yamanashi*-project? What effects result from that fact?

Super conducting magnetic bearings

- Explain the function principle of superconducting magnetic bearings!
- Compare the bearing forces and friction losses of active magnetic bearings and super conducting magnetic bearings! Discuss the friction losses of mechanical bearings in comparison!
- What possibilities do exist for "freezing" the magnetic flux?

Magnetic bearings for flywheel mass storages

- Describe the application of HTSC-bearings in flywheel mass storages!
- What is the relationship between stored kinetic energy density and circumferential speed of a rotating cylindrical mass?

Bearingless motors

- Describe the function principle of the bearingless motor!
- Name advantages and disadvantages of the bearingless levitation principle, compared to conventional active magnetic bearings!

Magnetohydrodynamic energy conversion

- Describe the physical principle of MHD energy conversion!
- Sketch the structure and describe the function principle of the *FARADAY*- and *HALL*-generator!
- Describe the technology of MHD-generators and name advantages and disadvantages, compared to conventional power plants!
- How would a MHD-combi power plant work?

Electric satellite drives

- Give an overview over electric drives for satellites!
- Describe the function principle of electric space drives!
- Explain the operating principle of an electro-thermal drive, compared to conventional thermochemical drives!
- Sketch the electrostatic drive (ion drive) and describe the function principle!
- Explain the construction types of the radio frequency ion drive and the Hall-ion drive (Sketch!)
- Describe the function operating principle of the electromagnetic satellite drive!

Fusion research

- How can energy be extracted from fusion reactions?
- Name the conditions for stable fusion operation and the reasons for that!

- Sketch the principle magnet field arrangement for the contactless plasma inclusion! Explain the physical background!
- How does the TOKAMAK fusion generator work in principle?
- How does the STELLERATOR fusion generator work in principle?
- Sketch the possible energy extraction in future fusion generators for electricity generation!

Proposals of topics for short presentations (approx. 10- 15 minutes)

You are encouraged to find and work out your own topics!

- Basics of physics of superconduction
- Technical use of superconduction – properties, application domains and limits
- Types and manufacturing methods of technically used superconductors
- Basics of physics of coolants for very low temperatures
- Cooling technology for superconductors
- Applications of technically used superconductors in electrical engineering
- Superconducting short circuit current limiter
- Superconducting cables for power supply
- Superconducting magnetic energy storages (SMES)
- Superconducting grid and locomotive transformers
- Rotating electrical machines with superconductor windings
- Rotating electrical machines with massive superconductors
- Overview and application of magnetic levitation techniques
- Basics and technical properties of electromagnetic levitation
- Controlling principles of active magnetic bearings
- Sensor technology of active magnetic bearings
- Dimensioning of a magnetically levitated high speed milling spindle
- Basics of physics of electrodynamic levitation
- High speed trains with magnetic levitation
- Magnetically levitated train TRANSRAPID
- Electrodynamic levitation train *Yamanashi*-project
- Superconducting magnetic bearings in flywheel mass storages
- Bearingless motor technology
- The MHD generator – Chances and limits!
- Electrical satellite drives – Function principles and application examples!
- Energy from fusion – Basics of physics and basic generator concepts!
- Projects of plasma and fusion research – State of the art and perspectives!